

# POLITECNICO DI TORINO

**I Facoltà di Ingegneria**

*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile*



**Tesi di Laurea Magistrale**

## IL POSIZIONAMENTO GNSS DI PRECISIONE IN AMBIENTE URBANO TRAMITE L'UTILIZZO DI SMARTPHONES

*Relatore:*

Prof. Paolo Dabove

*Candidato:*

Roberto Podo

Dicembre 2022

---



# INDICE

Introduzione .....	3
<b>1. Cenni storici .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Sistema GNSS .....</b>	<b>12</b>
2.1. Struttura del sistema GNSS .....	13
2.2. Struttura dei segnali GNSS.....	17
<b>3. Scale di Tempo .....</b>	<b>21</b>
<b>4. Le costellazioni GNSS.....</b>	<b>24</b>
4.1. Il sistema americano GPS.....	24
4.1.1. Il segnale GPS.....	30
4.2. Il sistema russo GLONASS.....	35
4.2.1. Il segnale GLONASS.....	38
4.2.2. La differenza tra GLONASS e GPS.....	39
4.3. Il sistema europeo GALILEO.....	40
4.3.1. Il segnale GALILEO .....	42
4.4. Il sistema cinese BEIDOU.....	44
4.4.1. Frequenze BEIDOU .....	46
4.5. Il sistema giapponese QZSS .....	49
4.6. Il sistema indiano INRSS .....	53
4.7. I servizi di augmentation .....	54
<b>5. Principi di posizionamento .....</b>	<b>59</b>
5.1 Posizionamento assoluto di codice.....	64
5.1.1 Modelli linearizzati nel posizionamento assoluto di codice.....	70
5.1.2 Posizionamento assoluto con misure di codice in Glonass.....	74
5.2 Posizionamento assoluto di fase.....	75
5.2.1 Modelli linearizzati nel posizionamento assoluto di fase.....	78
5.3 Errori nelle misure.....	80
5.3.1 Errori accidentali di misura .....	80
5.3.2 Errori grossolani.....	81
5.3.3 Errori sistematici .....	81
5.3.4 Errori vari di osservazione .....	86
5.3.5 Incidenza degli errori analizzati .....	87
5.4 Posizionamento relativo .....	88

5.4.1	Singole differenze .....	89
5.4.2	Doppie differenze.....	90
5.4.3	Triple differenze.....	92
5.4.4	Modelli linearizzati nel posizionamento relativo .....	96
5.4.5	Trattamento dati GNSS relativo.....	99
5.4.6	Approccio singola base .....	100
5.4.7	Test ratio.....	101
5.5	Fissaggio ambiguità di fase e combinazioni di frequenza.....	103
5.5.1	Utilizzo delle combinazioni di fase.....	105
5.6	Posizionamento differenziale .....	107
<b>6</b>	<b>Acquisizione dati nel posizionamento relativo .....</b>	<b>111</b>
6.1	Scelta del sito di misura .....	111
6.2	Indici DOP.....	112
<b>7</b>	<b>Effemeridi.....</b>	<b>117</b>
<b>8</b>	<b>Ricevitori e stazioni permanenti.....</b>	<b>120</b>
8.1	Ricevitori.....	120
8.2	Stazioni permanenti.....	126
8.3	Formato dati Rinex.....	129
<b>9</b>	<b>Obiettivo della tesi .....</b>	<b>136</b>
9.1	Sito di misura .....	140
9.2	Analisi dati .....	148
9.2.1	Analisi Samsung Galaxy J6.....	149
9.2.1.1	Campagna di misura 1 .....	149
9.2.1.2	Campagna di misura 2 .....	165
9.2.1.3	Campagna di misura 3 .....	171
9.2.1.4	Campagna di misura 4 .....	175
9.2.1.5	Campagna di misura 5 .....	181
9.2.1.6	Campagna di misura 6 .....	187
9.2.2	Analisi Huawei P9 EVA L09.....	193
<b>10</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>197</b>
	Bibliografia e sitografia.....	199

# INTRODUZIONE

Fin dall'antichità determinare la propria posizione nello spazio è stato un problema che riguardava navigatori, commercianti e scienziati.

Conoscere esattamente il posizionamento degli oggetti, dei veicoli, localizzare emergenze ed incidenti, effettuare rilievi topo-cartografici, monitorare i movimenti dei continenti, tracciare e realizzare grande opere di ingegneria, gestire flotte navali o aeree ed altro ancora è fondamentale al giorno d'oggi poiché aumenta le nostre sicurezze.

I sistemi di posizionamento satellitare globale moderni sono nati a partire dal 1970 e si sono perfezionati sempre più nel tempo: il più famoso è il GPS; ad esso si affiancano il sistema di posizionamento russo GLONASS, l'europeo GALILEO, il cinese BEIDOU ed altre ancora sono in progetto. Il posizionamento integrato multi-costellazione prende il nome di GNSS (Global Navigation Satellite System).

La tesi illustra i principi teorici del posizionamento satellitare, le tecniche di misura ed il trattamento dati GNSS e si applicheranno tali concetti per verificare la precisione del posizionamento ottenuto da comuni smartphones in ambiente urbano.

L'analisi verterà sull'analisi e confronto di dati di posizione rilevati in modalità statica ottenuti con due dispositivi: HUAWEI P9 EVA-L09 e SAMSUNG GALAXY J6: sono smartphones di gamma medio-bassa, dal costo di qualche centinaio di euro (200-300€) con sistema operativo Android.

Tecnicamente sono due smartphone simili e si valuterà la precisione nella stima della posizione per ciascun dispositivo e le differenze di tale precisione tra i 2 dispositivi oltre ad analizzare la qualità dei dati grezzi di ricezione satellitare.

Per far ciò si sono condotte 6 campagne di misura in una zona centrale di Padova (piazza Prato della Valle), differenziate tra rilievo mattutino e serale e tra condizione meteorologica serena e nuvolosa, per valutarne le differenze di ricezione e di precisione delle varie soluzioni.

L'analisi dei dati è stata svolta tramite il software "RTKLIB", un software open source, quindi gratuito e di libero accesso che sta prendendo piede sempre più in questi ultimi anni.



# 1. CENNI STORICI

Fin dall'antichità uno dei problemi dell'uomo è stato quello di orientarsi: chi intraprendeva traversate transoceaniche o a chi esplorava nuovi e sterminati territori doveva saper leggere una mappa, una bussola oppure saper osservare le stelle.

Dal rudimentale *Astrolabio* greco del IV secolo d.C. poi perfezionato intorno al 1300 dal mondo islamico, all'uso della bussola cinese (XIII secolo), passando per la *Balestriglia* (XVI secolo), fino all'*Ottante* e al *Sestante nautico* (1730) che sostituì dopo circa 2000 anni l'Astrolabio quale principale strumento utilizzato, la navigazione astronomica insegnava ad essere autosufficienti e ad osservare e giudicare criticamente.



Figura 1: Strumenti di antica navigazione; partendo da sinistra si ha un astrolabio, balestriglia e sestante

A partire dal XX secolo, si sono sviluppati i primi sistemi di radionavigazione ad **onde radio** per uso navale ed aeronautico. Possiamo definirli i predecessori della navigazione satellitare.

Le prime applicazioni furono sviluppate essenzialmente per scopi militari anche perché le attrezzature necessarie per interpretare i segnali avevano un costo molto elevato.

L'impiego della strumentazione elettronica nella navigazione risale alla seconda guerra mondiale.

Uno dei più importanti sistemi di radionavigazione terrestre ad onde radio è stato il **LORAN (Long Range Navigation)**. E' un sistema di navigazione a lungo raggio (fino a 1200 miglia≈1900Km) che utilizza onde radio LF (low frequency) omnidirezionali e di tipo pulsante e sfrutta l'intervallo di tempo tra i segnali ricevuti da un ricevitore da parte di tre o più stazioni per determinare la posizione del ricevitore che poteva essere a bordo di una nave o di un aereo. **Lo strumento che calcola la posizione è il ricevitore.**

I primi sistemi LORAN sono stati sviluppati in Gran Bretagna, prima della 2° guerra mondiale e la tecnologia è stata perfezionata dagli USA negli anni 1940 da ricercatori per l'esercito americano come Alfred Lee Loomis. Quando la tecnologia è stata rilasciata per la prima volta, aveva una portata abbastanza limitata oltre che un elevato costo di attrezzatura. Nel 1958 l'operatività del sistema LORAN passò alla guardia costiera americana, che ribattezzò il sistema "Loran-A".

Nel tempo la gamma e le applicazioni di LORAN sono aumentate, sviluppando **LORAN-C**, che opera nella gamma 90-110 kilohertz, diventando il sistema più diffuso.

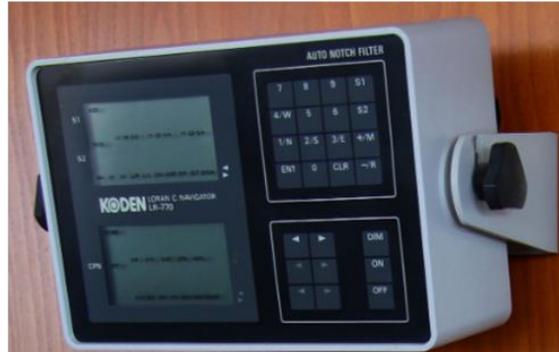


Figura 2: A sinistra foto dell'antenna Loran di Sellia Marina (Catanzaro) attivata nell'agosto del 1959 e smantellata nel luglio 2008. Questo impianto era la stazione master di una catena Loran C che comprendeva anche i centri radio di Lampedusa, Estartit (Spagna) e Kargabarum (Turchia). Altezza 190.5m. A destra un ricevitore Loran-C attivata nell'agosto del 1959

Varie nazioni fecero uso di questo sistema, tra cui Stati Uniti d'America, Giappone e vari paesi europei. La Russia utilizzava un sistema quasi identico, sulla stessa banda di frequenza, chiamato Chayka. Negli anni '70 il costo, il peso e le dimensioni dell'elettronica necessari per implementare il Loran-C erano stati drasticamente ridotti grazie agli sviluppi dell'elettronica.

**Principio di funzionamento:** un ricevitore LORAN è in grado di ricevere segnali a impulsi pulsati da trasmettitori radio. Poiché il ricevitore conosce la posizione esatta dei trasmettitori, può utilizzare gli impulsi per triangolare la sua posizione. In dettaglio il sistema LORAN si basa almeno su tre stazioni trasmettenti a terra (costituenti la cosiddetta “catena di Loran”) di cui ve ne è una principale detta Master che viene “accoppiata” con le altre due, dette Slave o secondarie, una alla volta: ossia la stazione *Master* è confrontata separatamente con ognuna delle due stazioni *Slave* o secondarie distanti dai 600 alle 1000 miglia dal Master. Il confronto avviene nel ricevitore ossia le stazioni trasmettono ripetutamente serie di impulsi e il ricevitore, a bordo di navi o aerei, valuta la differenza di tempo di ricezione tra la stazione master e la prima secondaria di cui riceve il segnale.

*Grazie a questa differenza di tempo è possibile tracciare una curva iperbolica* di cui le due stazioni trasmettenti costituiscono i fuochi, infatti geometricamente l'iperbole è il luogo dei punti per cui è costante la differenza tra le distanze da due punti fissi detti fuochi; nel caso del Loran la parabola è il luogo dei punti in cui è costante la differenza tra i tempi di ricezione del segnale proveniente dalla Master ed il segnale proveniente dalla stazione secondaria: la posizione del ricevente appartiene all'iperbole corrispondente alla differenza di tempo misurato. Ma una sola coppia di stazioni non permette di determinare la posizione bidimensionale sugli infiniti punti dell'iperbole: per ottenere l'esatta posizione è necessario che lo stesso principio sia applicato anche su un'altra coppia di trasmettitori, ossia la stazione master e la seconda stazione secondaria; la differenza di tempo di ricezione del segnale tra la stazione master e la seconda secondaria identifica una seconda iperbole: si hanno così 2 iperboli che si intersecano in un punto geografico il quale rappresenta la posizione del ricevitore relativamente alle posizioni delle tre stazioni.

Per ogni coppia di stazioni è quindi possibile tracciare, su apposite carte, una famiglia di linee iperboliche (linee di posizione) in cui per ogni iperbole è costante l'intervallo di tempo che separa i

segnali ricevuti. Se si considera un'altra coppia di stazioni si ottiene un'altra famiglia di linee di posizione: questa famiglia forma con la precedente un reticolo che permette di ricavare la posizione della nave o dell'aeromobile come intersezione delle due linee di posizione individuate dal ricevitore. L'apparato ricevente, a bordo di una nave o aereo, è dotato di un orologio sincronizzato con quello delle stazioni emittenti ed è quindi in grado di calcolare la differenza dei tempi di emissione e di arrivo delle onde radio per ogni stazione ed offre la lettura digitale della posizione in coordinate geografiche.

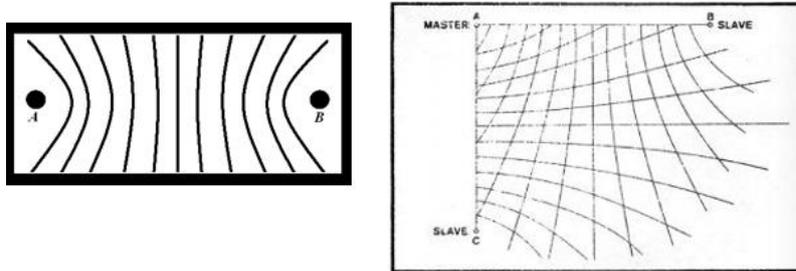


Figura 3: A sinistra una famiglia di curve paraboliche definite dalle due stazioni A (Master) e B che costituiscono i fuochi delle parabole: ogni parabola è il luogo dei punti per cui è costante la differenza di tempo tra i segnali ricevuti dal ricevitore dalla stazione A e dalla stazione B; a destra un reticolo di curve paraboliche ottenute dalla combinazione della stazione A e B + A e C

Nel tempo il sistema Loran è stato gradualmente abbandonato in favore del sistema GPS, anche se ultimamente si sta rivalutando una nuova versione del Loran, chiamata “E-Loran” che introduce sviluppi nei ricevitori e nelle caratteristiche della trasmissione, portando la precisione ad una risoluzione spaziale di 8 metri, quindi paragonabile al GPS e ha caratteristiche tali da renderlo un adeguato sostituto del GPS in situazioni dove questo non sia efficace o disponibile o volutamente degradato dal gestore del servizio. Nel dicembre 2015 negli Stati Uniti c'è stata anche una rinnovata discussione sul finanziamento di un sistema *eLoran* e il NIST (National Institute of Standards and Technology con sede nel Maryland, USA) si è offerto di finanziare lo sviluppo di un ricevitore eLoran delle dimensioni di un microchip. Altri sistemi di radionavigazione sviluppati nella metà del XX secolo furono il DECCA e l'OMEGA.

Il **4 ottobre 1957** l'URSS lanciò il primo satellite artificiale della storia attorno alla Terra: lo **Sputnik 1**. Ha così inizio l'epoca della **navigazione satellitare**.

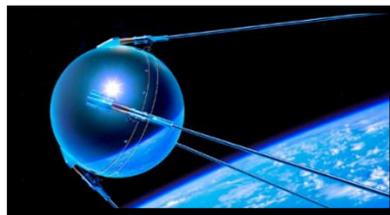


Figura 4: Satellite russo Sputnik 1

Pur anticipando gli USA nell'era delle esplorazioni spaziali, questo satellite russo farà maturare l'idea del sistema di posizionamento americano GPS.

Infatti il **primo sistema satellitare** a permettere il posizionamento tridimensionale di un oggetto è stato progettato dal DoD (Dipartimento della Difesa Statunitense). Il progetto ebbe vita nel 1958 con

il nome di **TRANSIT**: si trattava di una costellazione di 6 satelliti in orbita ad una quota di 1100 km che poteva consentire a navi e sommergibili di determinare la propria posizione in mare in qualsiasi condizione meteorologica sfruttando l'effetto Doppler sull'unica frequenza trasmessa, ossia i satelliti si spostavano su orbite note e trasmettevano i loro segnali su una frequenza specifica: la frequenza ricevuta differiva da quella nominale a causa dello spostamento del satellite rispetto al ricevitore e monitorando questa variazione di frequenza su un breve intervallo di tempo, il ricevitore poteva determinare la sua posizione. La misura poteva anche durare alcune ore con una precisione di circa 200 – 500 metri.

Ciò portò gli americani, nel **1973**, a creare un sistema più rapido e preciso: **nasce il GPS** (Global Positioning System). Il nome completo è NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System). Progettato inizialmente per scopi militari, poi nel 1991 gli USA aprirono al mondo civile il servizio GPS differenziando l'utilizzo per scopi civili dall'utilizzo per scopi militari. Il servizio civile lo chiamarono SPS (Standard Positioning System) ma il segnale civile era volutamente degradato per mezzo di un sistema di generazione di errori detto *Selective Availability* (SA) (disponibilità selettiva), voluto espressamente dal Dipartimento della Difesa statunitense (DoD) per ragioni di sicurezza il 25 marzo 1990; non va dimenticato infatti che il GPS nacque nel bel mezzo della guerra fredda per scopi militari e dunque si era ben cauti nell'offrire a qualunque straniero l'utilizzo di un posizionamento preciso riservato solo all'esercito americano e appositamente detto PPS (Precision Positioning System). L'origine della Selective Availability fu dovuto ad alcuni test che dimostrarono che la precisione, per scopi civili, era dell'ordine dei 15-40 m e fu considerata come troppo accurata e, per ragioni dichiarate di sicurezza nazionale, la precisione del posizionamento destinata all'utenza di massa fu degradata tramite la Selective Availability che introduceva degli errori di 100 m in planimetria e 156 m in altimetria al 95% di probabilità. Il 1° maggio 2000 il Dipartimento della Difesa americano (DoD), con a capo il Presidente Clinton, ha rimosso definitivamente la Selective Availability dal sistema GPS e da allora mai più riattivata.

Attualmente in ambito civile non professionale, per scopi navigazionali, il GPS permette di raggiungere precisioni  $\leq 8$  metri in planimetria e  $\leq 13$  metri in altimetria in posizionamento assoluto di un punto singolo (www.gps.gov “Gps Standard Positioning Service (SPS) 2020) che in pratica significa avere precisioni da 5÷10metri. Precisioni superiori dipendono dalla presenza di satelliti di “augmentation”, dalla qualità del ricevitore, dal tipo di posizionamento e se in Real Time o post processing fino a raggiungere precisioni centimetriche o millimetriche. Il sistema GPS è pienamente operativo a partire dal 1994 e in origine disponeva di 24 satelliti. L'obiettivo è sempre stato di fornire almeno 24 satelliti operativi; al 10 luglio 2022, vi erano un totale di **31 satelliti operativi** nella costellazione GPS. Gli Stati Uniti si impegnano a mantenere la disponibilità di almeno 24 satelliti operativi.<sup>1</sup>



Figura 5: Logo GPS

<sup>1</sup> www.gps.gov/systems/gps/space

In piena Guerra Fredda lo sviluppo del sistema di navigazione satellitare americano GPS generò la concorrenza nello sviluppo del sistema di posizionamento satellitare sovietico denominato **GLONASS** (GLObalnaya NAVigacionnaya Sputnikovaya Sistema). Progettato dal governo sovietico nel 1976, ha raggiunto la piena operatività nel 1996 con 24 satelliti, denominati “Uragan”, ma vide una difficile fase di mantenimento durante la crisi russa degli anni 2000 tant’è che nel 2002 i satelliti operativi erano solo 7 dei 24 previsti. La successiva ripresa economica russa ha portato il sistema GLONASS ad una nuova piena operatività voluta fortemente dal presidente Vladimir Putin a cui contribuì anche l’India: dall’ 8 dicembre 2011 la costellazione è ritornata pienamente operativa con 24 satelliti attivi ed ha permesso un’ottima copertura, paragonabile al sistema GPS.



Figura 6: Logo GLONASS

Al 10/07/2022 dal sito ufficiale GLONASS risultano 26 satelliti totali in costellazione, di cui funzionanti **22** mentre 3 sono in stato di manutenzione ed 1 in stato di messa in servizio.<sup>2</sup>

In Europa agli inizi del 2000, con l’avvento della grave crisi economica russa che causò il momentaneo blocco degli investimenti russi in campo spaziale, venne il timore che l’egemonia del posizionamento satellitare potesse divenire monopolio totalmente statunitense. Proprio la necessità di rompere il monopolio globale USA-GPS ha spinto l’Europa a progettare un proprio sistema di posizionamento europeo.

Inoltre il sistema americano GPS si era rivelato efficiente ma presentava delle limitazioni come ad esempio quelle relative alla precisione e all’affidabilità: infatti il livello di precisione poteva essere estremamente variabile in quanto condizionato dal luogo e dall’ora e, a causa della stessa configurazione dei piani orbitali, il sistema lasciava scoperte vaste aree della terra alle latitudini più elevate. Inoltre, relativamente all’affidabilità, la qualità del segnale non era garantito, né erano previste segnalazioni per allertare l’utilizzatore in caso di avarie o malfunzionamenti. Inoltre, trattandosi di un sistema nato per scopi militari, in periodo di crisi il gestore potrebbe bloccare il segnale destinato agli utilizzatori civili.

Per ovviare ai limiti tecnici ed ai vincoli politico-militari esistenti, l’Unione Europea prese la decisione di sviluppare un proprio sistema satellitare, denominato **GALILEO**, caratterizzato da maggiori livelli di precisione, affidabilità e sicurezza.<sup>3</sup>

La precisione attuale è **≤7 metri** in planimetria per posizionamento assoluto di codice; il servizio di alta precisione, gratuito per tutti anche se necessita di ricevitori appositi, offre precisione centimetrica in tempo reale.<sup>4</sup>

Il sistema europeo offre non solo una precisione maggiore ma anche più costante, merito della struttura particolare della sua composizione e delle rete a terra.

Il programma Galileo fu avviato ufficialmente il **26 maggio 2003** con un accordo tra l’Unione europea e l’Agenzia Spaziale Europea (ESA). Diversamente dal sistema Gps e Glonass, sviluppati entrambi originariamente per funzioni militari e poi adattati ai servizi civili, Galileo è rivolto

<sup>2</sup> [www.glonass-iac.ru/en/sostavOG/](http://www.glonass-iac.ru/en/sostavOG/)

<sup>3</sup> [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-Quarterly-Performance\\_Report-Q2-2021.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-Quarterly-Performance_Report-Q2-2021.pdf)

<sup>4</sup> Galileo (satellite navigation) - Wikipedia

principalmente al settore civile-commerciale mondiale. La costellazione completa prevede 30 satelliti artificiali orbitanti (27 satelliti operativi più 3 di riserva).

Tuttavia, Galileo comprende anche i Public Regulated Services (Prs), servizi riservati alle autorità governative per un utilizzo destinato alla difesa e sicurezza nazionale. In questo caso il segnale è criptato e protetto da interferenze ostili come lo jamming (l'atto di disturbare volutamente le comunicazioni radio facendo in modo che ne diminuisca il rapporto segnale/rumore o l'indice di chiarezza del segnale) e spoofing (hacker che intercetta informazioni riservate, diffonde informazioni false e tendenziose o effettuare qualsiasi tipo di attacco).



Figura 7: Logo Galileo

Nel novembre 2007 si giunse all'accordo finale per l'ultimo finanziamento e l'affidamento all'ESA (European Space Agency) degli appalti per la costruzione dei satelliti, superando gli ostacoli posti dal Regno Unito che preferiva affidarsi al sistema GPS americano per ragioni politiche. Ma proprio per non dipendere dal sistema GPS l'Unione Europea volle il suo sistema satellitare.

Nel settembre 2003 la Cina si è unita al progetto apportando un investimento di 230 milioni di euro. Israele è entrato come partner del progetto nel luglio 2004, diventando poi major partner nel 2014. I trenta satelliti previsti hanno cominciato ad essere messi in orbita a partire dal 2011 con un costo totale stimato in 3 miliardi di euro, comprese le infrastrutture di terra. Almeno due terzi del costo saranno coperti da aziende private e investitori, mentre la rimanente spesa è suddivisa tra Agenzia Spaziale Europea e Unione europea.<sup>5</sup>

Galileo è diventato pienamente operativo il 15 dicembre 2016. Al 10/07/2022, vi sono **21 satelliti operativi**, 1 in fase di messa in servizio ossia deve completare la fase di test in orbita e 6 satelliti non utilizzabili.<sup>6</sup>

Anche la Cina ha realizzato il proprio sistema di posizionamento satellitare chiamato **BEIDOU** (o **BDS** – BeiDou Navigation Satellite System). Iniziato nel 2000 in forma sperimentale ed approvato dal governo cinese nel 2004, inizialmente era destinato ad una copertura regionale e per uso militare; successivamente è stato implementato per una copertura globale ed annunciata l'apertura per uso commerciale.

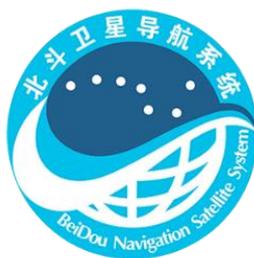


Figura 8: Logo BeiDou

<sup>5</sup> Sistema di posizionamento Galileo - Wikipedia

<sup>6</sup> <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>

Prima della creazione di BeiDou, l'esercito cinese faceva affidamento ai servizi gratuiti del GPS americano. Però quest'ultimo, essendo controllato dall'Air Force americano, poteva essere selettivamente rimosso dall'area cinese. Quindi la Cina ha sentito l'esigenza di un proprio sistema di posizionamento.

Il progetto BeiDou (BDS) nasce nel 1996, inizialmente come sistema militare e con una copertura regionale della sola Cina. Parallelamente a questo primissimo progetto, nel 2003 la Cina collaborò con l'Europa nella realizzazione del sistema satellitare a copertura globale Galileo. L'Europa inoltre sperava di espandere l'uso commerciale di Galileo anche in Cina ma non considerò la volontà di Pechino di costruire una propria rete sia per uso militare che commerciale e infatti, partecipando al programma Galileo, la Cina poteva ampliare le proprie conoscenze nell'ambito della complessa tecnologia satellitare. Tuttavia, nel gennaio 2008 il governo cinese si dichiarò non soddisfatto del suo ruolo nel progetto Galileo ed uscì dal programma europeo. Quindi alla fine di questa travagliata collaborazione la Cina ha proseguito con lo sviluppo della propria costellazione completata definitivamente a fine 2020. Con BeiDou Pechino garantisce un servizio civile commerciale ed in più uno militare, quest'ultimo riservato solamente all'esercito cinese e all'esercito pakistano. Il settore aerospaziale cinese ha portato a compimento una costellazione di copertura globale in meno di vent'anni, un risultato eccezionale. Il sistema satellitare di copertura globale prevedeva in origine 35 satelliti a varie altezze ma in realtà il sistema satellitare di ultima generazione BeiDou-3 destinati alla copertura globale ha 30 satelliti in varie orbite a varie altezze di cui: 3 in orbita geostazionaria (GEO), 24 satelliti in orbita terrestre media (MEO) e 3 in orbita geosincrona inclinata alta (IGSO) ed a questi si affiancano altri 14 satelliti della generazione precedente (BeiDou-2) di copertura regionale, pienamente operativi quindi per un totale di **44 satelliti in orbita**.<sup>7</sup>

Il **Giappone** nel 2002 ha promosso il progetto di sviluppo di un proprio sistema satellitare denominato **QZSS** (Quasi –Zenith Satellite System): il nome ufficiale è dovuto al fatto che la costellazione si posiziona allo zenit della regione giapponese (zenit è l'asse perpendicolare al piano orizzontale passante per l'osservatore giapponese). Il sistema giapponese QZSS (Quasi Zenit Satellite System) non è un sistema globale ma un sistema di posizionamento locale che orbita sul Giappone.



Figura 9: Logo QZSS

<sup>7</sup> <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/>

## 2. SISTEMA GNSS

Il termine GNSS è l'acronimo di *GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM* ossia “Sistema Satellitare di Navigazione Globale”. Con esso si intende il sistema di posizionamento e navigazione basato su ricevere contemporaneamente segnali elettromagnetici (onde radio) da diverse costellazioni di satelliti artificiali. I ricevitori elaborando i segnali radio e ricavano le proprie coordinate tridimensionali (posizione e quota).

Secondo la definizione internazionale il GNSS comprende il sistema americano GPS, il russo GLONAS, l'europeo GALILEO, il cinese BeiDou, il sistema giapponese QZSS ma altre costellazioni nel prossimo futuro potrebbero farne parte come l'indiano IRNSS. Appartengono anche servizi di *augmentation* ossia aumento della precisione e dell'affidabilità, come i satelliti geostazionari SBAS (Satellite Based Augmentation System) e componenti fisse di terra come stazioni ed antenne.

I vari sistemi di posizionamento, con le proprie costellazioni, si basano su due concetti apparentemente antitetici: **indipendenza ed interoperabilità**. Di fatto ogni sistema effettua un posizionamento indipendente ma permette anche di operare in combinazione con i satelliti di altri sistemi tale da garantire la migliore soluzione possibile, col vantaggio che il posizionamento divenga più preciso e affidabile se si integrano le misure delle diverse costellazioni rispetto a quello ottenuto con una sola di esse.<sup>8</sup>

Il fatto di disporre di più costellazioni permette di avere un maggior numero di satelliti disponibili a qualsiasi ora e di ricevere più segnali così che quando quelli relativi ad una costellazione non siano disponibili, si possono utilizzare i segnali di altre costellazioni.



Figura 10: A sinistra la costellazione satellitare in orbita del GPS; a destra un singolo satellite GPS

La caratteristica principale è la localizzazione e/o il monitoraggio della posizione di oggetti in ogni zona del globo, anche in movimento, a patto però che tale oggetto abbia un ricevitore e ci sia interservisibilità satellitare.

Alcune costellazioni sono di validità globale, cioè permettono un posizionamento in qualunque punto del globo, altre sono locali/regionali quindi offrono un posizionamento relativo solo alla copertura satellitare di specifiche zone o aree della terra (continentale o sub-continentale).

---

<sup>8</sup> Dal GPS al GNSS, Professore Alberto Cina, edizione 2014, pagina 10.

Il servizio principale offerto dai sistemi GNSS è definito in inglese con il termine PNT ossia Positioning, Navigation, Timing che rispettivamente permettono di sapere la posizione, di navigare ossia di orientare per andare da un luogo ad un altro e di avere uno stabile riferimento temporale grazie ai precisi orologi di cui si dota il sistema GNSS.

I più importanti sistemi di posizionamento globale sono: l'americano GPS, il russo GLONASS, l'europeo GALILEO, il cinese BEIDOU.

Altre costellazioni minori come ad esempio il giapponese QZSS e l'indiano IRNSS, a copertura attualmente regionale, saranno probabilmente destinate a cavalcare il palcoscenico spaziale ed altre ancora ne nasceranno, in un continuo evolversi per un miglioramento del posizionamento sia autonomo che integrato e che possa offrire soluzioni efficienti in aree e situazioni particolarmente difficili.

Quando viene attivato il sistema di posizionamento sul nostro ricevitore, che sia un ricevitore professionale o meno, innanzitutto l'antenna GNSS dello strumento cercherà la maggior quantità possibile di satelliti "visibili" in zona in quel momento e dopodiché il processore interno del ricevitore effettuerà i calcoli per localizzare la sua posizione: dovrà trovare almeno 4 satelliti anche se generalmente può arrivare a trovarne 8 o 10 in base alle caratteristiche degli spazi del luogo in cui ci si trova. Devono essere almeno 4 satelliti perché le incognite del posizionamento sono 4: coordinate X, Y, Z del ricevitore + errore di orologio del ricevitore. Verranno trattate nel dettaglio nel capitolo "Principi di Posizionamento".

Ad esempio se si percorrono zone boschive o si è tra edifici alti o in qualunque altra situazione in cui si ha difficoltà a cogliere il segnale dei satelliti GPS, avere a disposizione la rete complementare GLONASS, GALILEO e BEIDOU aiuterà ad avere più satelliti con i quali localizzare la propria posizione e si avranno dei miglioramenti considerevoli nella quantità dei dati forniti e nella velocità con cui verranno forniti. Però il consumo della batteria dello strumento sarà un po' più alto. Ovviamente se l'intervisibilità satellitare è totalmente assente (ad esempio in una galleria) nessuna costellazioni sarà ricevibile.

Se invece si percorrono zone dagli spazi più liberi come spiagge, zone con edifici bassi o generalmente situazioni in cui il ricevitore riesce a captare il segnale da un numero sufficiente di satelliti GPS, attivare ad esempio il segnale dai satelliti GLONASS non andrà a migliorare di molto una precisione che è già molto alta; in questo caso probabilmente non si percepiranno miglioramenti nell'esattezza dei dati.

## 2.1 STRUTTURA DEL SISTEMA GNSS

Ogni sistema di navigazione e posizionamento GNSS è composta da 3 parti o "segmenti":

- 1) **Segmento spaziale:** è la parte rappresentata dai satelliti. L'insieme dei satelliti crea la costellazione satellitare. I satelliti per la navigazione compiono orbite MEO (Medium Earth Orbit) pressoché circolare attorno alla terra. Distanza dai 19100 km ai 23200 km dalla superficie terrestre. Appartengono al segmento spaziale anche i satelliti geostazionari GEO (Geostationary Earth Orbit). In astrodinamica un'orbita geostazionaria è un'orbita che non solo sia equatoriale (ossia appartenente al piano equatoriale) e circolare ma è anche situata a una altezza tale per cui il periodo di rivoluzione di un satellite che la percorre, coincide con il periodo di rotazione della Terra, per cui per ad un osservatore sulla Terra il satellite apparirà fermo in cielo, sospeso sempre al di sopra del medesimo punto dell'equatore poiché

ruota, con moto circolare uniforme, alla stessa velocità angolare della Terra. La quota dell'orbita geostazionaria è fissa e deriva dal fatto che orbite a quote diverse hanno periodi di rivoluzione diversi.

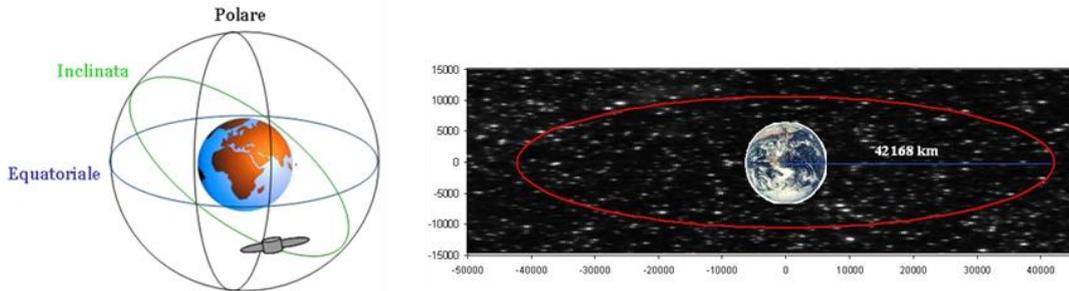


Figura 11: A sinistra le orbite terrestri: l'orbita equatoriale giace sul piano dell'equatore celeste ed il satellite che vi si trova ruota sopra l'equatore. L'orbita polare giace sul piano del meridiano celeste e passa per i poli. Ogni orbita fra quella equatoriale e quella polare si chiama (genericamente) inclinata. Le orbite possono essere circolari o ellittiche. A destra il raggio dell'orbita del satellite geostazionaria (GEO) pari a 42168 km

Nel caso della Terra il satellite artificiale GEO percorre l'orbita circolare in un tempo uguale al giorno siderale ossia

$$T_{\text{rotazione}} = 23 \text{ h } 56 \text{ min } 4,09 \text{ s} = 86164,09 \text{ s.} \quad (1)$$

Il raggio di quest'orbita pressoché circolare, misurato dal centro della Terra, può essere determinato mediante la **terza legge di Keplero** (volendo essere rigorosi il raggio è in realtà il semiasse maggiore di questa orbita pressoché circolare):

$$r_{\text{geo}} = \sqrt[3]{\frac{G \cdot M}{(2\pi/T)^2}} = 42168 \text{ km} \quad (2)$$

Con:

$G = 6.67428 \pm 0.00067 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$  la costante di gravitazione universale

$M = 5.9736 \times 10^{24} \text{ kg}$  la massa della Terra.

$T =$  periodo di rotazione del satellite attorno alla Terra espresso in secondi = 86164,09 s

Il raggio dell'orbita  $r_{\text{geo}}$  si misura a partire dal geocentro del pianeta; volendo invece conoscere la distanza del satellite dalla superficie terrestre, essendo il raggio medio della Terra di circa 6371 km, l'orbita geostazionaria GEO si trova a circa 36 000 km sopra la superficie terrestre.

Il giorno siderale è il periodo impiegato dalla Terra per eseguire una rotazione completa attorno al proprio asse e dura 23h 56minuti e 4,09 secondi quindi è più corto del giorno solare medio di quasi 4 minuti. Per spiegarlo si supponga che la Terra prima di iniziare la sua rotazione terrestre giornaliera si trovi nella posizione 1 (figura 12) in cui la verticale tratteggiata unisca Sole e il meridiano corrispondente della Terra. La Terra, mentre compie la rotazione completa attorno a se stessa, percorre anche un tratto di orbita attorno al Sole (angolo  $\theta$ ) e, a rotazione completata, la verticale tratteggiata in precedenza non passa più per il Sole (posizione 2). Il tempo per avere una rotazione così fatta è il tempo siderale (23h 56 min 4,09 s). Si necessitano di ulteriori 4 minuti (3min e 55,91 sec per esattezza) affinché la rotazione della Terra attorno al suo asse faccia sì che la verticale

tratteggiata ruoti di un angolo  $\theta$  e quindi il Sole transiti sulla stessa posizione o sullo stesso meridiano del giorno precedente. Questi “3min e 55,91sec” di ritardo aggiunti al tempo siderale fanno sì che:  $23h\ 56\ minuti\ 4,0905\ secondi + 3\ minuti\ e\ 55,91\ sec = 24h = 86400\ secondi$ , ossia giorno solare medio. Va aggiunto però che la rotazione terrestre non è perfettamente regolare poiché influenzate da forze di attrazione gravitazionali come Sole, Luna, altri pianeti per cui in un giorno solare medio non ci sono esattamente 86400sec (ottenuto da  $24h \cdot 60min \cdot 60$ ) ma un tempo medio di 86400,002 sec.

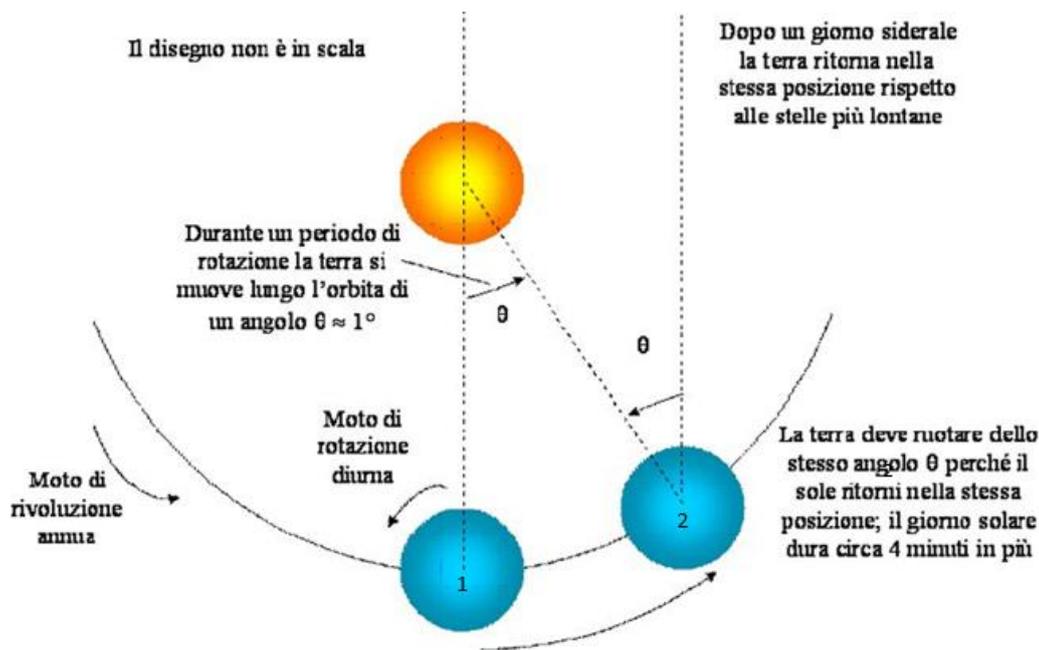


Figura 12: Funzionamento del giorno siderale e angolo  $\theta$

Un requisito fondamentale per il posizionamento è che ogni costellazione globale, che si definisca completa, deve garantire la presenza di almeno 4 satelliti a qualunque ora e luogo a partire da un'elevazione di almeno  $15^\circ$  rispetto l'orizzontale.

Su ogni satellite sono installati degli orologi atomici, alcuni al Cesio ed altri al Rubidio, per garantire un costante ed affidabile riferimento temporale. Hanno una precisione di diversi ordini di grandezza superiore rispetto agli orologi al quarzo presenti all'interno di un ricevitore.

La vita media prevista dei satelliti è legata alla vita degli orologi atomici montati a bordo: i primi satelliti duravano in media 7 anni, poi si è passati a 10 anni ed i satelliti più recenti raggiungono i 15 anni di vita.

I compiti dei satelliti sono:

- ✓ Trasmettere informazioni agli utilizzatori tramite un segnale radio complesso; tra queste informazioni trasmesse abbiamo anche le effemeridi ossia i parametri kepleriani utili per ottenere la posizione del satellite in orbita, fondamentale per ricavare il posizionamento del nostro ricevitore.
- ✓ Mantenere un accurato riferimento temporale grazie agli orologi atomici di bordo.
- ✓ Ricevere e memorizzare le informazioni provenienti dal segmento di controllo
- ✓ In orbita vi sono sia satelliti per la trasmissione di dati e sia satelliti di scorta per garantire copertura globale del servizio anche in caso di manutenzione o avaria dei satelliti ordinari.

Ciascun satellite dispone di razzi a idrazina per effettuare le correzioni di orbita e di pannelli solari fotovoltaici per la produzione di energia elettrica uniti a una batteria per garantire l'energia anche quando il sole è eclissato.

**2) Segmento di controllo:** comprende l'insieme delle stazioni a terra che gestiscono il sistema. Solo il segmento di controllo può inviare dati al satellite. I compiti del segmento di controllo sono:

- ✓ Seguire in modo continuativo, ovvero “tracciare”, i satelliti ed elaborare i dati ricevuti per calcolarne la posizione spatio-temporale e stimarne le effemeridi, ossia l'insieme dei parametri che permettono di calcolare la posizione del satellite; questi parametri poi sono inviati dal centro di controllo al satellite per mezzo di antenne di trasmissione di terra e a loro volta i satelliti li trasmettono ai ricevitori a terra per mezzo del messaggio di navigazione NAV.
- ✓ Memorizzare dati relativi ai satelliti per prevedere le effemeridi per le successive 12-24 ore.
- ✓ Imporre opportune manovre e correzioni d'orbita ai satelliti inviandogli informazioni tramite messaggi di navigazione “NAV”.
- ✓ Controllo degli orologi atomici dei satelliti e su questi ne calcolano un modello di errore.

**3) Segmento di utilizzo oppure segmento utente:** è rappresentato da ogni utente dotato di un ricevitore; il ricevitore è composto da un piccolo processore per elaborare le operazioni di calcolo per la stima della propria posizione, di un'antenna GNSS per ricevere i segnali satellitari e di una sorgente di tempo (di solito un orologio al quarzo), utile ad effettuare l'operazione di sincronizzazione con il tempo della costellazione satellitare. I ricevitori sono strumenti di tipo “passivo” o sistemi ad “una via”: possono cioè solo ricevere dati ma non emettono alcun segnale. Grazie al segnale del satellite, il ricevitore processa i dati ottenuti e stabilisce le proprie coordinate: la posizione che verrà determinata è quella del centro magnetico dell'antenna (tecnicamente *centro di fase dell'antenna del ricevitore*).

Esistono ricevitori in grado di acquisire segnali da più costellazioni GNSS (ad es. GPS+GLONASS o GPS+GLONASS+GALILEO+BeiDou) e software in grado di elaborarne unitamente i segnali realizzando l'interoperabilità tra le varie costellazioni.

Le specifiche sul sistema, sugli algoritmi del posizionamento, sul segnale trasmesso, sono tutte normate su documenti ufficiali detti ICD (Interface Control Document).

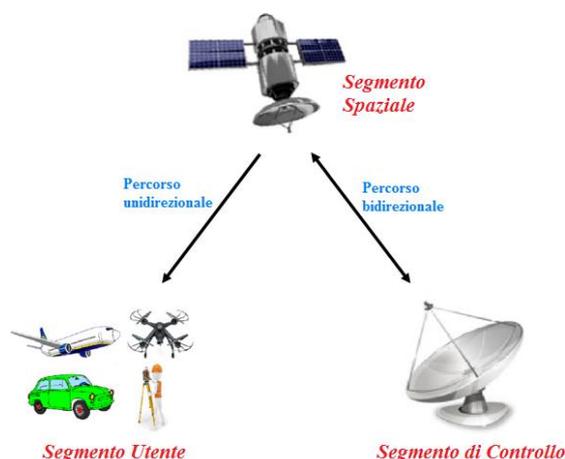


Figura 13: I segmenti dei sistemi GNSS

## 2.2 STRUTTURA DEI SEGNALI GNSS

Il segnale si origina da una frequenza fondamentale  $f_0$  [MHz] prodotta da **orologi atomici** presenti nel satellite che possiedono una elevatissima precisione e stabilità a lungo termine pari a  $10^{-12} \div 10^{-14}$  significa che, supponendo ad esempio una stabilità di  $10^{-12}$ , ogni secondo si perdono  $10^{-12}$  secondi di precisione o equivalentemente ogni  $10^{12}$  secondi si perde un secondo di precisione.

Da tale frequenza fondamentale  $f_0$  si originano le 3 parti del segnale radio trasmesso:

- ✓ **Componente portante o componente sinusoidale o fase** (in inglese *carrier phase*): Sono onde sinusoidali la cui frequenza è generata moltiplicando la frequenza fondamentale  $f_0$  per coefficienti noti, propri di ogni costellazione.

La lunghezza d'onda del segnale radio emesso si ottiene da:

$$\lambda = c/f \quad (3)$$

Essendo  $c$  = velocità della luce ( $3 \cdot 10^8$  m/s) ed  $f$  = frequenza della portante.

In ogni caso la lunghezza d'onda del segnale emesso si attesta su  $\lambda \approx 20$  cm per tutte le costellazioni.

- ✓ **Componente impulsiva o codice** (in inglese *Code*): sono onde quadre formate da una successione di valori “+1 e -1”, generati da un algoritmo che si ripete periodicamente nel tempo. Sono sequenze numeriche che sembrano casuali ma in realtà sono generate in modo deterministico da un algoritmo; le sequenze di numeri si avvicinano molto a quelle realmente randomiche. Vengono detti per questo motivo “pseudo casuali” o PRN (pseudo random noise).
- ✓ **Componente messaggio o codice di navigazione** (in inglese *Navigation message* detto codice NAV o codice D): contiene informazioni importanti come i parametri per il calcolo della posizione dei satelliti (effemeridi), informazioni sugli errori degli orologi di bordo e sui ritardi del segnale nell'attraversare la ionosfera (è la parte alta dell'atmosfera). Tali informazioni sono acquisite e trasmesse dal messaggio NAV e memorizzate in file formato RINEX. Possono essere anche trasmesse nei messaggi di protocollo RTCM per misure differenziali in tempo reale.

**Le componenti impulsive (codici) modulano le componenti portanti** nel senso che il passaggio del codice da +1 a -1 provoca uno sfasamento di  $\pi$  sulla fase come si può osservare in figura 14. Per depurare la portante dai codici occorre “**demodularla**”. Poi conoscendo quindi il codice è possibile rimodulare l'onda di partenza con un codice identico.

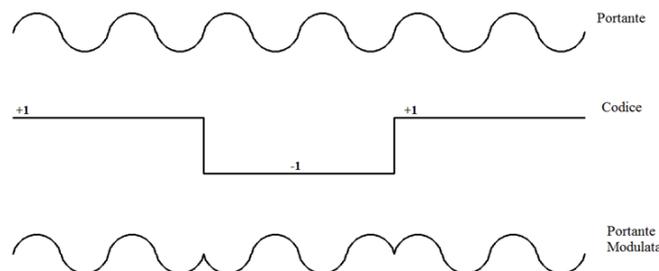


Figura 14: Effetto della modulazione della portante

Quindi il segnale finale trasmesso dal satellite risulta quello della portante (carrier phase) modulata dai codici (Code e Navigation message). Il segnale finale trasmesso assume il nome di **Broadcast signal**.

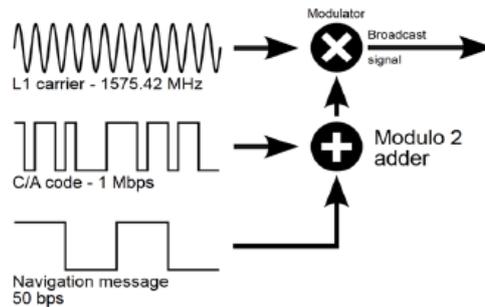


Figura 15: Modulazione di una portante con codici genera il Broadcast signal

Il gestore del sistema di navigazione ha la possibilità di criptare i codici, così che il Broadcast signal diventi accessibile solo per gli utenti autorizzati. Questa procedura è meglio nota come *Anti Spoofing* (A-S). Viene usata generalmente in campo militare.

[Lo spoofing è una tecnica utilizzata per falsificare diverse informazioni, come ad esempio l'identità (spoof) di un utente o il mittente del segnale così da intercettare informazioni riservate o diffondere informazioni false o effettuare qualsiasi altro tipo di attacco].

Un aspetto importante per il posizionamento è la misura della distanza tra i centri di fase delle antenne del ricevitore e del satellite. Tale distanza è chiamata **range** e può essere misurata secondo due modalità:

- ✓ **Misure di codice:** valuta la distanza sulla base del tempo di propagazione del segnale ad onde quadre (componente Code) dal satellite al ricevitore;
- ✓ **Misura di fase:** valuta la distanza sulla base del numero di cicli interi + parte frazionaria della componente portante (la portante è un'onda sinusoidale) che si ha dal satellite al ricevitore. In figura 16 ad esempio si hanno 2 cicli interi + una parte frazionaria.

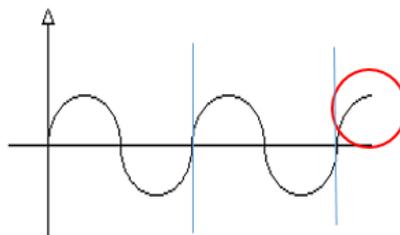


Figura 16: Misura di fase dato da 2 cicli interi + parte frazionaria (cerchiata in rosso)

I segnali GNSS si definiscono complessi perché:

- I satelliti “dialogano” con un numero imprecisato di ricevitori del segmento di utilizzo ma quest’ultimi non devono emettere segnali altrimenti potrebbero rivelare la loro posizione. Si tratta quindi di trasmissione ad una via; per motivi di segretezza militare non è possibile la trasmissione “a due vie”: si ricorda che il posizionamento nasce per scopi militari per poi essere adattato a scopi civili.

Sugli smartphone è possibile rintracciare il dispositivo solo perché si utilizza un servizio internet di mappatura che chiede la condivisione della posizione (prima di utilizzare una app

di geo-localizzazione viene chiesta l'autorizzazione di condivisione della propria posizione) e con l'applicazione "Trova il mio dispositivo" creata da Google si può ricercare da remoto il proprio dispositivo, a patto che lo smartphone sia associato ad un account Google, sia acceso ed attiva l'icona di geo-localizzazione, mentre in caso di smarrimento con cellulare spento si può risalire alla posizione approssimativa del dispositivo andando a ricercare la cella telefonica a cui il cellulare si era agganciato (l'area di competenza è di 3-4 chilometri quadrati).

- Le misure di codice servono per un posizionamento istantaneo ma di bassa precisione.
- Le misure di fase si utilizzano per posizionamenti di precisione, spesso in post-elaborazione.
- Per contenere e/o modellare gli errori legati alla propagazione del segnale attraverso lo strato ionosferico (parte alta dell'atmosfera densa di elettroni e ioni liberi che influenzano in modo sensibile l'indice di rifrazione delle radioonde) è importante l'utilizzo di due o più frequenze per combinarle tra loro ed ottenere l'eliminazione dell'errore ionosferico; applicazioni di precisione in tempo reale possono trarre vantaggio dalla presenza di più frequenze.

### Ma come funziona un orologio atomico?

Ogni operazione che richiede un'estrema precisione temporale ne fa uso. Ad esempio, la rete Internet, che necessita di un'accuratezza assoluta nella trasmissione dei pacchetti dati, o il sistema GNSS, dal momento che triangola la nostra posizione basandosi sul tempo di volo di un segnale radio inviato da più satelliti intorno al globo (e che devono quindi essere sincronizzati alla perfezione) verso il ricevitore.

Qualunque orologio è composto da due parti: un oscillatore (ad esempio un pendolo, una vibrazione) e un contatore che conta le oscillazioni.

Per misurare il tempo ci si basa su fenomeni periodici, come la vibrazione ad una certa frequenza (indotta elettricamente) di un cristallo di quarzo (è una lamina di quarzo che viene fatta oscillare e queste oscillazioni scandiscono il tempo). Ma questa vibrazione non è rigorosamente costante poiché influenzata da interferenze esterne, come gravità, temperatura, attrito, magnetismo, utilizzo, che ne compromettono l'accuratezza e la costanza sulla lunga durata. Per cui, per quanto un orologio al quarzo sia molto più preciso di uno automatico, col passare dei mesi subirà uno sfasamento sempre più grande, fino ad arrivare a perdere (o guadagnare) anche diversi secondi rispetto all'ora esatta. L'orologio atomico cosa fa? In pratica **controlla che le vibrazioni del cristallo di quarzo si mantengano perfettamente costanti** sfruttando le proprietà fisiche di atomi particolari come quelli del Cesio o del Rubidio o dello Stronzio o dell'Idrogeno. La particolarità che ha reso ad esempio gli atomi di Cesio così importanti per la misura del tempo è che i salti quantici (ossia gli elettroni dell'atomo "saltano" dalla loro orbita alla orbita di livello energetico superiore se eccitati, quindi da questo stato ripassano allo stato energetico precedente rilasciando energia) avvengono con una frequenza estremamente stabile in funzione della quantità di energia che viene loro somministrata, che è caratteristica di ogni tipo di atomo. Proprio per questa altissima stabilità, nel 1967 il Comitato internazionale dei pesi e delle misure ha stabilito la definizione di 1 secondo di tempo: "un secondo corrisponde a 9192631770 cicli di transizione tra due livelli energetici dell'atomo di Cesio-133" e tale frequenza è nota come frequenza naturale o frequenza di risonanza. Quindi, stabilito questo, il ruolo degli atomi di Cesio nell'orologio atomico è quello di controllare che le vibrazioni di un cristallo di quarzo restino costanti nel tempo.

Il funzionamento è complicato ma può essere così riassunto: il quarzo viene fatto vibrare (tramite stimolazione elettrica) alla medesima frequenza di risonanza del Cesio-133 (9192631770 Hz). La

vibrazione del quarzo è trasformata in microonde che eccitano gli atomi di Cesio. Se la frequenza del quarzo è pari alla frequenza di risonanza del Cesio, vi è un numero preciso di elettroni di Cesio indotti al salto quantico e la risonanza è rilevata dalla luce emessa dal Cesio quando si diseccita. Quando però la frequenza del quarzo varia a causa, come si è detto, di interferenze esterne, alcuni atomi di Cesio non assorbono più le microonde e quindi il quantitativo di luce emessa varia; per saperlo con certezza, gli atomi di Cesio vengono fatti passare attraverso due magneti, che dirigono solo le particelle con livello energetico superiore (e quindi irradiate da una frequenza corretta), verso un sensore che analizza la quantità di atomi eccitati. Se sono troppo pochi, significa che la vibrazione del quarzo sta cambiando e viene quindi corretta variando la corrente inviata al cristallo dall'oscillatore per ristabilire la frequenza di risonanza. I circuiti successivi sono analoghi a quelli di un normale orologio al quarzo. Il tutto in un arco di tempo ridottissimo. Tale frequenza, come in un normale orologio al quarzo, viene poi tradotta in misura temporale da un circuito. Per cui, si può dire che l'orologio atomico è in pratica un sistema che mantiene autonomamente la sua accuratezza o, in inglese, un **self-tuning system**.

Inoltre esistono diverse "classi" di orologi atomici: gli orologi atomici più precisi sono quelli che definiscono la scala di tempo TAI (si veda capitolo "Scale di tempo") con una stabilità di frequenza a lungo termine pari a  $10^{-16}$ , poi subito dopo vi sono gli orologi atomici presenti nelle stazioni a terra del segmento di controllo (stabilità di frequenza a lungo termine pari a  $10^{-15}$ ; la stabilità di frequenza rappresenta un indice dell'abilità dell'oscillatore a discostarsi il meno possibile dalla frequenza nominale per cui l'orologio è stato progettato: in sostanza significa che ogni secondo si perdono  $10^{-15}$  secondi di precisione o equivalentemente che perde un secondo di precisione ogni  $10^{15}$  secondi); poi ci sono gli orologi atomici montati a bordo dei satelliti che sono meno accurati rispetto a quello del centro di controllo (stabilità di frequenza a lungo termine di  $10^{-12} \div 10^{-14}$ ) ed infine ci sono gli orologi montati sui ricevitori che sono generalmente classici orologi al quarzo ed hanno una stabilità di alcuni ordini di grandezza inferiore rispetto agli atomici (stabilità di frequenza a lungo termine di circa  $10^{-9}$  ossia perde tre centesimi di secondo di precisione ogni anno), a seconda della qualità e costo del ricevitore.

Infine gli orologi da polso (orologi automatici) hanno una stabilità a lungo termine di  $10^{-6}$  ossia ogni secondo si perde 1 milionesimo di secondo di precisione ovvero introduce l'errore di 1 secondo ogni milione di secondi) che corrispondono alla deviazione di qualche secondo ogni mese rispetto l'orologio assoluto ideale. Esempi di instabilità sugli orologi atomici: un campione al rubidio di alta qualità ha uno scarto di 1 secondo ogni 1011, cioè di un secondo in 30.000 anni mentre i campioni primari al cesio hanno accuratezze di 1 su 1014, in altre parole 1 secondo in 30 milioni di anni, ammesso per assurdo che potessero funzionare così a lungo. I migliori orologi a fontana di cesio arrivano a una "imprecisione" pari a 2 secondi ogni 1016, cioè 1 secondo in 300 milioni di anni.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Atomi, orologi e satelliti – AstronautiNEWS; Microsoft Word - Tempo\_Campioni.doc (uniroma2.it)

### 3. SCALE DI TEMPO

Il tempo è un elemento importante poiché è una delle 4 incognite dei problemi di posizionamento e navigazione. Quindi si necessita di precisione e **sincronizzazione** tra i vari segmenti (controllo, satellitare e utente). La particolarità è che ogni sistema GNSS ha una propria scala temporale ma esistono parametri per calcolare i passaggi tra le diverse scale di tempo per garantire un'interoperabilità tra le costellazioni.

Vengono ora elencate le varie scale di tempo indipendenti dalle costellazioni.

**Scala di tempo TAI** (Tempo Atomico Internazionale): è una delle scale di tempo più accurata possibile, definita per mezzo dell'atomo di Cesio ed è mantenuta da 200 orologi atomici dislocati nel mondo all'interno di laboratori metrologici. Rappresentano un tempo estremamente preciso e costante. L'istante zero è fissato al 1° gennaio 1958. In 1 giorno TAI ci sono 86400 secondi. Il TAI si potrebbe definire un tempo "artificiale e indipendente" dal tempo reale di rotazione terrestre, quest'ultimo definito dal tempo GMT.

**Scala di tempo GMT** (Greenwich Medium Time): è il tempo solare medio di Greenwich detto comunemente *ora solare o tempo astronomico*. Il tempo si misura basandosi sulla rotazione della Terra e le 24 ore sono definite quando il Sole ritorna sul meridiano di Greenwich ogni giorno. Siccome però la rotazione terrestre non è perfettamente regolare poiché influenzata da forze di attrazione gravitazionali come Sole, Luna, altri pianeti, maree, questo provoca mediamente un **allungamento** del tempo di rotazione rispetto al tempo mantenuto dagli orologi atomici TAI (che non hanno queste irregolarità e risultano più costanti e precisi); per cui un giorno di rotazione terrestre GMT quindi non si può dire essere esattamente di 86400 secondi TAI ma varia da un giorno all'altro perché influenzato dagli effetti gravitazionali e viene per ciò definito un tempo medio di rotazione terrestre pari a 86400,002 secondi (come accennato nel capitolo 3, segmento spaziale)

**Scala di tempo UTC**: Tempo Universale Coordinato. E' fondamentale il tempo in cui noi viviamo e su cui sono impostati i nostri orologi o i nostri pc. Usato per definire i fusi orari tra cui il fuso 0 è quello contenente il meridiano di Greenwich. L'UTC deriva dal GMT ma non si basa su osservazioni astronomiche, le quali sono irregolari, bensì la regolarità è scandita da orologi atomici. Quindi esiste una discrepanza tra UTC e GMT che è ritenuta accettabile se contenuta in un intervallo  $\pm 0,9$  secondi, alle ore 12:00:00 UTC e con il Sole sopra il meridiano di Greenwich. Ma col passare del tempo questa discrepanza tende mediamente ad aumentare poiché il GMT è influenzato dai fenomeni di attrazione gravitazionale che per la maggior parte delle volte rallentano la rotazione terrestre e quindi la scansione del tempo GMT risulta più lenta dell'UTC. Dato che gli organismi internazionali hanno riconosciuto l'importanza di mantenere il tempo universale coordinato sincronizzato con l'ora solare, si rende necessario sincronizzare gli orologi atomici UTC (il cui secondo risulta indipendente dai periodi di rotazione/rivoluzione terrestre) con gli orologi GMT. Per ottenere ciò viene aggiunto **1 secondo** al tempo UTC quando necessario (o meglio quando l'intervallo  $\pm 0,9$  sec definito in precedenza raggiunge un ulteriore esubero in valore assoluto di 0,6 secondi). Questo 1 secondo viene aggiunto in una data stabilita dallo IERS (International Earth Reference System che è l'ente internazionale che comunica quando "aggiustare" gli orologi atomici) che di solito è il 31 dicembre o il 30 giugno, all'ultimo minuto della giornata alle 23:59:59 secondi

e quindi la mezzanotte scatterà dopo le 23 e 59 minuti e 60 secondi invece che dopo le 23 e 59 minuti e 59 secondi. **Tale secondo viene chiamato *secondo intercalare* o in inglese *leap second*.** Quindi in tale data il minuto UTC durerà 61 secondi anziché i classici 60 secondi. Poiché la frequenza di rotazione della Terra non è regolare per le cause gravitazionali citate nel GMT, non esiste una regola fissa per determinare ogni quanti anni o mesi sarà necessario introdurre il secondo intercalare: spesso è stato introdotto in un anno e anche nell'anno successivo, altre volte è stato introdotto dopo due anni, altre volte è stato introdotto dopo periodi ancora diversi ma si può dire che mediamente viene introdotto circa ogni 18 mesi (un anno e mezzo).

Tali aggiunte, quando decise dallo IERS, vengono effettuate nell'ultimo minuto della giornata, come già detto, nelle date del 30 giugno o 31 dicembre alle 23:59:59 UTC. Il primo secondo intercalare venne introdotto il 31 dicembre 1971. Il periodo più lungo senza aggiustamenti è stato quello compreso fra il 1° gennaio 1999 e il 31 dicembre 2005 (6 anni). C'è stato un periodo di tempo in cui due secondi intercalari hanno avuto luogo a sei mesi di distanza. Ciò è avvenuto tra il primo secondo intercalare il 31 dicembre 1971 e il secondo il 30 giugno 1972.

Un secondo intercalare funziona in sostanza come un anno bisestile: fa una correzione nel tempo.

Tecnicamente il secondo intercalare non deve necessariamente far coincidere i tempi UTC e GMT ma è ammessa una tolleranza ossia permette che alle ore 12:00:00 UTC il Sole sia sul meridiano di Greenwich, ammettendo uno scarto massimo di  $\pm 0,9$  secondi.

In Italia, per misurare il tempo, si usano due convenzioni a seconda del periodo dell'anno: si usa il CET (Central European Time cioè tempo dell'Europa centrale), pari all'UTC+1 ossia all'ora UTC valutata su Greenwich (fuso 0) viene aggiunta un'ora poiché siamo nel fuso adiacente ad est, limitatamente al periodo in cui è in vigore l'ora civile convenzionale, detta comunemente ora solare, che va dall'ultima domenica di ottobre all'ultima domenica di marzo. Quando invece è in vigore l'ora legale, adottata nel resto dell'anno, in Italia si usa l'orario CEST (Central European Summer Time, tempo estivo dell'Europa centrale), pari all'UTC+2 ossia all'UTC incrementato di due ore.

La scala di tempo TAI che si origina nel 1958, differisce dal tempo UTC, che parte nel 1972, di ulteriori leap second.

Dal UTC deriva il tempo UT1 in cui si considera l'asse di rotazione terrestre non fisso nel tempo ma che compie un percorso detto "moto del polo". Quindi UT1 considera in più all'UTC delle correzioni dovute al moto dei due poli che definiscono il vero asse di rotazione terrestre; però, data la velocità non uniforme della rotazione terrestre, UT1 ha una incertezza di  $\pm 3$  millisecondi al giorno.

Si vedono ora le scale di tempo utilizzate dalle varie costellazioni satellitari.

**Scala di tempo GPS:** la scala di tempo GPS, detta anche "*GPS time*", è mantenuta dall'orologio atomico della Master Control Station del Centro di Controllo del GPS in Colorado Springs. Non viene apportata alcuna correzione per tener conto del giorno solare e quindi non tiene conto della reale rotazione terrestre.

L'istante zero è alla mezzanotte del 6 gennaio 1980, data alla quale coincideva perfettamente col tempo UTC. Siccome il tempo UTC viene corretto aggiungendo quando necessario il secondo intercalare (o second leap) per sincronizzarlo con la rotazione terrestre, il che significa "*rallentarlo*" e quindi "*ritardarlo*" rispetto al tempo degli orologi atomici, la differenza tra UTC e GPS è pari proprio ai leap second aggiunti nel corso dei vari anni. Questo significa che uno stesso "spazio temporale" misurato con orologio atomico (tipico della scala di tempo GPS e TAI) risulti più "grande" rispetto al tempo UTC poiché a quest'ultimo è stato aggiunto 1 secondo diverse volte nel

corso degli anni e quindi in quei casi il minuto è durato 61 secondi che ha quindi fatto accumulare via via ritardo sul tempo GPS e sul tempo TAI.

A titolo di esempio si riportano le scale temporali alla data del 2 luglio 2022.<sup>10</sup>

Tabella 1: Comparazione tra diverse scale di tempo lette nello stesso momento del 2 luglio 2022

Scala di tempo	Data [GG/M/A]	Ora
TAI	2/07/2022	11:30:19
GPS	2/07/2022	11:30:00
UTC	2/07/2022	11:29:42

La data trasmessa dai GPS si basa sul numero di settimane passate dal 6 gennaio 1980 (tale data rappresenta l'istante zero del tempo GPS) e il numero di secondi trascorsi all'inizio della settimana corrente. Le settimane sono trasmesse con una codifica a 10 bit: ciò significa che il numero di settimane passate si azzerano ogni 1.024 settimane (circa 19,6 anni): il primo azzeramento quindi è avvenuto il 21 agosto 1999 e l'ultimo il 6 aprile 2019.<sup>11</sup>

Da quando si ha l'azzeramento, si ricominciano a contare da capo fino ad arrivare a 1.024 settimane per poi azzerare nuovamente.

Ad esempio: in data 2 luglio 2022, il sistema GPS trasmette i seguenti valori:

*Settimana n. 0168; Tempo trascorso dall'inizio della settimana: 577390 secondi*

Dato che sappiamo che fino ad oggi sono stati fatti 2 azzeramenti, aggiungendo  $1024 \cdot 2$  al numero della settimana 168 si ottiene il numero di settimane totali a partire dal 6/01/1980 e considerando che questi dati rappresentano la differenza tra la data e l'ora attuali e la mezzanotte del 6 gennaio 1980, si può facilmente calcolare la data e l'ora attuale GPS.

**Scala di tempo GLONASS:** La scala di tempo che utilizza GLONASS è quella sovietica **UTC(SU)** (Universal Time Coordinate Soviet Union) e vale  $\text{UTC(SU)} = \text{UTC} + 3 \text{ ore}$

Ad essa sono riferiti le posizioni dei satelliti nel messaggio di navigazione Glonass. Viene chiamata anche Glonass time o GLONASST. Il tempo è mantenuto dall'orologio Master all'idrogeno del Central Synchronizer (CS) Time del sistema di posizionamento GLONASS avente una stabilità nella frequenza non peggiore di  $2 \cdot 10^{-15}$ ; UTC(SU) viene periodicamente allineata al tempo GMT per tramite di leap second secondo le indicazioni dello IERS.

**Scala di tempo GALILEO:** viene chiamata **GST** (Galileo System Time) ed ha inizio alle ore 00:00 del 22 agosto 1999. E' allineato al tempo TAI. Nel messaggio di navigazione sono contenuti i parametri per calcolare l'offset (la differenza) tra la scala di tempo GALILEO e le scale UTC e GPS per un'interoperabilità tra le costellazioni.

**Scala di tempo BeiDou:** è detta **BDT** (BeiDou navigation satellite system Time). L'epoca di inizio è l'ora 00:00:00 del 1° gennaio 2006 del tempo UTC. Il tempo si misura in secondi nella settimana (SOW: Second Of Week). BDT è periodicamente controllata per avere un offset rispetto al tempo UTC minore di 50 nanosecondi. Nel messaggio di navigazione è trasmesso l'offset rispetto alle scale di tempo usate nelle altre costellazioni per garantire l'interoperabilità.

<sup>10</sup> <https://www.ipses.com/approfondimenti/standard-di-definizione-del-tempo/>

<sup>11</sup> <https://www.geoinstruments.it/gps-rollover-azzeramento-del-tempo-gps/>

## 4. LE COSTELLAZIONI GNSS

### 4.1 IL SISTEMA AMERICANO GPS

GPS è il sistema di posizionamento più diffuso e famoso al mondo. Acronimo di Global Positioning System, a sua volta abbreviazione del nome completo NAVSTA GPS (NAVigation Satellite Timing And Rangin Global Positioning System) è il sistema di navigazione, posizionamento e temporizzazione satellitare statunitense. Gestito dall'aeronautica statunitense USAF (United States Air Force) di cui il Major Command è l' AFSPC (Air Force Space Command) responsabile di tutte le operazioni spaziali e di terra, dei sistemi di lancio e dei satelliti. Il sistema GPS è co-finanziato dal Dipartimento dei Trasporti degli Stati Uniti (DOT) e collabora con la NASA. Il progetto GPS è stato sviluppato nel 1973 per scopi militari, nel 1991 gli USA aprirono al mondo il servizio per usi civili con il nome SPS (*Standard Positioning System*), con specifiche differenziate da quello riservato all'uso delle forze militari USA denominato PPS (*Precision Positioning System*). **Per quanto riguarda le prestazioni di posizionamento, PPS e SPS sono simili** da quando nel 2000 è stata disabilitata la Selective Availability che degradava il segnale civile di circa 100 metri, mettendo così a disposizione degli usi civili la precisione attuale di circa 5-10 metri in real time in posizionamento assoluto. Le caratteristiche che rendono il PPS superiore al SPS comprendono invece una maggior resistenza ai disturbi e l'esclusività dell'utilizzo da parte dei soli utenti autorizzati.<sup>12</sup>

Il sistema è stato progettato per permettere in ogni condizione meteorologica, in ogni istante ed in ogni luogo del pianeta il posizionamento tridimensionale di oggetti, anche in movimento, purché vi sia interscambiabilità satellitare con almeno 4 satelliti del sistema. La localizzazione avviene mediante trasmissione di segnali radio da parte di ciascun satellite e l'elaborazione dei segnali ricevuti è svolta dal ricevitore. In realtà queste sono condizioni comuni a tutti i sistemi di posizionamento.

Si analizza di seguito la struttura fisica del sistema GPS.

Il **segmento di controllo** è costituito da una rete globale di strutture a terra e distribuite nel mondo. La loro funzione è di tracciare i satelliti GPS, monitorare le loro trasmissioni, eseguire analisi e inviare comandi e dati ai satelliti tra cui manovre e correzioni d'orbita, controllare gli orologi dei satelliti e modellarne l'errore, prevedere le effemeridi per le successive ore.

E' costituito da **16 stazioni di monitoraggio** di cui 6 appartengono all' Air Force (AFSCN=Air Force Satellite Control Network) e 10 alla National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) col compito essenziale di tracciare i satelliti e acquisire informazioni e dati di range (ossia informazioni sulle distanze dalla Terra) di ciascun satellite; i dati acquisiti li inviano alle **2 stazioni di controllo** la cui principale è la Master Control Station (MCS) che controlla e gestisce la costellazione assicurandosi della salute dei satelliti, risolve anomalie, modella gli errori degli orologi dei satelliti, calcola le orbite satellitari estremamente precise che vengono trasmesse tramite dei messaggi di navigazione, inviati per mezzo di antenne di terra, ai satelliti affinché possano percorrerle. Sono **11 le antenne di terra** che trasmettono (ma può anche ricevere) dati di navigazione e comandi ai satelliti.

---

<sup>12</sup> Standard Positioning System - Wikipedia

La stazione di controllo principale è la **Master Control Station (MCS)** con sede nella base dell'Air Force a Schriever, situata a 16 km ad est di Colorado Springs (Colorado in California); ne esiste una seconda detta "**Alternate Master Control Station**" (AMCS) sempre in California.<sup>13</sup>



Figura 17: Successione dei passaggi nel segmento di controllo (www.gps.gov)

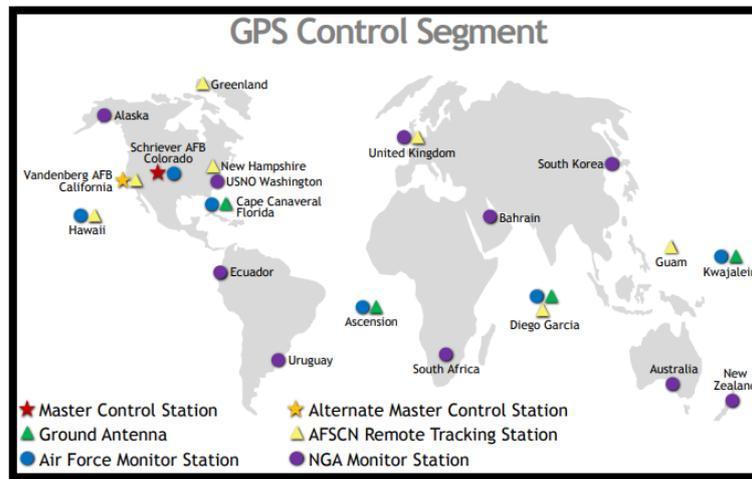


Figura 18: Stazioni ed antenne del segmento di controllo GPS (www.gps.gov)

Il **segmento spaziale** comprende da 24 a 32 satelliti della costellazione GPS. Il sito ufficiale "www.gps.gov" afferma che gli Stati Uniti si impegnano a mantenere la disponibilità di almeno 24 satelliti GPS operativi il 95% delle volte, per questo, in costellazione, generalmente ci sono più di 24 satelliti così da mantenere la copertura ogni volta che dei satelliti vengono sottoposti a manutenzione o dismessi. A luglio 2022 ci sono **31** satelliti operativi.<sup>14</sup>

La costellazione è disposta su 6 piani orbitali equidistanti ed aventi una inclinazione di  $55^\circ$  rispetto all'equatore (Figura 19).

La singola orbita, su cui viaggia il satellite, è pressoché circolare intorno alla Terra ed il satellite viaggia ad una altitudine dal livello medio del mare di circa 20200 km ovvero circa tre volte il raggio terrestre. Per queste caratteristiche di altitudine vengono chiamati **satelliti MEO** acronimo di

<sup>13</sup> www.gps.gov

<sup>14</sup> www.gps.gov/systems/gps/space

“Medium Earth Orbit”. L’orbita viene percorsa completamente dal satellite in 11 ore e 56 minuti (periodo di rotazione). Tale periodo si ottiene dalla 3° Legge di Keplero:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{GM}{r^3}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{3,986005 \cdot 10^{14}}{26500000^3}}} = 42932 \text{ sec [11h 56min]} \quad (4)$$

- GM = è il prodotto della costante di gravitazione universale moltiplicato la massa della Terra; per il GPS ci si riferisce al sistema di riferimento WGS84 in cui GM vale  $3,986005 \cdot 10^{14}$  metri<sup>3</sup>/sec<sup>2</sup>
- r = raggio dell’orbita satellitare misurata dal geocentro (26500 km = 26500000 m)

Perciò essendo il periodo di rotazione satellitare di 11 ore e 56 minuti, ogni satellite girerà attorno alla Terra due volte al giorno.

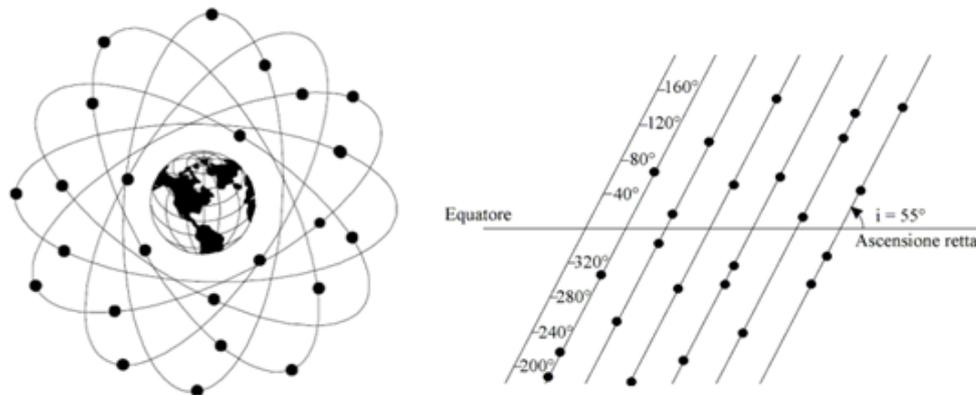


Figura 19: Costellazione satellitare e 6 piani orbitali (GPS) inclinati di 55°

Ogni satellite GPS ha a bordo quattro orologi atomici, due al cesio e due al rubidio con standard di frequenza elevati per garantire uno stabile riferimento temporale (stabilità della frequenza a lungo termine di  $10^{-12} \div 10^{-14}$ ). Gli orologi al rubidio sono meno precisi di quelli al cesio, risentono maggiormente dei disturbi ambientali e sui GPS sono usati come riserva. In compenso però sono molto economici, hanno lunga durata ed offrono una precisione di un solo ordine di grandezza inferiore a quella ottenibili con i campioni al cesio.

Un compito primario delle stazioni di controllo a terra è la continua misura e correzione degli orologi di ogni satellite, sincronizzandoli tra loro e con l’orologio all’idrogeno della Stazione MASTER del segmento di controllo che scandisce il tempo GPS e risulta più preciso (stabilità della frequenza a lungo termine pari a  $10^{-15}$ ), in modo che il tempo sia riconducibile ad una scala comune.

La costellazione garantisce la visibilità di almeno 4 satelliti per poter così calcolare il proprio posizionamento; comunque alle medie latitudini normalmente si riscontra un numero di satelliti minimo che oscilla da 6 a 10, quindi meglio dei 4 necessari.

La funzione dei satelliti in sintesi è: trasmettere informazioni agli utenti mediante segnale radio, mantenere un riferimento temporale accurato grazie agli orologi atomici di bordo, ricevere e memorizzare informazioni dal segmento di controllo, eseguire manovre e correzioni di orbita.

I satelliti sono stati lanciati in varie epoche e appartengono a diversi blocchi (o generazioni). Gradualmente nel tempo i satelliti sono stati migliorati ed è migliorata la qualità del segnale e le frequenze disponibili.

In sequenza:

*Satelliti Blocco I*: satelliti di prima generazione; sono i primi satelliti ad essere lanciati (1978-1995); comprendeva 3 piani orbitali inclinati di 63° sull' equatore. Segnale disponibile anche per uso civile;

*Satelliti Blocco II*: satelliti di seconda generazione; introduce i 6 piani orbitali inclinati a 55°. Lanciati nel '89. Introducevano restrizioni sul segnale (Select Availability);

*Satelliti Blocco IIA (Advanced)*: satelliti di seconda generazione avanzata; lanciati tra il 1990 e il 1997; essi sono stati in grado di operare con Select Availability per il comparto civile. Sono dotati di due orologi atomici al cesio e due orologi al rubidio; i satelliti potevano comunicare tra loro.

I blocchi appena citati sono totalmente dismessi. I successivi blocchi sono esposti nella figura 20. La figura riassume le caratteristiche delle generazioni attuali e future di satelliti GPS:

*Blocco IIR* ("Replenishment"= rifornimento): sono dotati di maggiore autonomia e messi in orbita tra il 1997 e il 2009; possono scambiarsi messaggi senza nessun contatto con la Terra. Sono dotati di tre orologi atomici al rubidio.

*Blocco IIR-M* ("Modernized"): simili ai satelliti del blocco IIR ma aggiungono il nuovo codice L2C per uso civile ed un nuovo codice militare M; il satellite IIR-M ha sperimentato la trasmissione in frequenza L5 che sarà adottata dai satelliti del blocco successivo;

*Blocco IIF* ("Follow-on") sono costruiti dalla Boeing<sup>15</sup> ed il primo esemplare è stato lanciato nel maggio 2010 mentre gli altri lanciati gradualmente fino al 2016; dotato del terzo segnale civile L5, hanno una durata di vita nominale di 12 anni;

*Blocco III* detto GPS III e GPS IIIIF ("Follow-on"): sono i satelliti di ultima generazione che avvantaggia l'aviazione commerciale e le applicazioni di sicurezza della vita; hanno una durata di vita nominale di 15 anni; primo lancio effettuato nel 2018 e sono destinati a sostenere il sistema GPS fino al 2030.

La costellazione GPS quindi è un mix di vecchi e nuovi satelliti. Negli ultimi anni si sono avuti periodi con massimo 32 satelliti operativi. A luglio 2022 si hanno **31 satelliti operativi**<sup>16</sup>, escluso quelli di riserva e i geostazionari.

---

<sup>15</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_di\\_posizionamento\\_globale](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_posizionamento_globale)

<sup>16</sup> <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

SATELLITI LEGACY		SATELLITI MODERNIZZATI		
BLOCCO IIIA	BLOCCO IIR	BLOCCO IIR-M	BLOCCO IIF	GPS III/IIF
0 operativi	7 operativi	7 operativi	12 operativi	4 operativi
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Codice di acquisizione grossolana (C/A) sulla frequenza L1 per utenti civili</li> <li>▪ Codice P(Y) preciso sulle frequenze L1 e L2 per utenti militari</li> <li>▪ Durata di progettazione di 7,5 anni</li> <li>▪ Lanciato nel 1990-1997</li> <li>▪ Ultimo dismesso nel 2019</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Codice C/A su L1</li> <li>▪ Codice P(Y) su L1 e L2</li> <li>▪ Monitoraggio dell'orologio di bordo</li> <li>▪ Durata di progettazione di 7,5 anni</li> <li>▪ Lanciato nel 1997-2004</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tutti i segnali legacy</li> <li>▪ 2° segnale civile su L2 (L2C)</li> <li>▪ Nuovi segnali di codice M militari per una maggiore resistenza agli inceppamenti</li> <li>▪ Livelli di potenza flessibili per segnali militari</li> <li>▪ Durata di progettazione di 7,5 anni</li> <li>▪ Lanciato nel 2005-2009</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tutti i segnali Block IIR-M</li> <li>▪ 3° segnale civile sulla frequenza L5 (L5)</li> <li>▪ Orologi atomici avanzati</li> <li>▪ Precisione, potenza del segnale e qualità migliorate</li> <li>▪ Durata di progettazione di 12 anni</li> <li>▪ Lanciato nel 2010-2016</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tutti i segnali Block IIF</li> <li>▪ 4° segnale civile su L1 (L1C)</li> <li>▪ Affidabilità, precisione e integrità del segnale migliorate</li> <li>▪ Nessuna disponibilità selettiva</li> <li>▪ Durata di progettazione di 15 anni</li> <li>▪ IIF: riflettori laser; payload di ricerca e soccorso</li> <li>▪ Primo lancio nel 2018</li> </ul>

Figura 20: "Blocchi" satelliti GPS (<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>)

**Il segmento di utilizzo:** è costituito dagli utenti finali dotati di ricevitori con antenna GPS. In generale i ricevitori si compongono di un'antenna, un microprocessore, un orologio come per esempio un oscillatore al quarzo, quindi di gran lunga meno preciso degli orologi atomici montati sui satelliti. Possono avere un display per fornire le informazioni all'utente oppure no (ricevitori esterni). Sono altresì disponibili in versione scheda OEM (Original Equipment Manufacturer) come ad esempio la scheda **ublox**. Questi sono interfacciabili mediante porta seriale o connessioni senza fili come il Bluetooth/Wi-Fi, che consentono di realizzare navigatori GPS su vari dispositivi: palmari, tablet, PC, computer portatili. Negli smartphones, grazie alle nanotecnologie, il ricevitore gps è in formato chip e l'antenna è generalmente interna.

Un ricevitore viene spesso descritto dal **numero di canali** di cui dispone, ovvero il numero di satelliti che è in grado di monitorare simultaneamente. Il numero di canali è stato incrementato progressivamente nel tempo. Tipicamente un ricevitore commerciale dispone di un numero di canali compreso tra 20 e 32 anche se sono disponibili ricevitori con un numero maggiore. Ulteriori informazioni nel capitolo "Ricevitori e stazioni permanenti".



Figura 21: A partire da sinistra: Palmare, Ricevitore esterno GPS/Glonass Bluetooth; scheda ublox; chipset GPS

Di fondamentale importanza per l'efficacia del posizionamento è la definizione di un sistema di riferimento o meglio di un **DATUM** opportuno.

Un Datum, detto anche Datum geodetico o sistema geodetico, è una struttura *teorica e convenzionale* che consente di definire la posizione dei punti sulla superficie terrestre. Un Datum geodetico comprende i seguenti punti:

- Approssimare al meglio la superficie del pianeta, in relazione agli impieghi previsti, con una superficie geometrica teorica, matematicamente trattabile (di solito è usato un *ellissoide* di rotazione) e definizione dei parametri geometrici e fisici;
- Associare alla superficie teorica matematicamente trattabile un sistema di riferimento, cartesiano o geografico, solidale alla superficie adottata, a cui vengono riferiti i punti della superficie terrestre; di solito si usa sistema cartesiano geocentrico detto ECEF= Earth-Centered Earth-Fixed.

Questo è necessario per poter affrontare matematicamente i problemi relativi al posizionamento e definire delle coordinate esatte.

Ogni costellazione ha il suo DATUM. Nello specifico il **DATUM** del GPS è costituito dall'ellissoide **WGS84** (World Geodetic System, 1984) e da un sistema di riferimento geocentrico ECEF (Earth Centered Earth Fixed).

Il sistema ECEF è definito come:

- un sistema di coordinate cartesiane geocentrico il cui punto (0,0,0) denota il centro di massa della Terra (da cui il nome "Earth-Centered") ed il sistema ruota in maniera solidale con la Terra.
- asse Z diretto verso il polo convenzionale raccomandato dallo IERS (International Earth Rotation Service);
- asse X è dato dall'intersezione del piano equatoriale ortogonale all'asse z col meridiano zero stabilito dal BIH (Bureau International de l'Heure); il meridiano zero è in sostanza il meridiano di Greenwich;
- asse Y completa la terna cartesiana destrorsa.

Oltre alle coordinate ECEF dell'ellissoide, possono utilizzarsi le coordinate geografiche dell'ellissoide  $\phi$ =longitudine,  $\lambda$ =latitudine,  $h$ =altezza ellissoidica (questa ultima da trasformare poi in quota ortometrica ossia riferita alla superficie del geoide con trasformazioni o software opportuni).

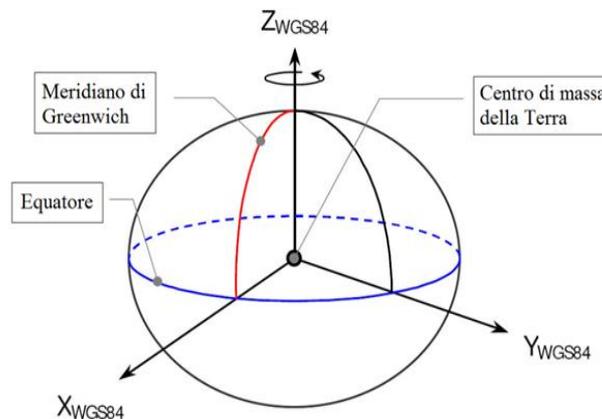


Figura 22: DATUM WGS84 - è il sistema di riferimento associato al GPS

La scala di tempo GPS è la **GPS time**, mantenuta dall'orologio atomico della Master Control Station del centro di controllo in Colorado Springs; rispetto al tempo UTC viene calcolata la discrepanza in leap second tale che i ricevitori GPS forniscano il tempo in scala UTC, ottenuta sottraendo al tempo GPS l'ammontare di leap second accumulato nel frattempo (si veda il capitolo SCALE DI TEMPO).

#### 4.1.1 IL SEGNALE GPS

Il segnale emanato dal satellite GPS trae origine dagli orologi atomici montati a bordo con elevata stabilità a lungo termine pari a  $10^{-12} \div 10^{-14}$  (ossia ogni secondo si perdono  $10^{-12} \div 10^{-14}$  secondi di precisione) i quali producono una frequenza fondamentale  $f_0 = 10,23\text{MHz}$ . Tale frequenza fondamentale genera un segnale che è composto da 3 parti:

- **COMPONENTE PORTANTE (o sinusoidale o fase)**: onda sinusoidale che può essere di 3 tipi  $\rightarrow$  L1, L2 e L5
- **COMPONENTE IMPULSIVA (o codice)**: onda quadra che modula le portanti; tale onda quadra è diversa per ogni satellite e questo permette di riconoscere il satellite che le invia. Può essere di diversi tipi: codici C/A (Coarse/Acquisition), P, W, L2C
- **COMPONENTE MESSAGGIO**: onda quadra detta anche codice D (o NAV); l'ultimo aggiornamento è il CNAV.

*Le frequenze di tutte queste componenti del segnale si ottengono dal prodotto di  $f_0$  per dei coefficienti moltiplicativi che ora si esplicheranno.*

In realtà effettivamente dal satellite parte il segnale della frequenza fondamentale, la componente codice (distinta per ogni satellite e permette di identificare il satellite che la invia) e la componente messaggio (contenente le effemeridi proprie di ogni satellite) e quindi si hanno queste 3 informazioni che partono dal satellite. Poi se si possiede un ricevitore  $L_1$  allora quel ricevitore è in grado di moltiplicare la frequenza fondamentale per il coefficiente moltiplicativo di  $L_1$  (che a breve vedremo) e così via per le altre portanti.

La lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) si calcola dal rapporto tra la velocità della luce ( $c$ ) e la frequenza della componente ossia la lunghezza d'onda dipende quindi dalla frequenza:

$$\lambda = c/f. \quad (5)$$

Per la componente portante i *coefficienti moltiplicativi* assumono i valori: 154, 120, 115 rispettivamente per L1, L2 e L5 da cui quindi si ottengono 3 onde sinusoidali dalle seguenti caratteristiche:

- **portante L1:**  $f_{L1} = f_0 \cdot 154 = 1575.42 \text{ Mhz}$   
 $\lambda_{L1} = c/f_{L1} \cong 19 \text{ cm}$
- **portante L2:**  $f_{L2} = f_0 \cdot 120 = 1227.60 \text{ Mhz}$  (6)  
 $\lambda_{L2} = c/f_{L2} \cong 24 \text{ cm}$
- **portante L5:**  $f_{L5} = f_0 \cdot 115 = 1176.45 \text{ Mhz}$   
 $\lambda_{L5} = c/f_{L5} \cong 25 \text{ cm}$

La L5 è specificatamente una banda di navigazione civile aeronautica ed è stata appositamente scelta poiché l'industria aeronautica con L5 può gestire le interferenze in modo molto più efficace rispetto

alle altre portanti, fornisce un segnale più robusto per utilizzo in situazioni critiche come l'avvicinamento di precisione per gli aeromobili. Inoltre è protetta a livello internazionale dall'Unione internazionale delle telecomunicazioni per i servizi di radionavigazione aeronautica.

Le portanti possono anche essere usate in combinazione tra loro per migliorare l'efficienza e la precisione del posizionamento a patto di avere un ricevitore multifrequenza. Infatti combinando 2 o più frequenze si eliminano cause di errori nella valutazione delle distanze satellite-ricevitore (come la rifrazione ionosferica) oppure si aumenta la velocità della stima della posizione grazie al fissaggio dell'ambiguità di fase in maniera più rapida (utile soprattutto nel posizionamento in tempo reale RTK= Real Time Kinematic).

A tal proposito, la portante L2 inizialmente era una banda destinata all'uso militare, criptata ossia utilizzabile solo dagli autorizzati al servizio, usata in combinazione alla portante L1 per avere un posizionamento migliore. Successivamente, con i satelliti del blocco IIR-M la portante L2 è stata aperta all'uso civile e quindi alcuni modelli di ricevitori GPS per uso civile in campo ingegneristico hanno la possibilità di usufruire del secondo canale L2, in combinazione con L1, permettendo così di raggiungere una precisione molto elevata (è possibile raggiungere precisione millimetrica o sub-millimetrica in post-processamento in rilievo statico, mentre centimetriche per il real time).

Per poter trasferire informazioni le onde portanti vengono modulate attraverso *codici* binari, cioè onde quadre formate da transizioni di valori +1 e -1, che apparentemente sembrano casuali ma in realtà sono generati da un algoritmo deterministico che si ripete periodicamente nel tempo. Per tale motivo sono chiamati codici **PNR** (Pseudo Random Noise).

La **componenti impulsiva o codici PRN**, permettono la misura della distanza satellite-ricevitore attraverso il tempo di propagazione del segnale dal satellite al ricevitore, misurato a partire dai codici che modulano le portanti. I codici sono formati da una sequenza di bit fino ad una determinata lunghezza, trasmessi ad una data velocità (chip rate in bit/s o Hz) e terminata la sequenza si ripetono periodicamente. Nel GPS **i codici sono i seguenti**:

- **C/A** (Course Acquisition): ha una lunghezza di 1023 bit ed è trasmesso con una frequenza  $f_{C/A} = f_0/10 = 1.023 \text{ MHz}$  da cui risulta una lunghezza d'onda  $\lambda_{C/A} = c/f_{C/A} \cong 300 \text{ m}$  e si ripete periodicamente ogni 1 ms. Il codice C/A modula la sola portante L1 (da cui il nome L1C/A) e fornisce l'identificativo del satellite; è stato il codice pionieristico e di avvio alla navigazione; probabilmente continuerà a trasmettere anche in futuro. Essendo il segnale più vecchio e consolidato è stato quello più diffuso nei ricevitori commerciali destinati alla grande massa ma di bassa precisione (precisione della posizione 5÷10m);
- **P** (Precision): lunghezza d'onda  $\lambda_P = c/f_P \cong 30 \text{ m}$ . Il codice P, riservato alle utenze **militari** ed altri utenti autorizzati, modula entrambe le portanti L1 e L2, sfasate però di  $\pi/2$ . Il gestore del sistema GPS può decidere di criptare il codice P per mezzo di un codice W(t) noto ai soli utenti autorizzati; la somma dei codici P e W(t) viene chiamato codice Y = codice criptato e quando è attiva la criptazione sulle portanti L1 e L2 si ha il codice Y. Questa procedura prende il nome di **Anti Spoofing** (A-S). L'A-S è stato attivato dal 31 gennaio 1994;
- **L2C**: Codice civile che modula solo la portante L2. A differenza del codice C/A, ha due distinte componenti PRN, trasmesse entrambe alla frequenza  $f_{L2C} = f_0/20 = 0,5115 \text{ Mhz}$  e sono:

- ✓ Civilian Moderate length (CM) di lunghezza 10230 bit e si ripete ogni 20ms; il codice sarà dunque L2C(CM); è un segnale di lunghezza moderata.
- ✓ Civilian Long length (CL) di lunghezza 767250 bit e si ripete ogni 1500 ms; il codice sarà dunque L2C(CL); è un segnale di lunghezza elevata.

Il codice L2C è trasmesso solo sulla portante L2 e rispetto agli altri codici è migliorata l'accuratezza di navigazione, la velocità d'acquisizione e la robustezza alle interferenze di segnale.

- Di attuale creazione è il segnale civile **L1C**. E' un segnale di codice trasmesso solo sulla portante L1 e rappresenta un ammodernamento del segnale civile L1C/A. Si rende diverso da L1C/A perché L1C è stato progettato specificatamente per consentire l'interoperabilità tra il GPS e altri sistemi internazionali di navigazione satellitare. L'implementazione fornirà anche il codice C/A per garantire la retrocompatibilità con il classico L1C/A ma il nuovo segnale viene trasmesso ad un livello di potenza superiore per prestazioni migliorate e per un tracciamento migliore. I segnali possono essere trasmessi solo da satelliti recenti (satelliti GPS III e successivi) il primo dei quali è stato lanciato a dicembre 2018.
- **M**: è il segnale militare ed ha reso importante il processo di modernizzazione. E' stato progettato per migliorare ulteriormente la protezione nei confronti di Jamming e Spoofing (*jamming* = disturbo indotto volontariamente nel segnale radio; *spoofing* = hackeraggio del sistema e creazione di false posizioni) e l'accesso sicuro ai segnali GPS militari. Esso contiene un codice PRN di lunghezza sconosciuta trasmesse alla frequenza  $f_M = f_0/2 = 5.115 \text{ MHz}$ . Per motivi di sicurezza militare, non è possibile avere a disposizione informazioni aggiuntive.

Infine la **componente messaggio**: noto anche come codice **D** o ancora come **codice Navigazione (NAV)** è sempre un codice binario composta da una sequenza +1 e -1, ha una frequenza  $f_D = f_0/204800 = 50 \text{ Hz}$ . Contiene importanti informazioni quali le effemeridi dei satelliti, lo stato di salute del satellite, l'orario della trasmissione del satellite, coefficienti per modellare gli errori degli orologi di bordo dei satelliti e coefficienti per modellare gli errori dovuti alla rifrazione ionosferica del segnale radio. In sostanza è una sorta di messaggio vero e proprio che contiene tutte le informazioni citate indispensabili per il posizionamento.

L'ultima versione del codice NAV è il **CNAV** che rappresenta il codice messaggio di ultima generazione: si ripete ogni 12 secondi ed ha una sequenza di pacchetti di 300 bit; contiene le stesse informazioni citate nel codice NAV ed in più ci sono informazioni sull'asincronismo tra le scale di tempo usate da ciascuna costellazione (*GNSS time offset*) per l'interoperabilità tra le costellazioni GNSS. Inoltre vi sono informazioni sulle correzioni differenziali SBAS (Satellite Based Augmentation System: sono satelliti geostazionari di supporto alla costellazione che permettono un miglioramento nella precisione della posizione).

La tecnologia di modulazione del segnale GPS prende il nome di **CDMA** (*Code Division Multiple Access*). Tutti i satelliti GPS emanano queste stesse frequenze e vi è un codice identificativo tipico di ogni satellite nel C/A, a differenza dei satelliti della costellazione GLONASS in cui la frequenza varia in funzione del satellite che le emana e dunque non esiste un codice identificativo e verrà trattato nella prossima sezione.

Una sintesi dei segnali di codice è riportata in tabella 2

Tabella 2: Componenti del Segnale GPS

Codice	Lungh. [bit]	Vel. trasmissione o frequenza f [Mbit/s o MHz]	ripetibilità	Rapporto con $f_0$	Modula	$\lambda=c/f$ [m]
C/A	1023	1,023	1ms	1/10	L1	300
P	$6,1871 \cdot 10^{12}$	10,23	7 giorni	1/1	L1; L2	30
L <sub>2</sub> C	10230 (CM)	0,5115	20 ms	1/20	L2	600
	767250 (CL)	0,5115	1500 ms	1/20	L2	
M	?	5,115	?	1/2	L1; L2	60
NAV	50	50 Hz	1 s	1/204800	L1; L2	$6 \cdot 10^7$
CNAV	300	25 Hz	12 s	1/409200	L1; L2	$10^6$

**Perché il GPS a volte mi mostra nel posto sbagliato?** Molte cose possono degradare la precisione del posizionamento GPS e come detto saranno analizzate nel capitolo "ERRORI". Le cause più comuni includono:

- Segnali riflessi da edifici o pareti ("multipath")
- Blocco del segnale satellitare dovuto a edifici, ponti, alberi, ecc.
- Uso in ambienti interni o sotterranei (es. gallerie)

Cause molto meno comuni possono includere:

- Interferenze radio o jamming;
- Grandi tempeste solari;
- Manutenzione/manovre satellitari che creano lacune temporanee nella copertura;
- Dispositivi progettati in modo improprio che non sono conformi alle specifiche dell'interfaccia GPS.

In molti casi, l'hardware GPS di un dispositivo funziona correttamente, ma il suo software di mappatura è difettoso e quindi risulterà di essere nel posto errato benché le coordinate di posizionamento siano corrette. Ad esempio, gli utenti sono spesso fuorviati da:

- Mappe disegnate in modo errato;
- Aziende etichettate in modo errato e altri punti di interesse non etichettati;
- Indirizzi stradali stimati in modo errato.

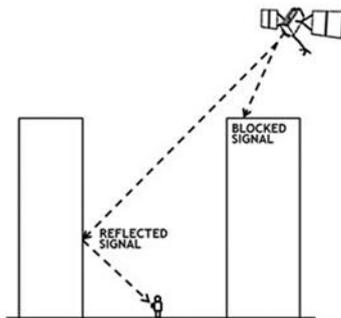


Figura 23: A sinistra degrado del segnale causa blocco o riflessione; a destra una galleria scherma le onde radio

**Il GPS militare è più preciso del GPS civile<sup>17</sup>?**

La maggior parte dei dispositivi civili di oggi, destinati ad un utenza di massa, utilizza una sola frequenza GPS, mentre i ricevitori militari ne usano due. L'utilizzo di due frequenze GPS migliora la precisione correggendo le distorsioni/errori del segnale causate dall'atmosfera terrestre e permettendo di raggiungere precisioni centimetriche. Esistono tuttavia ricevitori civili a doppia frequenza che godono della stessa precisione dei militari (o migliore) anche se il loro costo e le loro dimensioni le limitano alle applicazioni professionali. Quindi l'unico vero vantaggio del segnale militare è poter criptare il segnale che porta a due obiettivi: poter farlo ricevere solo agli utenti autorizzati e aumentare la protezione nei confronti di azioni di sabotaggio (spoofing e jamming).



Figura 24: equipaggiamento GPS militare

<sup>17</sup> <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/>

## 4.2 IL SISTEMA RUSSO GLONASS

Il sistema di navigazione, posizionamento e temporizzazione russo è il GLONASS (acronimo di GLObalnaya Navigation Sputnikovaya Sistema, tradotto è: sistema di navigazione satellitare globale) gestito dal Russian Aerospace Defence Forces. Così come il GPS statunitense, il GLONASS è nato per scopi militari e poi è stato convertito anche per ruoli civili ed è un sistema a copertura globale quindi permette il posizionamento in qualunque luogo ed ora sia in applicazioni terrestri, marine e aeronautiche. Si analizza ora la struttura fisica del sistema Glonass.

**Segmento di Controllo:** Il compito è sostanzialmente lo stesso visto per il GPS, ossia monitorare e tracciare i satelliti della costellazione GLONASS, caricare periodicamente sui satelliti le effemeridi ed i coefficienti dei modelli di correzione degli orologi satellitari. Il segmento di controllo comprende il System Control Center, il Central Synchronizer e il Phase Control Center, tutti situati a Mosca; poi ci sono diverse stazioni di monitoraggio sparse in Russia tra le più importanti San Pietroburgo e Komsomolsk-on-Amur (nella Russia orientale), in Ucraina (Ternopol), in Brasile e ancora Cuba, Antartide, e ora Nicaragua e Cina<sup>18</sup>: queste stazioni monitorano i dati inviati dai satelliti, verificandone così l'accuratezza. La prima stazione GLONASS fuori dal territorio russo è stata posta in Brasile, nella città di Brasilia, nel 2013. Come nel GPS, i dati rilevati dalle stazioni di monitoraggio sono inviati alla stazione di controllo principale dove vengono elaborati, eventualmente corretti e rinviati ai rispettivi satelliti per mezzo di antenne di terra.

**Segmento Spaziale:** il numero standard è 24 satelliti pienamente operativi, ma può variare a seconda se ci siano veicoli in manutenzione oppure in fase di test. Volano in orbita MEO (medium earth orbit) a circa 19100 km dalla superficie terrestre, disposti su 3 piani orbitali inclinati di 64,8° rispetto l'equatore (mentre il GPS ha 6 piani orbitali). Il periodo di ogni satellite è approssimativamente di 11 ore, 15 minuti e 44 secondi. I satelliti a bordo montano degli orologi al cesio e rubidio (stabilità a lungo termine di  $10^{-12} \div 10^{-14}$ ) sincronizzati periodicamente con l'orologio all'idrogeno del Central Synchronizer (CS) Time del segmento di controllo che è ancora più accurato (stabilità a lungo termine di  $10^{-15}$ ). Il posizionamento dei satelliti permette di averne sempre almeno 5 visibili dal proprio dispositivo ricevente.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> <https://www.fastweb.it/fastweb-plus/digital-magazine/come-funziona-glonass-l-alternativa-russa-al-gps/>

<sup>19</sup> [www.glonass-iac.ru/en/index.php](http://www.glonass-iac.ru/en/index.php)

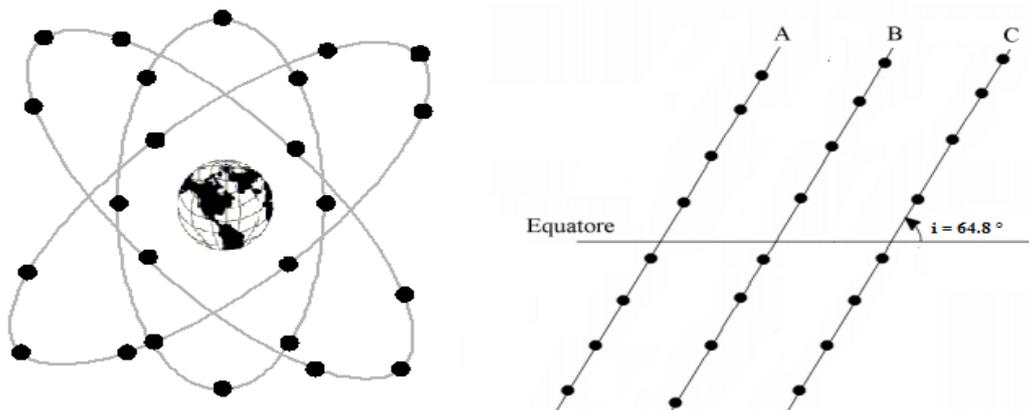


Figura 25: Piani orbitali satelliti GLONASS

Al 21/07/2022 risultano, dal sito ufficiale GLONASS<sup>20</sup>, 26 **satelliti** totali in costellazione, di cui **funzionanti 22** mentre 3 sono in stato di manutenzione e 1 in fase di messa in servizio. Ciò permette un'ottima copertura paragonabile al sistema americano GPS. Così come il GPS, questa configurazione consente un posizionamento con copertura continua e globale, ma rispetto alla costellazione GPS i satelliti GLONASS garantiscono una migliore copertura nelle regioni polari settentrionale e meridionale, nelle quali il segnale GPS presenta una cattiva ricezione.

Così come visto per il GPS anche per il GLONASS possiamo individuare diversi blocchi o generazioni di satelliti e ciascun blocco è stato lanciato in un periodo temporale differente. Dal sito ufficiale russo (<https://www.glonass-iac.ru>) si riportano i vari blocchi:

- Satelliti del primo blocco (1982-2005): vita media dei satelliti varia dai 3 a 4,5 anni; stabilità della frequenza degli orologi di bordo di  $5 \cdot 10^{-13}$ . Attualmente disattivati.
- Satelliti del blocco M (2003-2016): vita media dei satelliti di 7 anni ed orologi a bordo con stabilità della frequenza di  $1 \cdot 10^{-13}$ . Apertura di un 2° segnale civile.
- Satelliti del blocco K (2011-2018): presentano una vita media di 10 anni ed hanno migliorato le effemeridi. Apertura di un 3° segnale civile a partire dal satellite lanciato il 7 aprile 2011.
- Satelliti del blocco K2 (2017 – ad oggi 2022): rappresenta l'ultima generazione di satelliti con previsione di vita di 10 anni. Primo lancio programmato per il 30 settembre 2022.<sup>21</sup>

Oltre alle loro funzioni principali, i satelliti Glonass-K e K2 trasmetteranno informazioni al sistema internazionale di ricerca e soccorso "Cospas-Sarsat".

La scala di tempo che utilizza GLONASS è quella sovietica **UTC(SU)** (Universal Time Coordinate Soviet Union) mantenuta da un orologio all'idrogeno del Central Synchronizer (CS) Time e vale:  $UTC(SU) = UTC + 3$  ore

Per cui l'orologio dei satelliti GLONASS è periodicamente comparata e sincronizzata con l'orologio atomico del CS time (Central Synchronizer) del segmento di controllo e le correzioni vengono calcolate rispetto alla scala UTC(SU) (Universal Time Coordinated Soviet Union).

<sup>20</sup> [www.glonass-iac.ru/en/sostavOG](http://www.glonass-iac.ru/en/sostavOG)

<sup>21</sup> <https://www.gpsworld.com/launch-of-first-glonass-k2-satellite-postponed-until-2022/>

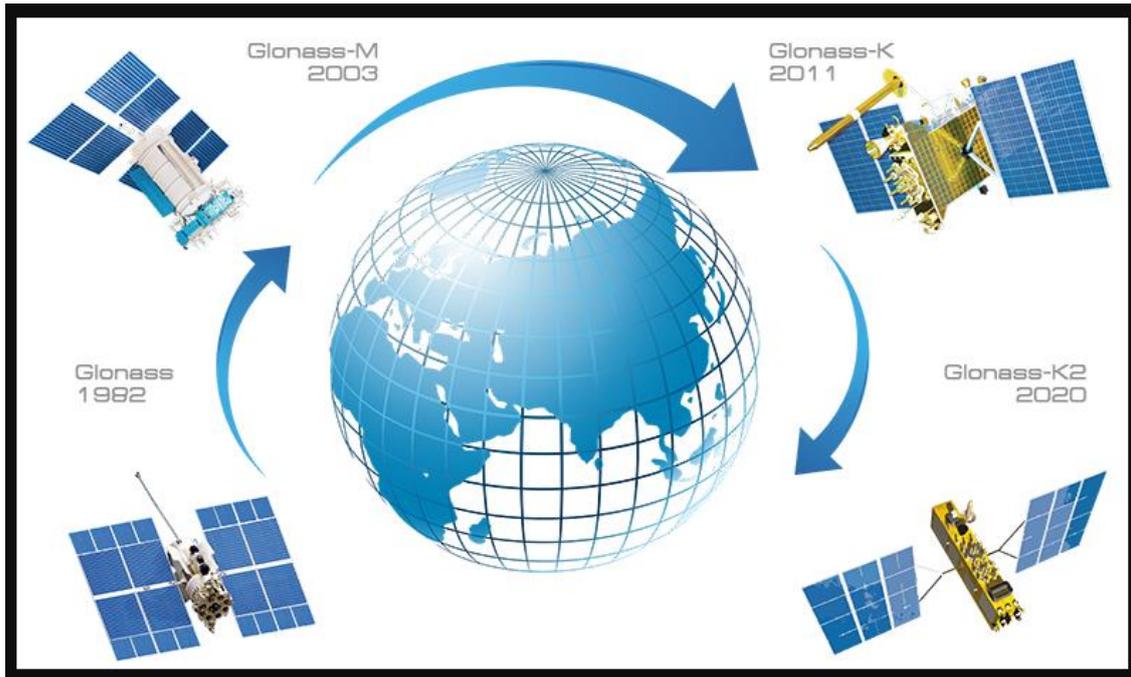


Figura 26: Evoluzione satelliti GLONASS (fonte: [glonass-iac.ru/en/sostavOG](http://glonass-iac.ru/en/sostavOG))

Il **segmento utente** è semplicemente costituito dagli utenti dotati di ricevitore; come per il GPS, si distingue tra ricevitori che utilizzano solo il segnale civile libero ed aperto a tutti e ricevitori che possano leggere anche il segnale criptato, quindi solo per autorizzati.

Il **DATUM** o sistema di riferimento usato dal Glonass è **PZ90** (Parametry Zemli, 1990) detto anche PE90 (Parameter Earth, 1990): la terna cartesiana di riferimento è ECEF.

Quindi la posizione dei satelliti e del ricevitore è riferita al Datum PZ90. L'ultimo aggiornamento del PZ90 è la versione **PZ90.11** redatta nel 2020: è abbastanza simile al WGS84 e comunque sono noti i fattori per passare tra i due sistemi di riferimento WGS84 e PZ90.11) ed è coerente col sistema globale internazionale ITRS (International Terrestrial Reference System = sistema di riferimento terrestre internazionale).

### 4.2.1 IL SEGNALE GLONASS

La comunicazione tra satelliti e utenti avviene attraverso un segnale radio composto di componenti portanti sinusoidali modulate da codici.

Ogni satellite della costellazione GLONASS trasmette un segnale radio che si origina da una frequenza fondamentale  $f_0 = 5.0$  MHz

Dalla frequenza fondamentale si origina la **componente portante** del segnale, costituita da 3 onde sinusoidali o fasi:

- L1 (1602MHz),
- L2 (1246 MHz)
- L3 (1202 MHz) disponibile a partire dai satelliti del blocco K.

Le portanti sono modulate da codici binari, come già visto nel GPS, solo che la tecnologia di modulazione del segnale GLONASS è differente dal GPS e prende il nome di **FDMA**=Frequency Division Multiple Access (accesso multiplo a divisione di frequenza), mentre nel GPS è CDMA.

Inoltre, a differenza dei satelliti GPS che emettono segnale sempre usando la stessa famiglia di frequenze indifferentemente dal satellite che le invia e per identificarsi si servono di un codice identificativo inviato nel messaggio C/A, nel GLONASS **ogni satellite è contrassegnato da un numero di canale K** ed in funzione di esso si determina la frequenza con cui trasmette il segnale:

- $f_1 = 1602 + 0.5625 \cdot K$  [MHz];
- $f_2 = 1246 + 0.4375 \cdot K$  [MHz];
- $f_3 = 1201.5 + 0.421875 \cdot K$  [MHz]

Per cui la banda di frequenza del segnale non sarà quella della portante ma sarà una **sottobanda** (funzione di K) che, come si deduce dai calcoli, occupa, in frequenza, una banda più piccola. Quindi ogni satellite GLONASS trasmette su una particolare frequenza e questo gli evita di dover trasmettere un proprio codice di identificazione.

Tutti i satelliti Glonass lanciati dopo il 2005 usano numeri K compresi tra -7 e +8; ogni satellite ha il suo K e nel codice messaggio che invia è contenuto anche il valore di K. Sebbene da -7 a +8 ci sono solo 15 numeri mentre i satelliti sono 24, non sussistono problemi poiché satelliti con eguale numero di canale K sono diametralmente opposti (o si vedrà uno o si vedrà l'altro) in modo da non essere tracciati contemporaneamente dallo stesso ricevitore.

Le lunghezze d'onda  $\lambda = c/f$  si avvicinano ai valori delle lunghezze d'onda visti nel GPS ( $\lambda_1 \approx 19$  cm;  $\lambda_2 \approx 24$  cm;  $\lambda_3 \approx 25$  cm).

L1 ed L2 sono modulate dalla **componente impulsiva** del segnale, o codice (onda quadra), che è il **PR ranging code**: è un pseudo random code russo ed è quindi una sequenza di codici binari, +1 e -1, trasmessa a 511 Kbit/sec che si ripete periodicamente ogni 1ms.

**La componente messaggio** è una onda quadra che modula solo L1 ed L2. E' un codice trasmesso a 50 bit/sec; contiene sia informazioni immediate che non immediate. Le informazioni immediate consistono nel: numero di satelliti, la differenza tra il tempo dell'orologio a bordo del satellite e la scala GLONASS UTC(SU) mantenuta quest'ultima dall'orologio atomico all'idrogeno del Central Synchronizer (CS) Time, il posizionamento accurato del satellite; mentre i messaggi di navigazione non immediati contengono gli almanacchi della costellazione (una serie di parametri orbitali relativi a tutti i satelliti da cui è possibile stimare l'orbita quotidiana di ciascun satellite sebbene in maniera

più approssimata rispetto alle effemeridi ) e indicazioni sullo stato di salute dei satelliti. La tecnologia di modulazione delle sottoportanti è FDMA.

Per modulare L3 venne avviata una sperimentazione di modulazione di tipo CDMA con alcuni dei satelliti del blocco M (2003-2016), in modo da armonizzare il sistema Glonass con i sistemi GPS e Galileo. Con i satelliti del blocco K tale tecnologia è stata applicata anche alla portante L2 ed infine sui satelliti di ultima generazione (K2) il protocollo CDMA è previsto applicato su tutte e tre le portanti (quindi L1, L2 ed L3) assieme alla modulazione FDMA di L1 ed L2: si è introdotta la tecnologia di modulazione CDMA per semplificare l'hardware dei ricevitori così che potranno leggere segnali Glonass compatibili col Gps e Galileo grazie al codice CDMA, in funzione di una migliore interoperabilità dei diversi sistemi di posizionamento.

Si visiti il sito <https://www.glonass-iac.ru/guide/glonass.php#og>) per maggiori dettagli sulle caratteristiche dei satelliti e dei segnali trasmessi.

#### 4.2.2 LA DIFFERENZA TRA GLONASS e GPS

Da un lato ci sono le differenze legate alla **composizione della costellazione**, dall'altro ai **sistemi di comunicazione** utilizzati dai satelliti. Nel dettaglio: il sistema GPS si compone di almeno 24 satelliti disposti su sei orbite differenti quindi su ogni orbita si trovano quattro satelliti che compiono la rivoluzione attorno alla Terra in circa 12 ore. Il sistema GLONASS, a regime, si comporrà di almeno 24 satelliti, disposti però su sole tre orbite: su ognuna di esse ruoteranno 8 satelliti in poco più di 11 ore. Ciò avrà ripercussioni sulla precisione delle rilevazioni: nel caso in cui il proprio navigatore satellitare funzioni con il solo GLONASS, infatti, potrebbe avere maggiori difficoltà ad agganciare il segnale e localizzare l'utente, per il minor numero di orbite satellitari.

Il GLONASS non presenta vantaggi significativi rispetto al GPS, tranne per una migliore copertura delle zone polari settentrionali e meridionali. Piuttosto, può essere definito come un sistema alternativo o complementare al GPS. Solitamente la sola rete GPS è in grado di garantire un posizionamento efficiente e sufficientemente preciso nella gran parte dei casi. Qualora il segnale GPS sia difficile da raggiungere o fornisca dettagli poco precisi entra in funzione il posizionamento GLONASS che può garantire un fissaggio dell'ambiguità di fase più veloce ed una maggiore precisione in aree poco battute dal GPS.

La maggiore differenza però si ha a livello comunicativo: mentre i satelliti GPS utilizzano la stessa frequenza radio ma differenti codici identificativi, i satelliti GLONASS utilizzano differenti bande di frequenza radio ognuna caratteristica di ogni satellite ma non hanno codice identificativo. La gran parte dei navigatori satellitari e degli altri dispositivi mobili oggi in commercio sono dotati sia di un chip GPS sia di un chip GLONASS: la stima della posizione sarà più precisa, potendo basarsi su di un network di 56 satelliti anziché 32 o 24 (supponendo GPS e GLONASS a pieno regime).

Ultimamente è presente in realtà anche il chip GALILEO e BEIDOU.

### 4.3 IL SISTEMA EUROPEO GALILEO

Galileo è il sistema globale di navigazione satellitare (GNSS) dell'Unione Europea. Come gli altri sistemi globali, Galileo fornisce segnali radio per scopi di posizione, navigazione e temporizzazione. E' un'iniziativa condivisa tra la Commissione Europea, l'Agenzia dell'UE per il Programma Spaziale (EUSPA) e l'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Galileo è il primo sistema di posizionamento e navigazione europeo, avviato ufficialmente nel 2003; fornisce un servizio affidabile e ad alta precisione, nato per scopi civili-commerciali, indipendente ma allo stesso tempo interoperabile con le altre costellazioni, soprattutto col Gps perché in origine Galileo fungeva da sistema di augmentation (potenziamento) del segnale Gps, poi è divenuto indipendente.

Il **segmento spaziale** prevede una costellazione completa di 27 satelliti MEO (altitudine media 24000 km) più 3 di riserva e comunque almeno 24 satelliti sempre operativi, disposti su 3 piani orbitali, inclinati di 56° rispetto al piano equatoriale e garantisce nelle maggior parte delle posizioni da 6 a 8 satelliti sempre visibili. Il semiasse dell'orbita misura 29601,297 km dal geocentro.<sup>22</sup>

Lo stato attuale della costellazione, a luglio 2022, è di **21 satelliti operativi**, 1 in fase di messa in servizio ossia deve completare la fase di test in orbita e 6 non utilizzabili (fuori uso).<sup>23</sup>

Il **segmento di controllo** di GALILEO comprende

- il segmento di controllo di terra “Ground Control Segment (GCS)”, che si occupa delle operazioni spaziali dei satelliti in orbita;
- il segmento di missione a terra “Ground Mission Segment (GMS)” responsabile della generazione, diffusione e del monitoraggio globale dei segnali di navigazione, posizionamento e tempo.

Il segmento di controllo include la seguente infrastruttura:

- 2 centri di controllo GCC (Galileo Control Centres) situati rispettivamente in Italia (Fiumicino) e in Germania (Oberpfaffenhofen);
- Una rete mondiale di 40 stazioni terrestri GSS (Galileo Sensor Station) che raccoglie e trasmette in tempo reale misure e dati ai GCC;
- Da 10 stazioni ULS (Up-Link Station) per la trasmissione dei dati verso la costellazione;
- Una rete mondiale di 6 stazioni di telemetria, tracciamento e controllo (stazioni TTC) che raccolgono e inoltrano i dati di telemetria generati dai satelliti Galileo, e distribuiscono i comandi di controllo necessari per mantenere i satelliti Galileo e la costellazione in condizioni operative nominali;
- 1 European GNSS service center (GSC) a Madrid, dedicato all'interfaccia con gli utenti;
- 1 Galileo Integrated Logistic Support (ILS) Centre, a Transinne, Belgio;
- 2 Galileo Security Monitoring Centre (GSMC);
- 1 Geodetic Reference Service Provider (GRSP);
- 1 Time Service Provider (TSP);
- 1 Galileo Reference Centre (GRC).

<sup>22</sup> “Dal GPS al GNSS”, del Professore Alberto Cina, pagina 24, edizione 2014

<sup>23</sup> <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>

Tutti gli impianti sono interconnessi tra loro attraverso una rete di comunicazione.<sup>24</sup>

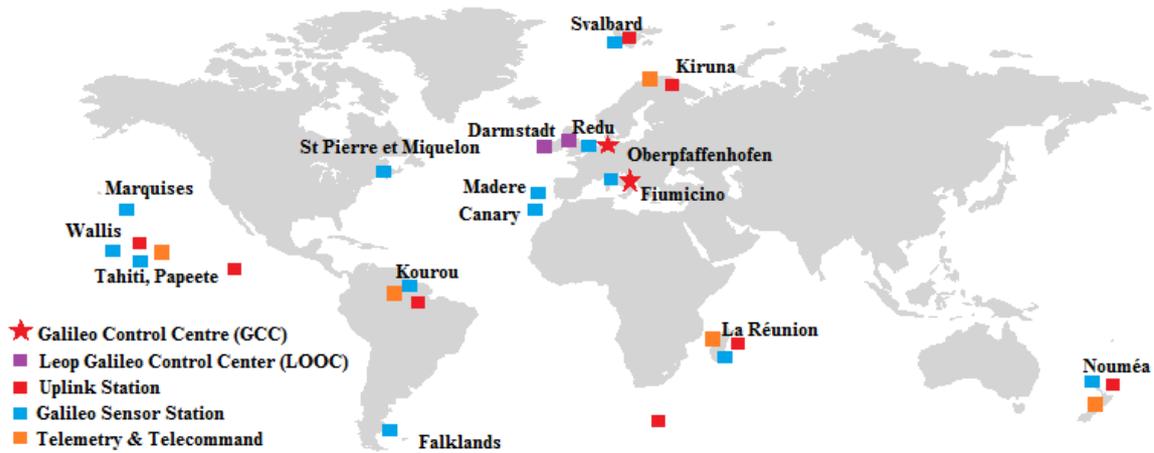


Figura 27: Mappa del Segmento di controllo di Galileo (fonte: System | European GNSS Service Centre (gsc-europa.eu))

Il *segmento utente* è costituito dagli utenti dotati di ricevitore. Essi potranno utilizzare i servizi introdotti dal GALILEO. Sono previsti ricevitori GNSS in grado di lavorare contemporaneamente con più costellazioni (GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU+ QZSS) capaci quindi di sfruttare in pieno l'interoperabilità dei sistemi ottenendo delle prestazioni migliori rispetto a quelle ottenibili tramite l'uso di un singolo sistema.

GALILEO ha un proprio **datum**, chiamato **GTRF** (Galileo Terrestrial Reference Frame) e ad esso sono riferite le posizioni dei satelliti calcolabili dalle effemeridi. Esso è realizzato dal consorzio GGSP (Galileo Geodetic Service Provider protoType)<sup>25</sup> e comprende stazioni permanenti Galileo (GSS - Galileo Sensor Station) ed una selezione di stazioni permanenti GNSS della rete internazionale IGS (International GNSS Service for Geodynamics). L'IGS, organismo nato il primo gennaio 1994, contribuisce alla realizzazione dei sistemi di riferimento. Matematicamente si può passare da un sistema di riferimento all'altro (ad esempio da GTRF a WGS84) o esistono software di conversione appositi.

**La misurazione del tempo** nel sistema GALILEO avviene mediante la scala di tempo **GST** (Galileo System Time); il GST è allineato all' International Atomic Time (TAI) e i parametri richiesti per la trasformazione in tempo UTC e GPS sono trasmessi nel messaggio di navigazione.

<sup>24</sup> [https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SDD\\_v1.1.pdf](https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf);  
<https://www.telespazio.com/it/programmes/galileo>

<sup>25</sup> <http://www.ggsp.eu>

### 4.3.1 IL SEGNALE GALILEO

Galileo trasmette diversi segnali e codici su 4 differenti frequenze di portante, che si trovano all'interno di un range 1.1GHz ÷ 1.6 GHz. Le quattro frequenze **portanti** sono E1, E5a, E5b, E6. I segnali E5a e E5b sono in realtà parte del segnale E5 e stanno nella sua larghezza di banda. Alcune frequenze di GALILEO sono in comune con quelle del GPS: la E1 Galileo coincide con L1 GPS e la E5a con la L5 così da garantire l'interoperabilità tra i due sistemi.

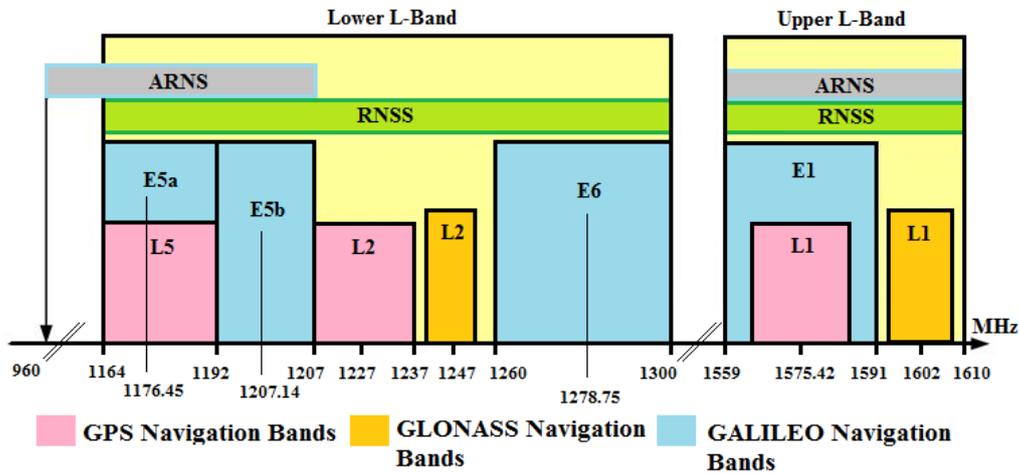


Figura 28: Frequenze segnali GPS, GLONASS, GALILEO (fonte: European GNSS (Galileo) Open Service-Signal Interface Control Document, 2010)

Le portanti sono modulate da **codici** di nota lunghezza della sequenza e noto periodo di ripetizione e composti da diverse componenti (B, C, I e Q). Una sintesi è in Tabella 3.

Tabella 3: Segnali Galileo (E= Galileo; L=GPS)

PORTANTI			CODICI			MODULAZIONE	SERVIZI GALILEO
Banda	Frequenza [Mhz]	fo*	Componente	Periodo [ms]	Lunghezza [chips]		
E1 (L1)	1575.420	154	E1-B	4	4092	CBOC	OS, PRS
			E1-C	100	4092		
E6	1278.750	125	E6-B			AltBOC	CS, PRS
E5	1191.795	120					CS
E5a (L5)	1176.450	115	E5a-I	20	10230	AltBOC	OS
			E5a-Q	100	10230		
E5b	1207.140	118	E5b-I	4	10230	AltBOC	OS,CS
			E5b-Q	100	10230		

La politica europea è stata subito orientata alla massima compatibilità con il GPS, infatti i tipi di modulazione usati rendono i due sistemi compatibili ed il fatto che la frequenza di L1 e L5 del GPS sia la stessa di E1 ed E5a dà la possibilità all'utente di accedere ad entrambi con un minimo incremento della complessità e di conseguenza dei costi del ricevitore. Il programma di posizionamento satellitare europeo prevede anche diversi accordi con Cina e Giappone e i rispettivi sistemi di posizionamento.

Nell'accordo tra Galileo e Glonass è sancito l'uso comune delle bande E5b e la banda Glonass di nuova generazione L3, in modo da consentire una maggiore interoperabilità tra i due sistemi.

Il sistema Galileo, indipendentemente dagli altri sistemi di navigazione, fornirà agli utenti **servizi** ad alte prestazioni in tutto il mondo di cui<sup>26</sup>:

- **Servizio Aperto (OS, Open Service):** servizio base di navigazione posizionamento e temporizzazione, aperto e gratuito per tutti. Precisione inferiore ai **4 metri orizzontalmente e 8 metri verticalmente** in posizionamento assoluto. OS non offre il servizio di integrità (ossia il servizio che informa l'utilizzatore sul numero di satelliti disponibili, sull'efficacia e affidabilità del posizionamento ricevuto e su eventuali disservizi ed anomalie) tranne che per il servizio di sicurezza SoL.
- **Servizio regolamentato da istituzioni pubbliche (PRS, Public Regulated Service):** ad accesso autorizzato, è destinato agli utenti governativi e per applicazioni sensibili che richiedono un alto livello di continuità di servizio.
- **Servizio di alta precisione (HAS, High Accuracy Service):** servizio complementare all'OS, aperto a tutti gratuitamente. Fornisce, grazie ad un segnale di navigazione aggiuntivo e in una diversa banda di frequenza, un servizio di elevata precisione, permettendo agli utenti di raggiungere livelli del sub-metro: dal sito [www.euspa.europa.eu](http://www.euspa.europa.eu) risulta che la precisione tipica del 95% in orizzontale dovrebbe essere inferiore a 20 cm e il 95% verticale dovrebbe essere inferiore a 40 cm.
- **Servizio Commerciale (CS, Commercial Authentication Service):** un servizio complementare all'OS, destinato per utenti professionali autorizzati per un'elaborazione dati più veloce e una maggiore precisione. I segnali sono criptati.
- **Servizio di Ricerca e Recupero (SAR, Search and Rescue service)** è il contributo dell'Europa al sistema internazionale COSPAS-SARSAT, il sistema internazionale di ricerca e salvataggio via satellite. Galileo include anche un utilissimo canale di ritorno per la conferma della segnalazione di emergenza: i satelliti di Galileo potranno ricevere segnali di emergenza emessi da navi, aerei e singoli individui e trasmetterli ai centri di soccorso nazionali; un centro di recupero sarà così in grado di conoscere la localizzazione di un incidente;
- **Servizio di Sicurezza (SoL = Safety of Life Service)** migliora il servizio OS avvertendo tempestivamente gli utenti quando l'OS non raggiunge certi margini di precisione o di continuità (integrità). E' utilizzato per applicazioni in cui è in gioco la vita umana e che richiedono informazioni di integrità per la ricerca e salvataggio nonché per la localizzazione delle emergenze e l'avvio delle operazioni di salvataggio. Il loro scopo principale è la robustezza contro disturbi e il rilevamento affidabile dei problemi entro pochi secondi.

I segnali di navigazione Galileo forniscono una buona copertura anche a latitudini fino a 75 gradi nord, che corrisponde a Capo Nord della Norvegia - la punta più settentrionale dell'Europa - e oltre.

<sup>26</sup> <https://www.telespazio.com/it/programmes/galileo>; [https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SDD\\_v1.1.pdf](https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf)

## 4.4 IL SISTEMA CINESE BEIDOU

Il sistema di navigazione satellitare cinese **BeiDou System**, abbreviato **BDS**, dalla sua nascita nel 1994 ad oggi ha avuto 3 fasi: BeiDou1, BeiDou2, BeiDou3. Il suo segmento spaziale attuale è una costellazione ibrida composta da satelliti su tre tipi di orbite, a diverse altezze e, rispetto ad altri sistemi satellitari, BeiDou (BDS) gestisce più satelliti in orbite alte per offrire migliori capacità anti-schermatura al segnale e garantire posizionamento più efficace nei canyon urbani. Si ripercorrono le varie fasi di crescita di BeiDou.



Figura 29: Canyon urbano in Singapore (Cina)

### I° fase → sperimentale (annunciato: 1994 - ultimo satellite: 2004) BeiDou-1.

Il primo sistema BeiDou è un sistema di posizionamento satellitare a livello sperimentale per testare il sistema; ufficialmente chiamato “BeiDou Satellite Navigation Experimental System” e noto anche come BeiDou-1, a copertura su scala regionale **principalmente per gli utenti in Cina**, è stato dismesso alla fine del 2012.

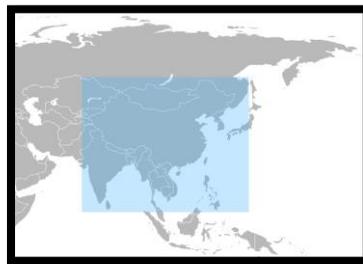


Figura 30: Area di copertura di BeiDou-1

### II° fase → copertura locale (annunciato: 2004 – ultimo satellite: 2012); BeiDou-2.

Nel 2004 la Cina annuncia il sistema BeiDou di seconda generazione che avrebbe offerto un servizio aperto a tutti. La seconda generazione del sistema è ufficialmente chiamata BeiDou Navigation Satellite System (BDS), nota anche come **COMPASS** o BeiDou-2. BeiDou-2 non è un'estensione del vecchio BeiDou-1, ma piuttosto lo sostituisce completamente. Primo satellite lanciato nel 2007. Completato a dicembre 2012 si hanno 14 satelliti BeiDou-2 di cui:

- 5 satelliti GEO (Geosynchronous Earth Orbit) a 35786 km dalla superficie terrestre.
- 4 satelliti MEO (Medium Earth Orbit) ad un'altezza di 21528 km dalla superficie terrestre, su 3 piani orbitali inclinati di 55° rispetto l'equatore con periodo di rotazione di 12ore e 53minuti.
- 5 satelliti IGSO (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit) ad un'altezza di 35786 km dalla superficie terrestre, in 3 piani orbitali inclinati di 55° rispetto all'equatore; son questi i satelliti

ad orbita alta: il loro scopo è permettere un posizionamento anche in presenza di edifici o ostacoli.

Dal 27 dicembre 2011 BeiDou-2/COMPASS ha iniziato a fornire gratuitamente dati di navigazione, posizionamento e temporizzazione alla Cina e all'area limitrofa (**regione Asia-Pacifico**). Questi satelliti sono ancora in funzione attualmente (2022).

BeiDou-2 è basato su simili concetti di posizionamento del GPS, GLONASS e GALILEO. Il sistema BeiDou-2 dal 2012 poteva fornire dati di posizionamento.

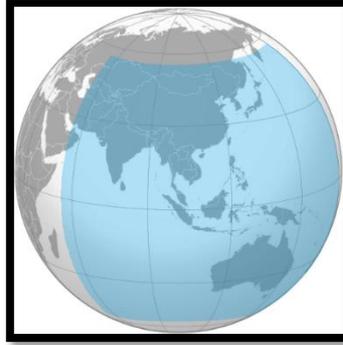


Figura 31: Area di copertura di BeiDou-2 → tra la longitudine 55°E e 180° E e tra la latitudine 55° S e 55° N.

### III° fase → copertura globale (annunciato: 2009- ultimo satellite: 2020); BeiDou-3.

Nel 2009 viene annunciata la creazione di un sistema di 3° generazione chiamato BeiDou-3 con l'obiettivo di garantire una copertura globale del servizio con 35 satelliti. Non sostituisce BeiDou-2 ma si aggiunge ad esso. Il primo satellite BDS-3 è stato lanciato il 30 marzo 2015. Il 27 dicembre 2018, il sistema di navigazione satellitare BeiDou ha iniziato a fornire servizi globali. Il trentesimo ed ultimo satellite del BDS-3 è stato lanciato in orbita il 23/6/20<sup>27</sup>. Quindi non più 35 satelliti previsti ma solo **30**.

Allo stato attuale (2022) il sistema satellitare BeiDou-3 è composto da 30 satelliti, di cui 3 in orbita geostazionaria (GEO), 24 in orbita terrestre media (MEO) e 3 in orbita geosincrona inclinata alta (IGSO) per ovviare ai problemi dei canyon urbani. La copertura del servizio di posizionamento di BeiDou-3 è globale<sup>28</sup>.

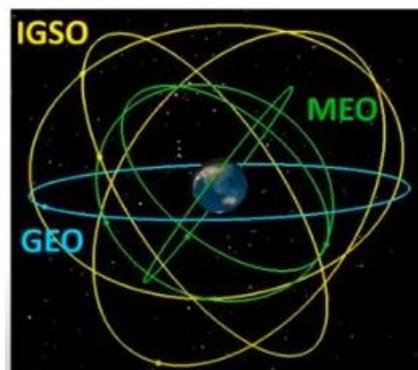


Figura 32: Le 3 tipologie di orbite di BeiDou

<sup>27</sup> Cina: completato il sistema di navigazione satellitare Bds - Dalla Cina - ANSA

<sup>28</sup> 北斗卫星导航系统 (beidou.gov.cn)

BDS-3 fornisce vari servizi, tra cui posizionamento, navigazione, temporizzazione, comunicazione globale di messaggi brevi, servizi di ricerca e salvataggio internazionali per utenti globali (SAR=International Search and Rescue Service), nonché servizi di potenziamento satellitare (BDSBAS), potenziamento delle stazioni di terra (GAS) e posizionamento preciso del punto (PPP).

Il sistema offre differenti frequenze di segnali per resistere alle interferenze o diminuire gli errori.

Per il 2035 c'è l'obiettivo di portare il sistema ad una maggiore onnipresenza, integrazione ed intelligenza. Quindi attualmente è in fase di espansione. Dal sito ufficiale<sup>29</sup>, cliccando su "informazioni satellitari del BDS" è possibile scaricare un file in cui ci sono informazioni sui satelliti in orbita. Al 21 giugno 2022 vi erano **44 satelliti** di cui 30 del BDS-3 e 14 del BDS-2. Ciascun Satellite è distinto dalla lettera G se geostazionario (GEO), M se a media orbita (MEO) ed I se geosincrono alto (IGSO). Una conferma ulteriore si ha dal documento ufficiale relativo alle effemeridi.<sup>30</sup>

Il livello standard del servizio di posizionamento BeiDou stand-alone, aggiornato al 2021, garantisce una precisione minore o uguale a **9 metri in planimetria**, mentre minore o uguale di **10 metri in altimetria**.

#### 4.4.1 FREQUENZE BEIDOU

##### Frequenze BeiDou-2

BeiDou-2/Compass trasmette in 3 bande portanti **B1, B2 e B3** corrispondenti alle frequenze E2, E5B ed E6 di Galileo (e quindi Gps dato che galileo è compatibile con Gps). In ogni banda di frequenza sono stati rilevati due sotto-segnali coerenti con uno sfasamento di 90° indicati come "I" e "Q". Le componenti "I" hanno codici più brevi e sono destinati al servizio aperto (Open Service (OS)). Le componenti "Q" hanno codici molto più lunghi, sono più resistenti alle interferenze e sono destinati al servizio autorizzato. Le portanti B saranno centrate sulle frequenze riportate di seguito e la **tecnologia di modulazione è QPSK** (Quadrature Phase Shift Keying).

B1/E2: frequenza 1561.098 MHz; Modulazione QPSK; Servizio: Aperto ed Autorizzato

B2/E5b: frequenza 1207.14 MHz; Modulazione QPSK; Servizio: Aperto ed Autorizzato

B3/E6: frequenza 1268.52 MHz; Modulazione QPSK; Servizio: Autorizzato

##### Frequenza BeiDou-3

Utilizza i seguenti **segnali aperti a tutti: B1C, B2a, B2b-I, B1I e B3I** trasmessi da BeiDou per determinare la posizione, la velocità e l'ora dell'utente. Attualmente sono forniti congiuntamente dalla costellazione BDS-2 e BDS-3.<sup>31</sup>

Nello specifico i cinque segnali nello spazio sono: il segnale **B1C**: con la frequenza centrale a 1575,42 MHz, il segnale **B2a** con la frequenza centrale a 1176,45 MHz, il segnale **B2b** con la frequenza centrale a 1207,14, il segnale **B1I** con la frequenza centrale a 1561,098 MHz ed il segnale **B3I** con la frequenza centrale a 1268,52 MHz.

<sup>29</sup> <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/>

<sup>30</sup> <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Ephemeris/>

<sup>31</sup> <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110/P020211014595952404052.pdf>

Un riepilogo delle frequenze è riportato nella tabella 4; si riportano negli slot grigi anche i segnali soggetti ad autorizzazione<sup>32</sup>. Le caratteristiche dei segnali "I" su B1 e B2 sono generalmente simili ai codici civili del GPS (L1-CA e L2C) ma i segnali BeiDou hanno una potenza leggermente maggiore.

Tabella 4: Frequenze BeiDou2-BeiDou3

Segnale BeiDou	B1C	B1a	B1I	A12	B2a	B2B	B2Q	B3I	A32
Segnale Galileo	E1-I	E1-Q	E2-I	E2-Q	E5A	E5B-I	E5B-Q	E6-I	E6-Q
Tipo di accesso	Aperto	Autorizzato	Aperto	Autorizzato	Aperto	Aperto	Autorizzato	Aperto	Autorizzato
Modulazione	B1C_d→BOC	BOC	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK	BPSK
	B1C_p→QMBOC								
Frequenza portante (MHz)	1575,42	1575,42	1561,09	1561,09	1176,45	1207,14	1207,14	1268,52	1268,52

**Segmento di controllo terrestre**<sup>33</sup>: è responsabile per il controllo e le operazioni del sistema BeiDou. Consiste in avere delle stazioni di controllo master (MCS=master control station), stazioni di sincronizzazione del tempo (TS/US = time synchronization/upload stations) e stazioni di monitoraggio (MS). Gestisce tutto il sistema.

Le stazioni di sincronizzazione del tempo (TS/US) hanno il ruolo principale di misurare le distorsioni degli orologi satellitari, caricare e creare messaggi NAV da inviare alla MCS.

Il compito delle stazioni di misura (MS) è monitorare continuamente le rotte dei satelliti e fornire dati in real-time alla MCS.

**Il segmento di utenti BDS** è costituito dai ricevitori idonei a ricevere segnale BeiDou e/o GNSS.

**Sistema di riferimento:** il documento ufficiale<sup>34</sup> 2020 cita: “BeiDou adotta come sistema di riferimento il BeiDou Coordinate System (**BDCS**). BDCS usa gli stessi parametri dell’ellissoide di riferimento definiti dal China Geodetic Coordinate System2000 (CGCS2000) che a sua volta è conforme agli standard dell’International Earth Rotation and Reference System Service (IERS) e coerente all’ultimo International Earth Reference Framework (ITRF) e in continuo aggiornamento; è un sistema geocentrico (ECEF)”.

Dopo il 2000 venne sviluppata nel continente cinese e zone limitrofe una rete di stazioni permanenti GNSS. Tale rete è definita **CORS** = *Continuously Operating Reference Station*. Tali stazioni controllano i movimenti crostali per aggiornare il sistema di riferimento.

**Il tempo di riferimento** del sistema BeiDou è il **BDT**: “BeiDou Navigation Satellite System Time”; le informazioni temporali vengono trasmesse nel messaggio di navigazione NAV.

BeiDou prevede anche un servizio internazionale di **ricerca e soccorso (International Search and Rescue Service (SAR))**. Solo in tal caso è possibile un segnale di ritorno dal ricevitore al satellite, conforme allo standard internazionale COSPAS-SARSAT e al segnale BDS B2b.

<sup>32</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou#cite\\_note-BBC8-74](https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou#cite_note-BBC8-74)

<sup>33</sup> <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110/P020211014595952404052.pdf>

<sup>34</sup> <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202008/P020200803544811195696.pdf>; pag.3

BDS e altri sistemi di ricerca e soccorso satellitare (GPS, GLONASS, GALILEO) a orbita media formano un sistema globale di ricerca e soccorso satellitare per fornire agli utenti di tutto il mondo servizi di avviso di emergenza tramite segnale di ritorno. Il servizio SAR è fornito da sei satelliti MEO nella costellazione nominale BDS-3, detto anche MEOSAR. Il servizio MEOSAR adotta il sistema di coordinate WGS-84.

Esiste anche un servizio del sistema di potenziamento/augmentation del suolo (**Ground Augmentation System service (GAS)**). Attraverso il servizio GAS gli utenti possono ottenere servizi di posizionamento ad alta precisione in tempo reale, nonché un servizio di post-elaborazione a livello di millimetro. Le caratteristiche del servizio GAS<sup>35</sup> sono dettagliate nella tabella 5.

BDS può fornire il servizio GAS alle **aree** coperte dalle comunicazioni mobili **in Cina e nelle aree circostanti**.

Tabella 5: GAS Service Performance Standard

Service Type	Service Class	Performance Characteristics	Performance Standard	Constraints
Single Frequency Pseudo-range Augmentation Service		Horizontal Positioning Accuracy (95%)	≤1.2m	The constellations of support: BDS; Correction objects: the pseudo-range/ carrier phase measurement value of the BDS B1I signal, and carrier phase measurement value of the BDS B1I & B3I signals; Observation Conditions: Number of available valid satellites ≥6; PDOP ≤2; The elevation mask is 10° .
		Vertical Positioning Accuracy (95%)	≤2.5m	
Single Carrier Phase Augmentation Service	Real-time; Meter level	Horizontal Positioning Accuracy (95%)	≤0.8m	
		Vertical Positioning Accuracy (95%)	≤1.6m	
		Convergence Time	≤15min	
Dual Frequency Carrier Phase Augmentation Service	Real-time; Decimeter level	Horizontal Positioning Accuracy (95%)	≤0.3m	
		Vertical Positioning Accuracy (95%)	≤0.6m	
		Convergence Time	≤30min	
Dual or Multi-Frequency Carrier Phase Augmentation Service	Real-time; Centimeter-level	Horizontal Positioning Accuracy (RMS)	≤4cm	Registration is needed for user service; The constellations of support: BDS/GPS/GLONASS; Correction objects: the carrier phase measurement value of the BDS B1 I& B3I, GPS L1 & L2 & L5, GLONASS L1 & L2 signals; Observation Conditions: Number of available valid satellites ≥6; PDOP ≤2; The elevation mask is 10° .
		Vertical Positioning Accuracy (RMS)	≤8cm	
		Convergence Time	≤45s	
Relative Baseline measurement by Post-processing service	Post-processing; Millimeter-level	Horizontal Positioning Accuracy (RMS)	4mm	
		Vertical Positioning Accuracy (RMS)	8mm	

Riepilogando: il sistema BeiDou è in grado di fornire servizi di posizionamento globale con una precisione ≤ 10 metri, ma la precisione nella regione Asia-Pacifico può essere ≤ 5 metri. Entro il 2035, il governo cinese prevede che il sistema BeiDou di posizionamento, navigazione e temporizzazione (PNT= Positioning Navigation Timing) sia più ubiquo, integrato e più intelligente e di aumentare il livello di precisione di almeno il doppio.

<sup>35</sup> <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110/P020211014595952404052.pdf>; page 30

## 4.5 IL SISTEMA GIAPPONESE QZSS

Il Giappone nel 2002 ha promosso il progetto di sviluppo di un proprio sistema satellitare denominato QZSS (Quasi –Zenit Satellite System). Il nome è dovuto al fatto che la costellazione si posiziona allo zenit della regione giapponese (zenit è l’asse verticale perpendicolare al piano orizzontale passante per l’osservatore). A differenza d’altri sistemi di posizionamento come il GPS statunitense o il GLONASS russo, il QZSS non funziona con una costellazione di satelliti intorno al globo terrestre, ma con una costellazione che orbita soltanto sopra l’arcipelago giapponese in orbita molto inclinata (superiore a 70° quindi “quasi verticale” da cui il termine quasi-zenit). Quindi è un sistema di posizionamento regionale col fine di raggiungere una maggior precisione ed accuratezza nei segnali di posizionamento satellitare in questa regione.

La sua origine è dovuta al fatto che inizialmente il Giappone si affidava al servizio di posizionamento statunitense GPS. Ma in realtà in molte zone del Giappone i segnali satellitari GPS erano ostruiti da grattacieli, alberi e altri oggetti, rendendo in alcuni casi addirittura impossibile l’acquisizione stabile delle informazioni di posizionamento, in aggiunta al fatto che il GPS pur offrendo un servizio globale nacque per ottimizzare il posizionamento sui territori americani e quindi lasciava a desiderare sui territori asiatici-giapponesi. Per questo nel 2002 il governo giapponese approvò il progetto di un sistema satellitare nazionale che fosse di supporto al GPS, per integrarlo e migliorarlo nei territori asiatici: in tal modo il numero complessivo di satelliti orbitanti sull’area giapponese sarebbe aumentato e di conseguenza la precisione del posizionamento. L’obiettivo del governo giapponese è di rendere QZSS autonomo nel 2024.<sup>36</sup>

Il progetto iniziale prevedeva che la costellazione QZSS fosse composta da 3 satelliti disposti in un’orbita geosincrona, altamente inclinata e poco ellittica e separati tra loro di 120°. In questo modo avrebbero dovuto percorrere, rispetto ad un osservatore a terra, una traiettoria a forma di otto (chiamata analemma o orbita satellitare quasi zenitale “QZO”) che avrebbe dovuto garantire la copertura della zona del Pacifico che va dal Giappone all’Australia e alla Nuova Zelanda.

Le novità che presenta il QZSS consistono nell’incredibile precisione sia nell’altitudine che nelle coordinate orizzontali. Quando esisteva solo il GPS la precisione della posizione era dell’ordine di 10 metri, mentre col QZSS attualmente l’errore massimo registrato si aggira da 1 metro ad 1 cm, aumentando quindi la precisione di 10 volte.<sup>37</sup>

Il primo satellite ad orbita Quasi-Zenitale, chiamato QZS-1 o Michibiki-1, fu lanciato l’11 settembre 2010. Poi vennero lanciati altri 3 satelliti, di cui due con orbita Quasi-Zenitale su Giappone ed Australia chiamati QZS-2 e QZS-3 (o Michibiki-2 e Michibiki-3) ed uno che compie un’orbita geostazionaria (GEO) chiamato QZS-4 o Michibiki-4. I lanci terminarono nel 2018. In questo modo QZSS ha una costellazione con 4 satelliti pienamente operativa dal 2018. Tuttavia il governo giapponese ha intenzione di portare a 7 il numero di satelliti in orbita per il 2023-2024.<sup>38</sup>

<sup>36</sup> [https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv02\\_why.html](https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv02_why.html)

<sup>37</sup> <https://topcardiofrequenzimetro.com/cose-il-qzss-e-a-che-cosa-serve/>

<sup>38</sup> [www.qzss.go.jp/en/overview/services](http://www.qzss.go.jp/en/overview/services)

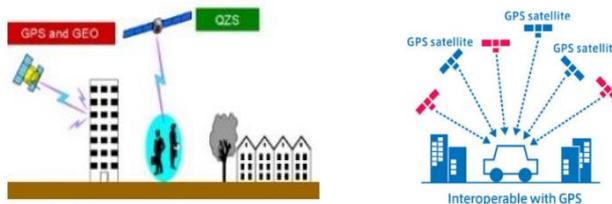


Figura 33: L'interoperabilità tra QZSS e GPS permette sia di determinare posizioni altrimenti non definibili perché ostacolate da edifici o alberi e sia di aumentare il numero di satelliti visibili poiché i satelliti QZSS si aggiungono ai satelliti GPS permettendo una ridondanza di misure e quindi maggiore affidabilità e precisione



Figura 34: La traiettoria dei satelliti QZSS è chiamata analemma

Satellite	Data	Luogo	Lanciatore	Stato del satellite
QZS-1 (Michibiki-1)	11 settembre 2010	Tanegashima	H-IIA	Operativo
QZS-2 (Michibiki-2)	1° giugno 2017	Tanegashima	H-IIA	Operativo
QZS-3 (Michibiki-3)	19 agosto 2017	Tanegashima	H-IIA	Operativo
QZS-4 (Michibiki-4)	10 ottobre 2017	Tanegashima	H-IIA	Operativo

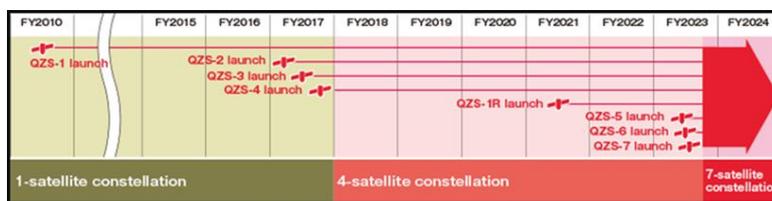


Figura 35: Cronologia lanci e previsione per il 2023-24; il satellite QZS-1R ha sostituito il primo satellite QZS-1 e la "R" indica "Replacement"

Nel 2016 il Governo giapponese e l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) hanno siglato un accordo per integrare il QZSS nel sistema di posizionamento europeo Galileo entro tre anni<sup>39</sup> e da qui ha inizio l'uso del QZSS come ausilio non solo al GPS ma anche alle costellazioni GNSS.

QZSS ha un livello di integrazione massima con il GPS, garantendo un numero sufficiente di satelliti per un posizionamento stabile e ad alta precisione (**minore di 1 metro**), migliore anche degli altri sistemi di posizionamento. I QZS sono compatibili con il GPS e i ricevitori possono essere acquistati a basso costo. Dal sito ufficiale<sup>40</sup> si legge: "QZSS è altamente compatibile con il GPS e può essere utilizzato con il GPS in modo integrato; QZSS e GPS possono essere utilizzati come un singolo gruppo di satelliti o più semplicemente, con QZSS, è come se il numero di satelliti GPS fosse stato aumentato. Poiché QZSS può essere utilizzato in modo integrato con il GPS, il numero di satelliti in grado di trasmettere segnali satellitari contemporaneamente è aumentato, il che rende possibile un posizionamento altamente preciso e stabile. Ciò riduce anche gli errori di posizionamento come descritto".

<sup>39</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_satellitare\\_Quasi-Zenith](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_satellitare_Quasi-Zenith)

<sup>40</sup> <https://qzss.go.jp/en/overview/services/superiority.html>

Le frequenze usate da QZSS sono nella banda del GPS e riportate nella tabella 6 di seguito <sup>41</sup>

Tabella 6: frequenze QZSS

Nome del segnale	QZ1 QZ2 QZ3	QZ4	Servizio di trasmissione	Frequenza [MHz]
	Orbita QZO	Orbita GEO		
L1C/A	✓	✓	Servizio di posizionamento, navigazione e cronometraggio satellitare (PNT)	1575,42
L1C	✓	✓	Servizio di posizionamento, navigazione e cronometraggio satellitare (PNT)	
L1S	✓	✓	Servizio di aumento del livello sub-metro (SLAS)	
			Rapporto satellitare per la gestione di disastri e crisi (DC Report)	
L1Sb	No	✓	Servizio di trasmissione SBAS	
L2C	✓	✓	PNT	1227,60
L5	✓	✓	PNT	1176,45
L5S	✓	✓	Servizio di verifica della tecnologia di posizionamento	
L6D	✓	✓	Servizio di aumento del livello centimetrico (CLAS)	1278,75
L6E	✓	✓	Multi-GNSS ADvanced Orbit and Clock Augmentation; PPP	
Banda S	No	✓	Servizio di conferma della sicurezza QZSS	Banda 2GHz

**I segnali interoperabili GNSS multi-costellazione sono: L1 C/A, L2C, L5 e L1C e la compatibilità è un requisito obbligatorio per il sistema QZSS, che lavora nelle stesse bande di**

<sup>41</sup> [https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv03\\_signals.html](https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv03_signals.html)

frequenza tra i sistemi multi GNSS senza interferenze dannose. I segnali di miglioramento delle prestazioni sono L1S (classe sub metro) e L6 (classe centimetrica). In figura un insieme di tutte le frequenze usate dai sistemi GNSS.<sup>42</sup>

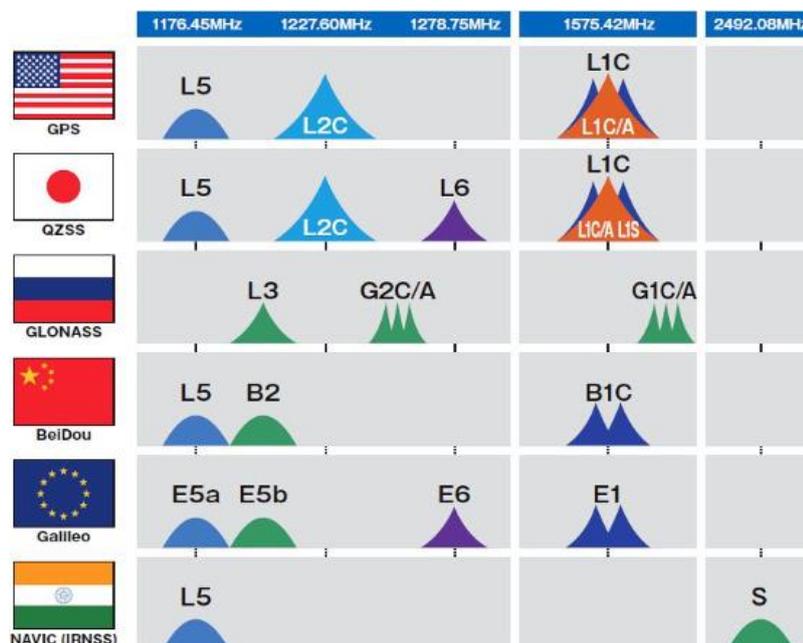


Figura 36: Frequenze interoperabili GNSS (fonte: <https://qzss.go.jp/en/overview/services/superiority.html>)

In QZSS l'errore massimo registrato si aggira tra **1 cm ed 1 metro** e viene usato per posizionamento e navigazioni di precisione, utili per una grande varietà di usi tra civili, militari e di comunicazione. Alcuni esempi di applicazioni sono le navigazioni aeree, marittime e terrestri. In questo ultimo settore si prospetta un contributo e sviluppo essenziale per le tecnologie di **automobili a guida automatica**, grazie alla sua alta precisione. Grande importanza rivestono le operazioni di ricerca e salvataggio, sia per casi di incidenti isolati che per catastrofi naturali. In realtà QZSS è anche pensato per **uso militare** e la questione ha generato diverse polemiche in Giappone dato che le sue leggi proibiscono l'utilizzo militare dello spazio dal 1969, sebbene tale legge fu revocata nel 2008: la Costituzione giapponese è di carattere pacifista in conseguenza degli accordi della 2° guerra mondiale. Tuttavia il Giappone ha dovuto riconsiderare questo quadro puntando su una difesa più attiva della nazione probabilmente per le tensioni con la vicina Corea del Nord.

<sup>42</sup> <https://qzss.go.jp/en/overview/services/superiority.html>

## 4.6 INRSS

Si cita a titolo informativo il sistema di posizionamento indiano **INRSS** (Indian Regional Satellite System), noto a livello commerciale come NAVIC (NAVigation with Indian Constellation) annunciato nel 2006 e di cui il primo satellite lanciato nel 2013; è di **carattere regionale** e attualmente ha 7 satelliti in orbita (3 geostazionari e 4 geosincroni). Copre l'India e una regione circostante che si estende per 1.500 km intorno all'India. Si tratta in totale di un'area rettangolare racchiusa dal 30° parallelo a sud al 50° parallelo nord e dal 30° meridiano est al 130° meridiano est.

<sup>43</sup> Il sito ufficiale promette precisioni minori di 20 m in qualunque condizione meteorologica su tali zone. Utilizza frequenze nelle bande L5 (1176.45MHz) ed S (2492.08MHz). Prevede un servizio civile aperto a tutti (detto SPS= Standard Positioning Service) ed uno riservato (crittografato) per gli utenti autorizzati, compresi i militari (detto RS= Restricted Service).

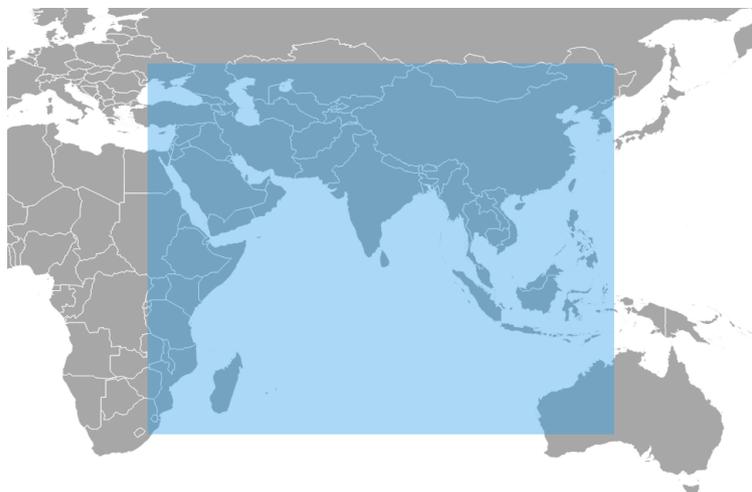


Figura 37: Poligono di copertura di IRNSS

Inoltre ha un servizio di potenziamento/aumento (augmentation) della precisione a servizio del GPS e tale servizio di augmentation è detto **GAGAN**<sup>44</sup> (GPS Aided Geo Augmented Navigation) ed usato essenzialmente dall'aviazione civile indiana. GAGAN è interoperabile con gli altri sistemi di augmentation internazionali come WAAS americano, EGNOS europeo e MSAS giapponese, ecc. di cui se ne parla nel prossimo paragrafo.

<sup>43</sup> <https://www.isro.gov.in/irnss-programme>

<sup>44</sup> <https://www.ursc.gov.in/navigation/index.jsp>

## 4.7 I SERVIZI DI “AUGMENTATION”

Fanno parte del GNSS anche i sistemi di augmentation **SBAS** (Satellite Based Augmentation System), **GBAS** (Ground-Based Augmentation System) e **GRAS** (Ground-Based Regional Augmentation System): sono servizi che permettono di fornire ai ricevitori un miglioramento delle caratteristiche del sistema di posizionamento assoluto di codice.

Nello specifico, con **Augmentation** di un sistema di navigazione satellitare GNSS si intendono non solo metodi che permettono un aumento (inteso come miglioramento) della precisione di posizionamento ma offrono altre informazioni come *l'integrità*.

- La **precisione** indica l'incertezza/tolleranza della mia stima di posizionamento e dipende dalla statistica tant'è vero che ad esempio le soluzioni di posizionamento GNSS vengono spesso accompagnati dalla citazione “precisione al 95% dei casi” cioè la posizione è quella stimata  $\pm$  una incertezza, e nel 95% dei casi tali valori sono rispettati. Ad esempio il GPS in posizionamento assoluto punto singolo con pseudorange definisce la precisione al 95% pari a  $\leq 8$  m in planimetria e  $\leq 13$  in altimetria.

Il parametro matematico che definisce la precisione di una popolazione di soluzioni è la deviazione standard ( $\sigma$ ):  $\sigma$  elevate significa alta dispersione delle soluzioni attorno al valor medio delle soluzioni della popolazione stessa quindi poca precisione, mentre  $\sigma$  basse significa poca dispersione ovvero soluzioni concentrate attorno al valor medio della soluzione della popolazione e ciò indica elevata precisione.

In pratica con la precisione si intende quanto ripetibili siano le soluzioni o i risultati indipendentemente dall'accuratezza della posizione stimata: uno strumento di misura preciso darà quasi lo stesso risultato ogni volta che viene utilizzato.

Con riferimento alla figura 38, una precisione alta significa rosa di colpi piccola, indipendentemente se abbiamo centrato il bersaglio. L'augmentation si applica solo a misure di codice e permette un miglioramento della precisione sulla stima di posizionamento.

L'obiettivo della tesi è definire la precisione delle soluzioni di posizionamento ottenute e paragonarle in funzione di diverse campagne di misura effettuate.

L'*accuratezza* invece indica quanto una misura è vicina al valore esatto, a patto di conoscere il valore esatto ossia le coordinate esatte del punto. In riferimento alla figura 38, indica quanto si è vicini al centro del bersaglio. Nel mondo del posizionamento le coordinate esatte del punto sono fornite da ricevitori geodetici professionali come quelli presenti nelle stazioni permanenti che riescono a stabilire le coordinate del punto di stazionamento con precisione sub-millimetrica tale da considerarsi come punti “vincolati” noti ossia coordinate note con esattezza. L'alta precisione nella stima delle coordinate della stazione o del vertice di inquadramento è richiesto poiché appartengono a reti geodetiche di primo ordine o costituiscono l'intelaiatura (in inglese il “frame) del sistema di riferimento. Se si andasse a stazionare col nostro ricevitore su tale punto, si potrebbe valutare anche l'accuratezza che è la differenza tra le coordinate stimate GNSS del nostro ricevitore meno quelle note.

L'accuratezza esprime quindi la differenza tra la reale posizione della stazione permanente e la posizione stimata con un secondo ricevitore. Questo a prescindere dalla precisione perché questa ultima è stimata sempre assieme alla soluzione perché quando si ha una soluzione stimata si ha anche l'incertezza della soluzione.

Nella tesi si sono utilizzati ricevitori GNSS interni a due comuni smartphones: Huawei P9 e Samsung J6, entrambi non dotati di ricevitori professionali poiché lo scopo principale dello smartphone non è il posizionamento. Per cui quello che si è potuto fare è solo verificare la precisione delle soluzioni ottenute.

In generale in un posizionamento GNSS si può sempre stimare la posizione con la sua precisione ma non è detto che si riesca a definirne l'accuratezza poiché non sempre si conoscono le coordinate esatte del punto su cui si staziona: per ottenerle sarebbe necessario stazionare con un ricevitore professionale sullo stesso punto e poi paragonare i risultati ottenuti con quelli del nostro ricevitore.

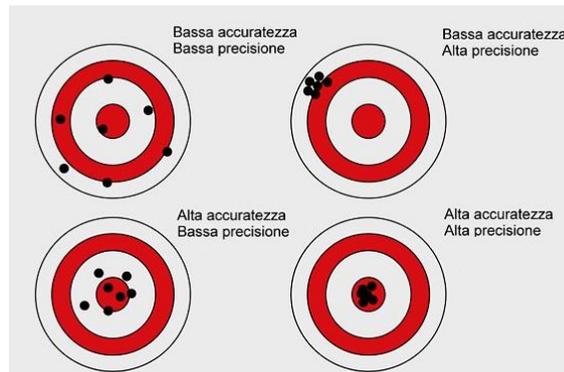


Figura 38: accuratezza e precisione

- Integrità**, indica il livello di confidenza che l'utilizzatore può avere, nel calcolo della sua posizione, nei confronti del sistema di posizionamento; significa quanto il sistema è "confidente/onesto" con l'utente, dichiarando informazioni ad esempio sul numero di satelliti funzionanti o se alcuni dati sono a rischio; il segnale di integrità serve proprio per segnalare satelliti difettosi che vanno esclusi dal calcolo delle coordinate. Comprende anche la capacità del sistema di fornire messaggi di allarme quando il livello di confidenza preposto non è rispettato come in caso di anomalie di funzionamento che causano anomali errori di posizione o se gli errori superano soglie definite. Necessitano di un alto livello di integrità tutte le applicazioni di precisione come sistemi di atterraggio strumentale automatico in aeronautica, operazioni di salvataggio, sistemi di comando e controllo di treni, guida di precisione di macchine operatrici, gestione di flotte aeree e navali, agricoltura di precisione, posizionamento di piattaforme petrolifere, applicazioni scientifiche. Ad eccezione di GALILEO, gli altri sistemi GNSS non forniscono informazioni di integrità, perché non sono stati progettati per dare quel tipo di informazione. Quindi per questo sono state messe in opera sistemi complementari detti di "augmentation", ossia di aumento delle prestazioni del sistema, costituiti o da infrastrutture terrestri (Augmentation terrestre) o spaziali (Augmentation spaziale). Il servizio ha copertura continentale o comunque riguarda ampie zone territoriali.

Un sistema di **AUGMENTATION TERRESTRE** è il metodo di posizionamento differenziale che permette una diminuzione degli errori del segnale satellitare e dunque permette una maggiore precisione della posizione grazie alla riduzione degli errori che affliggono il segnale. Le correzioni riguardano essenzialmente errori d'orologio, ritardi ionosferici e troposferici e vengono calcolate da una stazione permanente in contatto con i satelliti visibili in zona. Dopo di ciò la stazione permanente invia tali correzioni al ricevitore e quest'ultimo applicando tali correzioni sul suo calcolo delle

distanze tra ricevitore e satelliti, ottiene un aumento della precisione della posizione. E' un **augmentation terrestre** poiché le correzioni sono inviate dalle stazioni permanenti di terra al ricevitore. Ma anche il posizionamento di precisione PPP (Precise Point Positioning) può essere considerato un augmentation della precisione: infatti il PPP, benché non si basi sui principi del posizionamento differenziale, sfrutta le informazioni precise delle stazioni permanenti internazionali dell'IGS (International Service for Geodynamics) per arrivare a precisioni centimetriche.

Metodi di augmentation che richiedono alto grado di integrità sono richiesti dall'Organizzazione dell'Aviazione Civile Internazionale (OACI) per atterraggi e avvicinamenti di precisione e sono detti **GBAS (Ground Based Augmentation System)** che sfrutta i principi del posizionamento differenziale: ci sono dei ricevitori GNSS che fungono da stazioni di riferimento le quali calcolano le correzioni relative ai segnali satellitari dei satelliti visibili e tali correzioni sono inviate, sotto forma di segnali radio ad alta frequenza VHF (Very High Frequency), ai ricevitori finali ossia il sistema di bordo degli aerei e possono servire un numero imprecisato di velivoli all'interno di 20 miglia nautiche.

I sistemi di **AUGMENTATION SPAZIALE** invece sono detti **SBAS (Satellite Based Augmentation System)**. Il funzionamento in sintesi è simile al posizionamento differenziale DGNSS ma con una variante ossia è il satellite che trasmette le correzioni al ricevitore. Generalmente si tratta di satelliti geostazionari la cui quota è circa 36000 km dalla superficie terrestre. Il perché si usino satelliti geostazionari è dovuto al fatto che sono piattaforme stabili in relazione alle altre orbite in termini di integrità/confidenza. L'SBAS in breve funziona in questo modo: una rete di stazioni permanente di riferimento a terra di posizione nota, dette Reference Stations, installate sull'area relativa alla copertura del servizio SBAS (si è detto che ha copertura continentale o subcontinentale), ricevono i segnali da molti satelliti GNSS, le inviano alle stazioni di controllo (Master Station) che modellano i bias (cioè gli errori) ed eseguono le correzioni differenziali oltre che valutare lo status di integrità del sistema come di eventuali anomalie presenti e queste info le trasmettono sotto forma di messaggi per mezzo di antenne (Up-link Station) ai satelliti geostazionari SBAS in orbita che a loro volta trasmettono tali messaggi ai ricevitori. I ricevitori devono possedere i software necessari per leggere i messaggi di correzione SBAS e se tale tecnologia è presente allora applicano tali correzioni sul loro processo di calcolo interno del posizionamento. Se rimuoviamo la parte dell'errore, la precisione migliora immediatamente in Real time. **Le correzioni di augmentation sono apportate solo alle misure di codice** In generale la massima precisione raggiungibile in posizionamento assoluto di codice/stand-alone (tipica degli smartphone) varia dai 5 metri ai 10 metri in orizzontale (quindi niente correzioni) ma se si applicano le tecnologie SBAS si raggiunge una precisione più alta (**si raggiungono precisioni di 1÷3 metri in planimetria e da 2÷4 metri in planimetria**) mentre se si posseggono ricevitori di alta fascia si arriva ad precisioni addirittura di 10cm. Questo è il più grande vantaggio oltre le informazioni di integrità.

SBAS è adatto per applicazioni dove il costo per installare una stazione base per effettuare il Differential GNSS (DGNSS) non è giustificabile o se le stazioni permanenti siano distribuite su un'area troppo estesa e quindi, essendo l'efficienza del DGNSS funzione della distanza "stazione permanente-ricevitore", non si garantirebbero buone prestazioni. Le informazioni di augmentation fornite da SBAS riguardano: correzioni e integrità per gli errori di posizione, errori di orologio dei satelliti ed errori indotti da stime di ritardi dei segnali mentre attraversano la ionosfera. Per gli errori indotti dalla troposfera è il ricevitore stesso ad applicare un modello di ritardo troposferico. La particolarità è che i segnali SBAS hanno banda di frequenza e modulazione del segnale identiche a quelle del segnale GPS.

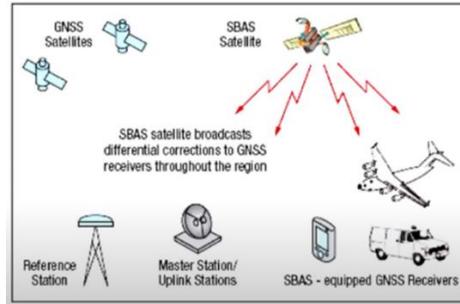


Figura 39: Meccanismo SBAS: la Reference Station riceve i dati dei satelliti GNSS, li trasmette alla Master Station che calcola le correzioni differenziali, quindi le invia al satellite SBAS che li invia al ricevitore equipaggiato di tecnologia per la ricezione segnali SBAS

Esistono diversi sistemi **SBAS** operativi in diverse zone del globo e che permettono di migliorare il segnale trasmesso dai satelliti. Abbiamo:

- WAAS (Wide Area Augmentation System) in North America
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) in Europa
- SDCM GLONASS (System for Differential Correction and Monitoring nella Federazione Russa)
- MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) in Giappone
- GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation o GPS And Geo Augmented Navigation system) in India
- BDSBAS (BeiDou SBAS) in Cina

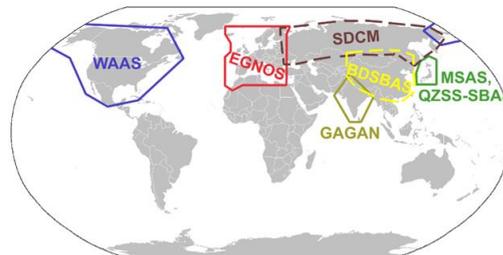


Figura 40: Aree di servizio SBAS

Si approfondisce il **WAAS** e l'**EGNOS**.

Il **WAAS** (Wide Area Augmentation System) è un sistema di miglioramento del GPS sviluppato dall'Agenzia Spaziale Statunitense con l'obiettivo di permettere agli aerei di affidarsi al GPS specialmente durante la fase di decollo e atterraggio. Il WAAS copre la zona nord americana e quindi usa una serie di stazione di riferimento a terra dislocate nel Nord America che raccolgono le informazioni provenienti dai satelliti GPS. Le informazioni vengono inviate tramite le stazioni di riferimento alle stazioni di controllo che attraverso algoritmi di calcolo stimano gli errori trasmessi dal segnale. Le correzioni vengono inviate tempestivamente ai satelliti WAAS geostazionari (per mezzo di antenne di terra "Up-Link Stations") e questi satelliti a loro volta ritrasmettono i messaggi verso l'utente il quale, se dotato di ricevitore idoneo in grado di leggere il segnale WAAS, applica le correzioni durante la stima della posizione per migliorarne la precisione. Il WAAS permette di arrivare a precisioni di **1 ÷ 2 metri in planimetria e da 2 ÷ 3 metri in altimetria (in stand-alone di codice)**.<sup>45</sup>

<sup>45</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=QyYudGp1oRs&t=9s>

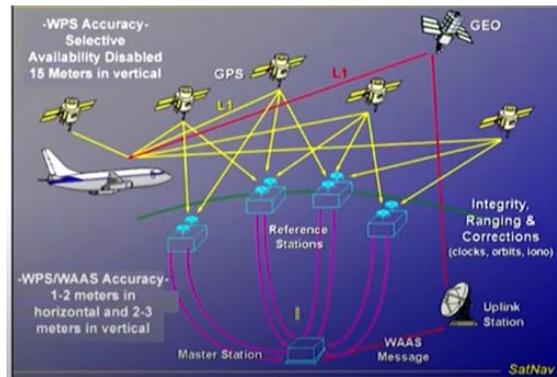


Figura 41: Tecnologia di augmentation WAAS

Simile al WAAS, l'**EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay System) copre il continente europeo. È principalmente usato per applicazioni dell'aviazione e per navigazione in mare. Esso è stato creato per essere un sistema di augmentation al GPS e permette di offrire al GPS quello che offre anche Galileo ossia aumento della precisione e fornitura di messaggi d'integrità con soglie di confidenza e allarmi in caso di anomalie in territorio Europeo. Il sistema è composto da:

- Satelliti geostazionari per invio di messaggi di correzione ed integrità
- Una rete di stazioni permanenti a terra
- Centri di raccolta ed elaborazione dati.

EGNOS utilizza 3 satelliti geostazionari da telecomunicazioni, due IMMARSAT e un ARTEMIS, posizionati sull'Africa e nella zona est dell'Atlantico. I segnali sono diffusi sulla banda L<sub>1</sub>C/A (Coarse Acquisition) del GPS. Per l'acquisizione dei dati dai satelliti ad ogni istante e stimare le variazioni della ionosfera, EGNOS utilizza una rete di 39 stazioni permanenti detta RIMS (Ranging and Integrity Monitor Station) distribuite essenzialmente in Europa e nord Africa (sono l'equivalente alle Reference Station nel WAAS). Esse poi trasmettono i dati verso i centri di controllo.

Il segnale EGNOS è di libero accesso all'utente dotato di ricevitore idoneo ossia l'utente finale deve utilizzare un ricevitore compatibile con EGNOS. I ricevitori in questione sono simili ai ricevitori GPS poiché frequenze e modulazione del segnale EGNOS sono identici a quelli GPS.

EGNOS consente agli utenti in Europa e oltre di determinare la loro posizione entro **1,5 metri**<sup>46</sup>. Secondo le specifiche tecniche<sup>47</sup> la precisione delle coordinate al 95% ( $2\sigma$ ) con correzioni differenziali EGNOS varia da **1 a 3 metri in planimetria e da 2 a 4 metri in altimetria per posizionamento assoluto di codice**.

Il servizio di integrità di egnos segnala satelliti difettosi che vanno esclusi dal calcolo delle coordinate e se gli errori superano delle soglie predefinite si genera un messaggio di allarme. Le soglie d'errore da non superare sono pari a 40 metri in planimetria e 50 metri in altimetria<sup>48</sup>. Le potenzialità di EGNOS non sono solo sul miglioramento della posizione e sulla integrità ma anche su un'elevata stabilità temporale nell'errore delle coordinate, diminuendo la variabilità nell'errore delle coordinate che si osserverebbe con l'uso del solo gps.

<sup>46</sup> [https://www.esa.int/Applications/Navigation/EGNOS/What\\_is\\_EGNOS](https://www.esa.int/Applications/Navigation/EGNOS/What_is_EGNOS)

<sup>47</sup> User Guide for Egnos applications developers, 2011

<sup>48</sup> "Dal GPS al GNSS", prof Alberto Cina; edizione 2014, pagina 230

## 5. PRINCIPI DI POSIZIONAMENTO

Un sistema di posizionamento satellitare è progettato per conoscere in ogni istante la posizione di un punto in qualsiasi parte del pianeta. L'obiettivo è conoscere le coordinate del ricevitore (o più propriamente la posizione del centro di fase dell'antenna del ricevitore poiché è questo il punto di ricezione del segnale) all'interno di un sistema di riferimento prefissato. Il sistema di riferimento generale è un sistema geocentrico ECEF proprio di ogni costellazione, in cui si avranno coordinate  $X, Y, Z$ . Oppure si potrebbero avere coordinate geografiche (longitudine, latitudine, altitudine) riferite all'ellissoide di riferimento e con le opportune conversioni di coordinate si può passare in coordinate ECEF e viceversa. L'altitudine può essere poi riferita al livello medio del mare con ulteriori trasformazioni<sup>49</sup>

Quello che segue si riferirà nello specifico al GPS ma i concetti possono essere estesi facilmente a tutte le costellazioni.

Il principio di base è quello di eguagliare la distanza misurata tra satellite  $j$  e ricevitore  $i$ , per mezzo di segnali elettromagnetici, affetta da errori di varia natura tipici del segnale radio, con la distanza valutata geometricamente e che rappresenta l'effettiva distanza chiamata **range geometrico**  $\rho_i^j(t)$  espressa dalla:

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad \text{Range geometrico} \quad (7)$$

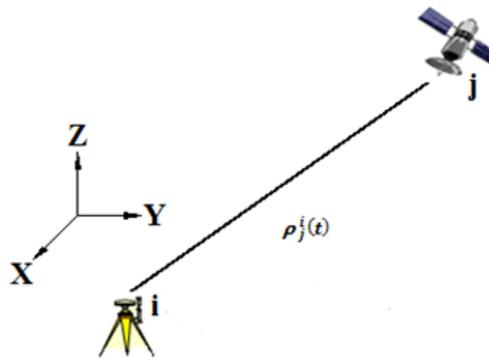


Figura 42: Range geometrico misurato in un sistema di riferimento ECEF

Nella (7) si hanno i seguenti elementi:

- $(X_i, Y_i, Z_i) =$  **coordinate incognite del ricevitore "i"**; se il ricevitore è in condizioni statiche le sue coordinate non risultano funzioni del tempo; se il ricevitore è in movimento le coordinate  $i$ -esime saranno funzioni temporali  $(X_i(t), Y_i(t), Z_i(t))$ .
- $(X^j(t), Y^j(t), Z^j(t)) =$  coordinate note del satellite "j" in movimento sulla sua orbita; il satellite è in continuo movimento, quindi funzione del tempo.

<sup>49</sup> "dal GPS al GNSS" Prof. Alberto Cina, pagina 256, edizione 2014

Avendo 3 coordinate incognite si necessita di almeno 3 equazioni di misura considerando 3 diversi satelliti, in cui si eguagliano le misure effettuate (più gli errori di misura) e i range geometrici, e da cui si otterranno le incognite ( $X_i, Y_i, Z_i$ ). La singola equazione di misura è:

$$\text{distanza misurata}_i^j(t) + \text{Errori}_i^j = \rho_i^j(t) \quad (8)$$

Per semplicità ora si trascureranno gli errori (trattati nel capitolo “Errori”).

Graficamente la posizione incognita del punto in stazione (ricevitore), corrisponderebbe all’intersezione di tre sfere, i cui raggi sono le rispettive distanze misurate tra satelliti e ricevitore (Figura 45). Tale operazione è detta “**trilaterazione sferica**”.

Per capire come funziona la trilaterazione si imposta un esempio su spazio bidimensionale per semplificare il concetto. Si supponga di avere un ricevitore GNSS che rileva i segnali dei 3 satelliti più vicini, li identifica (infatti ogni satellite ha un codice grazie a cui il ricevitore lo identifica) e ne misura la distanza satellite-ricevitore. Tale distanza può essere intesa come il raggio di una sfera ma in questo esempio 2D corrisponde al raggio di una circonferenza: il ricevitore, misurando ad esempio una distanza dal satellite di 18000km, può trovarsi in un punto qualsiasi della circonferenza, dato che ogni punto della circonferenza dista 18000km dal satellite 1. Essa è la prima informazione di distanza misurata. Essendo in uno spazio 2D si considerano satelliti e ricevitori su uno stesso piano.

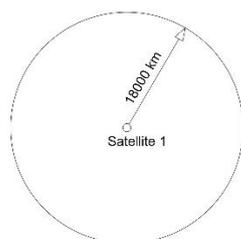


Figura 43: Distanza tra satellite 1 e ricevitore

Si supponga ora che il ricevitore capti il segnale di un secondo satellite e grazie a questo segnale il ricevitore misuri la distanza “satellite2-ricevitore” che risulta pari a 21500km. Considerando le due distanze misurate si può accertare che la posizione del ricevitore sia un punto che disti contemporaneamente 18000 km dal satellite 1 e 21500 km dal satellite 2, come rappresentato in figura 44.

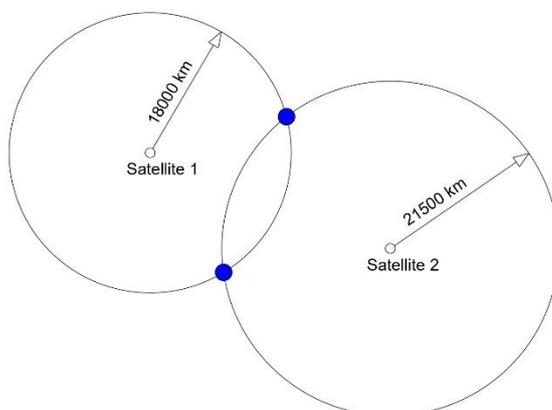


Figura 44: Distanza dal primo e dal secondo satellite e da cui nascono due punti di intersezione

Per capire in quale di questi due punti si trovi il ricevitore si necessita della misura di distanza da un terzo satellite. Supponiamo che la distanza satellite3 - ricevitore sia 27000km. Dall'intersezione delle 3 circonferenze si ha la posizione del ricevitore (in blu in figura 45).

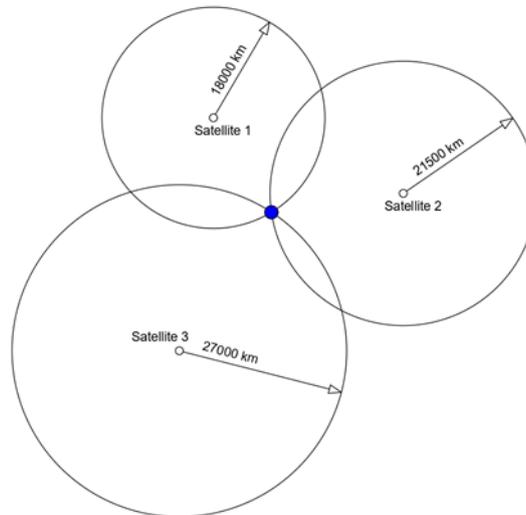


Figura 45: distanza misurata dal primo, secondo e terzo satellite, e dalla cui intersezione si ottiene la posizione del ricevitore (cerchietto blu). Questa è la trilaterazione

Nella realtà siamo nello spazio tridimensionale per cui invece dei cerchi si hanno delle sfere che si intersecano tra loro identificando un unico punto. In tal caso alla fine si avranno due intersezioni triple ma viene considerata delle due quella più vicina alla superficie terrestre.

Per avere la distanza misurata (cioè il raggio delle sfere di fig. 45) il ricevitore si basa su precisi riferimenti temporali: è fondamentale conoscere con precisione l'istante di tempo in cui il segnale viene trasmesso e l'istante di tempo in cui il segnale arriva al ricevitore mediante l'uso di orologi estremamente precisi e sincronizzati, altrimenti il posizionamento verrebbe falsato.

Nella realtà il posizionamento con 3 satelliti è teorico o meglio sarebbe valido solo se le misure venissero fatte considerando gli stessi orologi atomici montati sia su satelliti che su ricevitori. Dato che questi orologi costano svariate migliaia di euro (da 40 mila a 100 mila €) non è possibile installarli sui ricevitori. Di fatto i ricevitori montano orologi al quarzo, migliori degli orologi automatici da polso, ma molto più scadente rispetto agli orologi atomici soprattutto sui periodi lunghi e dunque non permettono una sincronizzazione precisa tra il tempo del ricevitore e il tempo della costellazione GNSS. Quindi nel valutare il tempo di ricezione del segnale, il ricevitore compie degli errori temporali molto elevati e non affidabili oltre che non modellabili.

Per risolvere il problema, la soluzione è reimpostare per ogni epoca di misura l'ora del ricevitore sul tempo del satellite<sup>50</sup> e questo lo fa il ricevitore stesso, tramite il suo processore interno, mettendo ad incognita del sistema l'errore di sincronizzazione  $\delta_i(t)$  dell'orologio del ricevitore con il tempo della costellazione GNSS avendo così in totale **4 incognite** ovvero le 3 coordinate del ricevitore nel sistema di riferimento ECEF ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) + l'offset o asincronismo  $\delta_i(t)$  dell'orologio del ricevitore. Il tutto sarà risolto prendendo misure di distanza da almeno quarto satelliti (4 incognite → 4 satelliti → 4 misure).

Misure da satelliti supplementari ai 4 permettono una ridondanza della misura migliorando l'affidabilità del sistema.

<sup>50</sup> [https://www.esa.int/Applications/Navigation/What\\_about\\_errors](https://www.esa.int/Applications/Navigation/What_about_errors)

Inoltre, per una migliore qualità e precisione nella posizione da rilevare è necessario prendere in esame gli effetti di una serie di fenomeni perturbativi che ritardano il segnale e falsificano la distanza misurata, come l'effetto della ionosfera, della troposfera, ritardi dovuti all'elettronica del ricevitore ed altri errori vari che, in proporzioni diverse, peggiorano la precisione della posizione e di cui se ne parlerà nel capitolo "Errori".

Per ottenere le incognite, è fondamentale che il ricevitore abbia NOTE la posizione dei satelliti nel momento della trasmissione dei segnali. La posizione del satellite è possibile conoscerla tramite le effemeridi, ossia i parametri orbitali kepleriani assieme ai coefficienti correttivi per tener conto degli effetti perturbativi (vedere capitolo Effemeridi), che il satellite invia nel messaggio di navigazione NAV in file formato Rinx e da cui il ricevitore risale alla posizione in orbita del satellite al momento dell'invio del segnale ma possono anche essere trasmesse nei messaggi di protocollo RTCM per misurazioni differenziali in tempo reale (lo vedremo nel posizionamento differenziale).

Anche l'orario di trasmissione del segnale è una informazione contenuta nel messaggio NAV. Inoltre, sempre nel messaggio NAV, ogni satellite trasmette anche l'almanacco ossia i parametri orbitali di tutti i satelliti della costellazione senza i coefficienti correttivi (giusto per avere una stima approssimativa della posizione del satellite) ed esclusivamente le effemeridi relative a sé stesso. In questo modo il ricevitore GNSS riceve i parametri dell'orbita da cui deriva la posizione del satellite.<sup>51</sup>

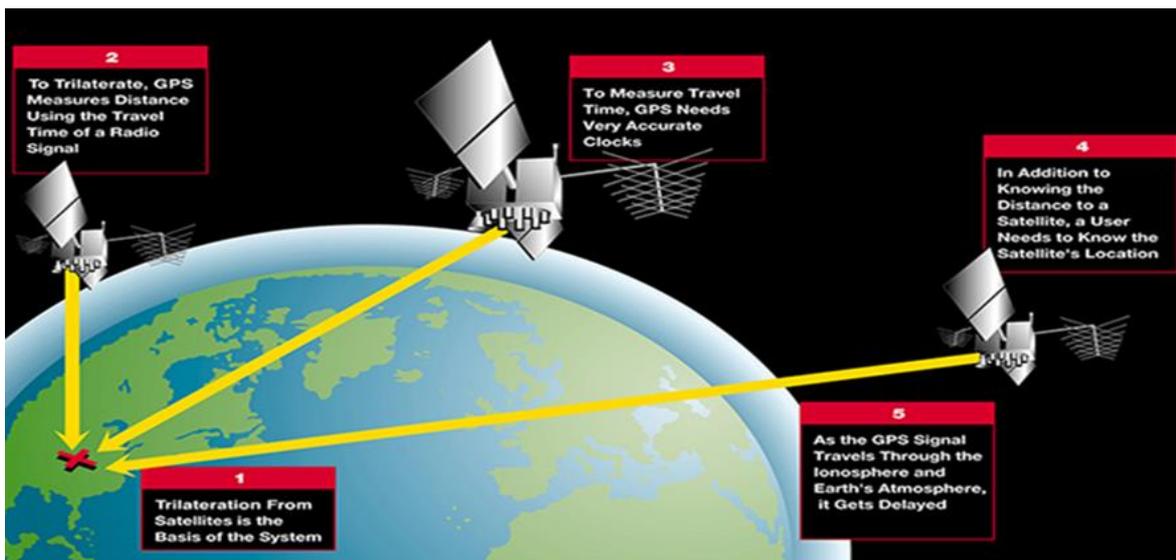


Figura 46: Illustrazione di come avviene il posizionamento nel GPS. Il meccanismo è simile in tutte i sistemi GNSS. Fonte [www.faa.gov](http://www.faa.gov)

<sup>51</sup>[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/gps/howit\\_works](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps/howit_works);  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_di\\_posizionamento\\_globale](https://it.wikipedia.org/wiki/Sistema_di_posizionamento_globale)

Le varie modalità con cui viene calcolato il posizionamento sono:

- **Posizionamento assoluto o stand-alone:** le coordinate del ricevitore sono identificate in un sistema di riferimento globale. Viene fatto sia con misure di codice che di fase.
- **Posizionamento relativo:** vengono determinate le componenti di un vettore *baseline* che unisce due vertici. Baseline è il vettore dato dalle differenze di coordinate tra 2 ricevitori GNSS a terra, le cui coordinate sono valutate relativamente alla posizione di un satellite. Nella differenziazione tra 2 o più stazioni non è possibile determinare la posizione di entrambe (o più) ma solo la loro posizione relativa: ciò implica che almeno di una delle due si debba conoscere la posizione nota in un sistema di riferimento oppure ci si accontenta di vettori di base (baseline). Con questo metodo si eliminano per differenza o si riducono gli errori sistematici (bias) da cui è affetto il range nelle due stazioni su ogni satellite. E' utilizzato in post-processamento.
- **Posizionamento differenziale:** è eseguito correggendo il range di codice o di fase, valutato dal nostro ricevitore Rover con posizionamento assoluto, con una correzione differenziale calcolata da una stazione "base". Vengono eliminati o ridotti vari errori sistematici come nel posizionamento relativo. E' utilizzato in real time.

Nei 3 casi il problema è sempre misurare la distanza tra ricevitore e i satelliti tramite segnali elettromagnetici e tale misurazione può essere effettuata **sia in misura di codice** (sfruttando la componente impulsiva del segnale) e **sia in misura da fase** (sfruttando la componente portante, o sinusoidale, del segnale).

Le misure GNSS possono essere svolte con ricevitore:

- Statico: il ricevitore è fermo nella sua posizione; in tal caso le coordinate incognite del ricevitore non saranno funzione del tempo ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) come visto nella (7);
- Cinematico: il ricevitore è in continuo movimento e quindi le coordinate incognite del ricevitore saranno funzione del tempo ( $X_i(t), Y_i(t), Z_i(t)$ )

Il posizionamento GNSS può essere eseguito:

- In post-elaborazione: la posizione è determinata a posteriori della campagna di misura e dopo che i dati sono stati analizzati al pc.
- In tempo reale (o real time): la posizione è direttamente determinata in campagna di misura.

## 5.1 POSIZIONAMENTO ASSOLUTO DI CODICE

In questo metodo la distanza misurata satellite-ricevitore è valutata tramite la componente codice del segnale. E' detto anche posizionamento stand-alone o punto singolo.

Nel posizionamento assoluto per ottenere la *distanza misurata ricevitore-satellite* (che rappresenta il raggio di una sfera nella trilaterazione vista sopra), il ricevitore utilizza il **tempo di volo**  $\Delta t_i^j$  che si basa sul principio della massima correlazione incrociata: in pratica il segnale GNSS, inviato dal satellite giunge al ricevitore che ne emette una replica identica al suo interno ma i due segnali, pur essendo identici tra loro, sono sfalsati nel tempo poiché il segnale del satellite ha già percorso la distanza satellite-ricevitore. Il tempo di volo è l'anticipo, inteso come spostamento o traslazione temporale, da dare alla replica del segnale nel ricevitore per sovrapporlo perfettamente al segnale trasmesso dal satellite e farli coincidere sulla scala del tempo, avendo così il massimo della correlazione.

Dalla teoria dei segnali infatti la correlazione incrociata (detta anche *correlazione mutua* o *cross-correlazione*, dall'inglese *cross-correlation*) rappresenta la misura di similitudine di due segnali come funzione di uno spostamento o traslazione temporale applicata ad uno di essi.<sup>52</sup>

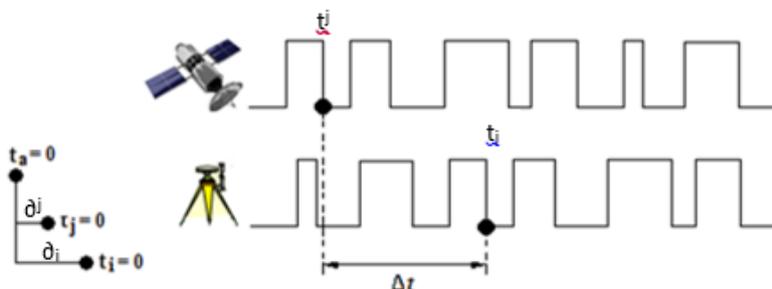


Figura 47: Misura con pseudorange di codice e scale temporali

Il tempo di volo  $\Delta t = t^j - t_i$  è quindi lo scostamento da dare della replica del segnale nel ricevitore per allinearla al segnale trasmesso dal satellite. Se moltiplicato per la velocità della luce ci dà una pseudo-distanza o pseudo-range.

E' uno pseudorange poiché non tiene conto né degli errori di varia natura  $e_i^j$  che possono modificare il percorso del segnale o la sua velocità (errori di ionosfera, troposfera, di effemeride ed errori vari considerati di natura accidentale) e né degli errori di asincronismo presenti nel tempo di volo  $\Delta t_i^j$ , asincronismi presenti sia nell'orologio del ricevitore che in quello del satellite rispetto alla scala del tempo misurata dal centro di controllo del sistema satellitare.

Il ricevitore quindi misura la distanza in modo "imperfetto" e perciò è detta "PSEUDORANGE" o **pseudo-distanza** ove col termine "pseudo" si intende la distanza misurata con la componente codice tra i centri di fase dell'antenna del satellite  $j$  e del ricevitore  $i$  che appare come vera ma non è vera. Per cui la misura di pseudorange è semplicemente:

$$R_i^j(t) = c \cdot \Delta t_i^j \quad (9)$$

In cui:

<sup>52</sup> Wikizero - Correlazione incrociata

- $c \cong 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^5 \text{ km/sec}$  = velocità della luce nel vuoto; poiché l'indice di rifrazione dell'aria è quasi pari ad 1, si assume che la velocità della luce nell'aria sia uguale alla velocità della luce nel vuoto. Tutte le forme di radiazione elettromagnetica, compresi i segnali satellitari, viaggiano alla velocità della luce.
- $\Delta t$  è il tempo di volo che non tiene conto degli asincronismi (in inglese "offset") degli orologi rispetto al tempo della costellazione GNSS mantenuta dal centro di controllo ( $t_a$  in figura 47).

Con riferimento alla figura 47 si possono notare tre scale temporali:

- Scala di tempo della costellazione ( $t_a$ ) mantenuto dall'orologio atomico del centro di controllo di ogni specifico sistema GNSS (ad esempio per il GPS si intende la scala di tempo GPS tenuta dalla Master Control Station di Colorado Springs).
- Scala di tempo del satellite ( $t_j$ ) mantenuta dagli orologi atomici a bordo dei satelliti, leggermente asincrona rispetto a  $t_a$ .
- Scala di tempo del ricevitore ( $t_i$ ) mantenuta dall'orologio interno del ricevitore, (generalmente orologio al quarzo) meno precisi e dunque presenta maggiore asincronismo rispetto a  $t_a$ .

Le scale temporali dei satelliti e del ricevitore possono essere "allineate" a quella della costellazione ( $t_a$ ) considerando gli offset/asincronismi  $\partial^j(t)$  e  $\delta_i(t)$  che rappresentano dei bias sulla distanza misurata ossia errori sistematici. Tali offset sono anche detti bias di orologio. Supponendo di essere nella costellazione GPS,  $\partial^j(t)$  è l'asincronismo del tempo del satellite rispetto al tempo della costellazione GPS mentre  $\delta_i(t)$  è l'asincronismo del tempo del ricevitore rispetto al tempo della costellazione GPS.

Ipotizzando per ora, per semplicità, che gli errori  $e^j$  siano nulli ( $e^j = 0$ ), si riportano tutti i tempi alla scala del tempo della costellazione ( $t_a$ ) tenendo conto dell'offset  $\partial^j(t)$  nel tempo di trasmissione  $t^j$  e dell'offset  $\delta_i(t)$  nel tempo di ricezione  $t_i$ , considerando per convenzione di assegnare segno opposto agli offset degli orologi del satellite e del ricevitore; sarà quindi possibile ricavare la distanza corretta ed eguagliarla al range geometrico, come in (10):

$$c[(t^j + \delta^j(t))] - (t_i - \delta_i(t)) = \rho_i^j(t) \quad (10)$$

$$\rightarrow c[(t^j - t_i) + \delta^j(t) + \delta_i(t)] = \rho_i^j(t) \rightarrow c \cdot \Delta t_i^j + c \cdot \partial^j(t) + c \cdot \delta_i(t) = \rho_i^j(t) \rightarrow$$

$$\rightarrow R_i^j(t) + c\delta^j(t) + c\delta_i(t) = \rho_i^j(t) \quad (11)$$

avendo posto  $R_i^j$  = "pseudorange" descritto nella (9) mentre  $\rho_i^j(t)$  descritta nella (7) e contenente le coordinate incognite del ricevitore  $i$ .

Dalla (11) si ricava la **equazione di Pseudorange**:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) - c\delta^j(t) - c\delta_i(t) \quad (12)$$

Si analizzano ora gli offset di orologio o bias di orologio.

Il bias di orologio del satellite  $\partial^j(t)$  può essere modellato come un polinomio di basso grado (2° grado nel Gps e Galileo mentre di tipo lineare nel Glonass) i cui coefficienti sono trasmessi nel messaggio di navigazione NAV. Tale bias altro non è che la correzione  $\partial^j$  da dare all'orologio satellitare calcolata a partire da un tempo di riferimento  $t_{oc}$  (time of clock) definito dall'orologio atomico del

centro di controllo GNSS e tiene conto sia di una correzione dovuta alla teoria della relatività di Einstein ( $\Delta t_{rel}$ ) e sia di una correzione dovuta al ritardo di gruppo  $T_{GD}$ . Nel GPS vale questa formula:

$$\delta^j(t) = a_0 + a_1 \cdot (t - t_{oc}) + a_2 \cdot (t - t_{oc})^2 + \Delta t_{rel} - T_{GD} \quad \text{bias orologio satellite GPS} \quad (13)$$

con

$t_{oc}$  = time of clock = tempo di riferimento

$\Delta t_{rel}$  = correzione che tiene conto dell'effetto relativistico

$T_{GD}$  = correzione legata alla velocità di gruppo del segnale: è un ritardo che riguarda la propagazione dei segnali modulati (codice + fase) quando si propagano nello spazio o in un mezzo, come l'aria o passano attraverso un dispositivo come un amplificatore o un altoparlante; è funzione della velocità con cui si propaga il segnale modulato la quale è diversa dalle singole velocità di fase delle varie componenti del segnale.

Per quanto riguarda il discorso della relatività, gli orologi a bordo dei satelliti vengono corretti per via elettronica per tener conto degli effetti della teoria della relatività generale e speciale (o ristretta) di Einstein che porta alla fine ad un anticipo del tempo sui satelliti.

I coefficienti ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ) del polinomio (13) sono trasmessi nel codice di navigazione (codice D o codice NAV).

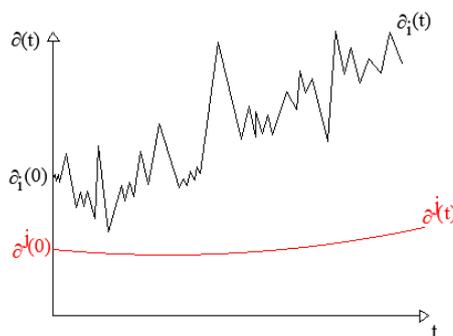


Figura 48: errori di orologio satellitare (in rosso) e di ricevitore (in nero); l'errore satellitare è ben modellabile mentre l'errore di orologio del ricevitore non è modellabile oltre che elevato

Se consideriamo sincronizzati tra loro gli orologi atomici di tutti i satelliti, l'errore di sincronizzazione di tali orologi con il tempo della costellazione  $t_a$  tenuto dal centro di controllo GNSS è approssimativamente di  $\delta^j(t) = 1$  nanosecondo (1ns)  $= 10^{-9}$  sec che se moltiplicato per la velocità della luce ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s) genera ad un errore sulla distanza misurata di 30 cm. Inoltre  $\delta^j(t)$  ha un andamento sub orizzontale nel tempo (fig.48): ciò significa che l'errore  $\delta^j(t)$  è poco variabile nel tempo ed quindi  $\delta^j(t)$  è ben modellabile. Si può concludere che l'errore di sincronizzazione dei satelliti con il tempo del centro di controllo è un errore  $\delta^j(t) = \text{noto in ogni epoca di misura}$ .

Gli orologi dei ricevitori invece sono normalmente degli orologi al quarzo, di precisione mediocre e l'errore di sincronizzazione dell'orologio del ricevitore rispetto al tempo della costellazione  $t_a$  tenuto dal centro di controllo GNSS è approssimativamente di  $\delta_i(t) = 1$  ms  $= 10^{-3}$  sec. Questo significa che se moltiplicato per la velocità della luce genera un errore di range di circa 300km che non è tollerabile. Inoltre  $\delta_i(t)$  non è ben modellabile nel tempo. Questo fa sì che la precisione dell'orologio del ricevitore non sia affidabile oltre che tantomeno modellabile. Per ovviare a tale imprevisto si potrebbe optare per una delle due opzioni:

- Montare nei ricevitori degli orologi atomici dello stesso tipo dei satellitari ma dato l'elevato costo di detti orologi (dai 40 ai 100mila euro) non è la scelta più impiegata;

- Trattare matematicamente il problema, considerando **incognito l'errore  $\delta_i(t)$**  commesso dall'orologio al quarzo **in ogni epoca di misura** e quindi risulta essere la 4° incognita del problema;

Dunque in totale si hanno **4 INCOGNITE** (coordinate del ricevitore +  $\delta_i(t)$ ) e si necessita di almeno 4 satelliti captati contemporaneamente per risolvere il problema.

Dalla (12) ponendo a sinistra i termini noti ed a destra le incognite, l'equazione di pseudorange sarà:

$$R_i^j + c \cdot \delta^j(t) = \rho_i^j - c \cdot \delta_i(t) \quad (14)$$

In cui

- $R_i^j(t)$ = pseudorange misurato dal ricevitore
- $c$  = velocità luce pari a  $3 \cdot 10^8$  m/s
- $\delta^j(t)$ = bias orologio satellite, noto
- $\rho_i^j(t)$ = range geometrico contenente le incognite di posizione ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) del ricevitore
- $\delta_i(t)$ = bias orologio ricevitore, incognito

La **configurazione base** del calcolo del posizionamento richiede che il numero delle osservazioni (ossia delle misurazioni di pseudorange satellite ricevitore) sia  $\geq$  al numero delle incognite in cui

$$\text{Numero di osservazioni} = n^j \cdot n_t \quad (15)$$

con:

$n^j$ = numero di satelliti in contatto col ricevitore

$n_t$ = numero di epoche di misura (il satellite è in continuo contatto con il ricevitore ma vengono acquisite informazioni solo in ogni epoca di misura; l'epoca di misura è il momento dell'acquisizione ed ha una durata variabile a seconda del metodo utilizzato ossia può durare un secondo o mezzo secondo o un decimo di secondo e le epoche sono intervallate l'una dall'altra da intervalli di tempo di uno o pochi secondi chiamati "rate di campionamento" oppure "intervallo di campionamento"; quando si perde il contatto tra satellite e ricevitore e perciò non comunicano più si creano i **cycle slip** ossia un ciclo/i in cui il segnale si perde).

Dato che ogni ricevitore compie  $n_t$  misurazioni, in totale il numero di osservazioni è dato da  $n^j \cdot n_t$ .

Sia per posizionamento statico punto singolo che cinematico punto singolo la risoluzione della configurazione base è possibile con un numero di satelliti  $\geq 4$  che permette misurazioni anche in real time ossia con una epoca di misura<sup>53</sup>.

**Oltre alla configurazione di base, esiste un'altra procedura** per risolvere il posizionamento basato sul **principio dei minimi quadrati** che permette un maggiore controllo dei dati disponibili e quindi un miglioramento del risultato finale: si basa sul fatto che nel definire una posizione si compiono degli errori e questa probabilità di errore è trattata statisticamente e dunque seguendo le leggi della propagazione dell'errore, né la posizione del ricevitore né l'offset dell'orologio sono calcolati esattamente ma piuttosto **stimati** attraverso il principio dei minimi quadrati in modo tale da minimizzare l'errore.

Il metodo dei minimi quadrati è una tecnica di ottimizzazione che permette di trovare una funzione, rappresentata da una curva di regressione, che si avvicina il più possibile ad un insieme di dati di

<sup>53</sup> "Dal GPS al GNSS" del Prof. Alberto Cina, edizione 2014, pag.33

osservazione. La variabile  $Y$  è espressa attraverso una funzione di una (o più) variabili indipendenti. Esso consiste nello scegliere i parametri (che figurano nell'equazione) che rendano minima la sommatoria dei quadrati delle distanze tra i dati osservati e quelli della curva di regressione che rappresenta la funzione stessa (ossia minimizzano la sommatoria dei quadrati delle differenze tra i valori della variabile  $Y$  osservata (valori di  $y_i$  in corrispondenza di  $x_i$ ) e quelli stimati mediante la funzione). Tale differenza è detta *scarto*. Se la funzione che si utilizza è di tipo lineare si parla di curva o retta di regressione lineare o retta dei minimi quadrati. Per esempio se  $(x_i, y_i)$  sono  $n$  coppie di osservazioni sulle variabili  $X$  e  $Y$  e la relazione tra  $Y = f(X)$  è di tipo lineare del tipo  $Y = a + bX$ , allora in corrispondenza di ogni valore  $x_i$  si avrà quindi un valore reale osservato ( $y_i$ ) e un valore teorico, detto valore atteso o stimato  $\hat{y}_i = a + bx_i$ . Tra ogni valore stimato e ogni valore reale osservato c'è uno scarto  $v_i$ :

$$v_i = |\hat{y}_i - y_i| = |(a + bx_i) - y_i| \quad (16)$$

La somma dei quadrati di tutti questi scarti dà una misura della distanza tra il modello teorico scelto e i dati effettivi. Il metodo di stima dei minimi quadrati porta quindi a scegliere i parametri  $a$  e  $b$  in modo tale che sia minima la quantità:

$$\sum_{i=1}^n [(a + bx_i) - y_i]^2 = \min \quad (17)$$

dove  $n$  denota il numero delle osservazioni. Con i parametri  $a$  e  $b$  così ottenuti è possibile tracciare la retta  $Y=f(X)$  che interpola al meglio tutti i punti di osservazione, minimizzandone la distanza dei punti dalla retta. La retta individuata dai parametri  $a$  e  $b$  così ottenuti prende il nome di retta di regressione o retta dei minimi quadrati. Naturalmente per ottenere un'unica retta ottimizzata e non un fascio, è necessario un numero di punti sperimentali osservati maggiore del numero di parametri da cui dipende la curva (il problema si dice sovradeterminato): in altre parole il metodo dei minimi quadrati presume un numero di osservazioni  $>$  numero di incognite (e non  $\geq$  come nella configurazione di base). Il fatto di cercare uno scarto e di elevarlo al quadrato equivale ad ingrandire il difetto tra grandezza teorica e grandezza misurata, per poi cercare i parametri che la minimizzino.

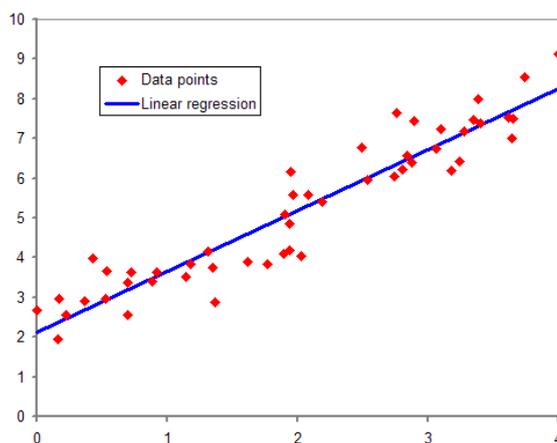


Figura 49: esempio di regressione lineare con una variabile dipendente ed una indipendente

Nel posizionamento GNSS come si traduce tutto ciò? Partendo da una misura effettuata su campo e quindi nota che chiamo  $l_0$ , bisogna ricondurre l'equazione di range geometrico, di natura non lineare, ad una relazione lineare o linearizzabile del tipo  $A \cdot x$ , tale che per ogni misura effettuata sul campo

$l_0$  vi sia una corrisposta equazione teorica lineare e che la loro differenza sia pari allo scarto  $v$ . Il tutto è noto come Modello di Gauss:

$$A \cdot x - l_0 = v \quad \text{Modello Lineare di Gauss} \quad (18)$$

A causa degli errori che affliggono la misura (errori accidentali, sistematici, grossolani, ecc.), facendo  $n$  osservazioni si avranno  $n$  valori di  $l_0$  differenti (uno per ogni misurazione effettuata) e perciò si avranno  $n$  valori di scarti  $v$  differenti. Se per ogni osservazione è possibile scrivere una equazione come la (18), l'insieme delle equazioni è scrivibile sotto forma matriciale dove:

- $A$  è detta “matrice disegno” o “matrice dei coefficienti” e contiene i COEFFICIENTI NOTI delle incognite e vedremo a breve come ottenerli;  $A$  ha  $n$  righe ( $n^\circ$  di misurazioni effettuate) ed  $r$  colonne (pari al  $n^\circ$  di parametri incogniti) con  $n > r$ ;
- $x$  è il vettore dei parametri incogniti (ha  $r$  righe perché  $r$  sono le incognite);
- $l_0$  vettore dei termini noti; dipende dalle  $n$  misure reali fatte sul campo (osservazioni)
- $v$  è il vettore degli scarti; sono  $n$  scarti pari al numero di  $n$  misure reali

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1r} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nr} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_r \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (19)$$

Si avrà un sistema di  $n$  equazioni in  $r$  incognite con  $n > r$  (se fosse  $n=r$  potrei risolverla come un classico sistema ovvero con la configurazione base ma non potrei compensare l'errore; invece posso **compensare l'errore** tramite procedura ai minimi quadrati la quale necessita di  $n > r$ ). Tuttavia il sistema (19) risulta non risolvibile perché ha  $n$  equazioni in “ $r + n$ ” incognite (queste ultime sono dovute a  $x_r$  parametri incogniti +  $v_n$  scarti non noti perché derivano dalla differenza “ $AX - l_0$ ” di cui  $AX$  funzione dei parametri incogniti): ho più incognite che equazioni. Per risolverlo ci appoggiamo alla statistica sfruttando il principio dei minimi quadrati. Tale principio fornisce le stime dei parametri incogniti (cioè  $\hat{x}$ ) che più di ogni altra soluzione mi minimizza lo scarto il quale scarto in realtà viene “ingrandito” elevandolo al quadrato, così da trovare i parametri incogniti  $\hat{x}$  che lo minimizzino ossia

$$\sum_i^n (A \cdot \hat{x}_i - l_0)^2 = \min \quad (20)$$

La procedura ai minimi quadrati ci fornirà le soluzioni stimate  $\hat{x}_i$  (cioè le incognite del problema) secondo la seguente formula:

$$\hat{x} = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} A^T \cdot P \cdot l_0 = N^{-1} \cdot T_n \quad (21)$$

Con  $P$ =matrice dei pesi,  $N$ =matrice normale e  $T_n$ =vettore normalizzato dei termini noti. In questo modo si vanno a trovare le incognite che mi danno gli scarti più piccoli, senza conoscere gli scarti in realtà. Per un maggiore approfondimento del tema si veda “Dal GPS al GNSS” libro del Prof. Cina pagina 40-47.

Dalla soluzione ottenuta può essere calcolato il vettore degli scarti stimati con l'equazione di Gauss secondo la seguente formula:

$$\hat{v} = A\hat{x} - l_0 \quad (22)$$

Dagli scarti stimati si può stimare la varianza dell'unità di peso  $\hat{\sigma}_0^2$  per mezzo della quale è possibile calcolare la matrice di varianza covarianza  $C_{xx}$  dei parametri  $\hat{x}_i$  stimati.

$$C_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \quad (22.1)$$

### 5.1.1 MODELLI LINEARIZZATI NEL POSIZIONAMENTO ASSOLUTO DI CODICE

Per stimare la soluzione con il principio dei minimi quadrati sopra accennato, il primo passo è quello di trasformare l'equazione di Pseudorange, ovvero la (14) che è una equazione non lineare a causa del termine  $\rho$ , in una equazione lineare del modello di Gauss, ovvero la (18).

Procediamo per passi: data una funzione non lineare regolare e linearizzabile del tipo  $f(X_1, X_2, \dots, X_3)$ , posso tracciarne la tangente alla funzione in un punto qualsiasi  $X^{(0)}$  noto, detto "centro dello sviluppo", mediante lo sviluppo in serie di Taylor. In tal modo si è linearizzata la funzione nell'intorno di  $X^{(0)}$ .

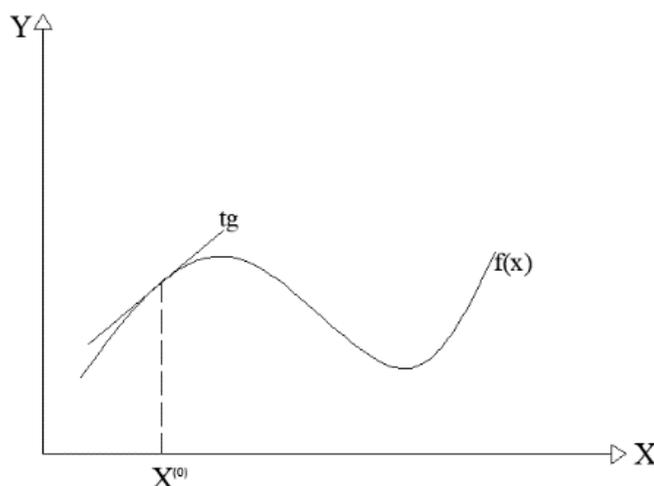


Figura 50: Linearizzazione di una funzione non lineare nell'intorno di un punto  $X^{(0)}$

Nel GNSS,  $X^{(0)}$  viene definito "valore approssimato della coordinata del ricevitore" ed è un punto noto approssimativamente: possono essere dedotte da cartografia oppure, qualora non si avessero, si può impostare il valore delle coordinate approssimate pari a zero dato che poi si applicherà un procedimento iterativo di convergenza da cui si otterranno le coordinate reali.

Dalla matematica, per sviluppo in serie di Taylor si intende:

$$f(X_1, X_2, \dots, X_K) = f(X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_K^{(0)}) + \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)_{(0)} \cdot (X_1 - X_1^{(0)}) + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)_{(0)} \cdot (X_2 - X_2^{(0)}) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_K}\right)_{(0)} \cdot (X_K - X_K^{(0)}) + \text{termini del 2° ordine trascurabili}$$

in cui  $f(X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_K^{(0)})$  è la funzione definita nei valori approssimati, mentre la parte  $\left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)_{(0)} \cdot (X_1 - X_1^{(0)})$  rappresenta la relazione lineare tipica delle rette, ossia "m · ΔX" e fornisce il valore della funzione Y nel punto  $X_1$ . In realtà " $X_i - X_i^{(0)} = \Delta X = x_i$ " rappresentano delle correzioni, ovvero

correzione da dare al punto approssimato  $X_i^{(0)}$  per ritrovarci nel punto  $X_i$  quindi  $X_i = X_i^{(0)} + x_i$ . Tali correzioni possono scriversi direttamente come  $x_i$  nello sviluppo di Taylor.

$$f\left(X_1^{(0)}, X_2^{(0)}, \dots, X_K^{(0)}\right) + \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)_{(0)} \cdot (x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)_{(0)} \cdot (x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_K}\right)_{(0)} \cdot (x_K) \\ + \text{termini del 2° ordine trascurabili}$$

Per linearizzare l'equazione di pseudorange  $R_i^j + c \cdot \delta^j(t) = \rho_i^j - c \cdot \delta_i(t)$ , è **sufficiente applicare lo sviluppo in serie di Taylor al range geometrico  $\rho_i^j(t)$** , poiché è questa la parte non lineare di tutta l'equazione: dalla (7) l'equazione di  $\rho_i^j(t)$  è funzione delle coordinate incognite del ricevitore ( $X_i$   $Y_i$   $Z_i$ ) e proprio rispetto ad esse si fa lo sviluppo di Taylor nell'intorno dei valori approssimati che sono le coordinate approssimate del ricevitore ossia  $X_i^{(0)}$   $Y_i^{(0)}$   $Z_i^{(0)}$  e che si è detto essere punti noti approssimativamente grazie ad esempio ad una cartografia.

Per tale punto vale:

$$X_i - X_i^{(0)} = x_i \rightarrow X_i = X_i^{(0)} + x_i;$$

$$Y_i - Y_i^{(0)} = y_i \rightarrow Y_i = Y_i^{(0)} + y_i;$$

$$Z_i - Z_i^{(0)} = z_i \rightarrow Z_i = Z_i^{(0)} + z_i$$

L'equazione del range geometrico linearizzata con sviluppo in serie di Taylor è:

$$\rho_i^j = \rho_i^{j(0)} + \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial X_i}\right)_{(0)} \cdot (x_i) + \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial Y_i}\right)_{(0)} \cdot (y_i) + \dots + \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial Z_i}\right)_{(0)} \cdot (z_i) + 2^\circ \text{ordine trascurabili} \quad (23)$$

In cui:

- $\rho_i^{j(0)}$  deriva dalla (7) applicando le coordinate approssimate del ricevitore e si ha il "range geometrico approssimato":

$$\rho_i^{j(0)}(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i^{(0)})^2 + (Y^j(t) - Y_i^{(0)})^2 + (Z^j(t) - Z_i^{(0)})^2} \quad (24)$$

- Mentre lo sviluppo delle derivate prime porta a:

$$\left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial X_i}\right)_{(0)} = -\frac{X^j - X_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}}; \quad \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial Y_i}\right)_{(0)} = -\frac{Y^j - Y_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}}; \quad \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial Z_i}\right)_{(0)} = -\frac{Z^j - Z_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}} \quad (25)$$

Sostituendo la (23) nell'equazione di Pseudorange, si giunge finalmente all'equazione linearizzata:

$$R_i^j + c \cdot \delta^j(t) = \rho_i^j - c \cdot \delta_i(t) \rightarrow \text{Applico la (23) ossia sviluppo di Taylor su } \rho_i^j \rightarrow$$

$$\rightarrow R_i^j + c \cdot \delta^j(t) = \rho_i^{j(0)} + \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial X_i}\right)_{(0)} \cdot x_i + \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial Y_i}\right)_{(0)} \cdot y_i + \left(\frac{\partial \rho_i^j}{\partial Z_i}\right)_{(0)} \cdot z_i - c \cdot \delta_i(t)$$

$$\rightarrow R_i^j + c \cdot \delta^j(t) = \rho_i^{j(0)} - \frac{X^j - X_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}} \cdot x_i - \frac{Y^j - Y_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}} \cdot y_i - \frac{Z^j - Z_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}} \cdot z_i - c \cdot \delta_i(t) \quad (26)$$

La (26) può essere impostata secondo il modello di Gauss:  $Ax - l_0 = v$  (vedi (18) e(19)) e avendo n osservazioni si avrà un sistema di n equazioni, scrivibile in forma matriciale, le cui incognite sono le

correzioni  $(x_i; y_i; z_i)$  ed il bias orologio ricevitore  $(c \cdot \delta_i)$ , **da risolvere con il principio dei minimi quadrati**; tale principio richiede un numero di osservazioni  $>$  del numero di incognite per cui le quattro incognite sono risolte ad ogni epoca se si tracciano almeno 5 satelliti (che permetteranno 5 osservazioni, ossia una per ogni satellite).

Secondo il modello di Gauss “ $Ax-l_0 = v$ ” la (26) diventa:

$$\left( -\frac{X^j - X_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}} \cdot x_i - \frac{Y^j - Y_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}} \cdot y_i - \frac{Z^j - Z_i^{(0)}}{\rho_i^{j(0)}} \cdot z_i - c \cdot \delta_i(t) \right) - \left( R_i^j + c \cdot \delta^j(t) - \rho_i^{j(0)} \right) = v^j \quad (26.1)$$

Osservando almeno 5 satelliti si avranno 5 equazioni come la (26.1) e per cui si può scrivere in forma matriciale, ove:

- la matrice disegno  $[A]$  è la matrice jacobiana che contiene le derivate parziali, calcolate nell’intorno dei valori approssimati, ossia i termini della (25);
- il vettore  $(x)$  è il vettore incognito contenete le “*correzioni  $(x_i, y_i, z_i)$  + l’offset dell’orologio del ricevitore*”; a tal proposito è conveniente stimare l’offset  $\delta_i$  dell’orologio del ricevitore in metri, moltiplicandolo per la velocità della luce per evitare possibili mal condizionamenti del sistema in quanto  $\delta_i$  può essere inferiore agli altri termini della matrice di alcuni ordini di grandezza.
- I termini noti  $l_0$  son rappresentati da tutto ciò che è noto ossia misure di pseudorange, offset orologio satellite  $\delta^j$ , range geometrico  $\rho_i^{j(0)}$ .

Nel caso del **posizionamento cinematico** con ad esempio 5 satelliti (apici  $j$  nella 26.1), partendo dalla (26.1) si ricava la matrice disegno  $[A]$ , il vettore dei termini noti  $(l_0)$  ed il vettore incognite  $(x)$ . Possono essere scritte ad ogni epoca di misura in questo modo:

$$\begin{bmatrix} \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_i^{1(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_i^{1(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_i^{1(0)}} \right) & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(2)}}{\rho_i^{2(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(2)}}{\rho_i^{2(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(2)}}{\rho_i^{2(0)}} \right) & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(3)}}{\rho_i^{3(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(3)}}{\rho_i^{3(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(3)}}{\rho_i^{3(0)}} \right) & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(4)}}{\rho_i^{4(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(4)}}{\rho_i^{4(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(4)}}{\rho_i^{4(0)}} \right) & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(5)}}{\rho_i^{5(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(5)}}{\rho_i^{5(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(5)}}{\rho_i^{5(0)}} \right) & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ c\delta_i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_i^{(1)} + c\delta^{(1)} - \rho_i^{1(0)} \\ R_i^{(2)} + c\delta^{(2)} - \rho_i^{2(0)} \\ R_i^{(3)} + c\delta^{(3)} - \rho_i^{3(0)} \\ R_i^{(4)} + c\delta^{(4)} - \rho_i^{4(0)} \\ R_i^{(5)} + c\delta^{(5)} - \rho_i^{5(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v^{(1)} \\ v^{(2)} \\ v^{(3)} \\ v^{(4)} \\ v^{(5)} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$[A]$                        $(x)$                        $(l_0)$                        $=$                        $(v)$

La matrice  $[A]$  ha un  $n^\circ$  di colonne pari al  $n^\circ$  di incognite e un  $n^\circ$  di righe pari al numero di satelliti acquisiti. Sviluppando col principio dei minimi quadrati, quindi tramite la (20), si ottiene

la soluzione stimata delle incognite ossia il vettore  $\hat{x}_i = \begin{pmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ \hat{z}_i \\ \widehat{c\delta}_i \end{pmatrix}$

Si ricorda che i valori stimati rappresentano le correzioni, e dunque non è la soluzione finale ma le correzioni stimate vanno aggiunte ai valori approssimati (apice 0) per ottenere le nuove coordinate (apice 1).

$$X_i^{(1)} = X_i^{(0)} + \hat{x}_i; \quad Y_i^{(1)} = Y_i^{(0)} + \hat{y}_i; \quad Z_i^{(1)} = Z_i^{(0)} + \hat{z}_i;$$

La soluzione delle coordinate del ricevitore così ottenuta (apice (1)) può essere considerata il nuovo valore approssimato e quindi procedere nuovamente con i minimi quadrati, per ottenere la nuova soluzione finale  $(X_i, Y_i, Z_i)^{(2)}$ . In pratica si tratta di un procedimento iterativo e le iterazioni si interrompono una volta giunti a convergenza, verificabile con un test di fine iterazione (ossia quando le correzioni  $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$  sono minori o uguali ad un valore prefissato). In mancanza di valori iniziali approssimati  $(X_i^{(0)}, Y_i^{(0)}, Z_i^{(0)})$ , è sufficiente porli pari a zero e risolvere il sistema con poche iterazioni in più.

Per il posizionamento statico, sostando più epoche nella stessa postazione, è necessario aggiungere una colonna in più alla matrice [A] per ogni epoca di misura, in quanto è presente anche l'errore dovuto all'orologio del ricevitore in ogni epoca di misurazione, considerato diverso ad ogni istante. Inoltre la matrice [A] avrà 5 righe in più per ogni epoca di tempo. Nell'ipotesi di avere due epoche di misura e cinque satelliti in visibilità, la matrice [A] avrà una colonna in più e ben 10 righe:

$$\begin{bmatrix} \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(1)}(t_1)}{\rho_i^{1(0)}(t_1)} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(1)}(t_1)}{\rho_i^{1(0)}(t_1)} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(1)}(t_1)}{\rho_i^{1(0)}(t_1)} \right) & -1 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(5)}(t_1)}{\rho_i^{5(0)}(t_1)} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(5)}(t_1)}{\rho_i^{5(0)}(t_1)} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(5)}(t_1)}{\rho_i^{5(0)}(t_1)} \right) & -1 & 0 & \vdots \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(1)}(t_2)}{\rho_i^{1(0)}(t_2)} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(1)}(t_2)}{\rho_i^{1(0)}(t_2)} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(1)}(t_2)}{\rho_i^{1(0)}(t_2)} \right) & 0 & -1 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(5)}(t_2)}{\rho_i^{5(0)}(t_2)} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(5)}(t_2)}{\rho_i^{5(0)}(t_2)} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(5)}(t_2)}{\rho_i^{5(0)}(t_2)} \right) & 0 & -1 & \vdots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ c\delta_i(t_1) \\ c\delta_i(t_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_i^{(1)}(t_1) + c\delta^{(1)}(t_1) - \rho_i^{1(0)}(t_1) \\ \vdots \\ R_i^{(5)}(t_1) + c\delta^{(5)}(t_1) - \rho_i^{5(0)}(t_1) \\ R_i^{(1)}(t_2) + c\delta^{(1)}(t_2) - \rho_i^{1(0)}(t_2) \\ \vdots \\ R_i^{(5)}(t_2) + c\delta^{(5)}(t_2) - \rho_i^{5(0)}(t_2) \end{pmatrix} = (\bar{v}) \quad (27.1)$$

Col posizionamento assoluto di codice si raggiungono **precisioni** nella stima della posizione dell'ordine dei **5 ÷ 10 metri** ma può raggiungere i **3 m** se presenti satelliti di **augmentation**.

### 5.1.2 POSIZIONAMENTO ASSOLUTO CON MISURE DI CODICE IN GLONASS

Quanto descritto nei paragrafi precedenti vale per le costellazioni GPS e GALILEO mentre ulteriori analisi vanno fatte per la misura pseudorange con la costellazione GLONASS. In generale il percorso del segnale trasmesso dal satellite si compone di due parti: il percorso diretto *satellite – antenna del ricevitore* ed il percorso *dall'antenna all'elettronica del ricevitore*. Mentre il primo percorso è unico per tutti i satelliti, il secondo attraversa l'elettronica dell'antenna, percorre il cavo dell'antenna del ricevitore e la parte *hardware* del ricevitore stesso e causa un ritardo detto **bias del ricevitore**. Per le costellazioni GPS e GALILEO il bias del ricevitore viene considerato lo stesso per tutti i satelliti (viene stimato insieme al bias d'orologio del ricevitore e non ha effetto sul calcolo della posizione) mentre nel GLONASS non è lo stesso per tutti i satelliti poiché dipende dalle frequenze del segnale che nel Glonass variano da satellite a satellite, inducendo ad avere un bias del ricevitore  $L_{i,GLO}^j$  per ogni satellite tra ricevitore  $i$  e il satellite  $j$ , che non può essere ignorato, portando l'equazione di pseudorange del GPS, di seguito riproposta:  $R_{i(t)}^j + c \partial_{(t)}^j = \rho_i^j(t) - c \partial_{i(t)}$  a diventare:

$$R_{i,GLO}^j(t) + c \partial_{GLO}^j(t) = \rho_{i,GLO}^j(t) - c \partial_{i,GLO}(t) + c L_{i,GLO}^j \quad (28)$$

Il termine  $c \partial_{GLO}^j(t)$  è il bias dell'orologio del satellite Glonass che può essere ipotizzato con una equazione di primo ordine, i cui coefficienti sono noti e comunicati attraverso il codice D. Invece  $L_{i,GLO}^j$  oltre che dipendere dalla frequenza del satellite ha una dipendenza diretta dall'elettronica del ricevitore e dalle condizioni al contorno quali temperatura e umidità in cui si trovano gli hardware del ricevitore: esso è residualmente presente ed è da considerarsi qualora si voglia ottenere una rilevazione precisa. In realtà il bias  $L_{i,GLO}^j$  può essere separato in due parti:

$$L_{i,GLO}^j = L_{i,GLO} + \delta_{i,IC}^j \quad (29)$$

in cui il termine  $L_{i,GLO}$  rappresenta la parte comune a tutti i satelliti mentre il termine  $\delta_{i,IC}^j$ , dipendente dal satellite GLONASS (le cui frequenze variano con il numero intero  $k$ ), è detto **bias intercanale** (IC). Il termine comune  $L_{i,GLO}$  può essere trattato allo stesso modo del bias di orologio del ricevitore e stimato con esso. L'espressione diventa allora:

$$R_{i,GLO}^j(t) + c \partial_{GLO}^j(t) = \rho_{i,GLO}^j(t) - c [\partial_{i,GLO}(t) - L_{i,GLO}] + c \partial_{i,IC}^j \quad (30)$$

Il bias intercanale  $\partial_{i,IC}^j$  è piccolo (ordine di grandezza uguale al noise delle misure pseudorange) e può essere trascurato nelle misure di codice ma non in quelle di fase.

## 5.2 POSIZIONAMENTO ASSOLUTO DI FASE

La distanza misurata satellite – ricevitore può essere ottenuta anche con misure di fase sulle onde portanti sinusoidali: ad esempio tramite le frequenze L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>5</sub> del GPS oppure quelle previste negli altri sistemi GNSS.

Sono misure più complicate di quelle pseudorange perché sono più precise. Per capire come posso avere una distanza tramite le onde sinusoidali bisogna riprendere il concetto di onda elettromagnetica. L'onda elettromagnetica è un'onda sinusoidale che si propaga nello spazio alla velocità della luce “c” e ripropone gli stessi valori di intensità I(t) in maniera periodica 2π. La figura 51 riproduce una generica onda portante:

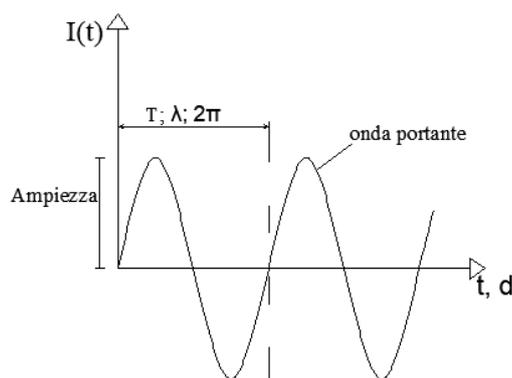


Figura 51: esempio di onda portante sinusoidale; la distanza tra due punti consecutivi uguali può definirsi su diversi domini: nel dominio del tempo è detto periodo T; è detta lunghezza d'onda λ nel dominio delle distanze; nel dominio degli angoli è detto angolo 2π.

Se si è in un punto interno della lunghezza d'onda λ o equivalentemente in un punto interno del periodo T, con una semplice proporzione posso sapere in che punto dell'onda mi trovo:

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi} \quad (31)$$

Con d= distanza misurata, t= tempo misurato, φ= fase misurata.

Usando i primi 2 membri della (31) e ricordando che la distanza è anche data dalla velocità della luce “c” moltiplicato il tempo, si ottiene:

$$d = \frac{\lambda}{T} t = ct \rightarrow \text{si deduce che } c = \frac{\lambda}{T} \text{ essendo che } \frac{1}{T} = f \rightarrow c = \lambda f \rightarrow \text{da cui } \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow$$

$$c = f\lambda \quad (32)$$

$$\text{Se si analizza nel dominio degli angoli (fasi } \varphi) \rightarrow d = \frac{\varphi}{2\pi} \cdot \lambda = \phi\lambda \quad (33)$$

con  $\phi = 0 \div 1$  detta **misura di fase in frazione di ciclo** e rappresenta la frazione di ciclo.

Alla (33) va inserito il numero di cicli interi “N” di lunghezza d'onda λ per ottenere la distanza misurata con misura di fase. N prende il nome di “**Ambiguità di fase**”.

La distanza satellite-ricevitore misurata con misura di fase è uguale a:

$$\text{misura di fase} = N\lambda + \phi\lambda \quad (34)$$

in cui  $N$  è **incognito** (il ricevitore non è in grado di misurarla, ma andrà calcolato) e si suppone costante per tutte le epoche di misura in cui il ricevitore rimane in contatto mentre  $\phi$  è **noto** (il ricevitore è in grado di misurarla).

All'istante  $t_0$  il range può essere espresso come somma del numero intero di cicli  $\lambda \cdot N_i^j$  (incognito) più la frazione di ciclo " $\phi_i^j(t_0) \cdot \lambda$ " (quest'ultimo effettivamente misurato). All'epoca successiva  $t$  il satellite ha percorso un tratto di orbita e il nuovo range avrà lo stesso  $N_i^j$  (si suppone rimanga costante per ogni epoca e questo accade se è mantenuto il contatto satelliti-ricevitore nelle varie epoche, ossia non esistono interruzioni di contatto detti *cycle slip* ed ecco perché risulta indipendente dal tempo) e una nuova componente frazionaria  $\phi_i^j(t) \cdot \lambda$  misurata dal ricevitore la quale è composta da un numero intero di cicli  $c(t) \cdot \lambda$  [nota bene che  $c(t)$  è un numero intero e non è la velocità della luce] + una parte finale frazionaria  $\Phi'(t) \cdot \lambda$ . Il ricevitore è in grado di contare solo il numero di cicli successivi a quelli di primo aggancio (questi ultimi rappresentano  $N_i^j$  e sono incogniti) ossia conta " $c(t)\lambda +$  la frazione  $\Phi'(t) \cdot \lambda$ ".

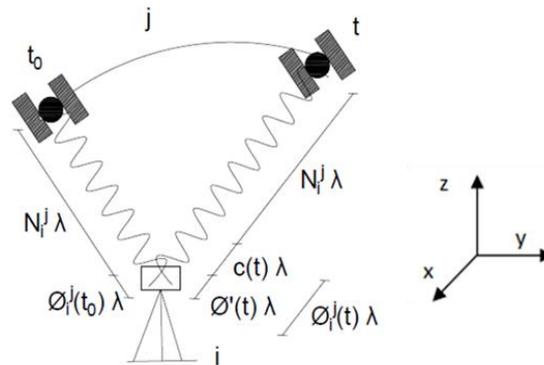


Figura 52: schema della misura di fase

Semplificando il concetto:  $N_i^j$  si suppone costante nelle varie epoche, quindi dato che l'orbita è ellittica, il range al tempo  $t_0$  è diverso dal range al  $t_1$  e siccome  $N_i^j$  è costante allora al tempo  $t_1$  ci sarà una porzione ulteriore di cicli interi  $c(t_1)\lambda +$  una parte frazionaria  $\Phi'(t_1) \cdot \lambda$ .

Si potrà determinare l'ambiguità di fase  $N_i^j$  osservando un satellite per più epoche e si avrà un  $N_i^j$  per ogni satellite.

Il fatto che  $N_i^j =$  costante significa che non si verificano cycle slip tra le varie epoche di misura. Se accade un cycle slip (perdita di contatto tra il satellite e ricevitore dovuto a problemi elettronici del ricevitore o di qualità del segnale) bisogna ricalcolare una nuova ambiguità di fase  $N_i^j$  incognita: è come se si resettasse tutto.

Applicando alla (34) gli asincronismi  $\delta$  degli orologi del satellite e del ricevitore, si ha la distanza reale ovvero il range geometrico:

$$\rho_i^j(t) = N_i^j \lambda + \phi_i^j(t) \lambda + c [\delta_i(t) + \delta^j(t)] \quad (35)$$

Dove

- ✓  $\rho_i^j$  = range geometrico (dalla (7)) contenente le **coordinate incognite** del ricevitore
- ✓  $N_i^j$  = ambiguità di fase; è una **incognita** per ogni satellite ma è costante nel tempo a meno di cycle slip;  $N_i^j$  viene calcolata in una prima fase detta *inizializzazione*
- ✓  $c\delta_i(t)$  = offset dell'orologio del ricevitore; **incognita**
- ✓  $c\delta^j(t)$  = offset orologio satellitare; è una grandezza nota
- ✓  $\lambda$  = lunghezza d'onda del segnale, nota

✓  $\Phi_i^j(t)$  = misura di fase in frazione di ciclo, nota.

Dalla (35) separando termini incogniti dai termini noti si ha:

$$\rho_i^j(t) - N_i^j \lambda - c \delta_i(t) = \phi_i^j(t) \lambda + c \delta^j(t) \quad (36)$$

in cui al membro di sinistra ci sono le incognite e al membro di destra i termini noti.

La (36) è una equazione espressa in metri. Volendola esprimere in “cicli” si dividono tutti i suoi termini per  $\lambda$  e diventa

$$\frac{\rho_i^j(t)}{\lambda} - N_i^j - f^j \delta_i(t) = \phi_i^j(t) + f^j \delta^j(t) \quad (37)$$

In cui  $f^j$  deriva da  $c/\lambda$  (per la (32)) e rappresenta la frequenza del segnale del satellite.

$N_i^j$  è incognita ma è costante nel tempo finché non si interrompe il segnale satellite-ricevitore, cioè finché non accade un *cycle slip* → se accadesse il segnale si azzererebbe ed il valore calcolato di  $N_i^j$  nella fase di inizializzazione (vedremo come) non sarebbe più valido perché si avrebbe un nuovo valore di  $N_i^j$ , da ricalcolare.

In posizionamento assoluto **con misure di fase** è possibile ottenere **una precisione sulla stima della posizione dell'ordine di un paio di metri**.

Il posizionamento può risolversi con la *configurazione base* ossia il numero di osservazioni  $\geq$  numero di incognite. Sviluppando il bilancio equazioni-incognite sia per il posizionamento statico che cinematico si deduce che il posizionamento con 1 sola epoca di misura non è possibile.

Quindi come si risolve il problema cinematico? Risolvendolo in post processamento oppure se invece si vuole un posizionamento cinematico in real time con misure di fase, esso è possibile solo se le ambiguità di fase ( $N_i^j$ ) sono note a priori.

Quindi determinare le incognite  $N_i^j$  è la prima cosa da fare e tale operazione è detta **inizializzazione**. Solo dopo che son note le ambiguità, il posizionamento cinematico di fase da un punto di vista del bilancio “osservazioni-incognite” equivale al modello “range di codice” e quindi risolvibile anche in real time.

L'inizializzazione consiste nel determinare l'ambiguità di fase rimanendo per alcune epoche di tempo fermi nella stessa posizione (in tal caso  $\rho_i^j(t)$  è detto *starting vector*). Poi si può procedere al movimento senza perdere il contatto con il satellite. L'inizializzazione può impiegare anche molto tempo, ad esempio 10÷30 minuti con ricevitore a singola frequenza, andando via via riducendosi con l'aumento del numero delle frequenze del ricevitore. Ad esempio nel GPS l'utilizzo della terza frequenza ( $L_5$ ) consente di fissare l'ambiguità di fase immediatamente oppure l'uso di ricevitori multifrequenza dotati di algoritmo OTF (On The Fly) permettono di inizializzare anche se in movimento. Una volta terminata l'inizializzazione, la misura di fase diventa come una semplice misura di codice e quindi ritorna possibile risolvere il problema del posizionamento in real time, ovvero con 1 sola epoca di misura sia in modalità statica che cinematica.

### 5.2.1 MODELLO LINEARIZZATO NEL POSIZIONAMENTO ASSOLUTO DI FASE

Così come fatto nel posizionamento di codice, anche nel posizionamento assoluto di fase si deve linearizzare l'equazione di range (la (36) che è espressa in metri), per poter poi stimare le incognite del sistema linearizzato tramite il principio dei minimi quadrati. Si considerino una ambiguità di fase  $N_i^j$  incognita per ogni satellite. Il modello linearizzato sarà simile a quello di pseudorange di codice con le ulteriori incognite di ambiguità.

Della (36) la funzione non lineare è quella del range geometrico e dunque è questa che linearizziamo tramite sviluppo di Taylor ottenendo:

$$\rho_i^{j(0)} + \left( \frac{\delta \rho_i^j}{\delta X_i} \right)_{(0)} \cdot x_i + \left( \frac{\delta \rho_i^j}{\delta Y_i} \right)_{(0)} \cdot y_i + \left( \frac{\delta \rho_i^j}{\delta Z_i} \right)_{(0)} \cdot z_i - c\delta_i(t) - N_i^j \lambda = \phi_i^j(t) \lambda + c\delta^j(t)$$

Scrivendola secondo il modello di Gauss  $AX-l_0 = v$ , per **una generica epoca con 5 satelliti** si ha:

$$\begin{bmatrix} \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_i^{1(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_i^{1(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_i^{1(0)}} \right) & -\lambda_i^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(2)}}{\rho_i^{2(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(2)}}{\rho_i^{2(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(2)}}{\rho_i^{2(0)}} \right) & 0 & -\lambda_i^{(2)} & 0 & 0 & 0 & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(3)}}{\rho_i^{3(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(3)}}{\rho_i^{3(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(3)}}{\rho_i^{3(0)}} \right) & 0 & 0 & -\lambda_i^{(3)} & 0 & 0 & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(4)}}{\rho_i^{4(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(4)}}{\rho_i^{4(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(4)}}{\rho_i^{4(0)}} \right) & 0 & 0 & 0 & -\lambda_i^{(4)} & 0 & -1 \\ \left( \frac{X_i^{(0)} - X^{(5)}}{\rho_i^{5(0)}} \right) & \left( \frac{Y_i^{(0)} - Y^{(5)}}{\rho_i^{5(0)}} \right) & \left( \frac{Z_i^{(0)} - Z^{(5)}}{\rho_i^{5(0)}} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_i^{(5)} & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ N_i^{(1)} \\ N_i^{(2)} \\ N_i^{(3)} \\ N_i^{(4)} \\ N_i^{(5)} \\ c\delta_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda\phi_i^{(1)} + c\delta^{(1)} - \rho_i^{1(0)} \\ \lambda\phi_i^{(2)} + c\delta^{(2)} - \rho_i^{2(0)} \\ \lambda\phi_i^{(3)} + c\delta^{(3)} - \rho_i^{3(0)} \\ \lambda\phi_i^{(4)} + c\delta^{(4)} - \rho_i^{4(0)} \\ \lambda\phi_i^{(5)} + c\delta^{(5)} - \rho_i^{5(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v^{(1)} \\ v^{(2)} \\ v^{(3)} \\ v^{(4)} \\ v^{(5)} \end{pmatrix} \quad (38)$$

Si hanno 5 equazioni in 9 incognite.

Come visto nel bilancio osservazioni/incognite con la misura di fase non riesco ad avere risultati in real time e nemmeno questo sistema di fatti è risolvibile con una sola epoca di misura. Sono necessarie più epoche di misura inizialmente per calcolare tutte le incognite poiché ad ogni epoca di misura si aggiungono in generale tante nuove equazioni quanti sono i satelliti in vista quindi dopo alcune epoche si avranno più equazioni che incognite, sia nel caso statico che cinematico e il sistema è risolvibile. In particolare nel *posizionamento statico*, le incognite iniziali saranno le ambiguità di fase (una per ogni satellite) e le 3 correzioni ( $x_i, y_i, z_i$ ) ed in più ad ogni epoca di misura avrò un'incognita "c $\delta_i$ " (offset orologio ricevitore) aggiuntiva, mentre nel *posizionamento cinematico* per ogni epoca si devono anche considerare 3 nuove incognite di correzione  $x_i, y_i, z_i$  perché la posizione

del ricevitore cambia continuamente. Una volta che l'ambiguità di fase è risolta, essa può essere "fissata ad intero" e tolta dalle incognite: questa fase è detta inizializzazione; per le successive epoche le ambiguità non faranno più parte delle incognite ed il modello è equivalente a quello di pseudorange di codice. Se si presenta un cycle slip significa perdita di contatto contemporanea con tutti i satelliti con cui il ricevitore era in ricezione e le ambiguità  $N_i^j$  calcolate non sono più valide e vanno ricalcolate, rimettendole nella colonna delle incognite per ricominciare.

Riepilogando: il **posizionamento assoluto** o **stand-alone** o **single point** è stata la prima tecnica ad essere implementata con l'ausilio dei segnali provenienti dai satelliti e la stima delle coordinate di un punto è effettuata solo da un unico ricevitore. La precisione della posizione è di 5÷10 metri ed è sufficiente per scopi navigazionali ma non professionali. La precisione del posizionamento assoluto con misure di fase è migliore (un paio di metri).

Un'altra modalità posizionamento assoluto è il Posizionamento Assoluto di Precisione o **Precise Point Positioning (PPP)**, che utilizza sia misure di codice che di fase, per determinare con precisione le coordinate assolute di un solo ricevitore. Con sessioni lunghe si arriva anche ad una precisione di qualche centimetro. Per il livello di precisione ottenibile è un'alternativa al posizionamento relativo e differenziale senza la necessità di avere una stazione base. Quindi la struttura è quella dello stand-alone ma la parola *precise* vuole distinguerlo dal posizionamento stand-alone in quanto sono richieste informazioni sulle orbite precise, sui modelli di errori degli orologi dei satelliti, su modelli di correzione ionosferico e troposferico che generalmente non si considerano nel posizionamento relativo/differenziale perché tali bias si elidono per differenza in questi ultimi metodi citati. Per cui solo il ricorso ad una sofisticata modellistica e prodotti precisi permette di arrivare ad un posizionamento di precisione centimetrica o addirittura sub-centimetrica senza sfruttare le differenze tipiche dei metodi relativi e differenziali. *PPP* è utilizzato perlopiù in ambito scientifico e di ricerca o per la determinazione di nuovi vertici geodetici in territori sperduti, in lontananza da stazioni permanenti GNSS da cui partire per applicare tecniche di posizionamento relativo. PPP può effettuarsi sia in post processing che real time.

## 5.3 ERRORI NELLE MISURE

I sistemi di posizionamento e navigazione satellitare GNSS sono affetti da una serie di disturbi che inducono una errata valutazione nella distanza “satellite-ricevitore” e di conseguenza comportano imprecisione sulla stima della posizione in cui si trova l’utente. Quindi la misura della distanza misurata, chiamata VALORE\*, è dato da

VALORE\*=VALORE + EA+EG+BIASES+EV in cui:

- VALORE= valore misura reale (esatta);
- EA=errore accidentale, cioè è una misura del noise dello strumento di misura: ordine di grandezza circa  $1\% \lambda$ .
- EG = errore grossolano (outlier): errori compiuti dall’operatore come ad esempio sbagliare a definire l’altezza strumentale o errori di settaggio/taratura dello strumento.
- BIASES= errore sistematico; possono essercene di diverso tipo: errori di orologio del satellite e del ricevitore, errori d’orbita, disturbo troposferico e ionosferico, multipath, variazione della posizione del centro di fase dell’antenna e verranno analizzati a breve;
- EV= errori vari di osservazione: interferenze elettromagnetiche, elettronica del ricevitore, cycle slip.

Oltre a questi errori, che sono intrinsecamente presenti nella misura, possono esistere errori introdotti volontariamente dal gestore del sistema come ad esempio quello introdotto volontariamente dal gestore del sistema GPS negli anni 90 con il nome di SA (Selective Availability) poi definitivamente rimosso il 1° maggio 2000.

Quindi non è mai possibile lavorare con la distanza perfetta ma è sempre una distanza affetta da errori. Purtroppo di questi errori si riesce ad intervenire negli errori di bias cioè negli errori sistematici; tutti gli altri errori è difficile da eliminare.

Di seguito, un’analisi dei vari errori e dei modelli di correzione

### 5.3.1 ERRORI ACCIDENTALI DI MISURA

In generale gli errori accidentali (detti anche casuali) sono quelli non prevedibili e di entità variabile. Essi rappresentano una misura del **noise** presente nella misura, ossia disturbi intrinseci nella misura perché usiamo comunque uno strumento di misura che non è perfetto quindi ha una sua imprecisione → ordine di grandezza di questo noise è circa  $\pm 1\% \lambda$  (quindi ogni volta la misura avrà sempre incertezza su quel livello di sensibilità: si pensi ad un righello con scarto millimetrico, avremo sempre incertezza sui decimi di millimetro). Questi errori possono anche dipendere dalla variazione casuale e di breve durata di fattori esterni come la pressione, l’umidità o la temperatura dell’aria, di cui lo sperimentatore non ha tenuto conto durante l’esecuzione della misura. Ad esempio nel GPS si ha un noise pari a:

- ✓ Codice C/A:  $1\% \cdot \lambda = 1\% \cdot 300\text{m} = \pm 3 \text{ metri} = \sigma_{C/A}$
- ✓ Codice P:  $1\% \cdot 30\text{m} = \pm 0,3 \text{ m} = 30 \text{ cm} = \sigma_P$
- ✓ Portanti L1, L2, L5:  $1\% \cdot 20\text{cm} = \pm 2 \text{ mm} = \sigma_L$

Con queste info sul noise di misura si possono andare a settare all'interno dei software di calcolo, come **RTKLIB**, che è una suite di software open source, quindi di libero accesso e aperto a tutti (utilizzato per analizzare e processare i dati di questa tesi) le opzioni tali da considerare le osservazioni col minore noise o impostare il valore massimo di noise che si vuole tenere in conto, anzi è proprio qui che si va a “giocare”, per poi analizzare come varia la qualità del posizionamento finale. Fortunatamente Rtklib permette di lavorare su questi parametri mentre con altri software commerciali non si riesce, nel senso che hanno di default delle impostazioni sui noise. Fortunatamente in rtklib ci si può “divertire a giocare” con questi parametri, impostando dalle opzioni un filtro sul rapporto segnale/rumore proprio per andare a capire l'effetto che si ha.

Il **rapporto segnale-rumore** è un rapporto tra la qualità o potenza del segnale rispetto al rumore di base del segnale stesso. Ovviamente più è alto, più il segnale è pulito e più ci aspettiamo che la misura sia meno affetta da rumore; più il rapporto è basso e più è simile ad accendere una tv e vedere male perché il segnale è di debole qualità. E' un fattore importante perché possiamo usare questo fattore per andare a pesare in maniera diversa, satellite per satellite, in base alla qualità del segnale e questa è una modalità assolutamente corretta di procedere (questo si può fare con software open-source e in quelli scientifici ma assolutamente non si può fare con un software commerciale perché non si raggiunge questo livello di dettaglio).

### **5.3.2 ERRORI GROSSOLANI**

GE = Gross Error (outlier) è l'errore umano, come ad esempio sbagliare a definire l'altezza strumentale (es misura altezza antenna da terra) o errori nel settaggio/taratura dello strumento. Se si compie un errore grossolano (cioè umano) o ce ne accorgiamo e riusciamo a recuperare in corso d'opera la misurazione, altrimenti bisogna rifare il rilievo.

### **5.3.3 ERRORI SISTEMATICI**

In generale per errori sistematici, detti in inglese *bias*, si intende l'errore che si ripete sempre ogni qual volta si effettua una misura e sono sempre della stessa grandezza. Si possono eliminare per mezzo di misure relative ossia facendo la differenza tra due misure si elimina automaticamente l'errore bias. Ad esempio:  $(a_1 + \epsilon_{bias}) - (a_2 + \epsilon_{bias}) = a_1 - a_2$

Gli errori sistematici in campo GNSS possono essere di natura dispersiva o meno (significa dipendenti o meno dalla frequenza) e correlati spazialmente o meno (significa che gli errori sono simili all'interno di uno spazio definito).

Negli errori bias rientrano:

❖ **Errori di orologio dei satelliti e dei ricevitori** composto da due parti:

- L'asincronismo (offset): traslazione temporale dell'origine dei tempi rispetto al tempo GNSS;
- La deriva dell'orologio (drift): l'accelerazione del ritmo di scansione del tempo.

L'errore di orologio satellitare  $\delta^j(t)$  può essere modellato da un polinomio di grado 1 o 2 (a seconda della costellazione) mentre l'errore dell'orologio al quarzo del ricevitore  $\delta_i(t)$  a causa della limitata stabilità dell'orologio del ricevitore, della difficoltà di modellarlo e dell'impossibilità fisica di sincronizzarlo con il tempo GNSS ogni volta che parte il segnale, è considerato un ulteriore incognita da calcolare

- ❖ **Errori d'orbita o di effemeride:** Il posizionamento GNSS è basato sulla conoscenza della posizione dei satelliti in ogni istante per mezzo delle *effemeridi* che permettono il calcolo della posizione istantanea dei satelliti. Ma ci sono degli errori che si compiono nello stimare la posizione del satellite. Rispetto ad alcuni anni fa, l'errore d'orbita oggi risulta notevolmente migliorato ed è comunque diverso a seconda della tipologia di effemeridi che si considera.

Le effemeridi possono essere:

- *Effemeridi trasmesse "broadcast"*: vengono inviate nel messaggio NAV e permettono il calcolo della posizione ECEF del satellite nelle epoche successive. Esse sono dunque predette ed hanno accuratezze metriche ( $\pm 1\text{m}$ ); sono calcolate da un'estrapolazione di dati precedenti (da 4÷6 ore di dati) e forniscono la posizione per le successive 1,5÷4 ore; se non fossero predette non si potrebbe fare il posizionamento in tempo reale.
- *Effemeridi "Ultra rapide predette"*: sono sempre predette ma con anticipo di qualche ora rispetto al tempo d'osservazione. La loro precisione è centimetrica; permettono il real time.
- *Effemeridi a posteriori*: possono essere Ultra rapide osservate, Rapide e Precise/Finali; vengono calcolate a posteriori (quindi dopo l'osservazione, in base alla posizione effettiva del satellite in un dato momento dell'osservazione, vengono definiti a posteriori per il calcolo della posizione del satellite) e hanno una precisione centimetrica; usate solo nel post processamento della posizione (quindi non real time).

Gli errori di effemeride si ripercuotono nel posizionamento assoluto sulle coordinate del ricevitore mentre nel posizionamento relativo e differenziale (che si analizzerà a breve) questi errori hanno un'importanza minore poiché vengono eliminati o ridotti per differenze di misure.

- ❖ **Errori dovuti alla rifrazione troposferica:** errore di natura non dispersiva (quindi non dipende dalle frequenze del segnale) ed è dunque identico per le diverse componenti del segnale. La troposfera è la parte più "bassa" dell'atmosfera che si trova a contatto diretto con la superficie terrestre e arriva ad un'altezza variabile che oscilla dagli 8 km ai poli fino ai 20km all'equatore ed è la zona in cui avvengono i fenomeni atmosferici poiché qui è concentrata la maggior parte del vapore acqueo. La troposfera può considerarsi composta da due parti:

- Parte "bagnata" (wet): dalla superficie terrestre fino a circa 11 km di altezza, in cui vi è la presenza del vapore acqueo; responsabile del 10% del ritardo del segnale
- Parte asciutta (dry): va dagli 11 km fino alla fine dello spessore troposferico; responsabile del 90% del ritardo del segnale.

La troposfera causa una rifrazione del segnale satellitare GNSS provocandone un sistematico ritardo per cui la misura di range risulta sistematicamente più lunga. La rifrazione troposferica dipende da parametri atmosferici e dall'angolo zenitale del satellite rispetto la verticale passante dal ricevitore oppure, equivalentemente, dall'angolo di elevazione del satellite rispetto all'orizzontale del ricevitore. Si nota che per angoli zenitali  $> 75^\circ$ , ovvero elevazione minori di  $15^\circ$  rispetto l'orizzontale, il segnale arriva troppo inclinato al ricevitore e significa che percorre una distanza di troposfera superiore e quindi subisce molte più rifrazioni troposferiche all'aumentare di

z proprio perché aumenta questa distanza inclinata di attraversamento troposferico del segnale. Per questo motivo è consigliabile acquisire dati solo dopo che i satelliti abbiano raggiunto almeno i 15° di elevazione sull'orizzontale (detto angolo di "Cut Off"). Il modello di errore può essere calcolato con una "mapping function" del tipo  $1/\cos(f(z))$  con  $z$  = angolo zenitale del satellite rispetto l'osservatore. I modelli più usati sono quello di Hopfield e quello di Saastamoinen.

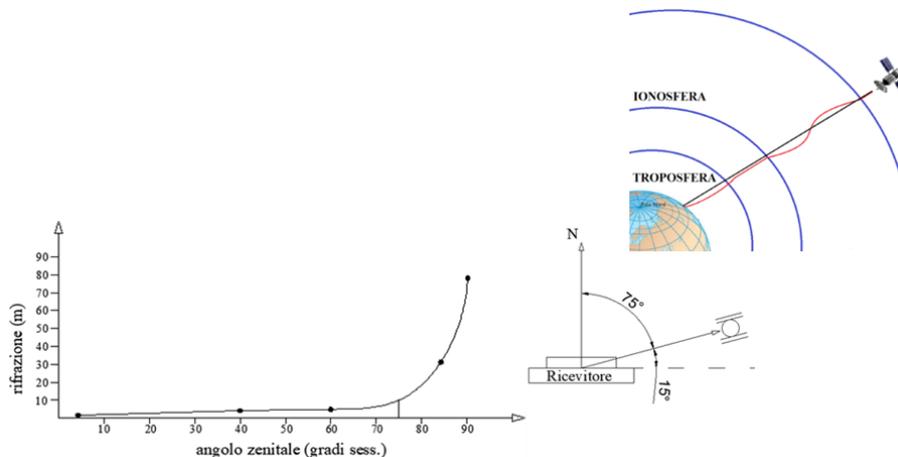


Figura 53: A sinistra: rifrazione troposferica in funzione dell'angolo zenitale; a destra troposfera e ionosfera

- ❖ **Errori dovuti alla rifrazione ionosferica:** la ionosfera è la parte "alta" dell'atmosfera, fino a circa 1000 km dalla superficie terrestre. In tale zona il Sole provoca la ionizzazione dei gas componenti l'atmosfera generando un'alta densità di ioni liberi che influenzano notevolmente l'indice di rifrazione delle onde radio. La concentrazione di elettroni liberi nella ionosfera è fortemente correlata alla quota (è più bassa negli strati ionosferici inferiori e cresce negli strati alti) e soprattutto all'attività solari, presentando variazioni stagionali e giornaliere.

La ionizzazione dell'atmosfera è dunque funzione delle radiazioni solari, ha perciò un andamento diurno ed è massima verso mezzogiorno poiché vi è la massima intensità solare ma dipende anche dalle latitudini in cui ci troviamo. L'errore può arrivare fino ad alcuni decimetri.

È un errore di natura dispersiva, ossia ha un differente impatto sulle diverse portanti ed è importante da considerare nelle applicazioni radio. L'errore, indicato con  $\partial R_{IONO}$ , è modellabile tramite una serie sulla singola portante che però può fermarsi solo al primo termine della serie poiché per frequenze elevate, come nel GPS, il secondo termine della serie e i successivi si possono trascurare

$$\delta R_{IONO} = -\frac{B_1}{f^2} - \frac{B_2}{f^4} - \dots \rightarrow \delta R_{IONO} \cong -\frac{B_1}{f^2} \quad (39)$$

con  $B_i$  = funzione della densità di ioni nella ionosfera;  $f$  = frequenza del segnale.

Tale errore può essere **eliminato** con un'opportuna combinazione di due portanti detta "**combinazione iono-free**".

Vediamola in breve: se si considera la portante  $L_1$ , che ha frequenza  $f_1$  e la portante  $L_2$ , che ha frequenza  $f_2$ , a causa del fatto che l'errore ionosferico è di natura dispersivo si avrà un effetto diversificato della rifrazione ionosferica sulle frequenze  $f_1$  e  $f_2$  che conduce ad avere valori di range misurato afflitto da errore  $R_{01}$  ed  $R_{02}$  pari rispettivamente a:

$$R_{01} = R_i^j + \partial R_{1,IONO} = R_i^j - \frac{B_1}{f_1^2} \quad (40)$$

$$R_{02} = R_i^j + \partial R_{2,IONO} = R_i^j - \frac{B_1}{f_2^2} \quad (41)$$

essendo:

$R_{0i}$  = range in misura di fase afflitto da errore misurato con la frequenza  $i$ -esima;

$R_i^j$  = range in misura di fase teorico corretto, esente da errore ionosferico

Dalla (40) si ricava  $B_1$ ; si fa lo stesso anche per la (41) e si eguagliano:

$$B_{1(40)} = B_{1(41)} \quad (42)$$

Dalla (42) si ricava  $R_i^j$  che risulta:

$$R_i^j = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot R_{01} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \cdot R_{02} = \frac{154^2}{154^2 - 120^2} R_{01} - \frac{120^2}{154^2 - 120^2} R_{02}$$

$$\rightarrow R_i^j \cong 2,55R_{01} - 1,55R_{02} \quad (43)$$

$R_i^j$  è la misura esente da errore ionosferico. Il prezzo da pagare per eliminare l'errore iono è di avere ricevitori a doppia frequenza che hanno un costo almeno il doppio di quelli a singola frequenza. Questo è il motivo principale per cui alcuni sistemi GNSS hanno onde portanti su almeno le due frequenze; nel GPS ad esempio L1 e L2 e la combo può essere fatta combinando L1 con L2, oppure L1 con L5 oppure L2 con L5 o relative frequenze degli altri sistemi GNSS.

La combo iono-free elimina l'errore ionosferico ma è 3 volte più rumorosa (cioè tre volte meno precisa rispetto ad una osservazione in singola frequenza). Dalla legge di propagazione della varianza:

$$\sigma_{IONO-FREE} = \pm \sqrt{2,55^2 \cdot \sigma_{L1}^2 + 1,55^2 \sigma_{L2}^2} \cong \pm 3 \sigma_L \quad (44)$$

In cui  $\sigma_{L_i}$  è la rumorosità (noise) della singola portante pari a  $\sigma_{L_i} = 1\% \cdot \lambda = 1\% \cdot 20\text{cm}$  ed è uguale sia per L1 che L2 quindi  $\sigma_{L1} = \sigma_{L2} = 0,2\text{cm}$ . Dalla (44) la rumorosità della combo iono-free è circa 3 volte superiore rispetto quella delle singole frequenze L1 ed L2 non combinate ma ciò è compensato dal fatto che è esente dal ritardo ionosferico del segnale che è più problematico. Si può effettuare una combinazione iono-free anche sulle misure di codice  $P_1$  e  $P_2$ :

$$P_{IONO-FREE} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (45)$$

In generale l'utilizzo di almeno 2 frequenze è indispensabile quando si vogliono misurare lunghe basi (> 15km); al di sotto di queste lunghezze l'effetto ionosferico è eliminabile con metodi differenziali o relativi che sfruttando la differenza tra due o più misure autoelidono, per differenza, l'errore ionosferico. Per base si intende la distanza tra 2 ricevitori, uno di coordinate note e l'altro no.

Come alternativa esistono anche dei modelli matematici applicabili a tutti i tipi di ricevitori (ricezione di solo codice, a ricezione di singola frequenza o a ricezione di doppia frequenza); questi modelli riducono l'errore ionosferico ma non lo eliminano del tutto come la combinazione di più frequenze che rimane la migliore soluzione. Ad esempio il modello di Klobuchar per il GPS e BeiDou basato sulla conoscenza di 4 coefficienti chiamati ION\_ALPHA e altri 4 ION\_BETA che sono riportati nel file di navigazione, spesso nella intestazione (Header) dei formati RINEX e che rappresentano i coefficienti di un polinomio

di 3° grado per la determinazione del ritardo. Oppure si usa il modello NeQuick per Galileo che usa un polinomio di secondo grado ed un indice di disturbo ionosferico (*Ionospheric disturbance Flag o Storm Flag (SF)*). Tali modelli sono inseriti nel software interno del ricevitore GNSS e utilizzano i parametri contenuti nel messaggio di navigazione trasmesso dal satellite permettendo la correzione ionosferica con discreta precisione.

- ❖ **Errore di multi-percorso o multipath:** si ha quando il ricevitore riceve un'onda non direttamente dal satellite ma gli arriva per via indiretta, riflessa da varie superfici. Multipath significa che i segnali satellitari non arrivano al ricevitore solo in linea retta, che sarebbe l'ideale, ma giungono anche per altri percorsi (multipath = multi-percorso) essendo stati riflessi su edifici, alberi, specchi d'acqua il che si traduce in un tempo di percorrenza maggiore che falsifica il dato o comunque influisce negativamente sul posizionamento. Tale effetto può essere ridotto scegliendo un sito con poche superfici riflettenti, oppure usando antenne di ricezione progettate appositamente per mitigare l'effetto multipath oppure aumentando il numero di satelliti disponibili tra cui soprattutto satelliti in orbite alte: se i segnali sono trasmessi da satelliti in orbite alte, ossia con angoli di elevazione elevati, gli effetti multipath non si verificano facilmente perché le onde riflesse non percorrono lunghe distanze a causa del piccolo angolo di incidenza tra il segnale e la superficie. Quindi satelliti con angoli di elevazione elevati possono mitigare gli errori di posizionamento. **Non è semplice modellare l'effetto multipath** a causa di diverse situazioni geometriche ed ambientali: esso è un errore di natura dispersiva (dipende dalla frequenza) e **può essere stimato attraverso una combinazione delle portanti** quindi servirà  $L_1+L_2$  ad esempio.

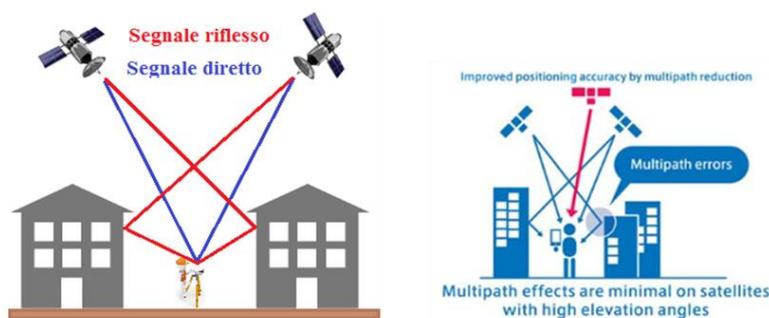


Figura 54: Errore Multipath

- ❖ **Errori dovuti alla posizione del centro di fase dell'antenna del ricevitore (si trascurano quelli del satellite):** La distanza "satellite – ricevitore" misurata con il segnale GNSS dipende anche dalla posizione del centro di fase dell'antenna PVC (Phase Correction Variation), e di fatto le coordinate del ricevitore sono effettivamente quelle del centro di fase dell'antenna del ricevitore, che non vediamo poiché interna allo strumento. Il centro di fase è un punto teorico, elettronico e non geometrico, che non è fisso ma varia sia in funzione dell'elevazione del satellite che emette il segnale e sia in base alla frequenza del segnale (il centro di fase della portante L1 può essere diverso da quello della portante L2). Per ogni antenna è fornita la posizione media del centro di fase A (figura 55), generalmente rispetto al punto in cui l'antenna viene avvitata al supporto porta-antenna ARP e si considera questo come punto di ricezione fisso compiendo quindi un errore di piccola entità pari a 1 o 2 cm (si compie errore poiché si è detto che in realtà il centro di fase è un punto variabile). Tale

errore è trascurabile per scopi ricreativi o navigazionali ma risulta importante per posizionamenti di elevata precisione. Tale errore non può essere eliminato nel posizionamento relativo o differenziale di fase tramite procedure di “differenze” tra misure effettuate da posizioni differenti (tipica del posizionamento relativo e differenziale), a meno che le antenne non siano tra loro identiche e sarà proprio questa l’ipotesi che manterremo nel posizionamento relativo e differenziale. Volendo correggere tale errore bisogna tener conto della variazione del centro di fase dell’antenna del ricevitore in funzione dell’angolo di elevazione del satellite e calibrare queste variazioni, in modo assoluto o relativo, con quelle di un’altra antenna di riferimento nota con precisione ad esempio antenna di tipo *Choke Ring*, della NOAA, adottata generalmente nelle stazioni permanenti GNSS. Da tale procedura si ottengono dei file di calibrazione che possono essere usati dai principali software di trattamento dati GNSS per correggere la posizione del centro di fase dell’antenna del ricevitore. La calibrazione è fatta dalla NOAA e i file di calibrazione per le principali antenne sono ritrovabili al sito: [www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/](http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/).

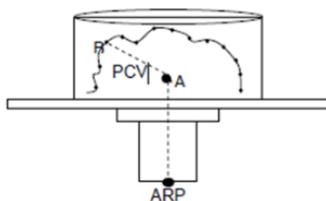


Figura 55: Centro di fase medio di antenna nel ricevitore (posizione A)

La tabella 7 riassume le caratteristiche degli errori bias nelle misure GNSS:

Tabella 7: errori bias nelle misure GNSS

Natura Bias	Tipo di Bias	Correlazione spaziale
Non Dispersivi (Non dipendenti dalla frequenza)	Effemeridi	Elevata su grandi distanze (>100 km)
	Troposfera	Regionale (decine di km)
	Orologio Ricevitore	Identici sulla stessa stazione
	Orologio Satellite	Identici sullo stesso satellite
Dispersivi (Dipendenti dalla frequenza)	Ionosfera	Regionale (decine di km)
	Multipath	Non correlati, dipendenti dal sito
	Centri di fase antenna	

### **5.3.4 ERRORI VARI DI OSSERVAZIONE**

- ❖ Errori dovuti all’elettronica del ricevitore e ritardi hardware che “sporcano” particolarmente il segnale.
- ❖ Interferenze elettromagnetiche: causate da temporali o lampi, stazioni radio o telefoniche che usano le stesse frequenze dei segnali satellitari possono causare interferenze elettromagnetiche provocando una elevata rumorosità del segnale GNSS e nel caso più sfavorevole anche una sua perdita.
- ❖ Cycle slip: il segnale GNSS inviato al ricevitore può subire delle interruzioni durante la sua acquisizione dovuta, ad esempio, alla presenza di ostacoli, cattive condizioni atmosferiche,

riflessioni multiple, che generano un salto nel conteggio del numero di cicli interi (Figura 54).

Durante l'elaborazione dei dati vi sono varie tecniche, quali la differenziazione delle osservazioni, l'utilizzo di combinazioni delle portanti, che permettono di "riparare" i salti di ciclo. In molti casi, una diligente post-elaborazione consente sia la individuazione dei cycle slip che la loro eliminazione.

### **5.3.5 INCIDENZA DEGLI ERRORI ANALIZZATI**

Nei paragrafi precedenti sono state descritte le principali fonti di errore che perturbano una misura GNSS. Tenendo conto della diversità delle sorgenti di errori, nella Tabella 8 vengono riassunti gli errori, in termini di distanza, che degradano la precisione delle misure.

Tabella 8: errori di posizionamento

CAUSA ERRORE		ERRORE [m]
OROLOGIO	Satellite	1 ÷ 3
	Ricevitore	10 ÷ 100
ORBITA	Effemeridi broadcast	1 ÷ 3
	Effemeridi precise	< 0.05
RIFRAZIONE	Ionosfera	5 ÷ 50
	Troposfera	2 ÷ 10
RICEVITORE	Multipath di codice	5 ÷ 15
	Centro di fase antenna	0.01 ÷ 0.05

**In conclusione le tecniche di posizionamento assoluto sono affette da errori di varia natura (visti in questo capitolo) che portano ad una precisione variabile tra i 5 e i 10 metri circa** in posizionamento assoluto di codice, in funzione di diversi aspetti tra cui anche la qualità della costellazione satellitare (quest'ultima definita dagli indici DOP). In effetti per il GPS, dal documento ufficiale “*Gps Standard Positioning Service (SPS)*” edizione 2020, risulta che, in assenza di Select Availability, l'errore sulla posizione finale del ricevitore è definito  $\leq 8$  metri in planimetria e  $\leq 13$  metri in altimetria con un intervallo di confidenza del 95%.

Tale precisione è accettabile per scopi di navigazione o fini ricreativi (escursioni) ma è insufficiente per scopi topografici, geodesia, tracciamento di grandi opere, controllo di deformazioni o in generale per scopi ove è richiesta un'alta precisione (centimetrica e sub-centimetrica). Anche se tali errori vengono modellati, essi si riducono ma permangono e comunque si aggiungeranno anche gli errori di modello oltre al fatto che i valori parametri da inserire nei modelli non son facili da capire; si pensi ad esempio ai parametri atmosferici che variano durante la corsa del segnale o la variazione di concentrazione di ioni nella ionosfera e così via.

**Se si vuole raggiungere precisioni elevate la soluzione è quindi abbandonare il posizionamento assoluto e affidarsi ad altri tipi di posizionamento: essi sono il posizionamento relativo e il posizionamento differenziale**, che si analizzeranno nei prossimi capitoli. Questi metodi sono basati sulla differenza di misure effettuate da posizioni differenti che permetterà l'eliminazione, o la forte riduzione, degli errori visti in questo capitolo. **Con tecniche di posizionamento relativo si lavora in post processamento ed è possibile raggiungere precisioni fino a  $10^{-6}$ ÷ $10^{-8}$  rispetto alla lunghezza della base (in altre parole è possibile raggiungere precisioni millimetriche o sub-millimetriche per scopi di precisione) mentre con tecniche differenziali si lavora in real time e si raggiungono precisioni centimetriche nel posizionamento in tempo reale.**

## 5.4 POSIZIONAMENTO RELATIVO

La tecnica del posizionamento assoluto è affetta da errori la cui modellazione non permette di raggiungere una precisione accettabile per scopi topografici, per cui ora si analizzano le tecniche di posizionamento che permettano una migliore stima della posizione ovvero il *posizionamento relativo* e il *posizionamento differenziale*.

Il posizionamento relativo è svolto in **post processamento** e permette di raggiungere **precisioni fino al livello millimetrico o sub-millimetrico** (da  $10^{-6}$ ÷ $10^{-8}$  lunghezza della base  $b_{AB}$  in posizionamento statico). Infatti è detto anche posizionamento di precisione. E' questo il tipo di posizionamento trattato nella tesi e con cui si testa la precisione delle nostre misure. E' un tipo di posizionamento che si può effettuare con tutti i tipi di ricevitori, sia professionali che non quindi è un metodo molto duttile.

Il *posizionamento relativo* si basa sul fatto che utilizzando almeno due ricevitori che osservano simultaneamente gli stessi satelliti è possibile effettuare vari livelli di combinazioni lineari di differenze di posizione per eliminare o ridurre sensibilmente gli errori comuni nelle due stazioni. L'obiettivo del metodo è determinare la posizione vettore **baseline**  $b_{AB}$  che è il vettore congiungente due vertici, su cui stazionano contemporaneamente 2 ricevitori uno di coordinate note A (stazione Master) e l'altro incognito B (Rover).

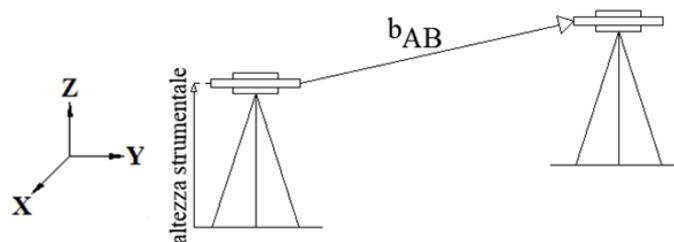


Figura 56: Nel posizionamento relativo il ricevitore A è di coordinate note (stazione Base o Master) e il ricevitore B di coordinate incognite (stazione Rover); il vettore baseline  $b_{AB}$  unisce i centri di fase delle antenne dei due ricevitori

Il vettore baseline  $b_{AB}$  è definito dalla differenza tra le coordinate dei due ricevitori, ottenendo le coordinate della baseline:

$$\vec{b}_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \quad (46)$$

Nella differenziazione tra 2 o più stazioni non è possibile determinare la posizione di entrambe (o più) ma solo la loro posizione relativa ossia i  $\Delta$ . Ciò implica che se si vuole conoscere la posizione di uno dei 2 ricevitori, l'altro ricevitore deve essere noto. Di fatti il posizionamento del ricevitore B (Rover) nel sistema di riferimento globale sarà dato da:

$$\vec{X}_B = \vec{X}_A + \vec{b}_{AB} \quad (47)$$

essendo A=stazione Master di coordinate note.

Si può effettuare un posizionamento STATICO RELATIVO, in cui i ricevitori stazionano su A e B per tutto il tempo della campagna di misura, ed un posizionamento CINEMATICO RELATIVO in cui il ricevitore B si muove, mentre A risulta sempre ferma.

Per il posizionamento relativo quindi si necessita di un ricevitore posto in A (Master), di posizione nota e di un ricevitore in B (Rover) di posizione incognita da determinare tali che vedano contemporaneamente gli stessi satelliti e poi si faranno delle differenze tra la misura fatta da A e da B o meglio delle combinazioni di differenze (che genereranno le “differenze singole, doppie” e le “differenze triple”) e successivamente verranno trattati i dati ottenuti per ricavare le componenti del vettore baseline  $\vec{b}_{AB}$  tra i centri di fase delle due antenne; per la coordinata “z” va poi ridotto sui punti di stazione a terra attraverso la misura delle altezze strumentali delle antenne.

Il posizionamento relativo può essere eseguito, sia in misura di fase che di codice ma **in pratica si applica solo alle misure di fase solamente perché il risultato sarà più preciso (una volta note le ambiguità di fase).**

Per trovare  $\vec{b}_{AB}$  in **misura di fase**, si fa riferimento all’espressione della misura di fase espressa in cicli del posizionamento assoluto (vedi la (37)) in cui si considerano anche gli errori spazialmente correlati di ionosfera, troposfera ed effemeridi; per un ricevitore generico  $i$  e un satellite generico  $j$ , separando termini noti (membro di sinistra) da termini incogniti (membro di destra) si ha:

$$\phi_i^j(t) + f^j \partial^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_i^j(t) - N_i^j - f^j \partial_i(t) + I_i^j(t) + T_i^j(t) + E_i^j(t) \quad (48)$$

A questo punto, si parte con gli ordini di differenza come di seguito riportato.

#### 5.4.1 SINGOLE DIFFERENZE

Considera 2 ricevitori, posti in stazione sui vertici A e B, che osservano simultaneamente lo stesso satellite  $j$ . Si impongono delle ipotesi: il satellite venga tracciato con continuità senza disconnessioni di collegamento ovvero senza cycle slips; presenza di un solo satellite  $j$ .

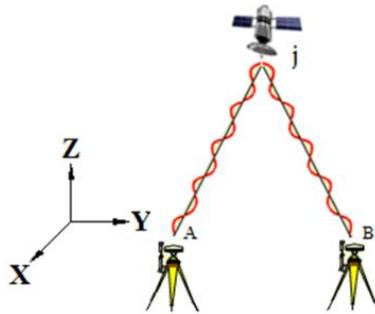


Figura 57: Schema delle singole differenze tra satellite  $j$  e due ricevitori A e B

Scriviamo le due equazioni delle misure di fase espressa in cicli sia per A che per B:

$$\phi_A^j(t) + f^j \partial^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) - N_A^j - f^j \partial_A(t) + I_A^j(t) + T_A^j(t) + E_A^j(t) \quad (49)$$

$$\phi_B^j(t) + f^j \partial^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_B^j(t) - N_B^j - f^j \partial_B(t) + I_B^j(t) + T_B^j(t) + E_B^j(t) \quad (50)$$

Si fa la differenza tra le due equazioni per eliminare i bias comuni nei due ricevitori. Quindi da "(50) – (49)" si ricava:

$$\phi_B^j(t) - \phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)] - (N_B^j - N_A^j) - f[\delta_B(t) - \delta_A(t)] + \Delta I_{AB}^j(t) + \Delta T_{AB}^j(t) + \Delta E_{AB}^j(t) \quad (51)$$

**La (51) è detta “singola differenza”.** Con la singola differenza si elimina il bias “ $f \cdot \delta^j$ ” legato all’asincronismo dell’orologio del satellite, in quanto termine uguale nelle due equazioni (49) e (50). Permangono ancora gli errori di orologio del ricevitore e le ambiguità di fase.

Gli errori ionosferico I, troposferico T ed effemeride E, essendo spazialmente correlati significa che possono considerarsi circa uguali per basi  $\leq 10 \div 15$  Km; supponendo questa ipotesi il loro residuo sarà pari a zero ( $\Delta I_{AB}^j(t) = 0; \Delta T_{AB}^j(t) = 0; \Delta E_{AB}^j(t) = 0$ ). Se la baseline ha una lunghezza superiore a 15 km tale residuo va considerato.

Per la (51) si semplifica usando questa designazione:  $(\blacksquare)_B^j - (\blacksquare)_A^j = (\blacksquare)_{AB}^j$  e si ha pertanto:

$\phi_B^j(t) - \phi_A^j(t) = \phi_{AB}^j(t); N_B^j - N_A^j = N_{AB}^j; \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) = \rho_{AB}^j(t); \delta_B(t) - \delta_A(t) = \delta_{AB}(t)$   
Ipotizzando una baseline  $b_{AB} \leq 15$  Km si ha che gli errori spazialmente correlati si annullano ( $\Delta=0$ ), quindi la (51) può risciversi semplificata, ottenendo **l’equazione alle singole differenze**:

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^j - f \delta_{AB}(t) \quad (52)$$

ove le coordinate della base line, incognite, sono all’interno del termine  $\rho_{AB}^j(t)$ .

## 5.4.2 DOPPIE DIFFERENZE

Ipotesi: assenza di cycle slip (quando vi è il contatto con più satelliti, un cycle slip significa perdere contemporaneamente il contatto con tutti i satelliti); presenza di 2 satelliti (j e k); i ricevitori A e B osservano simultaneamente i satelliti j e k.

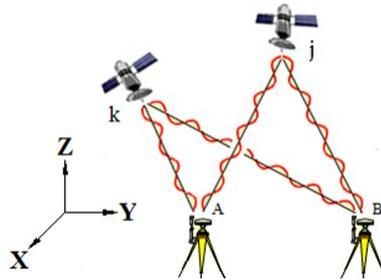


Figura 58: schema alle doppie differenze

Si necessita di una differenza singola sia per il satellite j che per il satellite k:

$$\phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^j - f^j \delta_{AB}(t) + \Delta I_{AB}^j(t) + \Delta T_{AB}^j(t) + \Delta E_{AB}^j(t) \quad (53)$$

$$\phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t) - N_{AB}^k - f^k \delta_{AB}(t) + \Delta I_{AB}^k(t) + \Delta T_{AB}^k(t) + \Delta E_{AB}^{kj}(t) \quad (54)$$

Nell’ipotesi di lunghezza massima del vettore base line di 15-20 km che permette di approssimare a zero gli errori spazialmente correlati ( $\Delta=0$ ) e che le frequenze del segnale emesso dai due satelliti siano uguali ( $f^j = f^k$ ) (ipotesi vera per GPS, Galileo e BeiDou ma non per Glonass) facciamo la

differenza tra le due singole differenze, ossia (54)-(53) e si ottiene la **equazione alle doppie differenze** espressa nella (55):

$$\phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) - N_{AB}^{jk} \quad (55)$$

in cui non appaiono più gli errori di orologio dei ricevitori “ $f \cdot \partial_{AB}$ ” mentre resta l’ambiguità di fase incognita.

Se avessimo avuto baseline maggiore di 15 km avremmo dovuto eseguire la differenza tra gli errori spazialmente correlati della (54) e (53) che avrebbe portato ad una equazione di questo tipo:

$$\phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) - N_{AB}^{jk} + \Delta \nabla I_{AB}^{jk}(t) + \Delta \nabla T_{AB}^{jk}(t) + \Delta \nabla E_{AB}^{jk}(t) \quad (55.1)$$

Per sviluppare i termini della (55) occorre ricordare che:

$$\begin{aligned} \rho_{AB}^{jk}(t) &= \rho_B^k(t) - \rho_B^j(t) - (\rho_A^k(t) - \rho_A^j(t)) \\ N_{AB}^{jk} &= N_B^k - N_B^j - (N_A^k - N_A^j) \\ \phi_{AB}^{jk} &= \phi_B^k - \phi_B^j - (\phi_A^k - \phi_A^j) \end{aligned} \quad (56)$$

L’assenza degli errori degli orologi dei ricevitori è il motivo per cui questa è l’osservazione standard dei programmi che trattano dati GPS. Tale assunzione è valida perché si sono assunte uguali le frequenze dei satelliti nonché la simultaneità delle osservazioni.

In presenza di *cycle slip*, diagrammando nel tempo le osservazioni alle doppie differenze otteniamo l’andamento “a gradino” riportato in figura 59. Il cycle slip si verifica quando il ricevitore sgancia tutti i satelliti cioè è una perdita di contatto con tutti i satelliti e può capitare per problemi elettronici o di qualità del segnale. Questo fa capire quanto le osservazioni siano funzione del valore dell’ambiguità: col cycle slip si creano vere e proprie discontinuità nelle osservazioni dei medesimi satelliti in quanto il resettamento del collegamento porterebbe ad una N incoerente con la precedente.

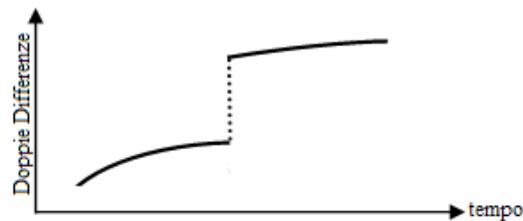


Figura 59: Cycle slip nelle doppie differenze

Per quanto riguarda la costellazione GLONASS le doppie differenze non portano alla eliminazione dell’errore d’orologio dei ricevitori in quanto il segnale viene trasmesso su frequenze diverse. L’equazione alle doppie differenze, considerando due ricevitori su due punti A e B che osservano simultaneamente due satelliti  $j$  e  $k$ , si presenta nella seguente forma:

$$\phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda^k} \rho_{AB}^k(t) - \frac{1}{\lambda^j} \rho_{AB}^j(t) - N_{AB}^{jk} - (f^k - f^j)[\delta_{AB,GLO}(t) - L_{AB,GLO}] + f^k \delta_{AB,IC}^k - f^j \delta_{AB,IC}^j \quad (57)$$

A differenza delle altre costellazioni GNSS, nel Glonass le doppie differenze non eliminano l’errore di orologio dei ricevitori a causa delle diverse frequenze con cui è trasmesso il segnale. Tale termine nel Glonass costituisce un’incognita aggiuntiva del posizionamento relativo, assieme al bias intercanale.

### 5.4.3 TRIPLE DIFFERENZE

Mentre nelle singole e doppie differenze i satelliti sono assunti fermi nel generico istante di tempo  $t$ , nel metodo delle triple differenze invece i satelliti si assumono in movimento e si considereranno due epoche:  $t_1$  e  $t_2$ . La differenza tripla consiste in una differenza tra una “doppia differenza al tempo  $t_2$  – doppia differenza al tempo  $t_1$ ”.

Il satellite  $k_{(t_1)}$  si sposta nella posizione nuova e diventa  $k_{(t_2)}$ , così come per il satellite  $j$ .

Come nei metodi visti in precedenza anche qui si parte dall’ipotesi di assenza di *cycle slip* e base line inferiore ai 15 km.

Si parte da due equazioni alle differenze doppie, una nel tempo  $t_1$  e una nel tempo  $t_2$ :

$$\phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_1) - N_{AB}^{jk} \quad (58)$$

$$\phi_{AB}^{jk}(t_2) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_2) - N_{AB}^{jk} \quad (59)$$

Sottraendo le due relazioni si elimina l’incognita “ambiguità di fase  $N_{AB}^{jk}$ ” e si ottiene l’**equazione delle triple differenze**:

$$\phi_{AB}^{jk}(t_1) - \phi_{AB}^{jk}(t_2) = \frac{1}{\lambda} [\rho_{AB}^{jk}(t_2) - \rho_{AB}^{jk}(t_1)] \quad (60)$$

che può essere scritta in forma simbolica come segue:

$$\phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_{12}) \quad (61)$$

La designazione simbolica è:  $(\blacksquare)_{AB}^{jk}(t_{12}) = (\blacksquare)_{AB}^{jk}(t_2) - (\blacksquare)_{AB}^{jk}(t_1)$  (62)

da applicare ai termini  $\Phi$  e  $\rho$ . I termini del membro di destra sono differenze seconde, secondo la (56). Su  $\rho$  si avrà:

$$\rho_{AB}^{jk}(t_{12}) = \rho_B^k(t_2) - \rho_B^j(t_2) - [\rho_A^k(t_2) - \rho_A^j(t_2)] - [\rho_B^k(t_1) - \rho_B^j(t_1) - [\rho_A^k(t_1) - \rho_A^j(t_1)]] \quad (63)$$

Idem per  $\phi_{AB}^{jk}(t_{12})$ .

Il vantaggio delle triple differenze è l’eliminazione dell’incognita di ambiguità di fase. Sebbene si sia fatta l’ipotesi che durante la trasmissione del segnale non si verifichino dei *cycle slip*, se prendessimo però in considerazione la presenza di *cycle slip*, dalla (55) risulta che le triple differenze sono indipendenti dall’ambiguità  $N$  e quindi immuni al *cycle slip* che risulta un ulteriore vantaggio. Se infatti graficizzassimo le osservazioni di triple differenze nel tempo, la presenza di un *cycle slip* comporterebbe il manifestarsi solo di un “picco” nei valori delle osservazioni (figura 60) facilmente individuato ed eliminato dalle osservazioni analogamente a quanto si fa per un errore grossolano (outlier).

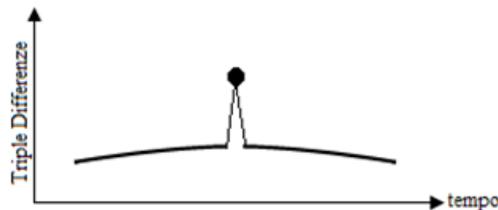


Figura 60: Cycle slip nelle triple differenze

Le triple differenze apparentemente sembrano perfette ma in realtà presentano dei difetti importanti quali:

- le differenze terze non consentono di operare sul real time perché necessitano di 2 epoche di misura consecutive (real time invece intende soluzione con 1 epoca di misura)
  - correlazione elevata: per giungere all'equazione della tripla differenza si sono svolte tante combinazioni di differenze: si è differenziato 3 volte tale da avere  $2^3=8$  osservazioni basate sui medesimi satelliti il che comporta correlazione tra le osservazioni e la conseguenza è che più si combinano osservazioni e più si combinano i loro errori, per la legge di propagazione della varianza. Quindi succede che questa combinazione in realtà risulta la combinazione di tutti gli errori precedenti e quindi non è molto eccellente come qualità; in generale le misure di fase tra un satellite  $j$  e due punti A e B cioè  $\phi_A^j(t)$  e  $\phi_B^j(t)$ , si dicono correlate fisicamente fino a quando il satellite osservato dai due ricevitori è lo stesso ed in più ci sono le correlazioni matematiche dovute ai vari ordini di differenze.
  - bassa ridondanza: per scrivere l'equazione alle triple differenze si necessita di otto misure di range; si veda la (63) che di fatti è composta da 8 termini. Significa che per avere una sola misura di differenza terza necessito di 8 singole misure di  $\rho$ , ognuna misurata una volta sola che significa bassa ridondanza (se una di esse è sbagliata, non abbiamo modo di scoprirlo dato che si misura una volta)
- Tutto ciò porta alla conclusione che le triple differenze non siano ottimali come soluzione finale. Esse infatti sono utilizzate solo per individuare ed eliminare cycle slip visibili graficamente come dei picchi (fig.60) o come soluzione approssimata. Invece **come soluzione finale si utilizza il metodo alle doppie differenze.**

Alla fine si ottiene la stima della baseline (Baseline Components), con le sue precisioni (Standard Deviation), le sue varianze (matrice di varianza covarianza), ecc. ecc.

From Station	To Station	Solution	Slope	Ratio
3	903	Iono free fixed	23087.240	19.0
Occupation Time		Meas. Interval (seconds):	03:54:00.00	15.00
Solution Type:		Iono free fixed double difference		
Solution Acceptability:		Passed ratio test		
Ephemeris:		Broadcast		
Baseline Slope Distance):		23087.240		0.000444
Baseline Components (meters):				
	dx	-10446.327	dy	19061.009
	dz	7782.855		
Standard Deviations (meters):				
		0.000839		0.000408
		0.000918		
	dn	10981.643	de	20308.205
	du			
		0.000624		0.000404
				dh
Posteriori Covariance Matrix:				
		7.038408E-007		
		4.756531E-008	1.662718E-007	
		3.904630E-007	-2.534002E-009	8.433269E-007
(see in the LAB)				

Figura 61: Output da software di un posizionamento relativo

**Posizionamento relativo in modalità statica.**

Si ipotizza di avere due ricevitori che osservano gli stessi satelliti alle stesse epoche di misura.

Il numero di osservazioni totali è dato dal numero di satelliti ( $n_j$ ) moltiplicato per il numero di epoche ( $n_t$ )  $\rightarrow n^{\circ}\text{oss} = n_j n_t$

Il numero di incognite è dato da: 3 coordinate del ricevitore rover ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) + le ambiguità  $N_j$  (1 ambiguità per ogni satellite quindi si hanno  $n_j$  ambiguità) +  $\delta_i$  (errori di orologio del ricevitore)  $\rightarrow n^{\circ}\text{incognite} = 3 + n_j + n_t$

La configurazione base alle singole differenze tra osservazioni ed incognite sarebbe:

$$n^{\circ}\text{osservazioni} \geq n^{\circ}\text{incognite} \rightarrow n_j n_t \geq 3 + n_j + n_t \rightarrow n_t \geq \frac{n_j+3}{n_j-1} \quad (64)$$

La soluzione finale è identica a quella vista nel posizionamento assoluto di fase. La soluzione minima  $n_j=2$  richiede  $n_t \geq 5$  non è affidabile per malcondizionamento geometrico.

La soluzione classica è  $n_j=4$  che comporta  $n_t \geq 7/3$  ossia  $n_t \geq 3$ . Da notare che non si ha soluzione con un'unica epoca di misura (quindi non è applicabile per il real time).

Alle doppie differenze si hanno due satelliti che lavorano in contemporanea per una singola equazione alle doppie differenze: la regola è pertanto considerare “ $n_j-1$ ” satelliti per ogni equazione e di conseguenza bisogna considerare “ $n_j-1$ ” ambiguità. Ad esempio se si hanno 3 satelliti sarebbe come considerare 2 satelliti ma è necessario avere un satellite di riferimento rispetto al quale si differenziano le misure quindi se si hanno i satelliti J, K, L nelle doppie differenze si impone che il satellite J sia quello di riferimento per cui si dovrà considerare una volta la coppia JK e una volta la coppia JL e ogni coppia fornisce una unica equazione alle doppie differenze.

Rispetto alle singole differenze, nelle incognite delle doppie differenze scompare il termine  $n_t$  legato al bias di orologio del ricevitore. L'equazione osservazioni - incognite sarà:

$$(n_j - 1)n_t \geq 3 + (n_j - 1) \rightarrow n_t \geq \frac{n_j+2}{n_j-1} \quad (65)$$

Il numero di satelliti minimo è  $n_j=2$ , con  $n_t=4$  epoche di misura ma questa soluzione, teoricamente possibile, nella pratica dà risultati non accettabile a causa del mal condizionamento geometrico dei satelliti nelle varie epoche (ogni epoca di misura è intervallata alla successiva solo di alcuni secondi e quindi acquisendo 4 epoche con intervallo di pochi secondi l'una dall'altra il satellite compie un tratto di orbita troppo breve per offrire informazioni differenti dalla precedente epoca); sarebbe fattibile solo se si avessero epoche maggiormente spaziate (ogni epoca spaziata dalla precedente di alcune ore) per garantire una disposizione geometrica satellitare differente e quindi avere osservazioni differenti e utili poter ottenere una soluzione affidabile.

Si può notare che non si giunge mai ad una soluzione con una sola epoca di misura.

Nel posizionamento GLONASS il fatto di avere in più le incognite di bias intercanale porta ad aumentare il numero di epoche necessarie al posizionamento rispetto le altre costellazioni GNSS.

Nelle triple differenze le uniche incognite sono solo le 3 coordinate del ricevitore B (le ambiguità di fase non compaiono in questa differenza). Per quanto riguarda il numero di osservazioni qui si necessita di 2 satelliti per una osservazione (da cui “ $n_j-1$ ” come visto nelle doppie differenze) ma anche di 2 epoche per avere 1 osservazione per cui il numero di epoche da considerare è “ $n_t-1$ ”, quindi il termine da usare per il  $n^{\circ}$  totale di osservazioni è  $(n_j-1) \cdot (n_t-1)$ . Si avrà quindi:

$$n^{\circ}_{oss} \geq n^{\circ}_{incognite} \rightarrow (n_j - 1)(n_t - 1) \geq 3 \rightarrow n_t \geq \frac{n_j + 2}{n_j - 1} \quad (66)$$

Una soluzione pratica è con  $n_j = 4 \rightarrow n_t \geq 2$  epoche di misura. Tale soluzione, per garantire sufficiente ridondanza, necessita di acquisire osservazioni per un tempo maggiore, almeno 1 ora per basi lunghe 10 km o da 3÷4 ore per basi lunghe da 20÷30 km.

La soluzione  $n_j = 2 \rightarrow n_t \geq 4$  pur teoricamente possibile nella pratica dà risultati non soddisfacenti a causa di cattiva configurazione geometrica (malcondizionamento) e che richiederebbe epoche molto spaziate le une dalle altre di alcune ore per assicurare una conformazione geometrica abbastanza diversa dalla precedente epoca di misura.

Si è dunque visto che in tutti i casi di posizionamento statico relativo, le configurazioni base hanno portato all'esclusione di poter determinare la posizione con un'unica epoca di misura, per cui si può procedere solo per post processamento.

### Posizionamento relativo in modalità cinematica

Il ricevitore A si considera fisso in un determinato punto di stazione, mentre il ricevitore B in moto ed occorre determinare la sua posizione ad ogni epoca di misura. Ne discende che si hanno tre incognite (coordinate ECEF:  $X_B, Y_B, Z_B$ ) per il numero di epoche di osservazione e la relazione osservazione-incognite sarà:

- singole differenze  $\rightarrow n_j n_t \geq 3n_t + n_j + n_i$ ;
- doppie differenze  $\rightarrow (n_j - 1)n_t \geq 3n_t + (n_j - 1)$ ; (67)
- triple differenze  $\rightarrow (n_j - 1)(n_t - 1) \geq 3(n_t - 1)$ .

Nessuna delle tre relazioni sopra riportate permette la soluzione cinematica real time ossia con una sola epoca ( $n_t = 1$ ) quindi il cinematico è risolvibile in post processamento. Si potrebbe applicare in real time solo se si elimina l'ambiguità di fase dalle incognite delle singole e doppie differenze mediante procedura di inizializzazione. L'inizializzazione può essere di 2 tipi:

- **statica:** col ricevitore mobile B si resta fermo in un punto di coordinate note, detto “*Starting Point*”, per più epoche finché il software interno del ricevitore risolva le ambiguità fissandole ad intero e fatto ciò è possibile toglierle dalle incognite; la baseline “stazione di base A-starting point” è detta *Starting Vector*
- **cinematica:** si risolvono le ambiguità di fase durante il movimento (come avviene su un aeroplano in movimento che deve comunicare la posizione) tramite un ricevitore a doppia frequenza che usa l'algoritmo **OTF** (*On The Fly*) il quale fornisce una determinazione istantanea dell'ambiguità di fase durante il movimento. Tale tecnica richiede un ricevitore a doppia frequenza.

Dopo l'eliminazione delle incognite di ambiguità dalle singole e doppie differenze si avrà la possibilità di determinare la posizione secondo queste condizioni:

- ✓ singole differenze:  $n_j \geq 4$  satelliti per  $n_t \geq 1$
- ✓ doppie differenze:  $n_j \geq 4$  satelliti per  $n_t \geq 1$

Nella pratica però con il termine “posizionamento relativo” si intende solo post processing quindi non viene utilizzato per real time. Per il real time si usa il posizionamento differenziale che si basa sugli stessi principi ma ottimizzato al tempo reale.

Le **differenze terze** sono indipendenti dall’ambiguità ma necessitano di due epoche di misura ossia necessitano di un’epoca di riferimento  $t_1$  + epoca  $t_2$  così da avere  $n_t=2$ , sia per il ricevitore A che per B. Questo lo si nota dall’equazione delle differenze triple (equazione 60). Si avranno in totale quindi  $n_t=2$  e la relazione  $(n_j - 1)(n_t - 1) \geq 3(n_t - 1)$  diventa possibile, dando come risultato:

✓ triple differenze:  $n_j \geq 4$  satelliti

ma la tripla differenza non è applicabile al posizionamento cinematico in real time proprio perché si necessita di 2 epoche di misura (mentre con il termine real time s’intende soluzione ottenibile con 1 epoca di misura)

#### 5.4.4 MODELLI LINEARIZZATI NEL POSIZIONAMENTO RELATIVO

Le equazioni alle differenze di fase sono di tipo non lineare, vengono perciò linearizzate con sviluppo di Taylor e poi impostate secondo il modello di Gauss “ $Ax-l_0 = v$ ” come visto per il posizionamento assoluto di fase. Si trascurano i bias di ionosfera, troposfera ed effemeridi.

Si consideri il **caso statico**.

Alle singole differenze (non si ha l’errore di orologio del satellite), supposte note le coordinate della stazione Master A, nel caso di avere 5 satelliti (apici) si possono scrivere 5 equazioni alle singole differenze che linearizzate e scritte secondo il modello di Gauss danno vita alla seguente matrice (68) relativa a **una sola epoca di misura**.

Applicando il principio dei minimi quadrati si otterranno le stime delle correzioni  $\hat{x}_B, \hat{y}_B, \hat{z}_B$  (da riapplicare ai valori approssimativi di partenza della baseline  $\Delta X, \Delta Y$  e  $\Delta Z$  per una successiva iterazione ma dato che la stazione Master è nota, tali correzioni in realtà sono direttamente applicabili alla posizione approssimata del ricevitore in questo modo:  $X_B = X_B^{(0)} + \hat{x}_B$ ), le 5 differenze di ambiguità  $N_{AB}^j$  e l’errore combinato di orologio  $\partial_{AB}$ .

Da notare che in un epoca di misura si hanno 9 incognite in 5 equazioni alle singole differenze per cui si necessita di **almeno 2 epoche**. Di seguito la matrice con una sola epoca di misura.

I termini con il soprassegno come  $\hat{x}_B, \hat{y}_B, \hat{z}_B$  significa che sono il risultato finale stimato al termine del procedimento ai minimi quadrati, mentre la semplice incognita è indicata come  $x_B, y_B, z_B$ .

$$\begin{bmatrix}
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_{AB}^{1(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_{AB}^{1(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_{AB}^{1(0)}} \right) & -\lambda_{AB}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(2)}}{\rho_{AB}^{2(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(2)}}{\rho_{AB}^{2(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(2)}}{\rho_{AB}^{2(0)}} \right) & 0 & -\lambda_{AB}^{(2)} & 0 & 0 & 0 & -1 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(3)}}{\rho_{AB}^{3(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(3)}}{\rho_{AB}^{3(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(3)}}{\rho_{AB}^{3(0)}} \right) & 0 & 0 & -\lambda_{AB}^{(3)} & 0 & 0 & -1 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(4)}}{\rho_{AB}^{4(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(4)}}{\rho_{AB}^{4(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(4)}}{\rho_{AB}^{4(0)}} \right) & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{AB}^{(4)} & 0 & -1 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(5)}}{\rho_{AB}^{5(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(5)}}{\rho_{AB}^{5(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(5)}}{\rho_{AB}^{5(0)}} \right) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_{AB}^{(5)} & -1
 \end{bmatrix}
 \begin{pmatrix}
 x_B \\
 y_B \\
 z_B \\
 N_{AB}^{(1)} \\
 N_{AB}^{(2)} \\
 N_{AB}^{(3)} \\
 N_{AB}^{(4)} \\
 N_{AB}^{(5)} \\
 c\delta_{AB}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 \lambda\phi_{AB}^{(1)} - \rho_{AB}^{1(0)} \\
 \lambda\phi_{AB}^{(2)} - \rho_{AB}^{2(0)} \\
 \lambda\phi_i^{(3)} - \rho_{AB}^{3(0)} \\
 \lambda\phi_i^{(4)} - \rho_{AB}^{4(0)} \\
 \lambda\phi_i^{(5)} - \rho_{AB}^{5(0)}
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 \nu^{(1)} \\
 \nu^{(2)} \\
 \nu^{(3)} \\
 \nu^{(4)} \\
 \nu^{(5)}
 \end{pmatrix}
 \quad (68)$$

in cui  $X_B^{(0)}$  = posizione approssimata del ricevitore B (Rover);  $X^{(i)}$  = posizione del satellite i-esimo;  $\rho_{AB}^{i(0)} = (\rho_B^i)_{(0)} - \rho_A^i$  in cui con (0) indica le coordinate approssimate del ricevitore. Alla (68) si applica sviluppo dei minimi quadrati che ci fornirà le stime delle incognite.

Nelle doppie differenze non vi è l'errore di orologio dei ricevitori e le incognite sono solo le correzioni  $x_B, y_B, z_B$  e le differenze di ambiguità  $N_{AB}^i$ . Supponendo la simultanea presenza di 4 satelliti (apici) che significa avere 3 equazioni di doppie differenze rispetto ad un satellite di riferimento che si supponga essere il satellite 1, si avranno per cui 3 equazioni alle doppie differenze e 6 incognite ( $x_B, y_B, z_B + 3$  differenze di ambiguità combinate  $N_{AB}^i$ ) per una generica epoca. Dunque si necessita di almeno una seconda epoca di misura per pareggiare il bilancio equazioni-incognite e poter risolvere il posizionamento.

Se si volesse applicare il principio dei minimi quadrati per avere un maggiore controllo sui parametri e un miglior risultato avremmo avuto bisogno di 3 epoche poiché uno dei criteri necessari e sufficienti per sviluppo ai minimi quadrati è avere un sistema sovradeterminato ossia numero di equazioni > numero di incognite.

Di seguito modello di Gauss con equazioni linearizzate, scritte in forma matriciale per le doppie differenze considerando 2 epoche di misura  $t_1$  e  $t_2$ .

$$\begin{bmatrix}
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(2)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} - \frac{X_B^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(2)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} - \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(2)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} - \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} \right) & \lambda_{AB}^{12} & 0 & 0 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(3)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} - \frac{X_B^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(3)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} - \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(3)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} - \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} \right) & 0 & \lambda_{AB}^{13} & 0 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(4)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} - \frac{X_B^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(4)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} - \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(4)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} - \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} \right) & 0 & 0 & \lambda_{AB}^{14} \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(2)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} - \frac{X_B^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(2)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} - \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(2)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} - \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_{AB}^{12(0)}} \right) & \lambda_{AB}^{12} & 0 & 0 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(3)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} - \frac{X_B^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(3)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} - \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(3)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} - \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_{AB}^{13(0)}} \right) & 0 & \lambda_{AB}^{13} & 0 \\
 \left( \frac{X_B^{(0)} - X^{(4)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} - \frac{X_B^{(0)} - X^{(1)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} \right) & \left( \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(4)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} - \frac{Y_B^{(0)} - Y^{(1)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} \right) & \left( \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(4)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} - \frac{Z_B^{(0)} - Z^{(1)}}{\rho_{AB}^{14(0)}} \right) & 0 & 0 & \lambda_{AB}^{14}
 \end{bmatrix}
 \begin{pmatrix}
 x_B \\
 y_B \\
 z_B \\
 N_{AB}^{12} \\
 N_{AB}^{13} \\
 N_{AB}^{14}
 \end{pmatrix}
 -
 \begin{pmatrix}
 \lambda \emptyset_{AB}^{12}(t_1) - \rho_{AB}^{12}(t_1) \\
 \lambda \emptyset_{AB}^{13}(t_1) - \rho_{AB}^{13}(t_1) \\
 \lambda \emptyset_{AB}^{14}(t_1) - \rho_{AB}^{14}(t_1) \\
 \lambda \emptyset_{AB}^{12}(t_2) - \rho_{AB}^{12}(t_2) \\
 \lambda \emptyset_{AB}^{13}(t_2) - \rho_{AB}^{13}(t_2) \\
 \lambda \emptyset_{AB}^{14}(t_2) - \rho_{AB}^{14}(t_2)
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 v^{(1)} \\
 v^{(2)} \\
 v^{(3)} \\
 v^{(4)} \\
 v^{(5)} \\
 v^{(6)}
 \end{pmatrix}
 \quad (69)$$

Dalla (69) una volta risolte le ambiguità potranno essere tolte dalle incognite e per le successive epoche sarà sufficiente stimare solo le 3 incognite di correzione di posizione: si deduce quindi che alle doppie differenze, una volta risolte le ambiguità di fase, per le successive epoche si avranno 3 incognite in 3 equazioni in ogni epoca risolvibile quindi in real time.

Si evince come anche nel **posizionamento cinematico** per definire la posizione in real time (1 epoca di misura) è necessario quindi aver fissato le ambiguità di fase (inizializzazione) e di fatti alle doppie differenze nella (69) una volta risolte le ambiguità, si avranno 3 incognite di posizione per ogni epoca di misura nelle 3 equazioni alle doppie differenze (3 equazioni perché derivano da  $n_j-1$  tipico delle doppie differenze, essendo  $n_j=4$ ).

Ma il posizionamento relativo nasce come pratica di utilizzato solo per post processamento proprio per avere alti livelli di precisione mentre per il real time si preferisce utilizzare altri metodi come il posizionamento differenziale che permette maggiore rapidità di esecuzione.

### 5.4.5 TRATTAMENTO DATI GNSS RELATIVO

Si vede ora la procedura da seguire nel posizionamento relativo per calcolare il valore della baseline  $\vec{b}_{AB}$ . Si useranno tutte le quantità differenziali che sono state analizzate (singole, doppie e triple) per trovare alla fine le componenti del vettore baseline  $\vec{b}_{AB}$  seguendo le fasi che ora si elencheranno. In generale si inizia con un posizionamento approssimato (di codice) che viene migliorato nei vari passaggi, tramite l'approccio ai minimi quadrati.

Si inizia facendo una campagna di misura dati GNSS (usando due o più ricevitori, secondo più sessioni di misura, ecc). Una volta raccolti i dati ci sono due approcci possibili di trattamento dati:

- ✓ Approccio “singola base”: se si hanno più baseline, le singole base si considerano incorrelate e indipendenti tra loro (in realtà esse sono correlate tra loro poiché i ricevitori osservano gli stessi satelliti ma si trascura ciò, semplificando il problema); è l'approccio più utilizzato dai software.

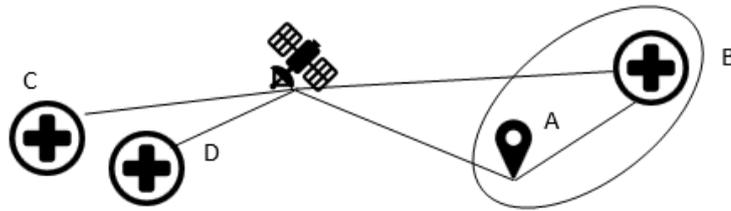


Figura 62: singola base AB

(A = stazione Base di coordinate note;) (B,C,D = Rover;) (AB=baseline)

Se ho 4 ricevitori (A,B,C,D) le baseline da considerare sono quelle linearmente indipendenti che possono essere ad esempio AB, AC e AD. I criteri per stabilire una baseline indipendente verranno definiti a breve.

In generale la regola è:  $N^{\circ}_{baseline} = N^{\circ}_{ricevitori} - 1$

- ✓ Approccio “multi-stazione o multi-baseline”: è l'approccio più rigoroso ed impegnativo che considera tutte le correlazioni esistenti tra le diverse baseline in ogni sessione di misura; metodo usato da pochi software tra cui il Bernese. Non verrà trattato in tesi.

La quasi totalità dei software utilizza il primo dei due approcci appena esposti in quanto, nella pratica le differenze di precisione sulle base line sono dell'ordine del millimetro e quindi trascurabile (tranne per eventuali applicazioni di misurazioni estremamente precise).

Alla luce di quanto sopra si esporrà una descrizione dell'approccio singola base.

### 5.4.6 APPROCCIO SINGOLA BASE

Come avviene per tutti i programmi con approccio non lineare ai minimi quadrati, si parte da valori approssimati di coordinate che vengono progressivamente migliorati con l'avanzare del numero delle iterazioni.

Tale approccio è suddivisibile nelle seguenti fasi:

- 1) Mediante posizionamento assoluto con misura di codice C/A, si determinano le coordinate geografiche approssimate del punto singolo incognito o dei punti singoli incogniti da definire (precisione  $5 \div 10$  metri);
- 2) Formazione differenze singole: innanzitutto occorre decidere quali base-line considerare indipendenti. I criteri di scelta sono:
  - ✓ Base più corta, in modo da trascurare le differenze degli errori spazialmente correlati; inoltre una baseline di 10-15 km richiede un tempo di acquisizione di 15 minuti mentre una base di 100 km richiede anche alcune ore per cui è un altro motivo per scegliere basi corte (è necessario stazionare per più tempo su basi lunghe perché i bias cambiano molto tra 2 stazioni lontane e resteranno dei residui non differenziabili nelle differenze ai vari ordini, quindi si opta per un maggior tempo di osservazioni così da osservare più satelliti, avere maggiore ridondanza nella misura, maggiore sicurezza e una stima migliore).
  - ✓ Base line che offre maggior numero di osservazioni.

Si effettua la differenza singola tra un satellite e due ricevitori costituenti una base e questo va ripetuto per tutti i ricevitori delle basi linearmente indipendenti e per ogni satellite.

- 3) Trattare i dati con le equazioni alle triple differenze (soluzione **.TRP**) partendo dalle coordinate approssimate ottenute al punto 1.

$$\text{Triple diff: } \phi_{AB}^{jk}(t_2) - \phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} [\rho_{AB}^{jk}(t_2) - \rho_{AB}^{jk}(t_1)]$$

da cui si ricavano con procedimento ai minimi quadrati le soluzioni  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{\text{TRP}}$  della baseline; equivale a calcolare  $\rho_{AB}^{jk}$  nel sistema WGS84 ma senza la necessità di conoscere l'ambiguità di fase iniziale. Si ottiene una soluzione che però non è la migliore possibile per i problemi definiti in precedenza relativi alle triple differenze, ossia poca ridondanza, alta correlazione tra le misure e quindi i termini della matrice di varianza covarianza non controllabili a causa della correlazione e della maggiore rumorosità nate dalle differenziazioni fatte. Al termine delle differenze terze sono anche riconoscibili i cycle slip dall'analisi dei residui: ad ogni interruzione di segnale il diagramma delle differenze terza presenta un picco come mostrato in fig.78.

Dunque questa soluzione ottenuta dalle triple differenze non è la ottimale ma sono usati come dati approssimativi di partenza per la fase successiva.

- 4) Elaborazione alle "doppie differenze": si parte dalle coordinate ottenute al punto precedente considerate come coordinate approssimate di partenza. Dalla elaborazione alle doppie differenze si ottiene una soluzione detta soluzione **FLOAT**, in quanto l'ambiguità di fase  $N_{AB}^{jk}$  non è fissata per intero ossia è in virgola mobile (N appartiene ai numeri reali). Significa  $N_{AB}^{jk} = N_B^k - N_B^j - N_A^k + N_A^j$  con i singoli valori di ambiguità appartenenti ai numeri reali, ossia valori con virgola.

Si determinano tramite il metodo ai minimi quadrati, con un processo iterativo i valori  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{FLT}$  del vettore base line, tenendo in considerazione i valori di  $N_{AB}^{jk}$  con virgola mobile ottenuti con inizializzazione statica.

- 5) Le ambiguità flottanti del punto 4 vengono fissate ai valori INTERI più vicini. In tal modo  $N_{AB}^{jk} = N_B^k - N_B^j - N_A^k + N_A^j$  sarà *valore intero*, essendo  $N_i^j \in N$  (con  $N = n^\circ$  naturali). Si dice in tal caso ambiguità fissata ad intero o FIX. Per fare ciò il software ispeziona la deviazione standard della combinazione di ambiguità  $N_{AB}^{jk}$ , ossia  $\sigma_N$ , e vede, nell'intervallo  $\pm \sigma_N$ , i numeri interi di N che rientrano in tale intervallo (lo vedremo meglio nel "test ratio"): arrotondare all'intero più vicino sembra la cosa più semplice ma non è sempre la più affidabile e difatti tale arrotondamento verrà verificato per mezzo del test ratio che ci dirà se il fissaggio dell'ambiguità è corretto tramite il fattore di qualità RATIO il quale deve essere superiore a certi valori minimi. Una volta fissate le ambiguità ad intero posso toglierle dalle incognite e portarle nei termini noti.
- 6) Tolta l'ambiguità  $N_{AB}^{jk}$  dalle incognite con ambiguità fissate ad intero stabilite al punto precedente, si rielabora alle "differenze seconde", partendo dalle coordinate  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{FLT}$ , ottenendo le soluzioni FIX:  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{FIX}$  della baseline che unisce i vertici A e B contenute nel termine geometrico  $\rho_{AB}^{jk}$  ossia verranno determinate con approccio ai minimi quadrati e tramite un processo iterativo le componenti del vettore baseline  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ .

Questo ultimo passaggio rappresenta il risultato finale del processo di calcolo ossia le componenti del vettore baseline con ambiguità fissate ad intero (soluzione FIX).

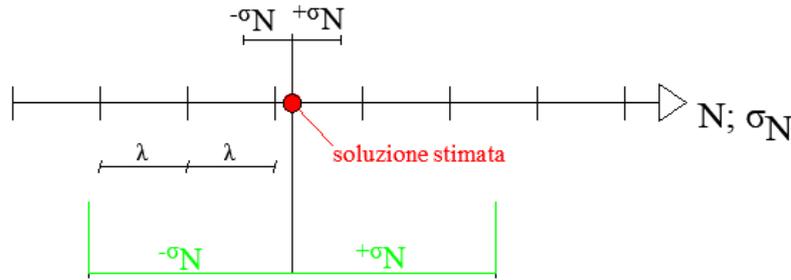
Da qui è possibile calcolare la matrice di varianza-covarianza della baseline. La deviazione standard (o scarto quadratico medio) è  $\sigma_{baseline} \approx 10^{-6} \div 10^{-8}$  della lunghezza della base, quindi si avrà un errore millimetrico a patto di non sbagliare l'ambiguità di fase.

#### 5.4.7 TEST RATIO

E' un test statistico utile per capire se l'ambiguità di fase  $N_{AB}^{jk}$  è stata fissata correttamente ad intero. Il procedimento individua più valori interi  $N_i^j$  in un intervallo di ricerca  $\sigma_N$  (è la deviazione standard della ambiguità di fase combinata  $N_{AB}^{jk}$  e si ricava da calcoli statistici), i quali generano diverse combinazioni di ambiguità ossia differenti  $N_{AB}^{jk}$  da usare nella soluzione FIX. A questo punto si avranno quindi diverse soluzioni  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{FIX}$  (una per ogni combinazione) e di ogni soluzione se ne stimerà la varianza dell'unità di peso  $\hat{\sigma}_0^2$ .

Per capire meglio, supponi che la soluzione stimata dell'ambiguità N flottante per un satellite e un ricevitore sia quella in figura, identificata dal pallino rosso. Ricordo che l'ambiguità N rappresenta il numero di cicli di  $\lambda$  che vi sono dal satellite al ricevitore.

Se l'intervallo  $\sigma_N$  è piccolo (figura 63 intervallo nero) allora attorno al valore stimato ricadono pochi valori interi di N (in fig.63 ricade un solo valore intero di N) ma se la  $\sigma_N$  è più ampia (intervallo verde) allora rientrano più valori (in figura 63 ricadono 5 possibili valori interi di  $N_i^j$ ). Per sapere qual è il valore migliore possibile si devono valutare tutte le soluzioni che rientrano in tale intervallo. Tutte le  $N_i^j$  appartenenti a tale intervallo bisogna combinarle nelle doppie differenze dando vita ad una serie di combinazioni  $N_{AB}^{jk}$ .


 Figura 63: Possibili valori di ambiguità di fase che ricadono per intero in un intervallo  $\sigma_N$ 

In pratica essendo  $N_{AB}^{jk} = N_B^k - N_B^j - N_A^k + N_A^j$  ma avendo più valori per ogni  $N_i^j$  della formula avrò  $n$  valori di  $N_{AB}^{jk}$ .

Si avranno quindi  $n$  soluzioni  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{\text{FIX}}$ , di cui ognuna caratterizzata dalla varianza dell'unità di peso stimata  $\hat{\sigma}_0^2$ . Tali varianze vanno ordinate in maniera crescente quindi:  $\hat{\sigma}_0^{2(I)}$ ;  $\hat{\sigma}_0^{2(II)}$ ;  $\hat{\sigma}_0^{2(III)}$ ;  $\hat{\sigma}_0^{2(IV)}$ ;  $\hat{\sigma}_0^{2(V)}$

Il RATIO è il rapporto tra la seconda più bassa varianza e la migliore (la più bassa) ossia:

$$\text{TEST RATIO} = \frac{\hat{\sigma}_0^{2(II)}}{\hat{\sigma}_0^{2(I)}} \quad (70)$$

Un rapporto elevato significa che tra le due soluzioni c'è molta differenza ossia un elevato miglioramento e quindi la soluzione  $\hat{\sigma}_0^{2(I)}$  risulta essere la soluzione migliore perché ha varianza più bassa e quindi indica che gli interi sono stati fissati correttamente.

Si ritengono accettabili i seguenti valori di test ratio:

$$\frac{\hat{\sigma}_0^{2(II)}}{\hat{\sigma}_0^{2(I)}} > 1,5 \text{ per misure statiche}$$

$$\frac{\hat{\sigma}_0^{2(II)}}{\hat{\sigma}_0^{2(I)}} > 3 \text{ per misure cinematiche (il valore del ratio per le cinematiche è maggiore poiché sono più difficili da fissare e quindi si è più diffidenti e dunque vincoli più restrittivi).}$$

In tutti i casi se il test non passa significa che l'ambiguità di fase non è stata fissata correttamente e questo accade perché ci sono stati errori nelle misure (interferenze elettromagnetiche, periodi troppo brevi di acquisizione, etc). In tal caso ci sono 2 strade:

- ✓ Si mantiene la soluzione con ambiguità fissata, accettando che si compia un errore di circa 20 cm (pari cioè al valore  $\lambda$  della portante), che su un posizionamento millimetrico ha la sua importanza
- ✓ Mantengo la soluzione float

In definitiva, l'approccio relativo in singola base, **in modalità statica** con ambiguità fissate ad intero (soluzione FIX) può portare a **precisioni millimetriche o sub-millimetriche** nella determinazione della baseline oppure in caso di non superamento del test ratio a precisioni centimetriche. In **modalità cinematica la precisione della posizione è centimetrica**.

## 5.5 FISSAGGIO AMBIGUITA' DI FASE E COMBINAZIONE DI FREQUENZA

Si è accennato nel capitolo del posizionamento relativo alle modalità di inizializzazione: può essere sia risolta in modalità statica, in cui si sosta per diverse epoche di misura nella medesima posizione, e sia in modalità cinematica in cui il ricevitore è in movimento.

Nel posizionamento di fase, sia relativo che differenziale, il fissaggio dell'ambiguità di fase ad intero è fondamentale per raggiungere precisione centimetrica o millimetrica.

Nei ricevitori a singola frequenza non ci sono molte alternative per semplificare l'operazione di inizializzazione mentre nei ricevitori multifrequenza possono sfruttarsi combinazioni di fase per ottimizzare la ricerca delle ambiguità di fase e renderla più rapida.

Ad esempio supponendo un posizionamento relativo con una stazione Master ed un Rover e 5 satelliti significa che, preso un satellite come riferimento, si avranno  $(n_j-1)$  differenze doppie ad ogni epoca e quindi si avranno 4 equazioni alle differenze doppie ad ogni epoca

Ipotizzando di usare il sistema di posizionamento GPS e sapendo che la lunghezza d'onda della portante  $L_1$  del GPS è  $\lambda \approx 19\text{cm}$ , supponendo un valore di  $N$  stimato con un intervallo di ricerca  $\sigma_N = \pm 1\text{metro}$  (deviazione standard dell'ambiguità di fase combinata  $N_{AB}^{jk}$  ricavata dal software di calcolo da analisi statistica), si ricerchi all'interno di tale intervallo  $\sigma_N$  il numero degli interi  $N_i^j$  che vi ricadono e di conseguenza si genereranno diverse combinazioni di  $N_{AB}^{jk}$  e quindi si svolgeranno i calcoli per giungere alla soluzione  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{\text{FIX}}$  in funzione di ognuna di tali combinazioni e si individuerà quella col miglior ratio. La domanda da porsi è la seguente: nel caso della frequenza  $L_1$ , quanti "candidati" di  $N$  interi ci sono in  $\sigma_N = \pm 1\text{metro}$ ?

La risposta è che in  $\pm 1\text{metro}$  (è il valore di  $\sigma_N$ ) ci sono 11 interi di lunghezza d'onda  $\lambda \approx 19\text{cm}$  in ossia 11 "candidati" interi di  $N_i^j$ . Vanno analizzati tutti il che porta ad una numerosità di combinazioni di doppie differenze da risolvere ( $N_{AB}^{jk}$ ) pari a  $11^4 = 14641$  combinazioni (essendo 4 le equazioni alle differenze doppie ad ogni epoca).

Significa che il ricevitore deve iterare la procedura definita nel paragrafo precedente dai punti 1) al 6) per ben 14641 volte, ottenendo altrettante soluzioni e poi effettuare il test ratio, per cui il procedimento è molto impegnativo.

Ma se considerassimo una combinazione di frequenze che mi generasse una lunghezza d'onda  $\lambda = 86\text{cm}$  gli interi candidati ricadenti nell'intervallo  $\sigma_N = \pm 1\text{metro}$  sono solo 3.

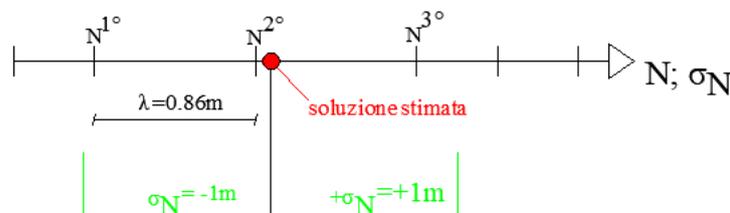


Figura 64: Fissaggio ad intero dell'ambiguità con  $\lambda = 86\text{cm}$  (Wide Lane)

Quindi il numero di combinazioni di doppie differenze da risolvere sarà  $3^4 = 81$ . **E' evidente il minor dispendio di risorse e di tempo di calcolo da parte del ricevitore/software.** Per ottenere  $\lambda = 86\text{cm}$

bisogna effettuare una combinazione di frequenza tra le portanti GPS  $L_1$  ed  $L_2$ . Tale combinazione prende il nome di **WIDE LANE**:

$$f_{WL} = f_{L1} - f_{L2} = (154 - 120) \cdot f_0 = 34 \cdot 10,23MHz = 347,82MHz$$

La lunghezza d'onda Wide Lane è dunque:

$$\lambda_W = \frac{c}{f_W[Hz]} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{347,82 \cdot 10^6} \cong 86cm \quad (71)$$

$L_1$  ed  $L_2$  hanno lunghezze d'onda rispettivamente di  $\lambda=19cm$  e  $\lambda=24cm$  quindi circa 4 volte più corte. Infatti wide lane sta a significare proprio onda larga e come detto velocizza il calcolo per il fissaggio dell'ambiguità di fase. Per questa ragione **molte tecniche di fissaggio si basano sulla combinazione wide lane**, tra cui l'algoritmo OTF (OnThe Fly) presente nei ricevitori a doppia frequenza che permette il fissaggio dell'ambiguità di fase in movimento, senza la necessità di sostare diverse epoche su uno stesso punto, utile ad esempio per gli aerei in volo. La wide lane può ottenersi in diverse combinazioni:  $L_1 L_2$  oppure  $L_1 L_5$  oppure  $L_2 L_5$ .

Tramite la legge di propagazione della varianza covarianza si può dimostrare che il rumore (noise) della wide lane, posto  $\sigma_{L1} = \sigma_{L2} = \sigma_L$  sia pari a:

$$\sigma_{WL} \approx \pm 6\sigma_L \quad (72)$$

Ossia la wide lane risulterà molto più rumorosa (quasi 6 volte) rispetto l'osservazione in singola frequenza il che si traduce in meno precisione sul posizionamento; di fatti per questa ragione la wide lane è usata solo per il fissaggio del numero di candidati interi per l'ambiguità di fase poiché si è visto che è più facile fissare l'ambiguità di fase o ridurre la numerosità delle soluzioni candidate all'interno di un intervallo di ricerca delle ambiguità, se si utilizza una lunghezza d'onda lunga come  $\lambda=86cm$  (risulta circa 4 volte la lunghezza d'onda di  $L_1$  e  $L_2$ ) piuttosto che usando lunghezze d'onda minori.

Quindi per fissare l'ambiguità in modo rapido si necessita di ricevitori **doppia frequenza**, e se dotati dell'algoritmo **On The Fly** (OTF), l'inizializzazione avviene addirittura in movimento.

Una volta determinate le ambiguità si procede con altre combinazioni di portante tipo la IONO FREE (analizzata nel capitolo "errori") o NARROW LANE oppure classiche osservazioni in singola frequenza  $L_1$ .

La combinazione **NARROW LANE**, che significa letteralmente "onda stretta/corta", si ottiene dalla combinazione di  $L_1$  e  $L_2$  in questo modo:

$$f_{NL} = f_{L1} + f_{L2} = (154 + 120) \cdot f_0 = (154 + 120) \cdot 10,23MHz = 2803,02MHz$$

$$\lambda_{NL} = \frac{c}{f_{NL}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2803,02 \cdot 10^6} \cong 11cm \quad (73)$$

La lunghezza d'onda narrow lane è piccola quindi non è da usare per il fissaggio dell'ambiguità di fase in quanto ci saranno moltissimi interi candidati  $N_i^j$ , ma va usata per le misure di range di fase delle osservazioni in quanto lunghezze d'onda piccole permettono maggiori precisioni nelle misure (equivale ad aumentare la sensibilità dello strumento di misura).

Infatti il rumore (noise) o deviazione standard della misura in narrow lane è:

$$\sigma_{NL} = \pm 0,7 \cdot \sigma_{NL} \quad (74)$$

Ossia una osservazione più pulita rispetto alle osservazioni in singola frequenza.

La combinazione **IONO FREE** vista al capitolo “Errori” ci permette di eliminare l’errore ionosferico ma è più rumorosa di circa 3 volte superiore a quella delle frequenze non combinate:  $\sigma_{IF} = \pm 3\sigma_L$ . La rumorosità di circa 3 volte la singola osservazione è compensata dal fatto che è esente da ritardo ionosferico del segnale che produrrebbe errori superiori, quindi è conveniente. Altre combinazioni di fase per ricevitori multifrequenza è la *geometry free*. Sono possibili anche combinazioni di codice e fase come: la combinazione *Melbourne-Wubben* e *codice smussato con la fase*.<sup>54</sup>

Se si possiedono ricevitori a singola frequenza sono poche le strategie di fissaggio degli interi poiché non vi è la possibilità di combinare le fasi. Un metodo è quello di creare un sistema alle doppie differenze tra misure di codice e fase su alcune epoche di misura e risolvere tale sistema nella incognita N.

Questa tecnica è limitata a basi corte (max 15km) e risente della rumorosità del codice. Si consiglia l’utilizzo della singola frequenza L<sub>1</sub> rispetto alla L<sub>2</sub> poiché meno affetta da noise ionosferico.<sup>55</sup>

Il tempo necessario per il fissaggio ad intero dell’ambiguità di fase in singola frequenza può variare dai 10 ai 30 minuti se non si possiede alcuna informazione sull’area in cui si svolge il posizionamento. In realtà se si ha una stazione base vicina, che è attiva da tempo, si velocizza il tempo necessario al fissaggio dell’ambiguità sul mio ricevitore e addirittura potrebbero essere necessari solo un paio di minuti o anche meno per terminare l’inizializzazione: infatti una stazione base conosce la propria posizione, conosce dove sono e quali sono i satelliti in zona quindi le effemeridi sono note, conosce la ionosfera e la troposfera della zona che quindi non sono più una incognita ma vengono stimate, l’errore di orologio del satellite è noto per cui restano incognite solo l’errore di orologio del ricevitore Rover e le ambiguità di fase che però quest’ultime sono all’incirca già stimate poiché in quella zona molto prossima il ricevitore della stazione base le avrà già stimate per precedenti e altri rilievi e quindi ha già stimato il valore di ambiguità per il satellite j, il valore di ambiguità per il satellite k e così via, ossia non si partirebbe da zero ma si ha un’idea e poi ovviamente si dovranno calcolare ma questo abbrevia il tempo di calcolo di inizializzazione.

### 5.5.1 UTILIZZO DELLE COMBINAZIONI DI FASE

La migliore soluzione possibile ottenibile è quella con ambiguità fissata ad intero (FIX). Se poi non si soddisfa il test del ratio allora si utilizza la soluzione float (FLT) ad ambiguità non intera ma appartenenti ai numeri reali ovvero ambiguità in virgola mobile. La soluzione FLT risulterà però meno precisa della FIX.

Per avere la migliore soluzione bisogna possedere ricevitori a doppia frequenza, si dovrebbe procedere con soluzione *wide lane* solo per fissare ad intero rapidamente le ambiguità di fase ed una volta risolte le ambiguità di fase, si passa alla soluzione *iono free*, *narrow lane* o solo L<sub>1</sub>.

Tutti i tipi di soluzioni, in funzione dell’ambiguità FIX o FLT, che si possono avere sono di seguito elencate:

<sup>54</sup> Per approfondire si consulti il libro “Dal GPS al GNSS” del Prof. Alberto Cina, edizione 2014, capitolo 9 e 10.

<sup>55</sup> Pagina 152 libro “Dal GPS al GNSS” del Prof. Alberto Cina, edizione 2014

-*Soluzione ionofree FIX*: si risolvono le ambiguità fissandole ad intero sfruttando la combinazione *wide lane*, per poi stimare la soluzione con la combinazione ionofree. È la migliore soluzione ottenibile nella maggior parte dei casi;

- *Soluzione ione free FLT*: va bene per basi molto lunghe, poiché generalmente su basi molto lunghe difficilmente si arriva al fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase; per basi < 30km è sconsigliato dato che si potrebbe aspirare a soluzioni FIX;

-*Soluzioni wide lane FIX*: la combinazione *wide lane* di solito va bene usarla solo per il fissaggio ad intero dell'ambiguità ma si è visto, nel precedente paragrafo, che la soluzione risulta ben 6 volte più rumorosa della osservazione in singola frequenza, per cui la *wide lane* è poco precisa se usata come soluzione finale di posizionamento. È consigliabile quindi usarla solo per determinare le ambiguità e poi passare alla combinazione ione free. Tuttavia se si decidesse di usare solo la *wide lane Fix* (no ionofree) va applicata su basi di 15÷30 km;

-*Soluzione L<sub>1</sub> FIX*: da usare su basi corte, minori di 15km ma meglio ancora se minori di 5÷10km, ossia su distanze tali che la ionosfera non influisca fortemente perché gli errori dovuti alla ionosfera aumentano con l'aumentare della distanza Master-Rover quindi su basi corte, tramite metodi relativi o differenziali, è possibile eliminare gli errori ionosferici, assieme agli altri bias spazialmente correlati, ma se superiori ai 15-20 km resteranno sempre dei residui non eliminabili (iono, tropo, effemeridi) che ostacoleranno sia il fissaggio dell'ambiguità di fase e sia la precisione della soluzione. Una combinazione ottimale sarebbe quello di precedere la soluzione con un fissaggio delle ambiguità con *wide lane* ma ciò presupporrebbe avere ricevitore multifrequenza;

-Soluzione L<sub>1</sub> FLT: in generale le soluzioni FLT sono meno precise delle soluzioni FIX; per basi superiori a 15km è difficile fissare ad intero l'ambiguità di fase con una singola frequenza per i motivi definiti al punto precedente, per cui si avrà la soluzione L<sub>1</sub> FLT che non è raccomandabile per l'elevato effetto del ritardo ionosferico. Un altro motivo per cui si potrebbe avere una soluzione L<sub>1</sub> FLT è che il tempo di acquisizione è stato troppo breve per un corretto fissaggio dell'ambiguità di fase.

**Riepilogando per ricevitori a singola frequenza:** per distanze Master-Rover superiori ai 15 km in singola frequenza diventa difficile avere ambiguità fissate ad intero (causa della sensibilità delle osservazioni ai ritardi ionosferici e agli altri errori bias spazialmente correlati ovvero troposfera ed effemeridi non eliminabili, che ostacolano il fissaggio dell'ambiguità) per cui sarà possibile solo una soluzione FLT; ma la soluzione FLT su singola frequenza L<sub>1</sub> non è una soluzione ottimale. Meglio optare su basi corte.

Lo stesso problema del fissaggio ad intero dell'ambiguità in singola frequenza si riscontra quando il tempo di acquisizione è troppo breve: non potendo sfruttare la tecnica On The Fly (OTF) per un istantaneo fissaggio ad intero dell'ambiguità anche in movimento poiché richiede una doppia frequenza, il tempo per terminare l'inizializzazione in singola frequenza varia tra i 10 e i 30minuti se è la prima volta in assoluto che si svolge un rilievo in zona per cui se il tempo di acquisizione è troppo breve c'è fortemente il rischio che non si riesca a fissare l'ambiguità di fase e si abbiano soluzioni in modalità FLT sulla L<sub>1</sub> che però non offre soluzioni ottimali. Tuttavia se si sfrutta una stazione base presente in zona, quindi con tecniche di posizionamento relative e differenziali, la quale possiede già di per sé delle informazioni relative a quell'area, il tempo di inizializzazione si velocizza e potrebbero essere sufficienti uno o due minuti.

## 5.6 POSIZIONAMENTO DIFFERENZIALE

Il posizionamento differenziale è una tecnica che di fondo ha gli stessi concetti del posizionamento relativo solo che viene **applicata per il real time** mentre il posizionamento relativo è utilizzato per il post processamento. Di fatti nel posizionamento differenziale si usano due (o più ricevitori) di cui:

- Un ricevitore posto su una stazione fissa A detta “stazione di base o Master”, generalmente è una stazione permanente, di posizione nota con precisione millimetrica, multi-frequenza e multi-costellazione.
- Un ricevitore posto in B (detta stazione “remota” o “Rover”), solitamente in movimento e di posizione incognita, la quale va determinata.
- Si applica una correzione al range di codice o a quello di fase, in funzione del tipo di misura che si effettua e permette di eliminare/correggere gli errori spazialmente correlati (ionosfera, troposfera, effemeridi) e gli errori di orologio comuni alle due stazioni.

E' la stazione Master che calcola la correzione da applicare: la stazione permanente A svolge una differenza tra il range geometrico di A ( $\rho_A^j$  NOTO, calcolato in funzione delle coordinate note tra stazione A e coordinate del satellite j anch'esse note) col range misurato  $R_A^j(t_0)$  sempre nel ricevitore A. Medesimo discorso sia per le misure di fase.

$$\text{CODICE: } PRC(t_0) = \rho_A^j(t_0) - R_A^j(t_0)$$

$$\text{FASE: } CPC(t_0) = \rho_A^j(t_0) - \lambda \cdot \phi_A^j(t_0)$$

PRC è la correzione o correzione differenziale (PRC= Pseudo Range Correction) per le misure di codice e CPC (Carrier Phase Correction) per le misure di fase: esse vengono inviate al ricevitore Rover (B) il quale **applica queste correzioni sulle sue misure di codice (pseudorange) o di fase valutate con un posizionamento assoluto**, permettendo così di eliminare o limitare gli errori presenti nel posizionamento assoluto cioè gli errori spazialmente correlati, gli errori di orologio del satellite e nelle misure di fase anche gli errori di orologio del ricevitore.

Se le basi sono di lunghezza limitata (minori di 15-20km) si avrà l'eliminazione dei bias spazialmente correlati altrimenti resterà un residuo.

**Il posizionamento differenziale real time con misure di codice è detto DGPS o DGNSS mentre il posizionamento differenziale real time con misure di fase è detto RTK (Real Time Kinematic).**

Il DGNSS di codice equivale ad una singola differenza del posizionamento relativo; l'RTK di fase equivale invece ad una doppia differenza del posizionamento relativo poiché si esegue un ulteriore ordine di differenza (si valuta il range misurato e corretto da CPC tra un Rover B e un satellite j e il range misurato e corretto da CPC tra lo stesso Rover B e un secondo satellite (satellite k) e si farà ancora una differenza tra questi due range corretti che permetterà di eliminare anche l'errore di orologio dei ricevitori, con il risultato che sarà una equazione dello stesso tipo della equazione delle doppie differenze nel posizionamento relativo).

La procedura potrebbe essere effettuata anche in post processazione utilizzando un software in cui inserire i dati della stazione A con relativa correzione e i dati di B a cui si applica la correzione ma rientreremo nel concetto di posizionamento relativo; per definizione di posizionamento differenziale si intende solo real time.

Per il posizionamento in tempo reale si provvede alla trasmissione delle correzioni via radio o tramite smartphone (collegamento internet o modem GSM) con l'invio al Rover delle correzioni differenziali secondo un formato dati RTCM o FKP.

*Per applicazioni cinematiche di precisione in tempo reale (precisione centimetrica) si usa il posizionamento RTK poiché più preciso rispetto alle misure di codice. Sono richieste in questo caso tecniche OTF (On The Fly) che sfruttano la ricezione di doppia frequenza per una combinazione wide lane per il fissaggio rapido dell'ambiguità di fase anche durante il movimento del Rover (la tecnica OTF presuppone ricevitori a doppia frequenza).*

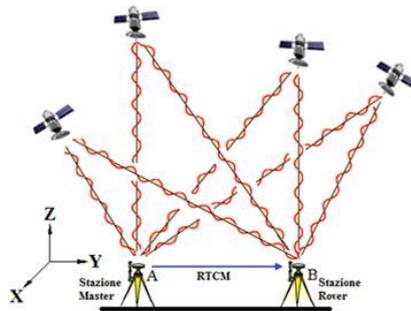


Figura 65: Invio della correzione con protocollo RTCM nel posizionamento differenziale

Con ricevitori a singola frequenza non è possibile il fissaggio istantaneo dell'ambiguità di fase e quindi va scelta un'altra tecnica per fissare l'ambiguità di fase come ad esempio il ratio test in cui potrebbero essere necessari anche dai 10÷30min: dipende dalla quantità di satelliti presenti e dalla loro disposizione geometrica (indice DOP), dalle condizioni meteo, dagli ostacoli alla visibilità presenti nel sito di misura ovvero una serie di elementi e situazioni che inficiano la stima ai minimi quadrati, a meno che vi è la presenza di dati pregressi nella stazione base che potrebbero essere sfruttati dal ricevitore Rover con cui è in contatto e velocizzare l'inizializzazione fino a terminarla anche in un paio di minuti.

In ogni caso se la distanza tra le basi è maggiore di 15-20 km si consiglia l'utilizzo di ricevitori a doppia frequenza capaci di fissare ad intero l'ambiguità con combinazione wide lane e poi, una volta fissata l'ambiguità, di procedere alla stima della soluzione con combinazione iono-free in modo da eliminare gli errori ionosferici; benché la soluzione iono-free abbia un noise elevato rispetto alla singola frequenza, il vantaggio su lunghe distanze di avere una soluzione senza disturbi ionosferici è superiore; tuttavia se le basi hanno distanze minori di 15-20 km si preferisce l'uso di ricevitori a singola frequenza perché hanno noise minore e gli errori ionosferici, troposferici e elettronici sono eliminabili su tali distanze tramite metodi differenziali (posizionamento relativo o differenziale).

Il posizionamento differenziale in tempo reale offre i seguenti standard di precisione:

- DGNSS di codice: minori di 1 metro in planimetria e minori di 1,5m in altimetria; è poco dipendente dalla distanza con le stazioni permanenti perché la precisione che ci si aspetta non è centimetrica ma metrica e come si nota dalla figura 66 per distanze a100km, la precisione in planimetria è da 2÷3m mentre in altimetria 4m.

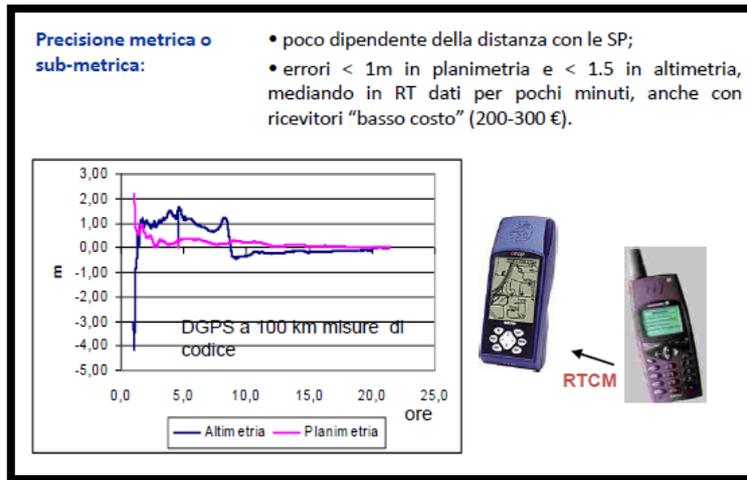


Figura 66: Precisione nel DGNSS di codice in real time

- RTK di fase: offrono precisione centimetrica → con ricevitori a doppia frequenza si raggiungono precisioni di 1 cm mentre con ricevitori a singola frequenza si arriva a 5 o 7 cm di precisione. Per avere questo livello di precisione la vicinanza con la stazione Master e il Rover è importante. Infatti all'aumentare di tale distanza le precisioni peggiorano perché le correzioni differenziali sono calcolate nella stazione Master e quindi allontanandoci troppo da essa le condizioni ionosferiche e troposferiche cambiano (non si citano le effemeridi perché hanno una correlazione su spazi anche > 100km) per cui la correzione differenziale della Master perde di efficacia. Dunque ci sarà l'influenza di residui di bias tropo/ionosferici non più eliminabili che provocherà una diminuzione della precisione oltre che causare una difficoltà nel fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase. In generale la precisione centimetrica vale per distanze tra Master e Rover minori di 15÷30 Km; se oltre la precisione degrada.

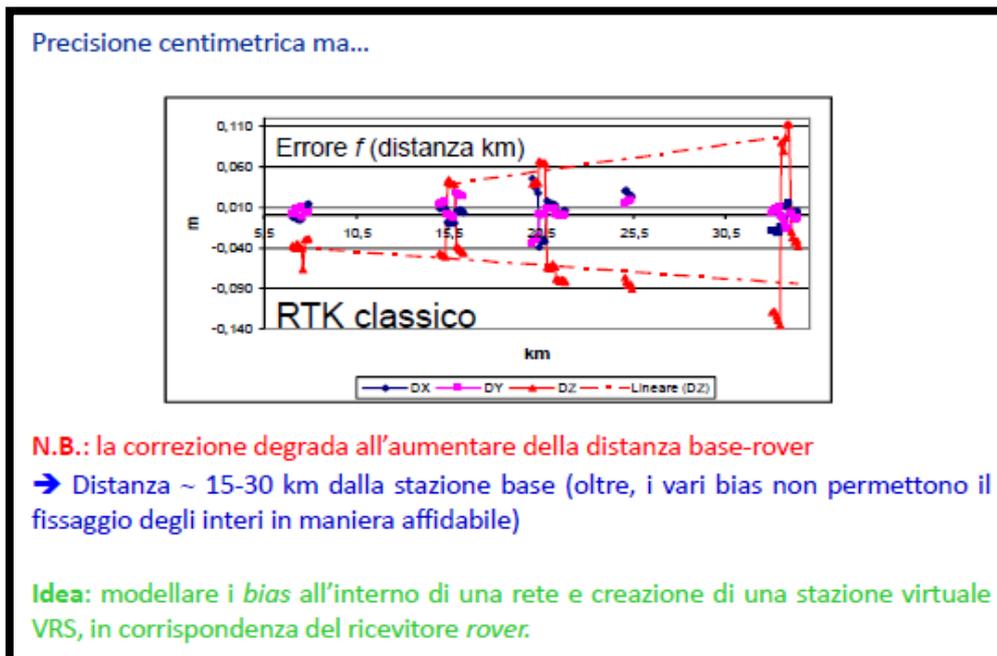


Figura 67: Precisione posizionamento differenziale di fase in real time (RTK)

L'ipotesi di avere basi di lunghezza limitata può essere superate col posizionamento differenziale (vale anche per il posizionamento relativo) grazie ad una rete di stazioni permanenti GNSS: l'idea è di modellare i bias all'interno di una rete di stazioni base permanenti in modo da mitigare la dipendenza della distanza e creare una stazione virtuale VRS=Virtual Reference Station in corrispondenza del Rover. Nel prossimo paragrafo verrà trattata.

Quindi col metodo di posizionamento differenziale è possibile superare l'ipotesi di "basi di lunghezza limitata", finora usata per elidere gli errori spazialmente correlati (iono, tropo ed effemeridi) se si utilizzano reti di stazioni permanenti GNSS dislocate sul territorio e tale che il Rover si trovi al centro di tale rete. La rete di stazioni permanenti è chiamata NRTK=Network for Real Time Kinematic. Utilizzabile anche col posizionamento relativo (post process).

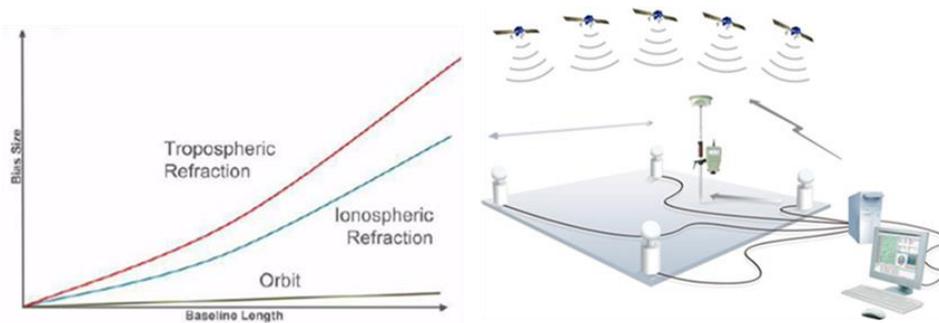


Figura 68: A sinistra la variazione dei bias in funzione della lunghezza della baseline; a destra una immagine semplificata di una rete di stazioni permanenti (Network for Real Time Kinematic o NRTK)

La diffusione delle correzioni differenziali può avvenire per via:

- Radiomodem (sistema ad 1 via): semplice trasmissione radio che può solo trasmettere le correzioni (non ricevere); è economico ma ha portata di pochi chilometri; disponibile ad un numero imprecisato di utenti che devono avere il collegamento radio del ricevitore sulla medesima frequenza della stazione Master;
- Modem GSM (sistema a 2 vie): ovvero tramite rete di telefonia mobile; è meno economico del radiomodem ma non ha limiti di copertura purché sia nella copertura del cellulare (copertura GSM); disponibile ad un numero di utenti pari al numero delle linee telefoniche disponibili;
- Internet IP (2 vie): tramite connessione internet è possibile inviare i dati di correzione; economico, di elevata portata (copertura GSM per internet); accesso ad un numero imprecisato di utenti con connessione internet.



Figura 69: Telefono o radio per trasmissione correzioni differenziali

## 6. ACQUISIZIONE DATI NEL POSIZIONAMENTO RELATIVO (POST PROCESS)

In questo capitolo analizzeremo come si acquisiscono dati di misura, ovvero come scegliere il sito per effettuare il rilievo e quanto tempo può durare una sessione di misura.

Nel posizionamento GNSS una caratteristica fondamentale è avere dati di osservazione che siano affidabili ed efficienti. Per ottenerli bisogna “ottimizzare” i rilievi ossia fare attenzione ad alcuni dettagli che potrebbero sembrare superflui ma che in realtà condizionano i dati che registrerà il nostro ricevitore. Il tutto è progettabile e programmabile prima di uscire in campagna così da evitare di fare rilievi con scarsi risultati. Progettare e programmare le misure è sempre utile, anzi fondamentale, quando si richiede alta precisione mentre può essere meno importanti in applicazioni a scopo ricreativo o navigazionale in cui ad esempio è sufficiente precisione metrica.

### 6.1 SCELTA DEL SITO DI MISURA

La scelta del sito di misura è importante e non difficile, basta seguire poche regole. Innanzitutto consultare la zona di intervento su cartografia a piccola-media scala (consigliate scale da 1:25000 – 1:100000) per individuare la zona del rilievo e assicurarsi che abbia punti liberi per la visibilità satellitare (ossia escludere in primis zone boschive o gallerie). Fatto ciò bisogna fare una ricognizione fisica sul campo per individuare il punto che rispetti al meglio i seguenti punti:

- Assenza di ostacoli (edifici, alberi ed altro) sopra un elevazione di  $15^\circ$  dall’orizzontale o in caso contrario rilevarne la presenza con misure speditive di azimuth ed elevazione tale che in post processamento si vada a valutare come è stata ostacolata la ricezione satellitare e la qualità dei dati ottenuti da tali satelliti nella finestra temporale che si progetta di utilizzare.
- Visibilità della volta celeste: la ricezione satellitare è possibile solo se il ricevitore ha la possibilità di “vedere” la volta celeste per ricevere i segnali quindi vanno evitate zone boschive, zone sotterranee, gallerie o metropolitane ed in genere tutti gli ambienti che schermino le radiazioni elettromagnetiche provenienti dai satelliti.
- Assenza di superfici riflettenti (metalliche, vetrate, specchi d’acqua ed altro) poiché possono provocare errori di multipath. In campagna risulta difficile valutare cosa generi multipath/riflessioni e l’effetto provocato sul segnale nel momento del rilievo: solo in post processamento può essere fatta analisi dettagliata. Tuttavia questo tipo di analisi dettagliata viene fatta solo per le stazioni permanenti GNSS. Generalmente per i normali casi di misura bisognerebbe evitare casi evidenti di riflessione quindi evitare di stazionare vicino fiumi, laghi, specchi d’acqua o in prossimità di ampie facciate di strutture elevate.
- Assenza di campi elettromagnetici: è molto importante, di fatti se nelle vicinanze ci sono apparecchiature che emettano radiofrequenze, così come elettrodotti ad alta tensione poiché i loro segnali possono interferire con i segnali satellitari provocandone un degrado o addirittura il completo oscuramento. Spesso usando il navigatore ci capita di vedere assenza

di ricezione di segnale in alcune zone del paese ed il navigatore smette di funzionare: significa che ci sono disturbi da campi elettromagnetici della stessa frequenza del segnale satellitare che oscurano il GPS. Tuttavia analisi dettagliate di spettri di frequenza presenti nel situ si effettuano per stazioni permanenti mentre per le classiche operazioni di misura è sufficiente effettuare una speditiva misurazione di prova in situ per verificare la ricezione del segnale GNSS.

## 6.2 Indici DOP

La precisione del posizionamento dipende anche dalla qualità della costellazione. Dato che si vuole ottimizzare la misura è interessante sapere la finestra temporale in cui ho il massimo dei satelliti visibili al di sopra di un punto di coordinate note. Per cui si pianifica la misura in funzione di quando ho la massima visibilità satellitare e per far ciò è sufficiente consultare gli almanacchi in modo da prevedere la posizione dei satelliti e programmare il rilievo nella finestra oraria in cui risultano orbitare contemporaneamente più satelliti.

Ma se si punta ad una migliore ottimizzazione della campagna di misura, ciò non basta e si deve valutare anche la qualità geometrica della costellazione ovvero la disposizione geometrica dei satelliti in cielo e tale qualità viene definita per mezzo dell'indice GDOP (Geometry Dilution Of Position) o più in generale con gli indici DOP.

Gli indici DOP danno una valutazione della bontà della configurazione satellitare: in pratica maggiore è il volume del tetraedro (avente come vertice il ricevitore e base la congiungente dei satelliti) migliore è la configurazione satellitare.

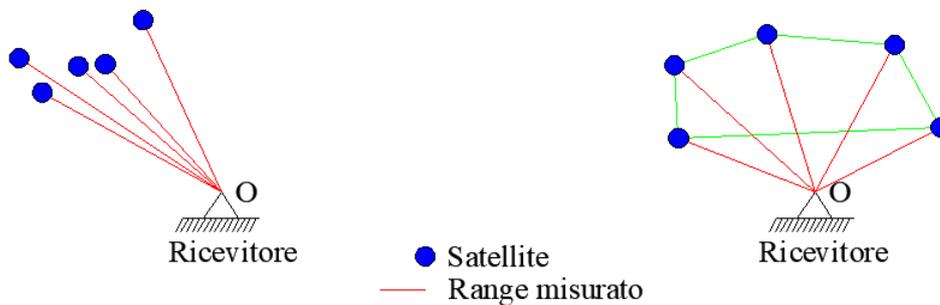


Figura 70: Conformazioni geometriche satellitari; un maggior volume del tetraedro significa migliore disposizione satellitare.

L'indice DOP è dato da questa funzione:

$$DOP = K \cdot \frac{1}{Volume\ tetraedro}$$
 con K costante di proporzionalità. Il DOP deve essere quindi piccolo (ossia volume tetraedro grande) affinché la disposizione geometrica satellitare sia buona.

La definizione analitica degli indici DOP è su base statistica e riferita ad un piano locale (terna di coordinate euleriana: “east, north, up” oppure “e, n, u”) su cui vengono stabilite le coordinate del satellite k rispetto al ricevitore che funge da origine del sistema di coordinate euleriane (esistono leggi di conversione dalle coordinate geocentriche del satellite a coordinate locali euleriane)<sup>56</sup>.

In tal modo si riesce a prevedere la posizione dei satelliti rispetto al ricevitore a terra e a ricavarne anche elevazioni e distanze. Per queste operazioni non è indispensabile conoscere la posizione dei

<sup>56</sup> Pagina 76 +pagina 176-177 libro “Dal GPS al GNSS” del Professore Alberto Cina, edizione 2014

satelliti con estrema precisione: sono sufficienti gli almanacchi delle effemeridi che contengono i soli parametri orbitali senza gli elementi correttivi.

Partendo dalle coordinate euleriane del satellite  $k$ , si ricava la matrice di varianza-covarianza di tali coordinate e si definiscono, a partire dagli elementi diagonali della matrice (la cui traccia è inversamente proporzionale al volume del tetraedro) i diversi indici DOP che sono:

$$\text{GDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2 + \sigma_t^2} \leq 6 \text{ per una valutazione globale ossia Global DOP;}$$

$$\text{PDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2} < 3 \text{ (Position DOP; è il più usato)}$$

$$\text{HDOP} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2} \text{ (High DOP) (per il planimetrico)}$$

$$\text{VDOP} = \sqrt{\sigma_u^2} \text{ (Vertical DOP) (per altimetria)}$$

$$\text{TDOP} = \sqrt{\sigma_t^2} \text{ (Time DOP)}$$

I più utilizzati sono GDOP e PDOP e i valori da rispettare sono rispettivamente  $\leq 6$  e  $< 3$ .

Dato che questi indici DOP risultano funzione dei termini di varianza, si vuole sempre avere che la varianza sia la più piccola possibile ed ecco perché questi indici debbono avere valori piccoli per essere affidabili.

Dato che la matrice dei cofattori è programmabile ossia ottenibile prima di effettuare le misure sul campo, anche i DOP sono programmabili e quindi si può prevedere qual è la migliore finestra temporale per avere i migliori indici GDOP e PDOP per poi uscire e fare le misure in quel lasso di tempo.

**Lunghezza della sessione di misura:** in generale la lunghezza della sessione di misura, ossia il tempo per il quale è necessario stazionare sul vertice acquisendo dati GNSS, dipende da vari fattori tra cui:

- lunghezza della baseline
- tipo di ricevitore (per applicazioni professionali: singola o doppia frequenza)
- rumori ed interferenze di segnale che comportano sostare per un periodo maggiore
- numero di satelliti visibili e qualità geometrica della disposizione nello spazio degli stessi (ovvero indici DOP)

Vale in generale la regola che maggiore è il numero di satelliti visibili, migliori sono i DOP, minore è il tempo di acquisizione.

Relativamente alla lunghezza della base, ad esempio usando un **ricevitore a singola frequenza** che tracci 4-6 satelliti i tempi indicativi di misura in modalità statica (si staziona sulla posizione da rilevare) sono riportati in tabella 9 (Hofmann-Wellenhof et al, 1997):

Tabella 9: Tempi di acquisizione indicativi in modalità statica e ricevitore singola frequenza

Lunghezza base	Durata sessione di misura
1 km	20-35min
5km	25-45min
10km	35-60min
20km	60-90min

Con ricevitori a singola frequenza non è consigliabile rilevare basi di lunghezza superiore a 15÷20 km sia per problemi di errori ionosferici che divengono non più spazialmente correlabili e sia per la difficoltà a fissare ad intero l'ambiguità di fase a causa degli stessi errori ionosferici, per cui si necessiterebbe di sostare per un tempo maggiore per riuscire a fissare l'ambiguità di fase.

Se si usassero ricevitori a doppia frequenza, le basi anche di 15÷20 km sarebbero risolte con sessioni di misura di pochi minuti grazie all'uso della tecnica wide-lane che permette un rapido fissaggio dell'ambiguità.

Ad esempio una base di 1km richiederebbe per il solo fissaggio degli interi dai 5÷10min in singola frequenza ma se si usasse una doppia frequenza servirebbero al massimo un paio di minuti.

Basi lunghe (> 20 km fino a centinaia di km) richiedono l'utilizzo di ricevitori a doppia frequenza per la questione degli errori non più spazialmente correlati e tecniche statiche, con sessioni di misura di diverse ore. Basi lunghe necessitano di tempi maggiori perché le distanze tra rover e base sono maggiori quindi gli errori sono meno correlati, avremo maggiori bias residuali che comporteranno non solo una maggiore probabilità di errore nella stima della posizione ma anche una difficoltà nel fissare ad intero le ambiguità di fase e quindi serve più tempo sia per il fissaggio che per modellare meglio ionosfera e troposfera che per acquisire più dati di osservazione tale da avere quanta più ridondanza possibile così da ridurre gli errori. Maggiore sarà il tempo di acquisizione e maggiori saranno le precisioni delle soluzioni. Tutto ciò è possibile solo se si effettua un posizionamento statico. Se invece si effettua un posizionamento cinematico su baseline grandi si ha di fronte un problema difficilmente risolvibile perché non si può stazione ma si è sempre in movimento, cambiando zona i bias variano sempre, cambiano i satelliti osservabili e quindi tutti gli errori e le insicurezze di calcolo vengono portate appresso: col cinematico non è ammesso avere basi lunghe se si vogliono precisioni elevati (centimetriche) tutt'al più ci si accontenterà di precisione metrica.

Le modalità di rilievo sono varie e si sceglie la più opportuna in funzione delle esigenze, strumentazione a disposizione, precisione desiderata, tempi e costi.

Si analizzano la modalità di rilievo e acquisizione dati del posizionamento differenziale e relativo.

**Posizionamento Differenziale:** Il posizionamento differenziale si basa su correzioni valutate dalla stazione Master ed applicate sulla stazione Rover in tempo reale; le correzioni sono trasmesse via radio o telefono o internet usando un protocollo dati RTCM e applicate in tempo reale. La precisione dipende dal tipo di range misurato dal Rover secondo quanto illustrato in tabella 10:

*Tabella 10: relazione tra tipo di osservazione, distanza tra stazione Base e Rover e precisione, nel posizionamento differenziale DGNS*

Osservazione	Distanza tra le stazioni	Precisione
Range di codice	Qualche centinaio di Km	Metrica
Range di fase	15÷20 Km	Centimetrica

Per il Range di fase se si eccedono i 20km si dovranno modellare gli errori spazialmente correlati per tenerli sotto controllo.

**Posizionamento Relativo:** l'obiettivo è determinare le componenti del vettore baseline ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ ) tra una stazione Master e un ricevitore Rover. L'elaborazione è fatta a posteriori (post processazione); generalmente si analizzano misure di fase con il metodo alle doppie differenze. La tabella 11 racchiude i metodi principali di acquisizione dati di posizionamento relativo per una successiva elaborazione (post processazione).

Tabella 11: tecniche di acquisizione dati per posizionamento relativo con misure di fase

Metodo	Tempo di misura	Lunghezza a basi	Precisione	Intervall o (Rate)[s]	Note	Applicazione
Statico	>30minuti 1ora 3÷4ore Variabile	10 Km 20÷30 Km >100Km	$10^{-6} \div 10^{-8}$ della lunghezza baseline	15÷60	Doppia frequenza se distanza basi >20km	Reti in quadramento di alta precisione
Rapido- statico	20÷30min(L <sub>1</sub> ) 6÷8min(L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> )	<10÷15 Km	$10^{-6}$ (millimetrica o centimetrica)	5÷15	Necessita buona configurazione satellitare	Reti di raffittimento
Cinematico Stop and go	< 1 minuto (almeno 2 epoche) (L <sub>1</sub> ) (L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> )	Qualche Km (<10)	Centimetrica	1÷5	Necessita contatto continuo con satelliti. Inizializzazione: ➤ Fino a 30min con L <sub>1</sub> ; ➤ 5÷6min se L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub> ; ➤ al volo (OTF) con L <sub>1</sub> +L <sub>2</sub>	Punti fiduciali
Cinematico continuo	Continuo	Qualche Km	Centimetrica	1÷5 20Hz	Idem come Stop and Go	Traiettorie, monitoraggio continuo

Da notare che il tempo di misurazione o “tempo di acquisizione” ossia per quanto tempo si è stati a ricevere misure dipende essenzialmente dalla distanza tra le basi e si può notare come l'intervallo di campionamento o “rate” (tempo trascorso tra un'epoca di misura e la successiva) varia in funzione del metodo: un rate maggiore per metodi statici mentre è richiesto un rate brevissimo, di 1 secondo o frequenza 20Hz, per metodi cinematici che necessitano di un continuo di misure poiché il ricevitore è in continuo movimento.

Col **posizionamento statico** si ha la migliore precisione: ad esempio avere precisione  $10^{-6}$  della distanza delle basi (baseline) significa mediamente un errore di 1 mm ogni km, pari a quella di un ottimo distanziometro. Ad esempio per basi lunghe 20 km mi aspetto nella peggiore delle ipotesi un errore di soli 20mm (2cm).

Il rilievo **statico** permette di raggiungere la maggior precisione e affidabilità, quindi è particolarmente adatto per la creazione di reti di inquadramento o a raffittire reti già esistenti.

La procedura prevede la registrazione di almeno quattro satelliti contemporaneamente da due punti, sui quali si collocano i ricevitori che rimarranno fermi per l'intera durata della sessione di misura. La buona precisione (millimetrica) comporta una non trascurabile durata delle sessioni di misura, che mediamente sono comprese tra 20 e 60 minuti, e il post-trattamento delle misure. La tecnica consiste nel posizionare un ricevitore su un punto di coordinate note, o comunque già determinato in

precedenza, e l'altro ricevitore (o gli altri, nel caso vengano impiegati più di due ricevitori) via via sui punti incogniti da determinare.

Dopo che un punto è stato determinato in una sessione di misura, esso diviene un punto noto per la successiva sessione di misura, e così via fintanto che tutti i punti da rilevare saranno stati occupati.

Il **posizionamento rapido-statico** è del tutto analogo al rilievo statico visto precedentemente ma si staziona sul punto da definire per un periodo minore dello statico e tale tempo si riduce se si utilizzano ricevitori multifrequenza ( $L_1+L_2$ ) poiché minore è il tempo necessario a fissare ad intero l'ambiguità di fase (tecnica Wide Lane) ma la condizione richiesta per riuscire ad acquisire dei buoni dati è che ci sia una buona configurazione satellitare quindi è importante l'operazione di planning ovvero pianificare l'orario di sessione in base a che ora del giorno i satelliti siano più visibili e gli indici DOP più bassi.

Il tempo di misura è condizionato dalla configurazione dei satelliti, dalla lunghezza della baseline e da eventuali sorgenti di errori, ad esempio la presenza di superfici riflettenti potrebbero potenzialmente causare errori di multipath (sono però visibili solo in post processamento) ed è consigliabile in tal caso allungare la sessione di misura.

Nel rilievo statico-rapido l'utilizzo di ricevitori a doppia frequenza permette di correggere la misura dai bias atmosferici (combinazione iono-free) per ottenere precisioni che sono solo di poco inferiori al rilievo statico.

Il **cinematico Stop and Go** si applica a ricevitori a singola e doppia frequenza e richiede l'assenza di cycle slip; all'inizio della campagna di misura si necessita della inizializzazione ovvero sostare staticamente su una posizione per il tempo definito in tabella 20.

Fatto ciò, il tempo della sessione di misura è breve (minore di un minuto) ma in caso di cycle slip bisogna risostare per il tempo di inizializzazione indicato in tabella per permettere un nuovo fissaggio delle ambiguità, tranne se si utilizza la tecnologia OTF poiché permette il fissaggio anche in movimento ma necessita di ricevitori a doppia frequenza. Il **posizionamento cinematico Stop and Go** è utilizzato per il rilievo di dettaglio. Il nome Stop and Go deriva che ci si sofferma sul punto da rilevare (STOP) solo per il tempo di misura necessario e poi ci si sposta su un altro punto da rilevare (Go). Le procedure cinematiche non sono utilizzate per la formazioni delle reti, ma piuttosto per eseguire il rilievo di dettaglio dei particolari del terreno o per l'aggiornamento di mappe catastali.

Il **cinematico continuo** è un metodo usato per rilevare una traiettoria, una traccia più che un unico punto, come ad esempio la catenaria di una funivia o il moto di un veicolo. Per l'inizializzazione valgono gli stessi principi del cinematico stop and go. L'intervallo di campionamento (rate) varia da 1÷5 sec se si viaggia a piedi o in bicicletta mentre se ci si muove molto più velocemente si necessita di un campionamento più fitto pari a 20Hz al secondo ossia 20 rilievi al secondo.

Questa metodologia di rilievo è impiegata nella realizzazione di picchettamenti di varia natura (strade, cave, bacini ecc. in cui le determinazioni si riferiscono a determinati istanti temporali) e la precisione ottenibile è dipendente dalla strumentazione utilizzata; è possibile arrivare a contenere gli errori nell'ordine di 2-10 cm.

## 7. EFFEMERIDI

Per poter stimare la posizione del ricevitore, un elemento fondamentale è conoscere la posizione dei satelliti, in un dato istante di tempo, definita in un sistema geocentrico centrale ECEF (Earth Centered Earth Fixed).

Si riesce a risalire a codesta informazione grazie al messaggio di navigazione: in tutte le costellazioni, ad eccezione del Glonass, il messaggio di navigazione non contiene direttamente le coordinate X, Y, Z del satellite ma i parametri che consentono il calcolo della posizione in un certo istante, secondo la teoria orbitale di Keplero, per mezzo dei 6 parametri orbitali kepleriani. La ragione risale alla concezione stessa del suo ricevitore GNSS, semplificato e sicuramente, così, meno costoso.

In realtà i satelliti non rispettano rigorosamente le leggi di Keplero a causa di fenomeni perturbativi (effetti di perturbazione) e per capire la reale traiettoria dei satelliti si necessita oltre che dei parametri orbitali di Keplero anche dei coefficienti correttivi che tengano in conto gli effetti di perturbazione (causate da variazione del campo di gravità terrestre, dalla pressione di radiazione del Sole e della Luna). Tutto ciò è contenuto nelle effemeridi trasmesse dal satellite (dette “**effemeridi Broadcast**”) al cui interno vi sono anche i coefficienti per la modellazione di errori sistematici (bias) d’orologio e ionosferico. Le effemeridi broadcast vengono calcolate rispetto ad un epoca di riferimento chiamata  $t_{oe}$  (time of ephemeris) e possono essere usate per applicazioni in tempo reale e in post processamento.

Si definiscono **effemeridi** (o efemeridi, dalla parola greca ἐφημερίς / *ephemeris* = giornaliero; latino *ephemēris*) le tabelle che contengono i valori calcolati, nel corso di un particolare intervallo di tempo, di diverse grandezze astronomiche variabili, quali i parametri orbitali di Keplero appunto, elementi correttivi per far fronte a fenomeni perturbativi, i coefficienti per il calcolo dell’offset dell’orologio del satellite.

**Il messaggio di navigazione (D o NAV) contiene le effemeridi** da cui si risalirà alla posizione del satellite.

Solo nella costellazione Glonass il messaggio di navigazione contiene direttamente le posizioni ECEF dei satelliti nello spazio e nel tempo, con posizione, velocità e accelerazione nel sistema di riferimento PZ90.

Inoltre, e questo vale per tutte le costellazioni, il messaggio di navigazione trasmette anche i 6 elementi kepleriani di tutti i satelliti senza tener conto dei fenomeni perturbativi: questi 6 soli parametri sono sufficienti per stimare le posizioni approssimative dei satelliti della costellazione. Tale informazione è sufficiente per pianificare sessioni di misura utile solo per fini di planning ma non di posizionamento proprio perché sono posizioni approssimative dato che non considerano i fenomeni perturbativi che invece sono tenuti in conto nelle effemeridi trasmesse Broadcast (possiamo quindi dire che i satelliti non seguono le leggi ideali di Keplero a causa di effetti perturbativi). L’insieme di questi 6 elementi kepleriani di tutti i satelliti prende il nome di **almanacco**. Esso permette una stima approssimata della posizione del satellite da 1 a 6 giorni. Tali parametri vengono aggiornati ogni 6 giorni per la costellazione GPS. Nell’almanacco sono presenti anche i coefficienti per il calcolo dell’offset dell’orologio del satellite con un polinomio di primo grado.

Per tale ragione gli almanacchi sono usati solo per planning di misura cioè per programmare rilievi o sessioni di misura in funzione di un certo numero di satelliti ad una certa ora.

Tabella 12: 6 parametri Kepleriani

a	Semiassse maggiore dell'orbita ellittica	Dimensione e forma dell'orbita
$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a^2}$	Eccentricità dell'orbita (b=semiassse minore)	
$\omega$	Argomento del perigeo	Piano orbitale nel sistema apparente
$\Omega$	Ascensione retta del nodo ascendente	
I	Inclinazione dell'orbita	
$\mu_0$	Anomalia media all'epoca di riferimento $t_{0e}$	Posizione nel piano dell'orbita

I parametri Kepleriani assieme ai coefficienti correttivi dei fenomeni perturbativi e ai coefficienti di calcolo dell'offset dell'orologio satellitare sono trasmessi dalle **effemeridi broadcast** che quindi permettono di **calcolare la posizione dei satelliti con un errore di circa  $\pm 1$  metro**. Le effemeridi Broadcast sono calcolate per ogni satellite dal segmento di controllo, sfruttando la parte di orbita immediatamente precedente (sono calcolate da un'estrapolazione di dati precedenti, da 4÷6 ore di dati), prevedendo così la successiva parte di orbita (forniscono la posizione per le successive 1,5÷4 ore). Il centro di controllo poi invia le effemeridi broadcast al satellite stesso e quest'ultimo le invia al ricevitore per mezzo del messaggio di navigazione, contenente anche l'almanacco (quindi il singolo messaggio NAV contiene sia le effemeridi del satellite e sia i dati di almanacco relativi a tutti i satelliti della costellazione) e permettono il calcolo della posizione ECEF del satellite nelle epoche successive; se non fossero predette non si potrebbe fare il posizionamento in tempo reale.

Le effemeridi trasmesse sono dunque acquisite dal messaggio di navigazione e memorizzate in file, in formato proprietario definito dalla casa costruttrice del ricevitore, o nel formato di interscambio RINEX indipendente dal ricevitore. Esse costituiscono i "dati di navigazione".

I file Rinex contenenti dati di navigazione hanno estensione **.yyn** in cui le prime due lettere indicano l'anno (ad esempio per il 2022 avremmo  $yy = 22$ ) e l'ultima distingue il tipo di costellazione per cui si potrebbe avere:

**yyn= gps; yyg = Glonass; yyh= Galileo; yyq=QZSS; yyp = BeiDou; yyo= SBAS** (ovvero satelliti di augmentation).

Ogni quanto tempo vengano trasmesse queste effemeridi Broadcast varia da costellazione a costellazione. Ad esempio nel GPS sono trasmesse ad intervalli temporali che vanno da 2 a 10 ore (generalmente ogni 4 ore) mentre nel Glonass ogni 30 minuti.

Avendo un orario di riferimento (che è quello per cui hai il dato di navigazione) è possibile risalire alla posizione del satellite nell'ora desiderata per mezzo di formule analitiche qui tralasciate.

Anche nei messaggi RTCM per posizionamento differenziale in tempo reale son contenuti i dati di effemeride.

Le effemeridi broadcast si è detto che hanno precisione metrica. Per applicazioni geodetiche può essere necessaria una maggiore precisione nel calcolo della posizione dei satelliti e in tal caso, in alternativa alle effemeridi broadcast, si possono usare le effemeridi “Ultra rapide predette” che sono sempre predette come le broadcast ma con anticipo di 1 ora rispetto al tempo d’osservazione. La loro precisione è centimetrica e permettono il real time come le broadcast. Oppure si opta per le **effemeridi calcolate a posteriori**. Tali effemeridi sono calcolate a posteriori dal centro di controllo e saranno note dopo il passaggio del satellite, in un tempo definito in tabella (può andare da poche ore ad 1 o 2 settimane): delle effemeridi calcolate a posteriori fanno parte le effemeridi **rapide, ultrarapide e precise**. Le effemeridi precise, dette anche **finali**, sono definite nei formati SP1 (contiene i dati di posizione e velocità) oppure SP2 (contiene solo le posizioni e in tal caso le velocità possono essere ricavate differenziando numericamente i dati di posizione) oppure **SP3** (è quello più utilizzato e contiene la posizione dei satelliti espressa in modo esplicito in coordinate ECEF, definite ad intervalli specifici che generalmente sono di 15 minuti ma possono essere anche di 30 o 40 minuti e poi sono definiti gli asincronismi degli orologi satellitari di bordo). La precisione sulla posizione del satellite è **centimetrica** per le effemeridi calcolate a posteriori, mentre nell’ordine del metro per le effemeridi broadcast trasmesse in tempo reale come riassunto nella tabella 13, nella colonna “Accuratezze”, riga “orbita”.

I formati SP sono di tipo ASCII quindi apribile sul pc con qualsiasi editor di testo, ad esempio “blocco note”. I file contenenti le effemeridi calcolate a posteriori sono scaricabile dal sito della NASA.

Per le costellazioni Galileo e BeiDou i messaggi di navigazione sono come nel GPS, quindi contengono i vari elementi kepleriani e i vari termini di correzione degli effetti perturbativi. L’unica differenza è che le coordinate ECEF dei satelliti sono riferite al sistema di riferimento GTRF per Galileo e CGCS per BeiDou.

Riepilogando: le effemeridi trasmesse, le cosiddette effemeridi broadcast, disponibili in real time, forniscono i dati di posizione del satellite con una accuratezza di circa 1 metro. Le effemeridi precise, disponibili a posteriori rispetto a quando il rilievo è stato effettuato, forniscono i dati di posizionamento del satellite con una accuratezza di circa 2,5 cm. Ci sono soluzioni intermedie per cui, attendendo circa 24/48 h, si possono utilizzare le cosiddette effemeridi rapide.

	Orbita / Clock	Accuratezze	Latenza	Intervallo
<b>Broadcast</b>	Orbite	~ 100 cm	Real time	giornaliero
	Clock sat.	RMS ~ 5 ns $\sigma$ ~ 2.5 ns		
<b>Ultrarapide (predette)</b>	Orbite	~ 5 cm	Real time	15 minuti
	Clock sat.	RMS ~ 35 ns $\sigma$ ~ 1.5 ns		
<b>Ultrarapide (osservate)</b>	Orbite	~ 3 cm	3 – 9 ore	15 minuti
	Clock sat.	RMS ~ 150 ps $\sigma$ ~ 50 ps		
<b>Rapide</b>	Orbite	~ 2.5 cm	17 – 41 ore	15 minuti
	Clock sat.	RMS ~ 75 ps $\sigma$ ~ 25 ps		5 minuti
<b>Precise</b>	Orbite	~ 2.5 cm	12 – 18 giorni	15 minuti
	Clock sat.	RMS ~ 75 ps $\sigma$ ~ 20 ps		30 secondi

Tabella 13: Precisione effemeridi

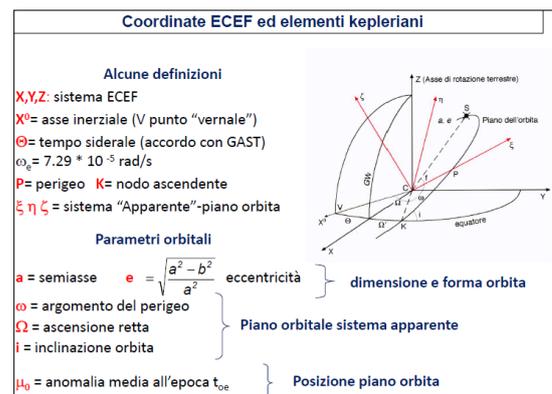


Figura 71: Parametri kepleriani

# 8. RICEVITORI E STAZIONI PERMANENTI

Il segmento utente nella struttura GNSS (capitolo 3) è costituito dai ricevitori.

In generale i ricevitori, sia civili che militari, si compongono di un'antenna, un microprocessore per elaborare le operazioni di calcolo e una sorgente di tempo, come per esempio un oscillatore al quarzo.

Lo scopo ultimo del ricevitore è quindi fornire la sua localizzazione. Un ricevitore viene spesso descritto dal numero di canali di cui dispone, ovvero il numero di satelliti che è in grado di monitorare simultaneamente.

Di ricevitori ve ne sono di diversi tipi. Una classificazione può essere fatta in base alle misure che questi sono in grado di acquisire; si hanno quindi:

- Ricevitori a misura di codice (pseudorange) o mass market
- Ricevitori a singola frequenza (nuovi mass market)
- Ricevitori multi frequenza e multi costellazione

## 8.1 RICEVITORI

### Ricevitori a misura di codice (pseudorange) o mass market

I ricevitori mass market sono di dimensioni esigue, del palmo di una mano, e per questo quelli dotati di display sono detti palmari. Possiedono un antenna che può essere integrata o esterna.

Sono ricevitori a larga diffusione commerciale, appunto detti mass market, in grado di acquisire sola la componente codice del segnale (C/A) e spesso solo la costellazione GPS; hanno basso costo (ordine di qualche centinaio di euro) ed usati per escursione e navigazione, e non sono idonei per ambito professionale. Hanno almeno 6 canali (generalmente >15 canali); Il costo varia da 50÷300€.

Se forniti di display forniscono le coordinate direttamente su un display e generalmente sono accoppiate ad una cartografia (mappe), proprietaria o pubblica, oppure in mancanza di display sono disponibili in versione **scheda OEM** (Original Equipment Manufacturer) come ad esempio la scheda **ublox** e queste ultime permettono la visualizzazione delle coordinate se connessi ad un software (pc o tablet) via cavo, Bluetooth, GSM o Wi-Fi. Si pensi ad esempio ai ricevitori GPS del tipo ublox installati all'interno delle auto per tracciarne il posizionamento e favorire il pronto intervento in caso di incidente o furto.

Tali schede OEM in formato chipset gps sono posti all'interno degli smartphones (sono i chip presenti nel nostro cellulare a fungere da ricevitore mentre l'antenna GNSS risulta interna al dispositivo ed è un'antenna indipendente e differente dall'antenna Wi-Fi, dall'antenna Bluetooth e dall'antenna gsm (necessaria per la telefonia), tutte presenti nei nostri smartphones; i più recenti montano chipset "gps+glonass" quindi consentono di tracciare più di una costellazione. La

costellazione GPS è sempre presente: non si hanno ricevitori solo Glonass, ma esistono ricevitori solo GPS.

Per la navigazione tramite smartphone esistono software appositi che utilizzano una cartografia, proprietaria o pubblica (ad esempio servizio Google Maps on line) su cui appaiono le coordinate visualizzabile sul display.

Sui ricevitori mass market non si possono acquisire dati poiché hanno solo memoria cartografica, ovvero non registrano dati e dunque non potrei fare il post processamento; questo significa che possono eseguire solo stime della posizione in **REAL TIME** sia in modalità statica che cinematica. In realtà alcuni di essi se collegati ad un PC via cavo o Bluetooth possono inviare i dati di codice al PC, quindi si possono salvare sul computer e si ha la possibilità di post processarli. In generale possono sempre fornire coordinate in formato NMEA via collegamento seriale.

Con questi ricevitori si può eseguire una stima della posizione approssimativa e i metodi di posizionamento effettuabili sono:

- ✓ Posizionamento ASSOLUTO di CODICE (precisione planimetrica  $\pm 5\div 10\text{m}$  e precisione altimetrica circa  $10\div 15\text{m}$ ; in presenza di costellazioni SBAS come ad esempio la costellazione EGNOS in Europa, si ha un miglioramento della precisione fino a  $\pm 1\div 3$  metri in planimetria e da  $2\div 4$  metri in altimetria)
- ✓ Alcuni ricevitori possono effettuare il posizionamento differenziale DGPS/DGNSS arrivando a precisioni dell'ordine del metro ( $1\div 3\text{m}$ ).



Figura 72: Nella 1° foto a sinistra ricevitori palmari GPS prodotti da Trimble, Garmin e Leica (da sinistra a destra); al centro scheda Ublox; a destra chipset interna ad uno smartphone

### Ricevitori Singola frequenza (nuovi mass market)



Figura 73: A sinistra un ricevitore palmare a singola frequenza; a destra smartphone Huawei P9Lite

Sono ricevitori che possono acquisire sia la componente impulsiva (Codice C/A) che la portante L<sub>1</sub>. Generalmente hanno almeno 12 canali e alcuni permettono l'acquisizione multi costellazione. Hanno le stesse funzioni dei mass market ma in più rispetto hanno la possibilità di memorizzare dati di codice e di fase L<sub>1</sub> in memoria interna o su scheda, quindi nella post processazione si ha la possibilità

di lavorare sui dati per migliorarne la precisione della posizione. L'antenna può essere integrata o esterna. Di solito hanno un display ma esistono anche senza.

Con tali ricevitori si può effettuare tutti i metodi di posizionamento: assoluto, relativo e differenziale, sia di codice che di fase su  $L_1$ , in post processamento o in real time, preferibilmente in modalità statica piuttosto che cinematica. Generalmente un ricevitore a singola frequenza in post processamento con posizionamento relativo, potendo lavorare sui dati, selezionando quelli con ottime condizioni al contorno (buona visibilità satellitare, poco noise, zero interferenze elettromagnetiche, antenna calibrata, ecc.) può raggiungere precisioni addirittura millimetriche, mentre in real time si hanno precisioni centimetriche ( $5 \div 7\text{cm}$ ), purché in ogni caso la distanza dalla base sia corta (non sia superiore ai 15 Km ma meglio se tra  $5 \div 10\text{ km}$ ): per basi a distanza superiore ai 15 Km entrano in gioco i residui ionosferici e troposferici non più eliminabili in singola frequenza e via via maggiori con la distanza ricevitore-base; questo comporta un aumento degli errori nel posizionamento dovuto soprattutto anche al fatto che per basi superiori ai 15 km i residui ionosferici rendano difficile avere una soluzione con ambiguità fissate ad intero (FIX) in singola frequenza a causa della sensibilità delle osservazioni ai ritardi ionosferici, non eliminabili in singola frequenza.

Data la sola presenza di  $L_1$ , le applicazioni cinematiche RTK (posizionamento differenziale in real time) potrebbero essere meno efficienti poiché con ricevitori a singola frequenza si ha l'impossibilità nell'istantaneo di fissare ad intero l'ambiguità di fase e potrebbero essere necessari all'inizio del rilievo diversi minuti per terminare l'inizializzazione e giungere ad un fissaggio dell'ambiguità di fase FIX per poi, in seguito, poter procedere con un posizionamento cinematico efficace che garantisca precisione centimetriche; ma se il tempo a disposizione per l'inizializzazione è breve si potrà giungere solo a soluzioni con ambiguità FLOAT (FLT) in  $L_1$  che risultano meno precise delle soluzioni  $L_1\text{FIX}$  per cui in tali situazioni sono in genere sconsigliate se è richiesta una precisione particolare della soluzione<sup>57</sup>. Il costo varia da poche centinaia a un migliaio di euro (da  $500 \div 5000\text{€}$ )

Se il ricevitore è di bassa qualità come quelli presenti nei comuni smartphones, che nascono non per posizionamento professionale ma essenzialmente per navigazione, si hanno difficoltà nel fissaggio dell'ambiguità di fase e dunque la soluzione FLOAT in tal caso è da preferire. Lo vedremo nel capitolo "obiettivo tesi".

In realtà oggi i ricevitori che si trovano in quasi tutti gli smartphone sono a ricezione di singola fase per cui la nuova frontiera del mass-market sono ricevitori a singola frequenza. Storicamente si è partiti con ricezione di codice per sperimentare se avesse senso installare dei microchip nei cellulari per il posizionamento e come sperimentazione si è usato la ricezione di codice perché era la più economica. Dato il grande successo ed utilizzo che ha avuto in campo navigazionale si è poi passati a installare negli smartphone ricevitori microchip a ricezione di singola fase per garantire una migliore precisione e sono stati commercializzati su scala globale.

Adirittura nel 2021 si è iniziato a produrre smartphone a ricezione di doppia frequenza come lo Xiaomi (marca cinese) ma è considerato una nicchia di mercato, non rientra quindi nel mass market.

In codesta tesi si sono analizzate le precisioni di posizionamento offerte da due comuni smartphones: Samsung Galaxy J6 e Huawei P9 EVA-L09, appartenenti ad una fascia di mercato medio-bassa e con caratteristiche tecniche simili. Le informazioni sul tipo di ricevitore GNSS e sul tipo di antenna GNSS non sono disponibili via internet comunque la posizione dell'antenna GNSS si trova nella

<sup>57</sup> Pagina 141-142-167, libro "Dal GPS al GNSS" del Prof. Alberto Cina, edizione 2014

posizione illustrata in figura 74. Tuttavia le schede tecniche dei due dispositivi sono riportate nelle seguenti immagini 75 e 76.

Di seguito una immagine che riporta la posizione dell'antenna GPS nei dispositivi utilizzati per la tesi: sia per il Samsung Galaxy J6 che per il Huawei P9 EVA-L09 l'antenna si trova in alto, lateralmente.

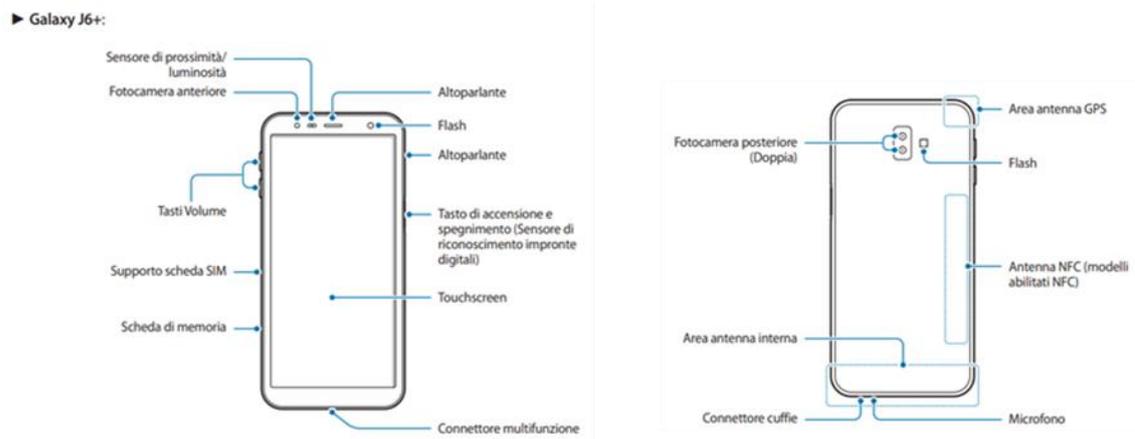


Figura 74: Smartphone Samsung Galaxy J6; da notare la posizione della antenna GPS

Le caratteristiche tecniche dei due smartphone, riassunte nelle due immagini successive, risultano abbastanza simili: il processore del Samsung è un 8 Core da 1,6 GHz con chipset Cortex A-53 Samsung Exynos 7870 octa, mentre Huawei monta un Octa Core con 2 processori: 2,5 GHz Quad-Core ARM Cortex-A72 e 1,8 GHz Quad-Core ARM Cortex-A53.

Gli smartphone sono dotati di sistema operativo Android, in particolare la versione 8 per il Samsung J6 mentre la versione 6 per il Huawei P9 sebbene su quest'ultimo si sia fatto un aggiornamento alla versione 7.

La memoria RAM per entrambi è di 3 GB, mentre la memoria interna è 32 GB espandibile con SD esterna per entrambi gli smartphone.

Il Samsung è più recente, di fatti l'anno di produzione è il 2018 mentre il Huawei il 2016.

Entrambi appartengono ad una fascia di mercato medio-bassa: il Samsung costa leggermente meno ossia da internet risulta che il miglior prezzo è 179 €, mentre 249 € per il Huawei.

Dalle ricerche effettuate non sono state trovate informazioni specifiche sulle caratteristiche dei ricevitori GNSS e delle antenne GNSS possedute internamente da entrambi i dispositivi. Non essendo dei ricevitori professionali queste informazioni spesso sono difficili da trovare. Tuttavia quello che è noto è che entrambi i dispositivi ricevono segnali multi-costellazione GPS, GLONASS e BeiDou e ricevono segnali sia di codice che di fase in singola frequenza (L1).

Dal posizionamento effettuato con tali smartphones non ci si aspetta una precisione centimetrica al pari di un ricevitore professionale, poiché essi nascono per scopi navigazionali e ricreativi, per cui la precisione che ci si aspetta è metrica.

Le seguenti immagini riassumono le caratteristiche tecniche dei due smartphone utilizzati.



### Samsung Galaxy J6

Specifiche e Caratteristiche Tecniche

- Dual Sim LTE 4G
- 8 Core 1.6 GHz
- Memoria 32 GB ESP
- Gps SI
- Android 8.0
- Display 5.6 1480x720
- Foto 13 Mpx
- Video Full HD

**Miglior prezzo € 179**

Samsung Galaxy J6 è un smartphone **Android** di fascia media, ideale per chi non ha troppe pretese ma che non vuole rinunciare ad un bel display touchscreen. Le funzioni offerte da questo Samsung Galaxy J6 sono più o meno quelle presenti su tutti i dispositivi più avanzati, a cominciare dalla connettività **Wi-fi** e dal **GPS**. Al top di gamma il trasferimento dati e la navigazione in internet grazie al modulo **LTE 4G**. Dispone di un enorme display **Touchscreen** da 5.6 pollici con una risoluzione di **1480x720** pixel non particolarmente elevata. Questo Samsung Galaxy J6 è un prodotto con pochi competitor per ciò che riguarda la multimedialità grazie alla fotocamera da ben 13 megapixel che permette al Samsung Galaxy J6 di scattare foto fantastiche con una risoluzione di **4160x3120** pixel e di registrare video in alta definizione (**Full HD**) alla risoluzione di **1920x1080** pixel. Lo spessore di **8.2mm** è contenuto e rende questo Samsung Galaxy J6 molto interessante.

Sistema Operativo	Android 8.0 Samsung Experience UI One
Disponibilità	2018/2
Dimensioni	149.3 x 70.2 x 8.2 mm
Peso	154 grammi

#### CONNETTIVITA'

Wi-Fi	✓ 802.11b/g/n
Bluetooth	✓ 4.2 con A2DP/LE
USB	✓ Micro USB 2.0
NFC	✗
GPS	✓ A-GPS/GLONASS/BeiDou

#### SENSORI

Accelerometro	✓
Prossimità	✓
Giroscopio	✗
Bussola	✗
Impronta Digitale	✓

Figura75: Scheda tecnica Samsung J6 (fonte www.hdblog.it)



### Huawei P9

Specifiche e Caratteristiche Tecniche

- Rete LTE 4G
- 8 Core 2.2 GHz
- Memoria 32 GB ESP
- Gps SI
- Android 6.0
- Display 5.2 1920x1080
- Foto 12 Mpx
- Video Full HD

**Miglior Prezzo € 249**

Huawei P9 è un smartphone **Android** completo, che non ha molto da invidiare ai dispositivi più avanzati. Dispone di un enorme display **Touchscreen** da 5.2 pollici con una risoluzione di **1920x1080** pixel. Sul versante delle funzionalità a questo Huawei P9 non manca davvero nulla. A cominciare dal modulo **LTE 4G** che permette un trasferimento dati e una navigazione in internet eccellente, passando per la connettività **Wi-fi** e il **GPS**. Questo Huawei P9 è un prodotto con pochi competitor per ciò che riguarda la multimedialità grazie alla fotocamera da ben 12 megapixel che permette di scattare foto fantastiche con una risoluzione di **4290x2800** pixel e di registrare video in **fullHD** alla risoluzione di **1920x1080** pixel. Lo spessore di appena **7mm** rende questo Huawei P9 un prodotto tra i più sottili sul mercato. C'è un modello più recente: **Huawei P10**.

Sistema Operativo	Android 6.0 Emotion UI v4.1 Marshmallow
Disponibilità	2016/2
Dimensioni	145 x 70.9 x 6.95 mm
Peso	144 grammi

#### CONNETTIVITA'

Wi-Fi	✓ 802.11 a/b/g/n/ac
Bluetooth	✓ 4.1 con A2DP/LE
USB	✓ Type-C
NFC	✓
GPS	✓ A-GPS/GLONASS/BeiDou

#### SENSORI

Accelerometro	✓
Prossimità	✓
Giroscopio	✓
Bussola	✓
Impronta Digitale	✓
Mic. di Riduzione Rumore	✓

Figura76: Scheda Huawei P9 (fonte www.hdblog.it)

### Ricevitori Multi frequenza e multi costellazione

Sono i ricevitori più completi. Possono ricevere tutte le parti del segnale ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_5$ , C/A, P) ma possono ricevere anche più costellazioni (le più completi ricevono tutte le costellazioni analizzate, ossia GPS, GLONASS; GALILEO; BEIDOU; QZSS). L'antenna può essere integrata o esterna.

Sono questi i ricevitori usati per le applicazioni professionali geodetiche o nelle stazioni permanenti.

Possono essere utilizzate per tutti i tipi di posizionamento, specialmente per quelli di precisione quindi sia posizionamento relativo che differenziale, sia statico che cinematico, sia in post processamento che in real time, senza limiti di lunghezza delle basi (possiamo avere centinaia di chilometri di distanza tra Master e Rover): la possibilità di combinare le frequenze permette di eliminare l'errore ionosferico e di modellare l'errore di multipath anche su distanze di centinaia di km.

Nel posizionamento di fase i ricevitori possono quindi sfruttare le combinazioni di portanti secondo varie tecniche per garantire un rapido fissaggio dell'ambiguità di fase. Sono infatti indicati per tecniche cinematiche in tempo reale RTK con tecniche di inizializzazione OTF.

In post processamento si raggiungono precisioni dell'ordine millimetro o sub millimetro, mentre col posizionamento differenziale (quindi in real time RTK) precisioni centimetriche (precisione di  $1\text{cm} \pm 2\text{cm}$ ).



Figura 77: Ricevitore professionale multifrequenza e multi costellazione sia singolo che su treppiedi con antenna e display

### Collegamento con altri sensori

Assieme al ricevitore GNSS spesso lavorano in modo integrato altri sensori utili per fini professionali e non come apparati inerziali (IMU), laser scanning (LIDAR), camere fotogrammetriche, orologi atomici, strumentazione geofisica, ecc.

### Dati in uscita

I dati che fornisce il ricevitore GNSS in output sono:

- Dati grezzi ossia misure di codice e di fase per un post processamento: possiamo trovarli o in formato proprietario della casa costruttrice del ricevitore (formato binario) o in formato standard internazionale "RINEX" = Receiver INdependent Exchange, che è un formato indipendente dal tipo di ricevitore (il rinex è un file di tipo ASCII apribile sul pc con un qualsiasi editor di testo). Se sono in formato proprietario possono poi essere convertiti nel formato Rinex tramite applicazioni apposite, come ad esempio "GNSS Logger" oppure c'è "Geo++". Esiste anche una versione compressa di Rinex, detta Rinex formato Hatanaka.

I Rinex sono in pratica dei file. Come file Rinex abbiamo dunque:

- File di osservazione: contiene le osservazioni di codice e di fase; il file è riconoscibile dall'estensione .OBS oppure .yyo con yy=anno in cui è stata effettuata la osservazione (ad esempio per il 2022 sarebbe yy=22)
- File di navigazione: contiene i parametri per il calcolo delle orbite dei satelliti; il file è riconoscibile dall'estensione .NAV oppure .yyn con yy=anno (ad esempio per il 2022 sarebbe yy=22); in realtà la lettera seguente la coppia di y è *n* per il GPS, *g* per Glonass, *h* per Galileo, *q* per Qzss, *p* per BeiDou e *o* per Sbas. Questo è un file di piccole dimensioni; il grosso dei dati sono nel file di osservazione.
- Coordinate in tempo reale: il ricevitore viene collegato ad un display mediante collegamento con porta seriale oppure il ricevitore stesso possiede un display. Per il formato dati si utilizza il protocollo internazionale NMEA (National Marine Electronics Association).
- Correzioni differenziali di codice o di fase in tempo reale: per posizionamento DGNS, il ricevitore può lavorare come stazione base e in tal caso invia correzioni differenziali secondo il protocollo RTCM (Radio Technology Commission for Maritime [Services]) oppure può lavorare come Rover e in tal caso riceve ed applica le correzioni differenziali per migliorare il calcolo della sua posizione.

## 8.2 STAZIONI PERMANENTI

Nel capitolo del posizionamento relativo e differenziale si è parlato di stazione base. Ma cosa sono le stazioni base? Sono stazioni permanenti, costruite su dei vertici che hanno un'importanza strategica per le reti nazionali e/o internazionali, dotate di ricevitori multi-costellazione e multi-frequenza, di ottime antenne esterne e tali da garantire la massima accuratezza nel posizionamento. Si è anche parlato delle reti NRTK ovvero le reti di stazioni permanenti che forniscono correzioni differenziali in modo continuativo per facilitare e permettere il posizionamento differenziale in real time garantendo precisioni centimetriche nelle misure di fase. Ma affinché le misure RTK consentano posizionamenti dei ricevitori Rover con e centimetriche, è necessario che le stazioni permanenti GNSS debbano essere note con precisioni superiori (ordine del mm e sub-mm).

“Il mercato del posizionamento” nel tempo ha richiesto la necessità di raggiungere precisioni via via più elevate nelle tecniche DGNS e di avere misure prese **in maniera continuativa** ed in un unico sistema di riferimento di una serie di vertici. Su tali vertici sono state montate le stazioni permanenti che acquisiscono dati sia di codice che di fase in maniera continuativa. Tali stazioni sono anche dette CORS = Continuously Operating Reference Station. Esse possono fungere da Stazioni Base/Master sia nel posizionamento differenziale che nel posizionamento relativo oltre che fungere da vertici per le reti NRTK e/o da vertici per la realizzazione pratica di sistemi di riferimento e reti internazionali e nazionali per la geodinamica di cui ne rappresentano il Frame (il “telaio” della rete): a livello internazionale per una rete di carattere globale contribuiscono le oltre 350 stazioni permanenti dell'IGS (International GNSS Service for Geodynamics) e quella dell'ITRF= International Terrestrial Reference Frame, invece a livello continentale si ha la rete dell'ETRF=European Terrestrial Reference Frame mentre a livello nazionale italiano di pubblico e libero utilizzo si ha ad esempio l'IGM (Istituto Geografico Militare) che ha definito un insieme di stazioni permanenti tali

da costituire la RDN=Rete Dinamica Nazionale, in cui col termine dinamico si intende che le posizioni delle stazioni permanenti, note con precisione millimetrica, sono continuamente aggiornate; poi esistono reti a livello regionale e provinciali sia pubbliche (come la rete interregionale SPIN GNSS comprende Piemonte, Val d'Aosta e Lombardia che riesce a fornire questi prodotti gratuitamente e quindi assolutamente di libero accesso) sia private come la rete IGS o Leica Geosystems.

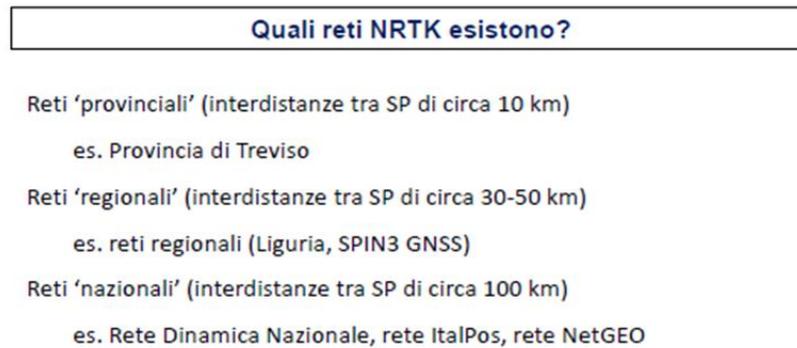


Figura 78: Tipologie di reti NTRK e interdistanze tra stazioni permanenti

Il loro obiettivo, oltre quello di offrire dati agli utenti per applicazioni geomatiche in post processamento o in real time, è:

- Mantenere il DATUM aggiornato: la SP non è altro che la materializzazione del sistema di riferimento teorico (ad esempio dei sistemi di riferimento ITRF e ETRF) e dato che ci offrono continue stime sul loro posizionamento, sono utili per monitoraggi geodinamici, ossia spostamento delle placche terrestri e deformazioni crostali, che si traduce poi nell'avere a disposizione un sistema di riferimento continuamente aggiornato e realistico
- Utili per avere stime efficienti sul ritardo troposferico e sul ritardo ionosferico
- Abbiamo visto che tramite le reti NTRK è possibile creare una modellazione areale dei BIASES, per incrementare la qualità del posizionamento

Proprio per questo loro ruolo è bene che la loro posizione sia compensata e controllata continuamente.

Le stazioni permanenti garantiscono, nella stima della loro posizione, il massimo livello di precisione che possiamo ottenere dal posizionamento e sono i "vincoli" o i punti di riferimento NOTI, nel calcolo della posizione del generico ricevitore Rover. Le caratteristiche che devono avere delle buone stazioni permanenti sono:

- Dotate di ricevitore multifrequenza che acquisisca in modo continuo dati di codice e di fase. Meglio se anche multi-costellazione.
- Il sito su cui giace la stazione permanente non deve presentare interferenze elettromagnetiche e la visibilità satellitare deve essere libera o senza importanti ostruzioni alla visibilità
- Memorizzazione delle osservazioni a partire da angoli di cut off di 5° di elevazione (con possibilità di partire da 0°).

- Rate di misura di 1 secondo (ossia il tempo che intercorre tra un'epoca di misura e la successiva)
- Forniscono giornalmente, via rete, dati ai centri di calcolo di reti globali, in file di 24ore acquisiti a 30secondi (alcune forniscono file orari)
- Elevata stabilità
- Dotate di un orologio di elevata qualità (alcune possiedono orologio atomico)
- Ricalcolo periodico delle proprie coordinate
- Opzionalmente possiedono una centralina meteorologica
- Antenna di tipo catalogato in IGS (International GNSS Service) o con file di calibrazione assoluta (ad esempio tipo choke ring) (fig.
- Forniscono correzioni differenziali

Ad oggi il ricevitore è collegato ad una rete e controllati da remoto; in passato era collegato ad un PC per l'archiviazione e controllo dei dati



Figura 79: Stazione permanente GNSS del Politecnico di Torino: Ricevitore GNSS con orologio atomico al rubidio + antenna

## 8.3 FORMATO DATI RINEX

Un ricevitore può produrre:

- Dati di codice e di fase (per post processamento) → tali dati possono essere in formato proprietario della casa costruttrice del ricevitore o in un formato indipendente dal tipo di ricevitore detto formato **RINEX (Receiver INdependent EXchange)** (sono file di tipo ASCII cioè apribili con un qualsiasi editor di testo).

La maggior parte dei software geodetici sono capaci di leggere misure di codice e di fase in formato Rinex ma anche di convertire a questo formato i formati dei dati delle case produttrici dei ricevitori. In formato Rinex oltre alle osservazioni vi sono anche altre tipologie di dati tra cui i file di navigazione contenenti le effemeridi.

Il formato RINEX è un formato dati che piace molto perché è un dato standard, documentato, open, quindi in chiaro, apribile con qualsiasi editor di testo e soprattutto non è vincolato dalla tipologia di software: infatti lavorando con il gnss, uno dei grossi problemi è che se viene effettuata una misura con un determinato ricevitore poi bisogna obbligatoriamente usare il software di quel determinato ricevitore perché il formato dati è letto solo da quel software.

Il formato RINEX ha risolto questo problema poiché è un formato standard indipendente dal tipo di ricevitore ed è letto da tutti i tipi di software, quindi permette di distribuire i dati a tutti ed è per questo che viene usato sia per i servizi pubblici che privati.

L'idea di creare il formato dati Rinex è stata sviluppata dall'osservatorio astronomico di Berna (AIUB) per facilitare lo scambio dei dati provenienti da diversi ricevitori.

Il formato Rinex supporta diverse costellazioni: GPS (G), GLONASS (R), GALILEO (E), BEIDOU (C), QZSS (J) ed anche i satelliti Sbas (S) (in parentesi è indicata la lettera indicante la relativa costellazione nel file rinex). La denominazione di un file Rinex è esplicita nella immagine successiva.

```

ssssdddf.yyt
| | | |
| | | | +-- t: file type:
| | | | O: Observation file
| | | | N: GPS navigation message file
| | | | M: Meteorological data file
| | | | G: GLONASS navigation message file
| | | | L: Galileo navigation message file
| | | | P: Mixed GNSS navigation message file
| | | | H: SBAS Payload navigation message file
| | | | B: SBAS broadcast data file
| | | | (separate documentation)
| | | | C: Clock file (separate documentation)
| | | | S: Summary file (used e.g., by IGS, not a standard!)
| | | |
| | | | +--- YY: two-digit year
| | | | +----- f: file sequence number/character within day.
| | | | +----- ddd: day of the year of first record or Julian day
| | | | +----- SSSS: 4-character station name designator or station id
| | | |
| | | | ftp://igsb.jpl.nasa.gov/pub/data/format/

```



Figura 80: I modi di denominazione di un file RINEX (Reicever INdependent EXchange format)

In figura 80 è descritta la denominazione del file Rinex mentre a destra vi è un file rinex observation ottenuto dalla stazione permanente di Padova. La denominazione del file è così composta:

- 4 lettere (ssss in figura, come PADO per la stazione di Padova o TORI per quella di Torino),

- il giorno dell'anno o la data Juliana (ddd in figura),
- una lettera (lettera f in figura= file sequence number) a cui corrisponde la fascia oraria UTC in cui è stata effettuata l'osservazione (ad esempio A=00:00÷01:00; B=01:00÷02:00; C=02:00÷03:00;...; J=09:00÷10:00 e così via),
- vi è un punto e successivamente un prefisso composto da 3 lettere: solitamente le prime 2 indicano l'anno (in figura sarebbe yy e quindi nel 2022 sarebbe yy=22) e l'ultima lettera individua il tipo di file. Questa ultima lettera è quella che definisce il tipo di dati che vi è all'interno e ogni lettera descrive un tipo di dati che troveremo nel file rinex, come ad esempio:
  - ✓ dati di osservazione (son le misure di codice e di fase) indicati con O;
  - ✓ dati di navigazione (contenente le effemeridi): come si può vedere dalla immagine precedente, a seconda della costellazione il prefisso cambia lettera finale ossia:
    - file di navigazione Gps: .yyN
    - file di navigazione Glonass: .yyG
    - file di navigazione Galileo: .yyL
    - file di navigazione relativo ad un mix di satelliti tra le diverse costellazioni GNSS (ad esempio gps+glonass): .yyP
  - ✓ dati meteorologici indicati con lettera M (anche i dati meteorologici utilizzano il formato rinex)
  - ✓ si hanno poi una serie di altri dati indicati nella precedente figura.

I file di osservazione e navigazione possono trovarsi anche con estensioni differenti e rispettivamente come “.obs” per le osservazioni e come “.nav” per i file di navigazione; in queste due ultime versioni però manca l'identificativo dell'anno; il file di maggiori dimensioni è il file di osservazione in cui vi sono le misure di codice e di fase. La struttura del file rinex sia di navigazione che di osservazione è simile ed è così fatta: in alto vi è la *header* cioè l'intestazione dove vi sono le informazioni generali terminante con la riga “end of header” e la parte successiva che è il *body* contenente le misure o i parametri richiesti per quel tipo di file.

Tabella 14: Estensioni dei file formato Rinex

File Type	Extension Type (yy is the year)
Obs Files	.yyO
Obs File (Hatanaka compressed)	.yyD
GPS Nav File	.yyN
Glonass Nav File	.yyG
Galileo Nav File	.yyL
Mixed GNSS navigation message file	.yyP
Sbas Payload navigation message files	.yyH
Sbas Broadcast data Files	.yyB
Meteorological data file	.yyM
Clock data file	.yyC

## RINEX DI OSSERVAZIONE

Nell'intestazione (header) dei file di osservazione (estensione .yyo oppure .obs) compaiono varie informazioni tra cui:

- Versione del formato Rinex (RINEX VERSION);
- Tipo di file ossia se navigazione o osservazione (TYPE);
- nome del programma di conversione, nome dell'istituto che ha effettuato la conversione e la data in cui è stato generato il file (PGM/RUN BY/DATE)
- eventuali commenti
- tipo di ricevitore e antenna
- coordinate approssimate ECEF del ricevitore
- altezza strumentale dell'antenna (DELTA)
- tipo di osservazione teoricamente possibili: dalla figura seguente, relativa al ricevitore dello smartphone Samsung J6, nei riquadri colorati si ha l'ordine in cui si trovano le informazioni nel body del file rinex: la 1° colonna identifica il numero di satelliti, la 2° colonna è la misura codice (nel riquadro rosso), la 3° colonna è la misura di fase sulla prima frequenza (nel riquadro giallo), la 4° colonna è la misura di doppler sulla 1° frequenza (riquadro verde), la 5° colonna è il segnale rumore della 1° frequenza (riquadro blu), poi relativamente al GPS vi è colonna che definisce il codice sulla 5° frequenza, la colonna per la fase sulla 5° frequenza ossia L5, poi la colonna per il doppler sulla 5° frequenza, infine la colonna per il segnale rumore sulla 5° frequenza. Discorso simile per le altre costellazioni. In realtà il ricevitore Samsung, così come Huawei, è in grado di ricevere praticamente codice, fase, doppler e rapporto segnale rumore solo sulla prima frequenza (indicate con le frecce, in figura)  
[Il doppler è un altro metodo di misura della distanza che si basa sul ritardo in cui l'onda arriva al ricevitore rispetto a quando è partita e rappresenta un altro metodo di misurare la distanza; è una sorta di deriva della misura di fase: risulta essere meno precisa della fase ma leggermente più precisa dei codici.]
- SYS/PHASE SHIFT”: sono gli shift di fase dal punto di vista sistemico, cioè ad esempio rispetto alla L1 GPS, la L5 GPS è shiftata di -0,25 cicli; la L1C Galileo è shiftata di +0,5 cicli rispetto alla L1B Galileo mentre la L5Q del QZSS è sfasata rispetto alla frequenza L1C di -0.25cicli.

Al di sotto dell'header vi è il *body* in cui si trovano le osservazioni ossia le misure di codice e di fase della distanza misurata tra ricevitore e satellite: per ogni epoca di misura sono comprese tante righe quanti sono i satelliti acquisiti in quell'epoca. Con riferimento al file rinex observation raffigurato nella immagine successiva, in testa ad ogni epoca acquisita risultano le informazioni:

22 04 02 09 35 5.0000000 20= anno (22), mese (04), giorno (02), ora (09), minuti (35), secondi (5.0000000), numero satelliti acquisiti (20).

Seguono le misure di codice e di fase nelle corrispondenti colonne.

```

GEOPO92J - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?
3.03 OBSERVATION DATA M: Mixed RINEX VERSION / TYPE
Geo++ RINEX Logger Geo++ 20220402 093447 UTC PGM / RUN BY / DATE
*****COMMENT*****
This file was generated by the Geo++ RINEX Logger App COMMENT
for Android devices (Version 2.1.6). If you encounter COMMENT
any issues, please send an email to android@geopp.de COMMENT
Filtering Mode: MORE COMMENT
*****COMMENT*****
Geo++ MARKER NAME
GEODETTIC MARKER TYPE
Geo++ Geo++ OBSERVER / AGENCY
unknown samsung SM-J600FN REC # / TYPE / VERS
unknown SM-J600FN ANT # / TYPE
4390186.4097 923270.2322 4518580.0460 APPROX POSITION XYZ
0.0000 0.0000 0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
G 8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q SYS / # / OBS TYPES
R 4 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q SYS / # / OBS TYPES
E 12 C1B L1B D1B S1B C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q SYS / # / OBS TYPES
C 4 C2I L2I D2I S2I C5Q L5Q D5Q S5Q SYS / # / OBS TYPES
J 8 C1C L1C D1C S1C C5Q L5Q D5Q S5Q SYS / # / OBS TYPES
2022 4 2 9 35 5.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
24 R01 1 R02 -4 R03 5 R04 6 R05 1 R06 -4 R07 5 R08 6 GLONASS SLOT / FRQ #
R09 -2 R10 -5 R11 0 R12 -1 R13 -2 R14 -7 R15 0 R16 -1 GLONASS SLOT / FRQ #
R17 4 R18 -3 R19 3 R20 2 R21 4 R22 -3 R23 3 R24 2 GLONASS SLOT / FRQ #
G L1C SYS / PHASE SHIFT
G L5Q -0.25000 SYS / PHASE SHIFT
R L1C SYS / PHASE SHIFT
E L1B SYS / PHASE SHIFT
E L1C +0.50000 SYS / PHASE SHIFT
E L5Q -0.25000 SYS / PHASE SHIFT
C L2I SYS / PHASE SHIFT
J L1C SYS / PHASE SHIFT
J L5Q -0.25000 SYS / PHASE SHIFT
C1C 0.000 C1P 0.000 C2C 0.000 C2P 0.000 GLONASS COD/PHS/BIS
END OF HEADER

Geo++ MARKER NAME
> 2022 4 2 9 35 5.0000000 0 20
C11 25463050.797 4327.153 30.800
C24 22370690.393 -360.254 20.900
C25 22810653.213 118781056.7541 2577.030 41.400
C32 26476466.823 137869909.9931 1405.599 33.200
G02 23656609.970 124316323.4621 3161.315 33.900
G06 23366299.348 122790731.0281 1682.014 34.200
G12 20111614.219 105687245.1561 713.867 38.000
G19 23241194.756 122133301.8671 -2301.969 35.700
G22 24292471.272 3498.578 28.800
G24 20717562.830 108871527.1641 -1115.801 38.400
G25 21390862.214 112409738.8671 3106.999 34.600
G29 24603335.965 129291402.7641 4675.209 34.300
G32 22912383.887 120405389.7431 2439.693 43.900
R03 23657546.821 -3393.402 26.900
R04 21655432.656 -1510.156 30.300
R05 22334928.151 119392990.3641 2049.113 32.600
R12 23950473.732 127939130.8941 -2341.462 34.500
R14 20145885.294 107388904.8881 2562.559 39.800
R23 20274808.042 108456550.7401 1957.042 37.700
R24 21699504.246 116037000.6651 4799.211 33.000
    
```

Figura 81: File rinex di osservazione del ricevitore Samsung J6; da notare gli ordini di grandezza diversi tra misure di codice e di fase: le prime sono espresse in metri e hanno ordine di grandezza simile alla distanza satellite ricevitore (intorno ai 22 mila km) mentre le seconde rappresentano le distanze in numero di cicli.

Scorrendo il file, si nota che alcune volte la frequenza L1 non viene ricevuta; questo perché ci sono interferenze che fanno perdere il segnale a causa di qualche disturbo elettromagnetico o il telefono/ricevitore si è surriscaldato (è stata questa la causa in uno dei miei rilievi) e ciò pregiudica le prestazioni del ricevitore oppure nel caso di un ricevitore-smartphone potrebbe esserci qualche aggiornamento firmware mentre si effettua il rilievo o ancora la ricezione di una telefonata durante il rilievo. Ci possono essere anche diverse epoche consecutive in cui non appaiono misure di fase e quindi per quelle epoche si potrà solo sfruttare la misura di codice.

### RINEX DI OSSERVAZIONE

**Il file rinex di navigazione** è un file che è possibile scaricare da qualsiasi stazione permanente oppure se si possiede un ricevitore di discrete qualità esso riesce a produrlo da sé, senza la necessità di scaricare i dati della stazione permanente vicina. Nella header del file di navigazione solitamente vi sono delle informazioni generiche come quelle già citate per il file rinex di osservazione ma in più

vi sono i parametri IONALPHA E ION BETA che possono essere usate nei modelli Klobuchar per la stima dei modelli di ionosfera, a seconda del modello di analisi scelto; vi sono poi i parametri per il calcolo del tempo in UTC (DELTA-UTC); leap second opzionale ossia il  $\Delta t$  tra tempo GPS e UTC.

Al di sotto della “header” seguono le informazioni orbitali per ogni satellite: per tutte le costellazioni ad eccezione del Glonass, non si hanno informazioni dirette sulla posizione del satellite in coordinate XYZ ma si hanno i parametri necessari per calcolarli (e lo farà internamente il software).

SIFET		I FORMATI DEI DATI - RINEX			gfoss.it	
SOCIETA' ITALIANA DI TOPOGRAFIA E TOPOGNOMIA					Associazione Italiana per l'Informazione Geografica Libera	
2.10	N: GPS NAV DATA				RINEX VERSION / TYPE	
XXRINEXN V2.10	AIUB		3-SEP-99 15:22		PGM / RUN BY / DATE	
EXAMPLE OF VERSION 2.10 FORMAT						
.1676D-07	.2235D-07	-.1192D-06	-.1192D-06		COMMENT	
.1208D+06	.1310D+06	-.1310D+06	-.1966D+06		ION ALPHA	
.133179128170D-06	.107469588780D-12	552960	1025		DELTA-UTC: A0,A1,T,W	
13					LEAP SECONDS	
					END OF HEADER	
6 99	9 2 17 51 44.0	-.839701388031D-03	-.165982783074D-10	.000000000000D+00		
	.910000000000D+02	.934062500000D+02	.116040547840D-08	.162092304801D+00		
	.484101474285D-05	.626740418375D-02	.652112066746D-05	.515365489006D+04		
	.409904000000D+06	-.242143869400D-07	.329237003460D+00	-.596046447754D-07		
	.111541663136D+01	.326593750000D+03	.206958726335D+01	-.638312302555D-08		
	.307155651409D-09	.000000000000D+00	.102500000000D+04	.000000000000D+00		
	.000000000000D+00	.000000000000D+00	.000000000000D+00	.910000000000D+02		
	.406800000000D+06	.000000000000D+00				
13 99	9 2 19 0 0.0	.490025617182D-03	.204636307899D-11	.000000000000D+00		
	.133000000000D+03	-.963125000000D+02	.146970407622D-08	.292961152146D+01		
	-.498816370964D-05	.200239347760D-02	.928156077862D-05	.515328476143D+04		
	.414000000000D+06	-.279396772385D-07	.243031939942D+01	-.558793544769D-07		
	.110192796930D+01	.271187500000D+03	-.232757915425D+01	-.619632953057D-08		
	-.785747015231D-11	.000000000000D+00	.102500000000D+04	.000000000000D+00		
	.000000000000D+00	.000000000000D+00	.000000000000D+00	.389000000000D+03		
	.410400000000D+06	.000000000000D+00				

Figura 82: Esempio di file di navigazione Rinex (fonte [www.gfoss.it](http://www.gfoss.it)); in rosso l'header e in verde il body

In sostanza ogni blocco che si legge nel body è relativo ad un singolo satellite ed inizia con una riga contenente il nome (identificato da un numero) del satellite a cui si riferisce quel blocco, il tempo  $t_{oc}$  (time of clock in anno, mese, giorno, ora, minuti, secondi che rappresenta il tempo di riferimento rispetto a cui viene calcolato l'offset dell'orologio del satellite), i coefficienti  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  del bias di orologio del satellite  $\delta^i$ . Al di sotto della prima riga vi sono 7 righe che contengono vari parametri orbitali kepleriani e i coefficienti correttivi d'orbita ed in più vi sono altri termini utili per stimare la posizione del satellite come il  $t_{oe}$  (time of ephemeris che rappresenta l'epoca di riferimento rispetto a cui vengono calcolate le effemeridi, valutato in secondi all'interno della settimana GPS: è il centro dell'intervallo all'interno del quale le effemeridi broadcast vengono usate) ed il termine IODE che rappresenta l'identificativo effemeride del satellite ossia al cambio dei parametri delle effemeridi corrisponde un nuovo numero iode: è importante infatti che tutti i ricevitori calcolino la posizione dei satelliti con gli stessi parametri.

Quindi tutti quei numeri che vi sono nel body del file di navigazione servono per determinare l'orbita e soprattutto la posizione del satellite in una specifica epoca; può essere interessante avere i parametri del modello dell'orologio del satellite ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ) perché se ad esempio si volesse creare un software per comparare i modelli di orologio dei satelliti, queste informazioni sono assolutamente fruibili e accessibili.

NAVIGATION FILE (\*.YYN or \*.NAV)

	$t_{oc}$	$a_0$	$a_1$	$a_2$
1 0 10 10 8 0 0.0	.148013234138D-03	.170530256582D-11	.00000000000D+00	
	.22600000000D+03	-.61625000000D+02	.466983737461D-08	.285302438067D+01
	-.329588191414D-05	.491300632711D-02	.415742397308D-05	.515366060638D+04
	.20160000000D+06	.335276126862D-07	.156408352384D+01	-.242143869400D-07
	.961530182141D+00	.299687500000D+03	-.174198327438D+01	-.821141346690D-08
	-.247153132064D-09	.10000000000D+01	.10830000000D+04	.00000000000D+00
	.20000000000D+01	.00000000000D+00	-.325962901115D-08	.48200000000D+03
	.19440000000D+06			

IODE  $t_{oc}$  [s] in GPS WEEK

Figura 83: estratto del body del file di navigazione rinex

Mentre i file di navigazione Gps, Galileo e BeiDou hanno struttura e componenti simili, i file di navigazione GLONASS sono diversi: vi è direttamente la posizione XYZ, l'accelerazione e velocità di ogni satellite, riferiti al datum PZ90, con una certa cadenza e devono usarsi delle equazioni differenziali per stimare la sua traiettoria; quindi cambia la tipologia di approccio nella stima della posizione del satellite in una determinata epoca rispetto alle altre costellazioni e quindi l'algoritmo del software deve tener conto di ciò. Continuano ad essere presenti sotto forma di elementi kepleriani i parametri orbitali relativi agli almanacchi.

Le effemeridi Glonass hanno validità 30 minuti. Tutti i tempi del formato rinex sono nella scala di tempo UTC, ottenuti sommando 3 ore al tempo UTC(SU).

SIFET SOCIETÀ ITALIANA DI FOTOGRAFIA E TOPOGRAFIA

I FORMATI DEI DATI – GLONASS NAV

gfoss.it Associazione Italiana per l'Informazione Geografica Libera

Contengono la posizione, la velocità e l'accelerazione dei satelliti ad intervalli di 30 minuti. Le posizioni intermedia vengono definite con una integrazione basata su equazioni differenziali di 4°

2.10	GLONASS NAV DATA	RINEX VERSION / TYPE
SpiderWeb 4.0	2012 10 03 10:20	PGM / RUN BY / DATE
2012 10 3 1.825392246246e-007		CORR TO SYSTEM TIME
16		LEAP SECONDS
		END OF HEADER
1 12 10 02 23 15 0.0	<u>-1.764595508575D-04</u>	<u>0.00000000000D+00</u>
	<u>8.000659942627D-02</u>	<u>3.725290298462D-09</u>
	<u>2.265614453125D+04</u>	<u>-1.700992584229D-01</u>
	<u>8.109526367188D+02</u>	<u>-3.560448646545D+00</u>
	<u>1.862645149231D-09</u>	<u>0.00000000000D+00</u>
2 12 10 03 01 15 0.0	<u>-3.349976614118D-04</u>	<u>-1.818989403546D-12</u>
	<u>8.145399093628D-01</u>	<u>2.793967723846D-09</u>
	<u>1.862383886719D+04</u>	<u>-8.145399093628D-01</u>
	<u>1.571796826172D+04</u>	<u>-6.501874923706D-01</u>
	<u>-7.548077636719D+03</u>	<u>-3.358065605164D+00</u>
	<u>1.862645149231D-09</u>	<u>0.00000000000D+00</u>

In grigio le posizioni XYZ, in grassetto le velocità e sottolineate le accelerazioni. Nei riquadri i parametri del modello di clock del satellite

Figura 84: Effemeridi broadcast GLONASS in formato RINEX per i satelliti 1 e 2 (fonte www.Gfoss.it)

Attualmente si utilizza il formato Rinex versione 3 (l'ultima versione è la 4 datata Dicembre 2021, fonte Wikipedia, ma ancora non molto diffusa); il vantaggio rispetto le versioni precedenti è che c'è più ordine nella lettura; son sempre file di testo, quindi leggibili e documentabili e la cosa interessante è che in queste nuove versioni vi è indicato il **rapporto segnale-rumore** in dBHz.

Nella seguente tesi come ricevitori si sono utilizzati due smartphones che di default non forniscono dati in formati rinex, quindi per ottenerli si è utilizzata l'applicazione “Geo ++ RINEX Logger” scaricabile gratuitamente da internet, la quale utilizza i servizi API Android più recenti per registrare i dati di misurazione GNSS grezzi del dispositivo in un file RINEX che include pseudorange, misure di fase, intervalli di delta accumulati, frequenze doppler e valori di rumore. Tale applicazione supporta GPS / GLONASS / GALILEO / BDS / QZSS per L1 / L5 / E1B / E1C / E5A (se supportati dal dispositivo).

Tale applicazione è stata testata con successo su molti dispositivi ed anche sui dispositivi smartphones utilizzati ha funzionato. In sostanza immediatamente prima di effettuare il rilievo, si accede all'app e la si attiva e quindi il rilievo ha inizio: parte l'acquisizione dei dati grezzi. Terminato il rilievo, i file Rinex ottenuti possono essere scaricati su pc e aperti con un editor di testo qualsiasi fornendo i dati di osservazione in formato Rinex 3.03 (si veda figura 81 per il file rinex ottenuto).



Figura 85: A sinistra logo dell'applicazione “Geo++RinexLogger” mentre al centro l'interfaccia grafica; a destra i due dispositivi smartphone in fase di rilievo statico con l'applicazione “Geo++RinexLogger” attivata

Una volta terminato il rilievo e quindi finita la registrazione dei dati di osservazione satellitare, l'applicazione Geo++Rinex Logger fornisce tali dati in due cartelle chiamate *BEST* e *MORE*:

- *BEST*: contiene le osservazioni che per l'applicazione risultano essere le migliori;
- *MORE*: contiene tutte le osservazioni effettuate.

Per il processamento dati si sono considerate solo le osservazioni contenute nella cartella *MORE* in modo da possedere tutte le informazioni di osservazione possibili in quanto saremmo poi noi ad impostare le opzioni del software di processamento così da settare dei “parametri soglia” che automaticamente considereranno solo le osservazioni che rispondono a tali parametri.

Non si è tenuto conto della cartella *BEST* perché non sono noti i parametri secondo cui l'applicazione sceglie le migliori osservabili possibili.

Per entrambi gli smartphones usati nel rilievo: essi non producono i file rinex di navigazione per cui si è proceduto scaricando da internet i file di navigazione della stazione permanente vicina al rilievo.

Così come per il posizionamento relativo, anche per un posizionamento assoluto, i file rinex di navigazione, fondamentali per il posizionamento, sarebbero dovuti essere scaricati dal sito Internet della stazione permanente più vicina a meno che il ricevitore non sia in grado di autoprodurli.

## 9. OBIETTIVO DELLA TESI

La tesi ha l'obiettivo di:

- analizzare la qualità in termini di PRECISIONE di un posizionamento relativo statico in ambiente urbano (Prato della Valle, Padova) effettuato per mezzo di due comuni smartphones, aventi simile valore economico ed appartenenti allo stesso segmento di mercato, che fungono da ricevitori Rover GNSS;
- capire come ottimizzare la soluzione statica
- verificare se e quanto differisce tale soluzione tra i due ricevitori.

Inoltre verranno analizzati i dati grezzi di osservazione (pseudo-distanze) rilevati dai singoli ricevitori Rover, illustrandone il numero di satelliti acquisiti, l'indice PDOP ed il rapporto segnale-rumore e saranno paragonati con i dati grezzi rilevati dalla stazione permanente di Padova che gode di un ricevitore geodetico professionale multi-frequenza e multi-costellazione di alta qualità (Ricevitore Stonex SC2200 con antenna professionale Stonex 1500SA)

I ricevitori Rover utilizzati sono due smartphones dalle caratteristiche tecniche simili ovvero il **HUAWEI P9 EVA-L09** ed il **SAMSUNG GALAXY J6**, rispettivamente immessi sul mercato nel 2016 e nel 2018, dal costo di qualche centinaio di euro (200-300€), entrambi con sistema operativo Android, attualmente entrambi in commercio e capaci di acquisire sia i segnali di codice che i segnali della portante L1 delle costellazioni Gps, Glonass e BeiDou.

Si sono condotte in totale 6 campagne di rilievo di dati GNSS in **modalità statica**: ad ogni singola campagna di misura è associato un punto di stazionamento su cui si è sostato per 1 ora, una determinata condizione metereologica e una determinata fascia oraria. In generale si sono considerate queste condizioni:

- giornata soleggiata: una campagna di misura al mattino ed una in serata
- giornata nuvolosa: una campagna di misura al mattino ed una in serata

Sono stati scelti 2 punti di stazionamento. I risultati ottenuti sono stati commentati e confrontati tra loro. Il fine è di analizzare sia la qualità dei dati di osservazione rilevati dai singoli smartphone e sia le soluzioni ottenute in termini di precisione della posizione stimata osservando se tali soluzioni cambino o meno in relazione al punto di stazione, all'orario di rilievo ed al tipo di smartphone che ha rilevato la posizione.

Come software di elaborazione dati per ottenere la stima della posizione si è usato il software open source **RTKLIB versione 2.4.3 b33**, impostando un **posizionamento relativo** che ha visto usare come stazione Master la stazione permanente di Padova, sita presso il CISAS Giuseppe Colombo dell'Università degli Studi di Padova (via Venezia 15, Padova) e distante circa 3 km dal sito di misura in Prato della Valle (Padova) quindi in accordo alla teoria sulle massime distanze raccomandate tra rover e stazione permanente per il posizionamento relativo a singola fase, ossia minori di 15-20 Km. **Si è scelto il posizionamento relativo sia per simulare un posizionamento professionale geodetico in ambiente urbano ma con ricevitori di qualità medio-bassa e sia perché si presta al post-processamento e quindi permette una analisi dettagliata sia dei dati grezzi che dei risultati.**

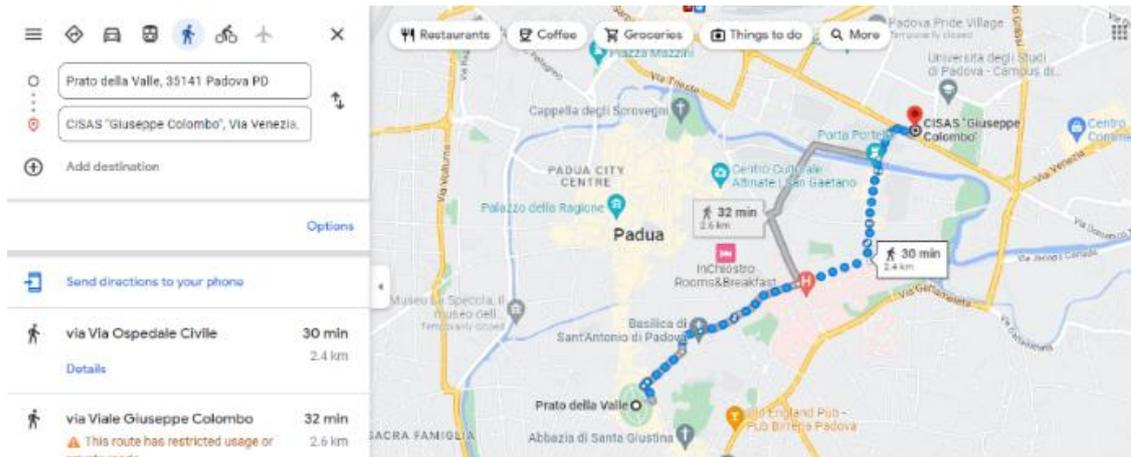


Figura 86: Distanza stazione permanente di Padova – piazza Prato della Valle (Padova) di circa 3 km

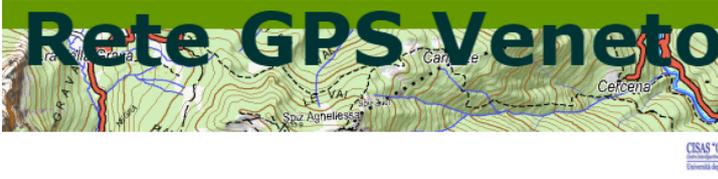


Figura 87: Piazza Prato della Valle (Padova) e sulla sinistra la basilica abbaziale di Santa Giustina

### **PADOVA (PADO)**

<b>Coordinate approssimate:</b>		
Latitudine:	45° 24' 40"N	
Longitudine:	11° 53' 46"E	
Altitudine:	65 m	
<b>Tipo antenna:</b>	STONEX SA1500	
<b>Tipo ricevitore:</b>	STONEX SC2200	
<b>Ente di riferimento:</b>	CISAS (Università di Padova)	

Figura 88: Stazione permanente sita in via Venezia 15, Padova, presso l'Università degli Studi di Padova



**Rete GPS Veneto**

**Padova ( PADO )**

Home	<a href="#">Informazioni generali</a>
Obiettivi	<a href="#">Archivio dei dati</a>
Motivazioni	<a href="#">Informazioni dal logsheet</a>
	<a href="#">Elenco dei logsheet</a>
Sistemi di riferimento	<b>Informazioni generali</b>
Il CISAS e il GPS	<b>Nome</b>
Stazioni GNSS	Padova
Scarica dati	<b>Codice</b>
Rete GNSS Italiana	PADO
MultiGNSS	<b>Reti</b>
Documenti	IGS, EPN, CEGRN, RDN
FAQ	<b>Coordinate approssimate:</b> ( sistema WGS84 )
Registrazione	45° 24' 40.1394" N
Contatti	11° 53' 45.801" E
Privacy	64.7 m
	(Attenzione: Queste coordinate sono approssimate. Le coordinate seguente link: <a href="http://147.162.229.63/Web/page.php?pid=db&amp;n=">http://147.162.229.63/Web/page.php?pid=db&amp;n=</a>
	<b>Sistema</b>
	GPS+GLO+GAL+BDS
	<b>Proprietario</b>
	Università di Padova

[search](#) | [email](#) | [admin](#)

Ultima modifica: 2021-05-06 12:02:23

Figura 89: dati e informazioni sulla stazione permanente GNSS di Padova recuperabili al sito:

<http://retegnssveneto.cisas.unipd.it/Web/index.php>

La stazione permanente di Padova, di proprietà dell'università di Padova, fa parte sia della rete regionale veneta detta "Rete GPS Veneto", sia della rete nazionale dell'IGM (Istituto Geografico Militare) e anche della rete di stazioni europee EUREF.

Dal sito della regione si legge: "La Rete GPS Veneto costituisce un'infrastruttura geodetica essenziale per supportare operazioni di rilievo topografico e catastale sul territorio regionale. La rete opera sul territorio con stazioni permanenti attive 24 ore al giorno, 7 giorni su 7. I servizi offerti in modo gratuito, comprendono la disponibilità di files RINEX per la correzione differenziale post-processing e il servizio di posizionamento in tempo reale distribuito via internet tramite protocollo Ntrip.

Le stazioni permanenti di Rete GPS Veneto sono fornite da Enti Istituzionali e Soggetti Privati ed il dato osservativo è liberamente accessibile tramite questo portale previa registrazione. La Rete si avvale del supporto scientifico dell'Università di Padova. Inoltre, essa è inquadrata nella Rete Dinamica Nazionale RDN dell'IGMI e nella Rete Europea Permanente EPN dell'EUREF."

In realtà la registrazione è richiesta solo per il servizio RTK di Rete GPS Veneto, per ottenere le correzioni in tempo reale, mentre non è chiesta per i dati Rinex di osservazione e navigazione per post processamento.

Per scaricare i file Rinex dal sito è necessario collegarsi al sito di Rete GPS Veneto. Dalla home page si clicca su "Scarica dati" e, dopo aver selezionato la stazione ed il periodo di interesse, è possibile visualizzare i dati RINEX di osservazione ad 1 secondo per ogni ora della giornata, i dati RINEX di osservazione a 30 secondi giornalieri, i dati RINEX di navigazione giornalieri e quelli delle coordinate geocentriche delle stazioni permanenti disponibili. Infine si scaricano i files di interesse.

Sempre dal sito ufficiale si cita: “*La Regione Veneto, tramite l'Università di Padova e d'intesa con l'Agenzia del Territorio, è impegnata per attivare e operare una Rete Regionale di Posizionamento basata sui satelliti del Global Navigation Satellite System (GNSS). Tale sistema attualmente comprende i satelliti americani GPS e quelli russi GLONASS, con prospettiva di allargamento ai satelliti Europei della costellazione Galileo. L'obiettivo è di garantire la copertura trigonometrica del territorio regionale con un servizio di precisione, affidabilità e standard di qualità in linea con quelli europei*”

Effettivamente scaricando i dati rinex di osservazione si nota che i dati acquisiti provengono da multi-costellazioni GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDOU ma i file rinex di navigazione solo con estensione .n ossia relativi ai satelliti GPS per cui il processamento dei dati, con posizionamento relativo, sarà fatta solo considerando la posizione dei satelliti GPS; da qui si conferma che la stazione permanente di Padova sia in realtà una stazione permanente essenzialmente GPS.

Le istituzioni interessate al funzionamento e manutenzione della stazione permanente sono:

- La Regione Veneto, quale organo di coordinamento e di indirizzo in campo cartografico e territoriale, ricerca lo stato dell'arte quanto a strumentazione per il rilevamento e le tecniche di restituzione e gestione del dato spaziale.
- L'Agenzia del Territorio, interlocutore istituzionale di professionisti ed enti locali, guarda con interesse alle tecniche che minimizzano imprecisioni di rilevamento e inquadramento.
- L'Università di Padova, forte della sua esperienza nel campo delle applicazioni dei satelliti artificiali alla topografia, cartografia e posizionamento di precisione, si propone con una rete di tre stazioni già operative, a Padova, Asiago e Rovigo, e con infrastrutture di comunicazione, di elaborazione dati e di addestramento del personale che già le hanno valso riconoscimenti in campo nazionale e internazionale. Lo stretto collegamento con l'Istituto Geografico Militare, che è l'Organo Cartografico dello Stato, garantisce l'armonia tra le procedure a livello regionale e quelle a livello nazionale. Infine la stretta collaborazione tra l'Università di Padova e l'EUREF, il consorzio europeo per la definizione di un sistema geografico di riferimento comune agli Stati membri, garantisce la perfetta integrazione in ambito comunitario.



Figura 90: Distribuzione delle stazioni permanenti GNSS che partecipano alla rete europea EUREF. In Veneto sono presenti due stazioni, a Padova e Venezia

## 9.1 SITO DI MISURA

Tutte le campagne di misura sono state effettuate in Prato della Valle a Padova.

Prato della Valle è la più grande piazza di Padova, anzi si classifica tra le prime 10 per estensione in Europa, con una superficie di 88 620 m<sup>2</sup>. La configurazione attuale risale alla fine del XVIII secolo.

La piazza esiste sin da epoca romana ed ha da sempre avuto funzioni economiche e ricreative (mercati, riunioni, feste). Il fatto che sia rimasta una zona non edificata, pur a ridosso delle mura della città, è dovuta alla conformazione a catino della zona per lunghi secoli (forma concava, depressa) che provocava ristagni d'acqua, tanto da assumere quell'aspetto di valle che giustifica il nome ed anche per questo una parte di essa fu usata per molti secoli come zona cimiteriale; nonostante ciò, aveva il pregio di essere molto ampia e pur essendo in diversi periodi dell'anno ricettacolo di acque stagnanti, ospitava folle, mercati e sagre. Il nome attuale in realtà risale al XII secolo d.C.

**Breve storia:** in epoca romana la piazza veniva chiamata “Campo di Marte” o “Campo Marzio” poiché usata come un'area destinata per le riunioni dell'esercito romano; in seguito vi costruirono un vasto teatro, lo Zairo, e un circo per le corse dei cavalli. Nell'epoca delle persecuzioni contro i primi cristiani, il circo fu utilizzato per i combattimenti e qui furono martirizzati due dei quattro patroni della città, Santa Giustina e San Daniele (gli altri 2 patroni sono Sant'Antonio da Padova e San Prosdocimo). Nel 304 la protomartire Giustina fu sepolta nell'area cimiteriale prossima all'area del Prato e nel corso del VI secolo iniziò la costruzione della prima basilica dedicata a Santa Giustina e da allora la zona del Prato fu considerata di proprietà della basilica.

Nel 589 una serie di gravi alluvioni sconvolsero l'assetto idrografico di molti fiumi della pianura padana: a seguito di questo periodo di disordine idrografico, l'area del Prato si trasformò in una zona acquitrinosa e paludosa, piena di zanzare, abbandonata a se stessa se non per qualche conduzione rurale effettuata dai monaci dell'abbazia. Nel 970 il vescovo Gauslino visitando la basilica e la zona del Prato la descrisse come desolata e abbandonata; promosse, quindi, la costruzione di un monastero adiacente alla basilica che fu dotato di cospicui possedimenti tra cui l'intera area di Prato della Valle; in realtà quella zona era considerata appartenente alla basilica di Santa Giustina dal VI secolo e perciò il vescovo ratificò semplicemente una situazione ormai consolidata.

A partire dal **XII secolo**, contestualmente ad una rinascita di tutta la città, si tornarono ed effettuare mercati in Prato della Valle e due volte al mese aveva luogo il mercato degli animali; a quest'epoca infatti risale l'uso del termine Prato della Valle da “**Pratum**” per quest'area come indicativo di luogo commerciale e da “Valle” poiché sebbene si trovasse a ridosso delle mura della città, continuò a mantenere per lungo tempo il suo aspetto paludoso e malsano, dovuto alla conformazione a catino del terreno (zona depressa). Inoltre esso non era proprietà demaniale, ma dell'abbazia di S. Giustina che, durante la dominazione veneziana, non aveva i mezzi di curarne a pieno la bonifica. Tutti questi fattori, come pure la destinazione cimiteriale di una sua parte, contribuirono così a preservare la zona da radicali cambiamenti e a lasciarla a lungo ineditata per molti secoli.

Per tutto il Medioevo fu comunque sede di fiere, giostre, feste pubbliche e gare, come le corse dei “sedioli”, una specie di biga tipicamente padovana. Persino le più frequentate prediche di Sant'Antonio venivano tenute in Prato della Valle (1200 d.C.).

Nel 1767 il Senato Veneto dichiarò l'area di proprietà comunale, contro le pretese dei monaci di Santa Giustina. La configurazione attuale di Prato della Valle risale al 1775 ad opera di Andrea Memmo, patrizio veneziano illuminista, nominato Provveditore della Serenissima a Padova, che la

progettò così come è oggi con l'aiuto dell'abate Domenico Cerato, professore di architettura a Vicenza e Padova e progettista di diverse opere pubbliche a Padova e dintorni. Memmo giunse in città con l'incarico di Provveditore straordinario nel 1775 con gli obiettivi principali di rilancio commerciale e di igiene pubblica della città: valorizzò questo spazio attuando una radicale bonifica e creando una canalizzazione sotterranea destinata a far defluire le acque dell'anello centrale, che tuttora vediamo, valicato da 4 ponti.

Dai documenti storici risulta che l'isola ellittica centrale venne realizzata attraverso il trasporto di "10000 carri di terreno" che servirono a riempire la depressione centrale che caratterizzava il Prato impedendo quindi il ristagno delle acque e i fenomeni di impaludamento che colpivano periodicamente l'area. L'isola ellittica centrale (20000 m<sup>2</sup>) prese subito l'appellativo di *Memmia* in onore ad Andrea Memmo, circondata da una canaletta di acqua (alimentato dal canale Alicorno) e sulle cui sponde vi si trova un doppio anello di statue, attualmente ben 78 statue di cui 40 lungo l'anello esterno e 38 lungo quello interno più la collocazione di due obelischi ai piedistalli dei ponti est ed ovest (fonte Wikipedia). Le statue su piedistallo furono scolpite tra il 1775 e il 1883 da diversi artisti e rappresentano i più illustri personaggi della città, padovani di nascita o d'adozione o che hanno reso lustro alla città; solo gli spazi dell'ingresso ai quattro ponti furono riservati a personaggi politici, a Dogi e Papi. La statua numero 44 rappresenta Andrea Memmo. Nell'isola Memmia furono inizialmente allestiti padiglioni per dar vita ad un mercato, ma in seguito, al posto delle botteghe, furono piantati degli alberi.

La canaletta ellittica che cinge l'isola fu pensata sia come elemento di paesaggio sia come elemento essenziale di bonifica; infatti funzionò anche come canale di raccolta e di scolo per le acque piovane; la canaletta è alimentata dal canale Alicorno che, oggi, scorre in gran parte tombinato e quindi non visibile. Le acque entrano ed escono dalla canaletta attraverso due apposite bocche collocate sotto al ponte meridionale (Ponte dei Papi) che dà accesso all'isola.

Tra il 1970-1980 la crescente invasività del traffico automobilistico trasformarono l'area del Prato esterna all'isola Memmia in un grande parcheggio e l'isola stessa finì per essere percepita come un'immensa aiuola spartitraffico. A partire dagli anni 90 l'area del Prato della Valle è stata oggetto di un complesso intervento di recupero: tale recupero ha riguardato sia l'aspetto fisico dell'area sia quello sociale-funzionale con progressive limitazioni alla circolazione delle auto ed hanno eliminato quasi totalmente le aree di parcheggio usate fuori dall'isola Memmia. Un nuovo assetto della vegetazione dell'isola, con viali alberati e prato inglese, ha consentito all'area di essere utilizzata come luogo di ritrovo per studiare all'aperto o prendere il sole.

Quindi storicamente Prato della Valle è stato un luogo in cui si svolgevano mercati, fiere e sagre e tutt'ora il sabato è il giorno settimanale destinato ad uno dei più grandi mercati di Padova e diverse volte l'anno il Prato ospita eventi e concerti con decine di migliaia di spettatori.

La piazza sostanzialmente oggi è ad uso pedonale compresa la zona esterna dell'isola Memmia che essendo asfaltata è spesso utilizzato da runner, pattinatori (in alcune occasioni si svolgono vere e proprie gare di pattinaggio professionistico) e come ciclabile mentre i veicoli circolano esternamente ad essa.

L'assetto della vegetazione è impostato per garantire ampi prati, mentre i quattro viali che si intersecano al centro della piazza, in cui è presente una fontana, sono viali alberati per cui garantiscono anche ombra oltre che adornare il prato.

Sul Prato della Valle si affaccia ancora l'imponente Basilica abbaziale di Santa Giustina, presente sin dal VI secolo seppur debba la sua attuale forme al Cinquecento. Vicino sorge il complesso monumentale del monastero.<sup>58</sup>



Figura 91: a sinistra Prato della Valle (Padova) prima del progetto di Andrea Memmo in un quadro di Francesco Guardi (Museo delle belle arti di Digione); a destra mappa del 1767, prima del progetto di Andrea Memmo



Figura 92: Prato della Valle oggi risulta una zona verde, ampia, libera da ostacoli alla visibilità satellitare; risulta un'area verde interna al centro città padovano, densamente popolato



Figura 93: Canaletta ellittica che cinge l'isola della Memmia e sull'argine il doppio anello di statue

<sup>58</sup> <https://www.venetostoria.com/?p=2295>; <https://padovanet.it/informazione/prato-della-vallen>

Il motivo della scelta di tale Piazza su cui si sono effettuate tutte le campagne di misura è dovuto al fatto che è uno spazio aperto, in assenza di ostruzioni alla visibilità satellitare (come si nota dalla foto non vi sono grattacieli o agglomerati urbani a ridosso della piazza), libero da interferenze elettromagnetiche che potessero interrompere i segnali (è stata eseguita una prova speditiva di campo per verificare che la rete gsm e gnss dello smartphone prendesse senza problemi), ridotta probabilità di avere multipath proprio per l'assenza di edifici alti.

Le campagne di misura quindi si sono tenute tutte in piazza Prato della Valle. In particolare

- **1° caso studio:** ricevitore (smartphone) posizionato al centro panchina di fronte alla fontana centrale;
- **2° caso studio:** ricevitore (smartphone) posizionato all'estremità di una panchina sita sul viale alberato che collega il ponticello nord-ovest con la fontana centrale;

I punti sono segnati con una stellina rossa nella figura 94.

Per ciascun sito si sono effettuate almeno 2 campagne di misura, ciascuna della durata di 1 ora, in modalità statica ossia il ricevitore rimaneva stazionario, nella medesima posizione, per tutta l'ora di rilievo. Le condizioni del posizionamento statico sono:

- ✓ Campagna di misura effettuata durante una giornata soleggiata ossia tale da avere il cielo terso e quindi teoricamente aspettare la ricezione dei migliori dati di osservazione satellitare;
- ✓ Campagna di misura effettuata durante una giornata uggiosa e/o nuvolosa ossia con cielo coperto.

Si è optato per il rilievo in condizioni metereologiche opposte così da poter poi analizzare e confrontare la qualità dei dati di osservabili rilevati ed inoltre fare delle considerazioni sulla qualità delle soluzioni stimate dal software RTKLIB alla fine del processo di calcolo.

Si riportano di seguito le foto dei casi studio.

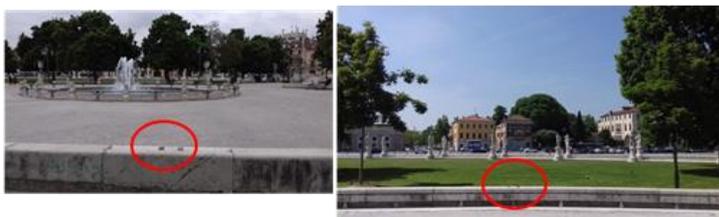


Figura 94: Prato della Valle (Padova) in vista assonometrica. Si nota la canaletta con il doppio anello di statue, il vasto prato dell'isola Memmia, i viali alberati e la fontana al centro della piazza. Le stelline rosse indicano i punti di stazionamento su cui è stato fatto il rilievo statico di un'ora ossia i casi studio 1 e 2

**1° CASO STUDIO:** ricevitore al centro della panchina frontale alla fontana centrale.

La panchina è in spazio aperto, non vi sono alberi nelle vicinanze per cui tale luogo è idoneo per garantire una ottima visibilità satellitare e non soffrire di multipath.

Rilievo effettuato contemporaneamente sia con smartphone Huawei P9 che Samsung J6 in data 22 marzo 2022 (giornata di sole) e 2 aprile 2022 (giornata nuvolosa), sia al mattino che sera.



*Figura 95: Immagini relative alla panchina nei pressi della fontana centrale di Prato della Valle (Padova). Cerchiato in rosso i due smartphones*

**2° CASO STUDIO:** ricevitore su panchina del viale alberato.

La panchina è situata sul viale alberato che collega il ponticello nord-ovest con la fontana centrale. Essendo sempre in Piazza Prato della Valle lo spazio è aperto e non ci sono ostacoli alla visibilità, però rispetto al caso studio 1 vi è la presenza di qualche albero che potrebbe dare fastidio in termini di rapporto segnale rumore.

Rilievo effettuato contemporaneamente sia con smartphone Huawei che Samsung in data 29 marzo 2022 (giornata nuvolosa) e in data 5 aprile 2022 (giornata soleggiata) sia al mattino che in serata.

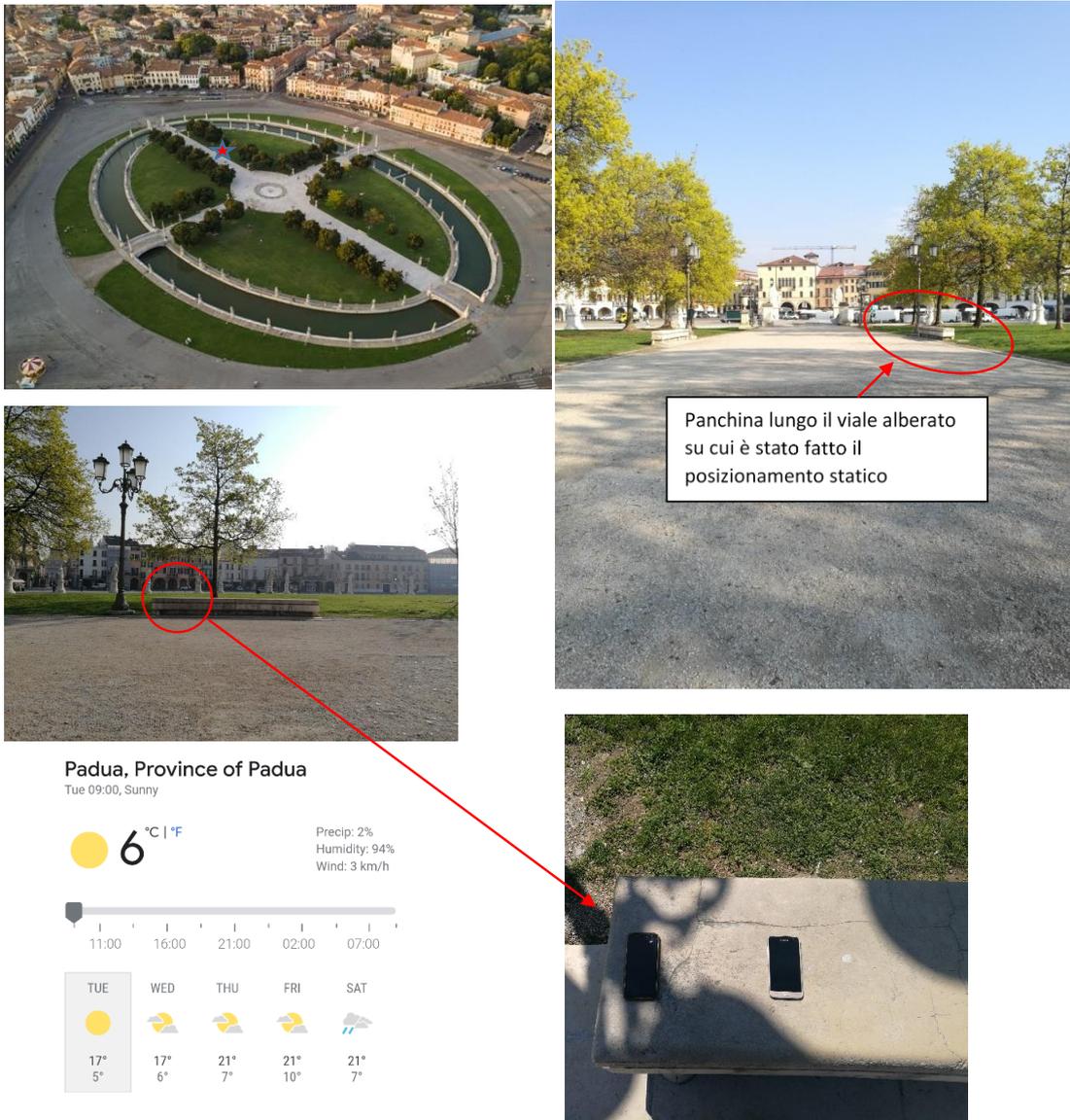


Figura 96: Rilievo statico effettuato stazionando su panchina del viale alberato di Prato della Valle (Padova)

Per entrambi i casi studio non è necessario avere punti di riferimento sul campo né tanto meno avere le coordinate precise del punto di stazionamento poiché lo scopo della tesi non è valutare l'accuratezza della posizione (di fatto non si hanno le coordinate precise dei punti di stazionamento, ottenibili solo con un ricevitore geodetico professionale) ma quello che interessa far notare, ovvero l'obiettivo della tesi, è verificare la precisione delle coordinate ottenute dallo smartphone. Il parametro scientifico che definisce la precisione delle soluzioni ottenute ovvero la precisione delle coordinate stimate dall'elaborazione dei dati rilevati durante il posizionamento statico è la deviazione standard ( $\sigma$ ) (in inglese STANDARD DEVIATION), detto anche *scarto quadratico medio*, la quale indica la dispersione delle soluzioni attorno al valore medio delle soluzioni.

Si ricorda infatti che per dispersione della stima di una coordinata  $x$  su  $n$  epoche, si intende lo scarto quadratico medio:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{x_i - E(x_i)\}^2}{N}}$$

dove  $x_i$  è la stima all'epoca  $i$  e  $E(x_i)$  indica la media delle stime  $x_i$  calcolate sulle  $N$  epoche.

#### Measures of Variation: Comparing Standard Deviations

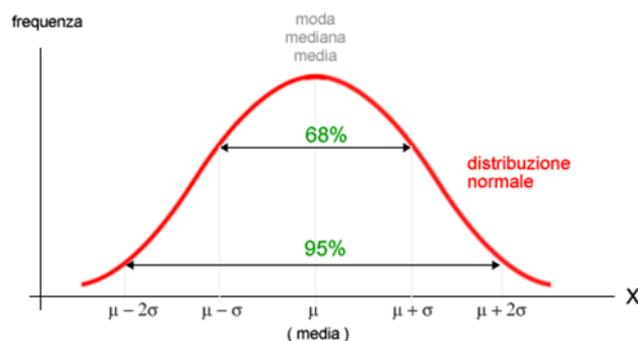
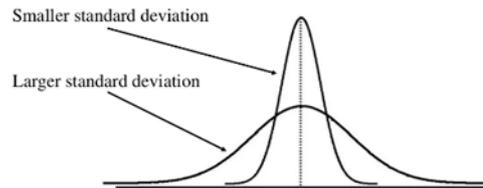


Figura 97: in alto due popolazioni di soluzioni a distribuzione normale con deviazione standard differente. Alla curva più ampia corrisponde una deviazione standard ( $\sigma$ ) maggiore che significa maggiore dispersione delle soluzioni rispetto al valor medio ovvero soluzioni molto diverse tra loro quindi poca precisione; alla curva più stretta corrisponde una deviazione standard ( $\sigma$ ) minore ossia minore dispersione delle soluzioni rispetto al valore medio e quindi soluzioni più precise. In basso la proprietà della deviazione standard: in una distribuzione normale della popolazione il 68% degli elementi è compreso nell'intervallo  $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$  in cui  $\mu =$  valore medio della distribuzione e  $\sigma =$  deviazione standard; la percentuale degli elementi diventa il 95% se si prende in considerazione il doppio della deviazione standard  $(\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma)$  e sale al 99% se si considera il triplo  $(\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma)$  e così via.

Si processeranno i dati impostando il software RTKLIB in modo che ci dia una soluzione al secondo così da valutare la nuvola di punti delle coordinate stimate (un trio di coordinate al secondo appunto) e definirne la standard deviation che è il parametro che permette di capire la dispersione di questa nuvola di soluzioni, ovvero la precisione della soluzione offerta da ciascun smartphone.

E quindi si procederà a delle comparazioni tra le varie campagne di misura per valutare la differenza di soluzioni tra un rilievo al mattino e un rilievo in serata. Si è scelto di effettuare la campagna di misura sia al mattino che alla sera e vederne la differenza poiché i ritardi indotti da ionizzazione dell'atmosfera sono più alti nelle ore diurne e massimi verso mezzogiorno mentre nelle ore serali l'effetto ionizzante si attenua. Inoltre è interessante capire il numero di satelliti visibili tra mattina e sera sempre sulla stessa area, la disposizione geometrica di tali satelliti (indici DOP) e verificare come varia la qualità delle soluzioni tra il mattino e la sera.

I rilievi appena citati sono stati effettuati contemporaneamente con i due smartphone SAMSUNG GALAXY J6 e HUAWEI P9EVA-L09 e sono stati ripetuti sia durante una giornata di sole, quindi cielo terso, e sia durante una giornata nuvolosa, quindi cielo coperto, per verificare se varia la intersvisibilità satellitare e le interferenze elettromagnetiche che potrebbero influire sul rapporto segnale rumore e per verificare se il risultato dell'analisi è influenzato da percentuali di umidità differenti ovvero verificare se una maggiore umidità, tipica delle giornate uggiose, comporti maggiori errori troposferici (la troposfera è influenzata sia dai parametri atmosferici che dall'angolo di elevazione del satellite).

I valori della standard deviation vengono automaticamente calcolati dal software di elaborazione dati RTKLIB.

Entrambi i ricevitori sono a ricezione di singola fase ( $L_1$ ) e a ricezione di codice e ricevono i segnali da multi-costellazione, infatti ricevono da GPS, GLONASS e BeiDou (vedere fig.75 e 76 pag.124).

Vedremo però che il processamento dei dati, per ottenere le soluzioni di posizionamento, sarà basato solo sulla costellazione GPS, poiché la stazione permanente utilizzata come base (stazione permanente di Padova) ha dati rinex di navigazione solo GPS per cui è possibile valutare la posizione dei satelliti di solo tale costellazione.

## 9.2 ANALISI DATI

Si analizzano innanzitutto i dati di osservazione rilevati dallo smartphone Samsung J6 e verranno visualizzate le soluzioni ottenute nelle varie campagne di misura. Successivamente si analizzano i dati ed i risultati ottenuti con lo smartphone Huawei P9 EVA-L09 nelle stesse campagne di misura.

Per l'analisi delle osservabili e delle soluzioni si usa il software **RTKLIB versione 2.4.3 b33**.

Rtklib non è un software ma una suite di software ovvero una collezione di software sviluppati dallo stesso produttore. In genere una suite di software è composta da programmi informatici che rispondono a esigenze diverse. L'interfaccia grafica contenente tutti i software (o tools) è RTKLAUNCH. Da qui si possono lanciare tutte i singoli tools.

Per la tesi sono stati utilizzati essenzialmente 2 tools:

- **RTKPLOT** per una visualizzazione grafica: ci permette di visualizzare graficamente sia i dati di pre-processamento (si possono analizzare i file rinex di osservazione e di navigazione contenenti i dati grezzi delle misure di codice e di fase, il numero di satelliti, le posizione dei satelliti, gli indici DOP e i rapporti segnale-rumore) e sia i risultati del post processamento;
- **RTKPOST** per l'elaborazione dati in post-processamento: esso è il tool che processa i dati, esegui i calcoli e fornisce le soluzioni in un file di testo (contenente le stime della posizione rilevata, ossia le coordinate) che poi saranno graficamente visibili su Rtkplot. In particolare Rtkpost viene impostato per fornire una soluzione al secondo in modo da poter trarre conclusioni sulla precisione del posizionamento e la qualità del ricevitore.

Il software restituisce una soluzione al secondo, riferito all'ora di rilievo statico effettuato e compatibilmente ai periodi temporali con presenza di un numero di satelliti sufficienti per la stima della posizione. Dalla "popolazione" di soluzioni ottenute e relative ad un'unica campagna, il software stesso calcola la deviazione standard  $\sigma$ .

Esiste anche l'opzione di avere un'unica soluzione della posizione ovvero tre uniche coordinate (X, Y, Z oppure latitudine, longitudine e quota), le quali in realtà rappresentano la media delle soluzioni avute ogni secondo ma, per quanto definito nella sezione precedente, non interessa avere l'unicità della soluzione ma piuttosto la popolazione delle soluzioni per definirne la standard deviation ossia la precisione delle soluzioni di output. Ricordo che possiamo solo verificare la precisione delle soluzioni e non l'accuratezza della stima della soluzione (vedere paragrafo "i servizi di augmentation", sezione "precisione e accuratezza" pag. 55) poiché non si possiede la posizione esatta del punto stimata con ricevitore professionale. Quindi non è interessante stabilire tre univoche coordinate.

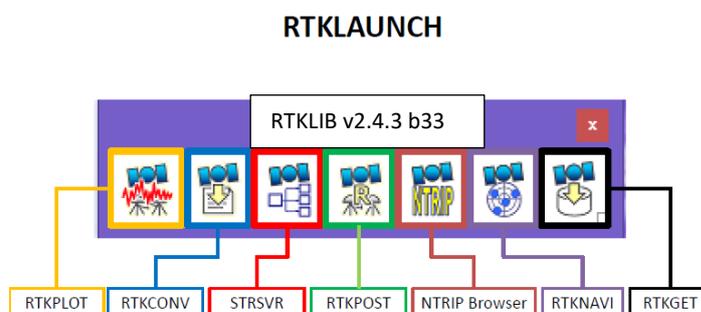


Figura 98: interfaccia di RTKLIB, versione 2.4.3 b33

## 9.2.1 ANALISI SAMSUNG GALAXY J6

### 9.2.1.1 CASO STUDIO 1: CAMPAGNA DI MISURA 1

Ricevitore posizionato su panchina, in centro Prato della Valle, frontale alla fontana

DATA: 2 aprile 2022.

CONDIZIONE METEOROLOGICA: nuvoloso.

Ora del posizionamento: Mattino ore 11:35 CEST (ora legale italiana) → 9:35 tempo UTC

Durata del posizionamento statico: 1 ora.



Figura 99: meteo del 2 aprile 2022 raffigurante la giornata nuvolosa; sito della campagna di misura 1 con varie foto scattata nei pressi della fontana di Prato della Valle con cielo coperto (meteo nuvoloso) e i due ricevitori smartphone, Samsung J6 e Huawei P9, in fase di rilievo statico effettuato contemporaneamente.

### Analisi delle osservabili con RTKPLOT

RICEVITORE SAMSUNG: si analizzano i satelliti acquisiti, l'indice PDOP ed il rapporto segnale rumore (SNR).

#### Satelliti acquisiti

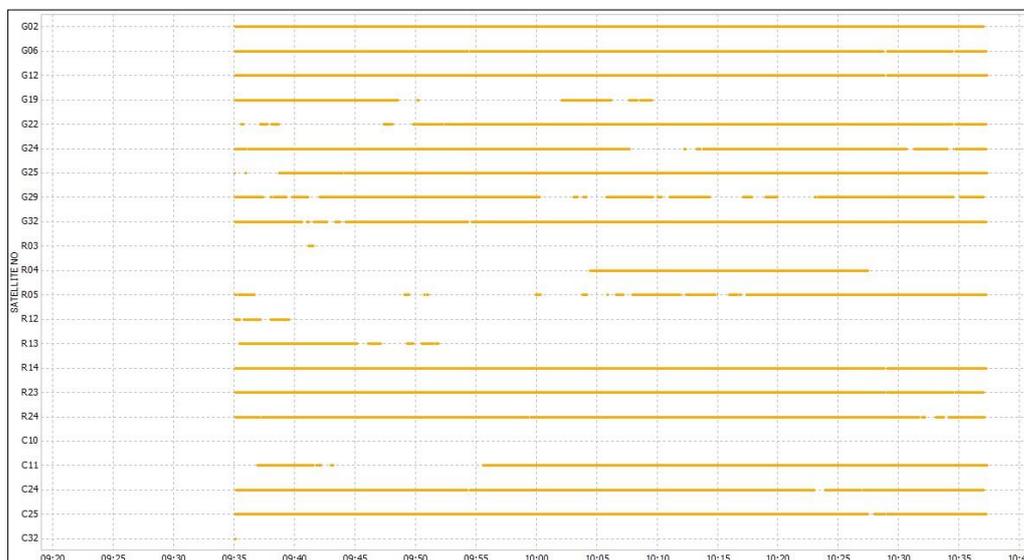


Figura 100: tutti i satelliti multicosstellazione acquisiti dal ricevitore Samsung J6 nell'ora di rilievo della campagna 1

Da figura 100 in ascissa si vede l'orario UTC di rilievo (dalle 9:35 alle 10:37 circa) mentre sulle ordinate si hanno i satelliti acquisiti: la lettera G indica satellite GPS, R il Glonass e C il BeiDou mentre il numero accanto identifica il numero del satellite acquisito. Si hanno 22 satelliti acquisiti di cui 9 GPS, 8 GLONASS e 5 BeiDou.

Da porre attenzione su un particolare interessante: il file rinex di osservabili dei ricevitori smartphones, sia Samsung che Huawei, contengono i dati grezzi multi-costellazione ma il file di navigazione della stazione permanente di Padova risulta essere unicamente un file con estensione .n ossia contenente solo le effemeridi dei satelliti GPS. Per cui il software RTKLIB, nel processamento dei dati, impostando dalle opzioni "modalità di posizionamento relativo", potrà stimare solo le posizioni dei satelliti GPS e dunque le soluzioni di output del programma saranno basate solo sui dati dei satelliti GPS (in accordo alla (7) pag. 59).

Quindi per questo ha senso visualizzare solo i satelliti GPS poiché il posizionamento relativo potrà essere fatto solo con tali satelliti perché solo di essi sono note le effemeridi (contenute nel messaggio di navigazione).

Dal ricevitore dello smartphone sono acquisiti 9 satelliti Gps, come illustrato in figura 100. Si nota che il satellite **G19** ha problemi nell'essere ricevuto, il **G22** inizialmente ha problemi di ricezione e inizia ad esser ben acquisito dalle 9:50, il **G29** risulta essere "saltellante" e come si vede dall'immagine ha problemi di visibilità con il ricevitore dalle 10 alle 10:05 e dalle 10:15 alle 10:20.

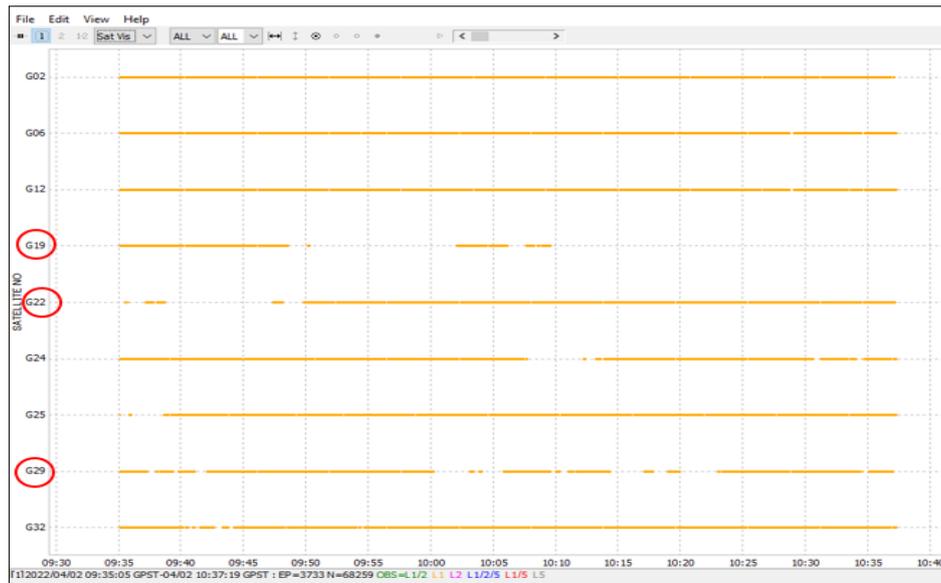


Figura 101: satelliti GPS acquisiti dal ricevitore Samsung J6 nell'ora di rilievo della campagna 1; il satellite G19 manifesta problemi nell'acquisizione per una buona parte del tempo mentre i satelliti G22 e G29 presentano qualche problema in alcune zone orarie

Nell'immagine successiva si legge chiaramente la numerosità dei satelliti: nella figura 102 si riportano tutti i satelliti multi-costellazione; nella figura 103 solo i satelliti GPS. Per le successive campagne si riporteranno solo i dati relativi al GPS per quanto scritto poc' anzi.

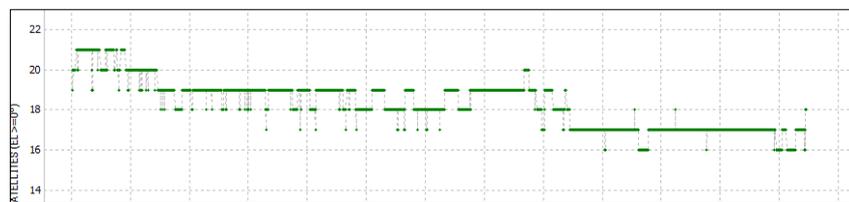


Figura 102: Numero di satelliti totali multi-costellazione acquisiti nel corso dell'ora di rilievo

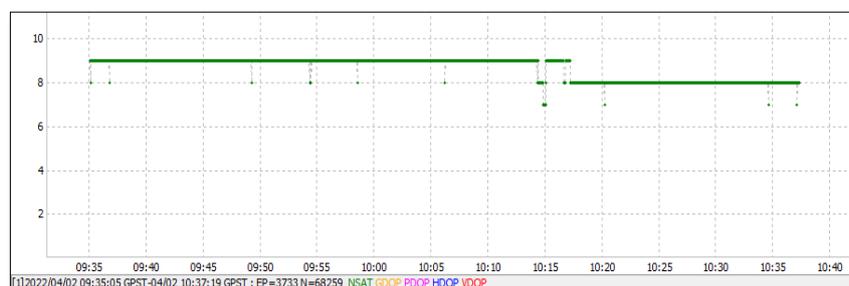


Figura 103: Numero di satelliti GPS acquisiti nel corso dell'ora

Si nota come siano mediamente 19 i satelliti totali multi-costellazione acquisiti nel rilievo della campagna 1 e diventano 17 verso la fine della campagna. Relativamente alla sola costellazione GPS (figura 103) si hanno 9 satelliti acquisiti dal ricevitore per il 66% del tempo mentre dalle 10:17 in poi risultano acquisiti solo 8 satelliti (il G19 non è più acquisito) (8 satelliti per il 33% del tempo).

### Indice PDOP

Gli indici PDOP rappresentano un indicatore della bontà della configurazione geometrica satellitare. Sono consigliati valori di PDOP  $< 3$  anche se per una lunga acquisizione possono essere tollerati valori anche superiori per brevi intervalli di tempo.

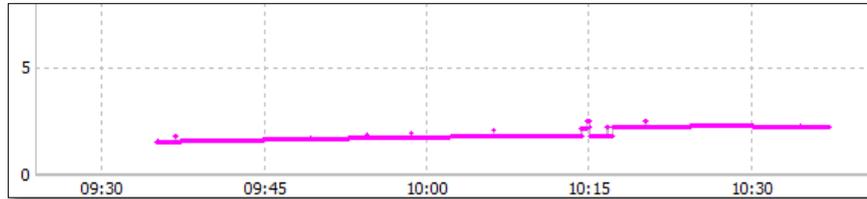


Figura 104: Indice PDOP

Dalla teoria sono consigliati valori di PDOP  $< 3$  ed effettivamente gli indici PDOP risultano tali per tutto il tempo di acquisizione. Il valore medio è  $PDOP_{medio} = 1,9$ .

Da notare che alle discontinuità presenti nel grafico PDOP corrispondono discontinuità anche nella numerosità di satelliti visibili (si veda figura 103) ed in particolare la scomparsa/comparsa di un satellite genera una ridisposizione geometrica satellitare che quindi impatta sull'indice GDOP.

### SNR

Il rapporto segnale/rumore (SNR) ci offre un'indicazione sulla qualità del segnale elettromagnetico ricevuto ossia quanto tale segnale risulti essere potente e pulito in funzione dei disturbi da cui può essere affetto (tecnicamente detti rumori che appartengono agli errori accidentali) che inficiano la qualità e la potenza del segnale stesso. Valori di SNR alti significa potenza del segnale buona rispetto a rumori disturbanti, mentre SNR bassi significa predominanza dei disturbi. Un buon livello di SNR è  $\geq 30$  dBHz. Generalmente bassi valori di SNR possono essere dovuti a ricevitori di bassa qualità a causa dei rumori indotti dalla elettronica del ricevitore stesso e dai ritardi hardware oppure possono essere provocati da interferenze elettromagnetiche (tempeste magnetiche o interferenze con altri segnali radio che possono coprire in frequenza il segnale satellitare provocando un aumento del rumore e dunque una diminuzione della potenza di segnale satellitare e nel caso più sfavorevole anche una sua perdita).

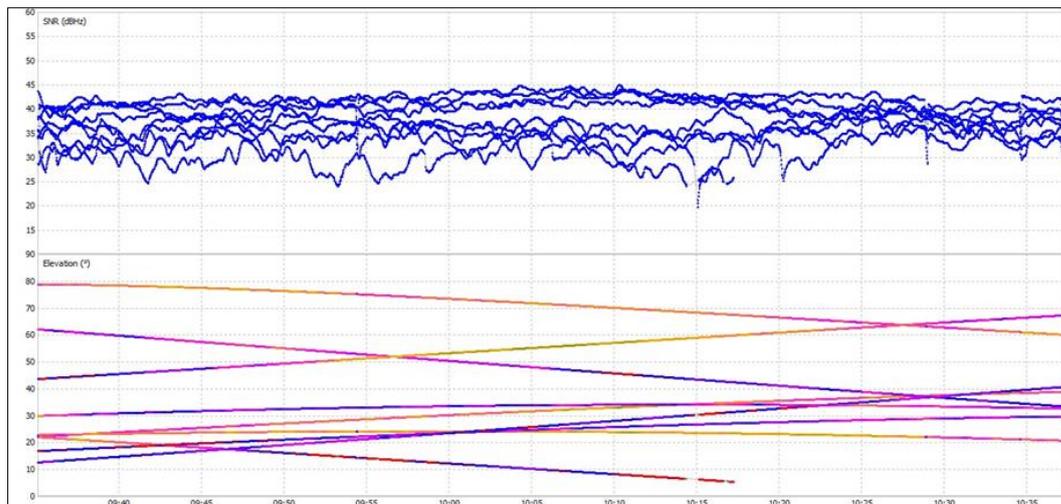


Figura 105: in alto in blu il grafico SNR di tutti i satelliti GPS acquisiti; in basso le elevazioni dei vari satelliti

Si nota come il rapporto segnale/rumore per il ricevitore Samsung J6 sia mediamente 35 dBHz tranne per qualche satellite. Per avere una migliore lettura si deve visualizzare il SNR satellite per satellite. Quello che si nota è che i satelliti che hanno una intervisibilità scarsa in determinate fasce temporali o comunque discontinua (figura 101) hanno anche SNR in calo (figura 106 e 107 rispettivamente per i satelliti G22 e G19) a cui spesso è collegata una diminuzione di elevazione del satellite, specialmente se inferiore ai  $15^\circ$  sull'orizzontale; infatti nel momento in cui un satellite tende a sorgere o tramontare diminuisce la sua inclinazione e questo comporta un maggior percorso del segnale satellitare e quindi maggiore spazio di attraversamento della troposfera e ionosfera che provoca un incremento degli errori, maggiori disturbi e rifrazioni del segnale. Il SNR per G22 è rappresentato nella figura seguente e si nota che ad inizio campagna le elevazioni basse comportano SNR minori rispetto a fine campagna a cui corrispondono elevazioni maggiori e quindi SNR migliori (più alti)

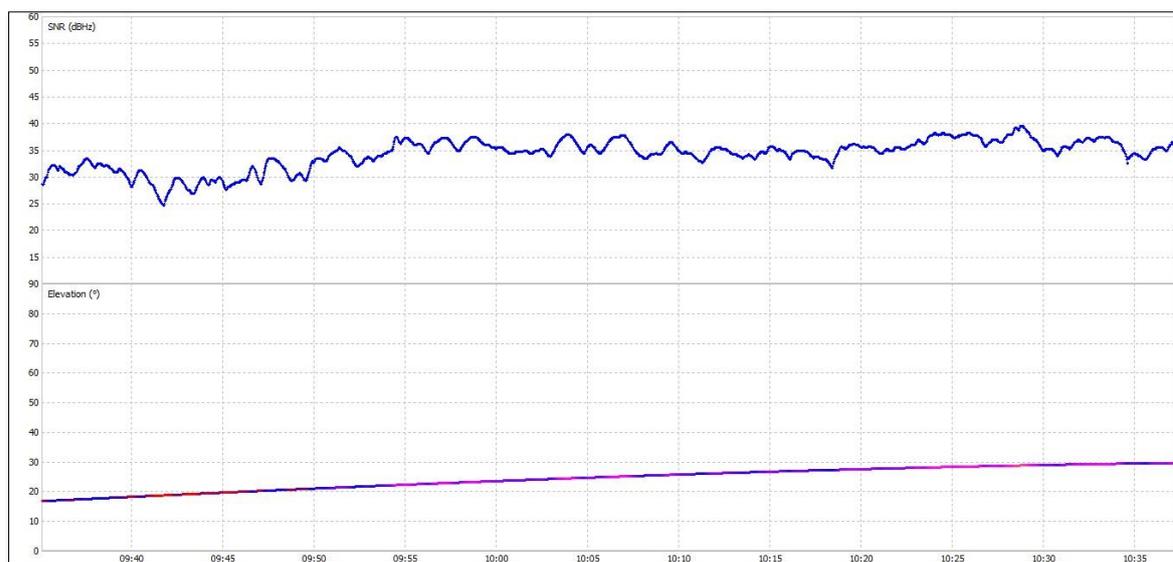


Figura 106: SNR del satellite **G22**; si nota che un aumento di elevazione del satellite migliora il rapporto segnale rumore (SNR parte da un 28dBHz a inizio campagna e termina a circa 37 dBHz).

Si visualizza ora il SNR del satellite G19 che risultava quello con i maggiori problemi nella intervisibilità satellitare e infatti anche il SNR risulta in decadimento, al di sotto dei 35 dBHz.

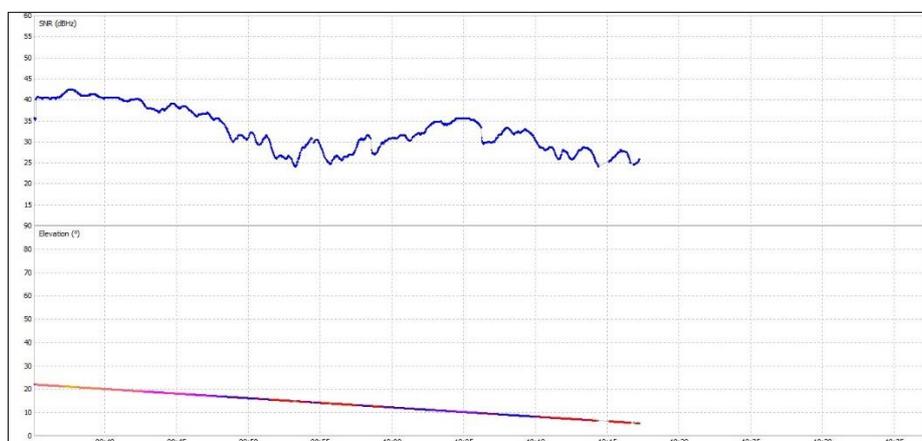


Figura 107: SNR del satellite **G19**; si nota che ad una diminuzione di elevazione del satellite corrisponde un peggioramento del rapporto segnale rumore.

Il satellite **G29** aveva delle discontinuità nelle zone centrali del rilievo e di fatti nel diagramma SNR corrisponde un decadimento come si vede dalla figura successiva cerchiata di rosso:

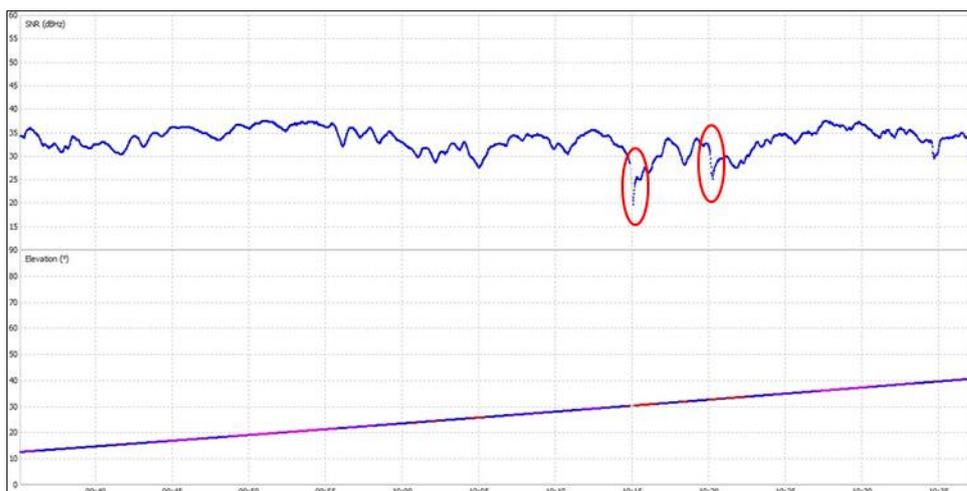


Figura 108: Satellite G29 che presenta dei disturbi di rumore localizzati intorno le 10:15 e 10:20, cerchiati in rosso

Si analizza ora il file rinex di osservazione della **stazione permanente di Padova** relativo allo stesso giorno e alla fascia oraria 9:00-11:00 UTC così da poterlo confrontare con le osservabili del ricevitore Samsung e trarre le opportune conclusioni. Anche in questo caso si è selezionata solo la costellazione GPS perché le soluzioni di rtkpost faranno fede solo a tale costellazione.

#### Numero satelliti GPS acquisiti da stazione permanente di Padova

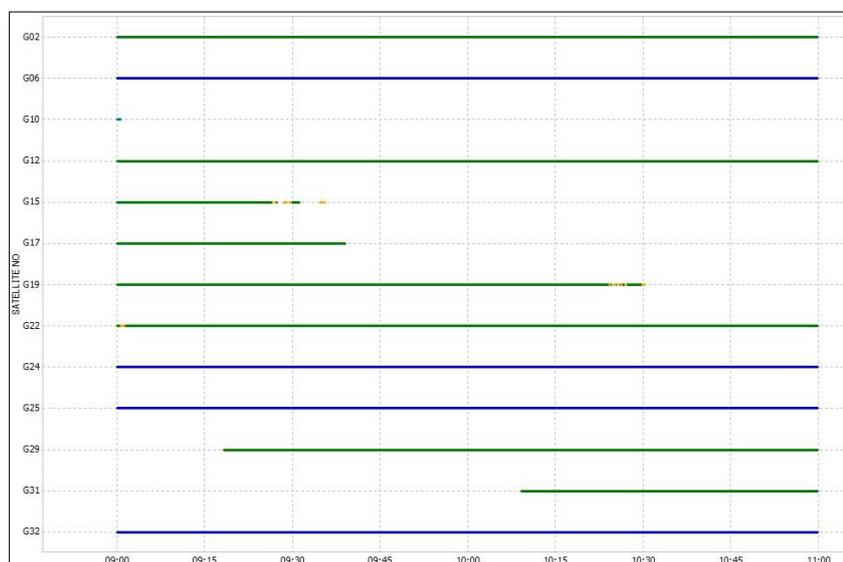


Figura 109: Satelliti GPS visibili dalla stazione permanente dalle 9:00 alle 11:00 UTC

Tra i satelliti GPS acquisiti dalla stazione permanente di Padova si ritrovano ovviamente quelli rilevati dallo smartphone Samsung J6 ovvero i satelliti G2, G6, G12, G19, G22, G24, G25, G29 e G32 ed in più vi è il satellite G10, il G15, il G17 e il G31 non pervenuti dall'analisi dei dati smartphone perché i primi 3 sono osservabili dalle 9 alle 9:30 UTC quindi al di fuori dell'orario di rilievo 9:35-10:35, mentre il G31 non è stato rilevato dallo smartphone probabilmente per un segnale

troppo debole. Si allega l'immagine della numerosità dei satelliti GPS acquisiti dalla stazione permanente.

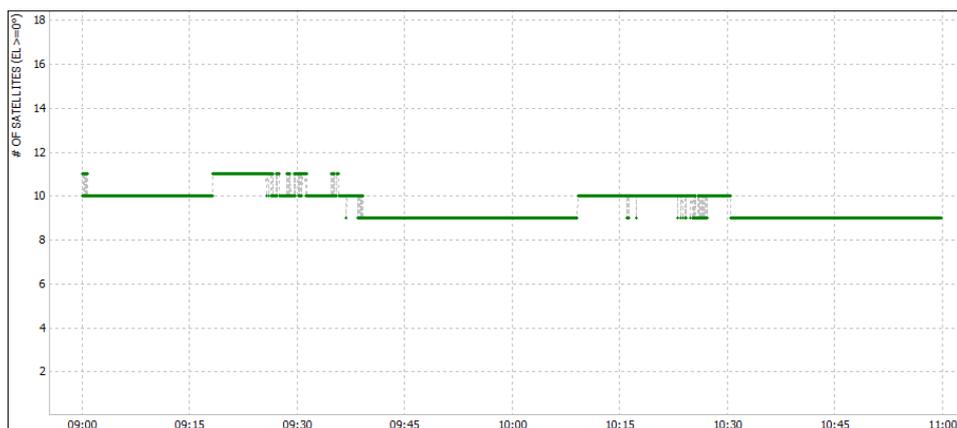


Figura 110: Numero di satelliti acquisiti dalla stazione permanente di Padova dalle 9:00 alle 11:00 UTC

Si hanno 9 satelliti GPS per il 50,8% del tempo, 10 satelliti GPS per il 39,5% e 11 satelliti GPS per il 9,7% del tempo. Paragonato con la figura 103 in cui si avevano 9 satelliti GPS per il 66% del tempo e 8 satelliti GPS per la restante parte, dunque non vi è tanta differenza in termini di numerosità di satelliti acquisiti GPS tra stazione permanente e ricevitore Samsung J6.

#### Indice PDOP stazione permanente di Padova

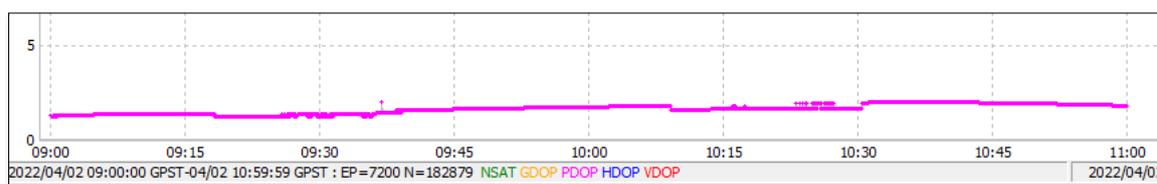


Figura 111: Indice PDOP ottenuti inserendo in RTKPLOT i file rinex della stazione permanente di Padova

I PDOP risultano  $< 3$  per tutto il tempo di acquisizione:  $PDOP_{medio} = 1,7$ .

Confrontato con il valore di PDOP del Samsung J6 ( $PDOP_{medio} = 1,9$ ) non si notano sostanziali differenze poiché osservano gli stessi satelliti, nella medesima fascia oraria e i satelliti mantengono la stessa configurazione geometrica.

Il fatto che il  $PDOP_{STAZ.PERM} < PDOP_{SMARTPHONE}$  è dovuto al fatto che gli indici DOP, valutando la visibilità e la posizione dei satelliti rispetto alla posizione del ricevitore, per essere calcolati necessitano delle coordinate note dei satelliti ad una certa ora definite in un sistema di riferimento locale (East, North, Up) il quale è centrato nella posizione del ricevitore a terra (posizione ECEF; se non nota si imposta la posizione approssimata  $X_0, Y_0, Z_0$ ), per poi definirne la matrice di varianza-covarianza delle coordinate locali del satellite: la traccia di tale matrice è proporzionale al volume del tetraedro generato dalla configurazione geometrica dei satelliti (si veda pagina 113) e da cui poi si ottengono le formule per i vari indici DOP. Dunque essendo le coordinate del punto di stazione della stazione permanente sicuramente molto più precise rispetto alle coordinate approssimate del ricevitore smartphone, in automatico gli indici DOP valutati con la stazione permanente sono migliori (ossia più piccoli)  $\rightarrow PDOP = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2 + \sigma_u^2}$ .

### SNR da stazione permanente di Padova

Quello che immediatamente salta all'occhio è il valore dei rapporti segnale/rumore (SNR) mediamente elevato: con la stazione permanente il segnale è decisamente migliore, più potente, più "pulito" poiché vi sono meno rumorosità e/o disturbi dovuti alla elettronica interna del ricevitore geodetico professionale di alta qualità della stazione permanente: la media dei SNR per la stazione permanente è  $\geq 45$  dBHz contro i 35 dBHz del ricevitore Samsung J6. Essendo un ricevitore multifrequenza e multicotellazione riesce a stimare anche l'errore multipath (da notare la media dei multipath su un periodo di rilievo medio-lungo tende ad essere zero perché ha comportamento periodico, con periodo di circa 20 minuti quindi con almeno 20 minuti di campagna di misura il multipath diventa un errore accidentale, ossia a media zero).

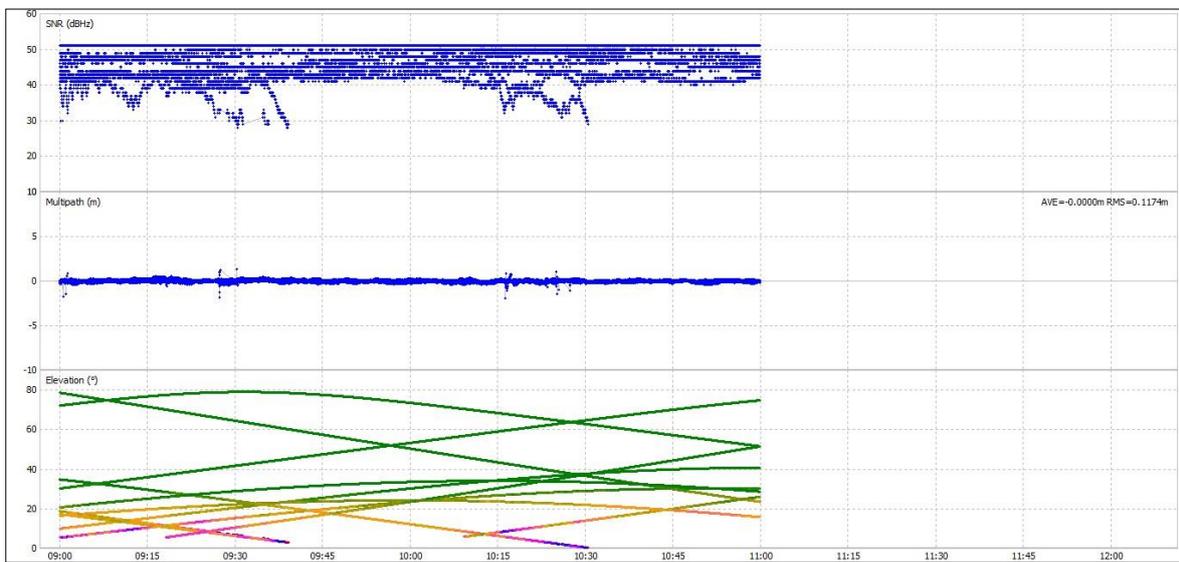


Figura 111: Rapporto segnale rumore, multipath ed elevazione dei satelliti osservati dalla stazione permanente di Padova

## Processamento con RTKPOST

Si utilizza il tool RTKPOST del software Rtklib per effettuare l'elaborazione dati in post-processamento ed ottenere la stima di una soluzione o meglio di una famiglia di soluzioni dato che si imposta il software in modo da fornire una soluzione per ogni secondo della campagna di rilievo. Ottenuto il risultato del processamento, verrà visualizzato graficamente su RTKPLOT, che è un altro tool di Rtklib, per ricavare informazioni statistiche utili tra cui la standard deviation ( $\sigma$ ) che è il parametro fondamentale che indica la qualità del risultato ottenuto in termini di dispersione della "nuvola" di soluzioni ottenute: minore è la dispersione e migliore è la precisione delle soluzioni ottenute.

Oltre alla standard deviation, altri parametri importanti da ricercare sono la percentuale di soluzioni con ambiguità fissata ad intero (% FIX) e la percentuale di soluzioni con ambiguità non fissata ad intero (% FLOAT).

Le modalità per il fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase sono:

- **"FIX and HOLD"**: il software una volta che fissa ad intero l'ambiguità di fase la mantiene per le successive epoche
- **"CONTINUOS"**: il software epoca per epoca si richiede l'ambiguità e la ricontrolla.

Si processerà con entrambe le modalità per valutare eventuali differenze. Da sottolineare che col settaggio "FIXandHOLD" e "Continuos" il software genererà alcune soluzioni ad ambiguità effettivamente fissata (soluzioni fix) mentre altre soluzioni, per le quali non riesce a fissare l'ambiguità di fase, saranno valutate con ambiguità in virgola mobile (soluzioni float).

Poi si ripeterà il processamento impostando dalle opzioni il non fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase ottenendo così soluzioni **100% FLOAT**: in tale caso le soluzioni saranno tutte esclusivamente calcolate con ambiguità in virgola mobile e per ogni campagna di misura si paragoneranno i risultati ottenuti con i risultati delle soluzioni ad ambiguità fissata.

Sebbene dall'analisi preliminare effettuata con RTKPLOT risultasse che il satellite G19 avesse poca visibilità ed un rapporto segnale-rumore non buono, non viene manualmente escluso dall'analisi poiché impostando, dalle opzioni del software, un filtro SNR, esso automaticamente esclude i segnali che hanno un valore SNR minore di una certa soglia (soglia che viene stabilita dall'operatore). Ad esempio con la dicitura "SNR 30" si intende  $SNR \geq 30dBHz$  in cui  $30 dBHz$  rappresenta la soglia minima di rapporto segnale/rumore accettato.

Un altro parametro che viene chiesto dalle opzioni del software RTKPOST è l'angolo di *cut-off* ossia l'angolo minimo di elevazione satellitare da considerare: una bassa elevazione crea maggiori errori. Indicativamente si parte con un angolo di cut-off di  $15^\circ$ .

Siccome nelle opzioni di RTKPLOT spetta all'utente decidere quale valore soglia di SNR e di angolo di cut-off impostare, si è proceduto per tentativi e per ogni soluzione si sono valutati i risultati scegliendo quelli che avessero la standard deviation migliore.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase "FIXandHOLD"

Iniziamo con il processamento dati impostando l'opzione di modalità di fissaggio dell'ambiguità di tipo "FIXandHOLD" ed un primo tentativo di combinazione SNR + cut off di questo tipo:  $SNR \geq 30$  e angolo di elevazione minimo  $15^\circ$ . Il File della soluzione è riconoscibile dalla estensione ".pos"; di seguito un estratto del suo contenuto.

9. OBIETTIVO DELLA TESI; CASO STUDIO 1: CAMPAGNA DI MISURA 1; SAMSUNG GALAXY J6

```

# program : RTKPOST ver.2.4.3 b33
% Inp file : C:\Users\ROBERTO\Desktop\test\document1\Final1\test\cell samsung\RTX_STREAM\panchina fontana\2aprile2022_MNOLOGO_ora 11.3447_CEST\MORE_0851*
% Inp file : C:\Users\ROBERTO\Desktop\test\document1\Final1\test\dati stazione permanente padova\panchina fontana\2 aprile nuvoloso\rtx osservazione
% obs start : 2022/04/02 09:34:00.0 UTC
% obs end : 2022/04/02 10:37:01.0 UTC (week2203 55639.0s)
% pos mode : static
% freq : 141.2415
% solution : combined
% elev mask : 15.0 deg
% dynamics : off
% tidecorr : off
% lonp opt : broadcast
% tropo opt : saastammin
% ephemeris : broadcast
% navl sys : gps glonass galileo beidou
% amb res : fix and hold
% amb glo : on
% val thres : 3.0
% antenna1 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% antenna2 : ( 0.0000 0.0000 0.0000)
% ref pos : 45.41151125 11.896058115 64.6648
%
% (latitude,height,sdms84,ellipsoid,0=fix,2=float,3=sbas,4=gps,5=single,6=gpp,ms=# of satellites)
% UTC latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ms sdu(m) sde(m) sdu(m) sdu(m) sdu(m) sdu(m) sdu(m) age(s) ratio
2022/04/02 09:34:47.000 45.39811458 11.87682774 111.0512 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:34:48.000 45.398114043 11.87682500 111.0563 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:34:49.000 45.39811394 11.87682249 111.0937 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:34:50.000 45.398113215 11.87682216 111.0669 1 4 0.0017 0.0012 0.0011 0.0014 -0.0006 -0.0009 0.00 1.7
2022/04/02 09:34:51.000 45.39811788 11.87682407 111.0871 1 4 0.0017 0.0012 0.0011 0.0014 -0.0006 -0.0009 0.00 17.9
2022/04/02 09:34:52.000 45.39811930 11.87682283 111.0982 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.2
2022/04/02 09:34:53.000 45.39811815 11.87682215 111.0956 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.5
2022/04/02 09:34:54.000 45.39811894 11.87682116 111.1220 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:34:55.000 45.39811856 11.87682028 111.1365 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:34:56.000 45.39812482 11.87682173 111.2487 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.5
2022/04/02 09:34:57.000 45.39811683 11.87681762 111.1787 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:34:58.000 45.39811193 11.87682168 111.2001 1 4 0.0018 0.0012 0.0011 0.0014 -0.0007 -0.0009 0.00 4.5
2022/04/02 09:34:59.000 45.39811378 11.87681997 111.2072 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:00.000 45.39811537 11.87681541 111.2039 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.2
2022/04/02 09:35:01.000 45.39811383 11.87681314 111.2424 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 2.5
2022/04/02 09:35:02.000 45.39811362 11.87681400 111.2255 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:03.000 45.39811335 11.87681299 111.2407 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.2
2022/04/02 09:35:04.000 45.39811382 11.87681078 111.2698 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:35:05.000 45.39811268 11.87681116 111.2772 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:06.000 45.39811109 11.87680945 111.2881 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:35:07.000 45.39811302 11.87680812 111.3007 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.2
2022/04/02 09:35:08.000 45.39811254 11.87680776 111.3113 1 4 0.0018 0.0012 0.0011 0.0014 -0.0007 -0.0010 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:09.000 45.39812241 11.876807649 111.3441 1 4 0.0018 0.0012 0.0011 0.0014 -0.0007 -0.0010 0.00 1.7
2022/04/02 09:35:10.000 45.398112706 11.876808069 111.3267 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:35:11.000 45.398112596 11.87680816 111.3275 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:12.000 45.398112413 11.876808395 111.3666 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 2.3
2022/04/02 09:35:13.000 45.398112410 11.876808163 111.3786 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.5
2022/04/02 09:35:14.000 45.398112228 11.876807958 111.4466 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:15.000 45.398112161 11.876807931 111.4172 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 2.3
2022/04/02 09:35:16.000 45.398111954 11.876807927 111.4453 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:35:17.000 45.398111817 11.876807950 111.4544 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.2
2022/04/02 09:35:18.000 45.398111748 11.876807925 111.4530 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:35:19.000 45.398111689 11.876807976 111.4484 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:35:20.000 45.398111622 11.876807942 111.4375 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.8
2022/04/02 09:35:21.000 45.398111606 11.876807943 111.4417 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:22.000 45.398111654 11.876807932 111.4352 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:23.000 45.398111535 11.876807974 111.4359 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 2.2
2022/04/02 09:35:24.000 45.398111495 11.876807928 111.4458 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:25.000 45.398111359 11.876807918 111.4382 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:26.000 45.398111131 11.876807907 111.4712 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.2
2022/04/02 09:35:27.000 45.398110971 11.876807937 111.4978 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:35:28.000 45.398110854 11.876807908 111.5382 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:35:29.000 45.398110748 11.876807862 111.5724 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.6
2022/04/02 09:35:30.000 45.398110623 11.876807872 111.5511 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:35:31.000 45.398110610 11.876807817 111.5924 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:32.000 45.398110591 11.876807872 111.6144 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:33.000 45.398110545 11.876807850 111.7037 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 21.6
2022/04/02 09:35:34.000 45.398110490 11.876807874 111.6889 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.5
2022/04/02 09:35:35.000 45.398109943 11.876807855 111.7160 1 5 0.0019 0.0012 0.0012 0.0014 -0.0007 -0.0011 0.00 8.0
2022/04/02 09:35:36.000 45.398109718 11.876807856 111.7176 1 5 0.0019 0.0012 0.0012 0.0014 -0.0007 -0.0011 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:37.000 45.398110585 11.876807907 111.5756 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.5
2022/04/02 09:35:38.000 45.398110516 11.876807897 111.5848 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.6
2022/04/02 09:35:39.000 45.398110377 11.876807863 111.5285 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:35:40.000 45.398110291 11.876807837 111.6415 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.2
2022/04/02 09:35:41.000 45.398110258 11.876807828 111.6580 2 7 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:35:42.000 45.398110063 11.876807749 111.5978 1 4 0.0019 0.0012 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0011 0.00 6.1
2022/04/02 09:35:43.000 45.398110265 11.876807756 111.6236 1 4 0.0019 0.0012 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0011 0.00 3.5
2022/04/02 09:35:44.000 45.398109927 11.876807820 111.6420 1 4 0.0020 0.0012 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0011 0.00 4.1
2022/04/02 09:35:45.000 45.398110111 11.876807808 111.6333 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:35:46.000 45.397727313 11.876121303 -21.6486 1 6 0.0015 0.0012 0.0012 0.0010 0.0011 0.0013 0.00 3.0
2022/04/02 09:35:47.000 45.398110124 11.876807844 111.6560 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.7
2022/04/02 09:35:48.000 45.398110071 11.876121303 -21.6486 1 6 0.0015 0.0012 0.0012 0.0010 0.0011 0.0013 0.00 3.1
2022/04/02 09:35:49.000 45.398109982 11.876807836 111.8612 1 4 0.0020 0.0013 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0012 0.00 4.9
2022/04/02 09:35:50.000 45.398110419 11.876807991 111.6461 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:35:51.000 45.398110414 11.876807925 111.6080 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 2.1
2022/04/02 09:35:52.000 45.398110402 11.876807211 111.6524 1 4 0.0020 0.0013 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0012 0.00 3.5
2022/04/02 09:35:53.000 45.398109923 11.876807981 111.9051 1 4 0.0020 0.0013 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0012 0.00 3.5
2022/04/02 09:35:54.000 45.398109713 11.876807853 111.7892 1 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:55.000 45.398110650 11.876807476 111.6724 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:35:56.000 45.398109326 11.876807929 111.8965 1 4 0.0020 0.0013 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0012 0.00 4.0
2022/04/02 09:35:57.000 45.398109277 11.876807717 111.6287 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.4
2022/04/02 09:35:58.000 45.398109279 11.876838565 154.4915 1 6 0.0014 0.0011 0.0019 0.0009 0.0010 0.0012 0.00 3.8
2022/04/02 09:35:59.000 45.398110703 11.876807613 111.7652 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:36:00.000 45.398110623 11.876807609 111.7892 1 4 0.0019 0.0012 0.0012 0.0015 -0.0008 -0.0011 0.00 6.1
2022/04/02 09:36:01.000 45.398110461 11.876807634 111.8258 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:36:02.000 45.398110303 11.876807630 111.8380 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:36:03.000 45.398110162 11.876807690 111.8753 1 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:36:04.000 45.399498368 217.3421 1 6 0.0013 0.0011 0.0019 0.0009 0.0010 0.0011 0.00 6.3
2022/04/02 09:36:05.000 45.398109899 11.876807579 111.9504 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.0
2022/04/02 09:36:06.000 45.398109755 11.876807598 111.9935 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.6
2022/04/02 09:36:07.000 45.398109746 11.8768074847 112.0469 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 2.0
2022/04/02 09:36:08.000 45.398108861 11.876807426 112.1255 1 4 0.0021 0.0013 0.0013 0.0016 -0.0009 -0.0013 0.00 7.1
2022/04/02 09:36:09.000 45.398109215 11.87652125 125.1216 1 6 0.0009 0.0007 0.0008 0.0006 0.0007 0.0008 0.00 7.5
2022/04/02 09:36:10.000 45.398776023 11.876521585 125.7018 1 6 0.0009 0.0007 0.0008 0.0006 0.0007 0.0008 0.00 3.1
2022/04/02 09:36:11.000 45.398108468 11.876807406 112.2490 1 4 0.0021 0.0013 0.0013 0.0016 -0.0009 -0.0013 0.00 3.0
2022/04/02 09:36:12.000 45.398776272 120.3087 1 6 0.0009 0.0007 0.0008 0.0006 0.0007 0.0008 0.00 3.1
2022/04/02 09:36:13.000 45.398109498 11.876807281 112.2723 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:36:14.000 45.398109556 11.876807241 112.3220 2 6 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:36:15.000 45.398776214 112.3795 1 4 0.0022 0.0013 0.0013 0.0016 -0.0009 -0.0013 0.00 3.4
2022/04/02 09:36:16.000 45.398108412 11.87642822 120.8058 1 4 0.0009 0.0006 0.0006 0.0003 0.0003 0.0004 0.00 4.4
2022/04/02 09:36:17.000 45.398108032 11.8768071905 112.6159 1 4 0.0022 0.0013 0.0013 0.0016 -0.0009 -0.0014 0.00 11.3
2022/04/02 09:36:18.000 45.398108032 11.8768071905 112.6159 1 4 0.0022 0.0013 0.0013 0.0016 -0.0009 -0.0014 0.00 11.3
2022/04/02 09:36:19.000 45.398109417 11.876809119 112.5985 2 5 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.3
2022/04/02 09:36:20.000 45.399602580 11.876316869 210.5810 1 5 0.0015 0.0009 0.0017 0.0008 0.0009 0.0008 0.00 3.1
2022/04/02 09:36:21.000 45.398109220 11.876808075 112.6881 2 5 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.7
2022/04/02 09:36:22.000 45.398109461 11.876807817 112.6987 2 5 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.1
2022/04/02 09:36:23.000 45.398109418 11.876807817 112.7272 2 5 0.0033 0.0033 0.0054 -0.0018 0.0021 -0.0035 0.00 1.7

```

Figura 112: Soluzioni in formato testo ottenute da RTKPLOT relative a SNR 30 +cut off 15°. Si ha una soluzione per ogni secondo. In questo figura si hanno soluzioni fino alle 10:37 (per ragioni di spazio l'immagine riporta solo i dati dei primi 2minuti)

Come si vede dalla figura 112, il file ha una prima parte (intestazione) in cui si riassumono le impostazioni dei parametri stabiliti e una seconda parte contenente la successione delle soluzioni. Se tale file viene caricato su RTKPLOT si ha la visualizzazione grafica che immediatamente, oltre a fornire un impatto visivo sulla qualità dei risultati, offre anche i valori di standard deviation scritti a lato (figura 113 cerchiati in rosso) relativi alla totalità delle soluzioni. Nella immagine successiva vi è un estratto di RTKPLOT: sono rappresentate tutte le soluzioni della modalità FIXandHOLD di cui i punti verde rappresentano le soluzioni FIX mentre i punti gialli rappresentano le soluzioni FLOAT; questo perché il software, sebbene cerchi di fissare ad intero le ambiguità, solo di alcune soluzioni riesce a fissarle mentre di altre non riesce, fornendo la soluzione con ambiguità in virgola mobile (soluzione float).

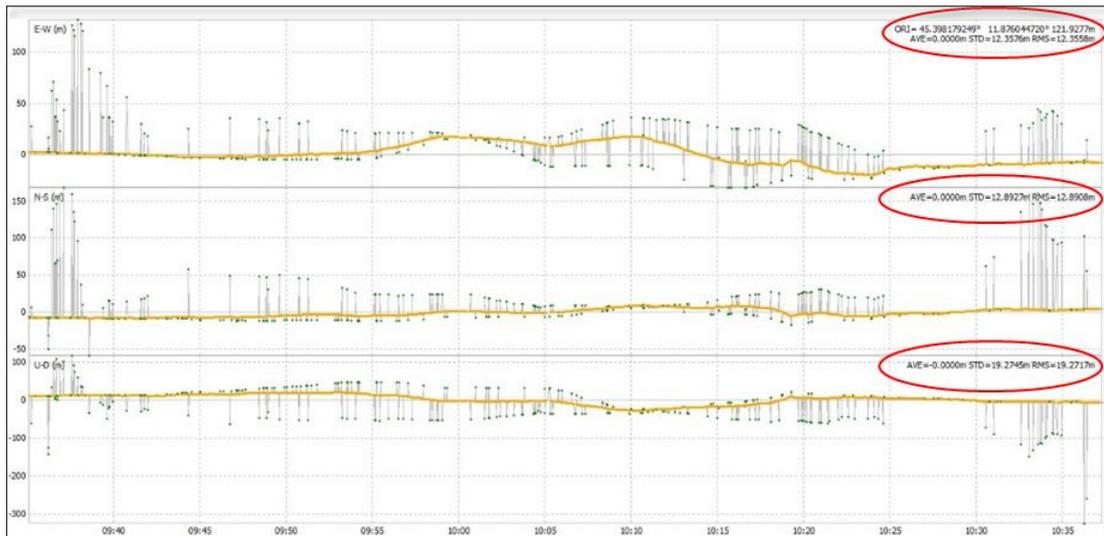


Figura 113: Soluzione grafica visualizzata su RTKPLOT (settaggio SNR30 e cut-off 15°); cerchiare in rosso le standard deviation per le direzioni East-West, North-South e Up-Down

Si è ripetuto tale procedura per diverse combinazioni di SNR e Cut-off (angolo di elevazione) e confrontando la qualità delle soluzioni, sulla base della standard deviation, si è scelta quella con standard deviation minore. Di seguito un riepilogo rapido dei processamenti effettuati con diverse combinazioni.

Combinazione 1 = Segnale-rumore 30 + angolo di elevazione min 15° (è quella appena analizzata)

Combinazione 2 = Segnale-rumore 30 + angolo di elevazione min 10°

Combinazione 3 = Segnale-rumore 35 + angolo di elevazione min 15°

Combinazione 4 = Segnale-rumore 35 + angolo di elevazione min 10°

A PARI CUTOFF: tra la combinazione 1 e la 3 risulta migliore la 1 mentre tra la combinazione 2 e la 4 risulta migliore la 2. Infine tra la combinazione 1 e 2 risulta migliore la 2, evidenziata appositamente.

La scelta è stata effettuata grazie al fatto che il software dà la possibilità di sovrapporre graficamente due soluzioni diverse per compararle e leggerne i valori statistici di media (AVE=average), standard deviation (STD) e media quadratica (RMS=root mean square), scritti al lato e cerchiati in rosso nella figura 114 e 115. In questo caso si sono sovrapposte SNR30+cutoff10° e SNR 35 + cutoff 15°.

Dalla figura 114 risulta che per la campagna di misura 1, effettuata in data 2 /04/2022, le soluzioni di posizionamento relative alla direzione Est-Ovest, per due combinazioni di “SNR+cutoff” hanno come standard deviation ( $\sigma$ ) i seguenti valori:

SNR 30 + cutoff 10°  $\rightarrow \sigma = 11.1692$  m;

SNR 30 + cutoff 15°  $\rightarrow \sigma = 12.3576$  m

In realtà la differenza tra le deviazioni standard delle varie combinazioni è piccola in relazione alla qualità del ricevitore smartphone, quindi per le successive campagne di misura, si è scelto di processarle utilizzando unicamente la combinazione “SNR 30 + angolo di elevazione 10°” evitando di ripetere la comparazione delle varie combinazioni.



Figura 114: sovrapposizione di 2 soluzioni, relative alla direzione E-W, ossia soluzione SNR 30+cutoff10° e SNR30 + cut off 15°. Valori statistici delle 2 soluzioni nell'area cerchiata in rosso (rispettivamente 2° e 3° rigo)

Di seguito i grafici rappresentativi delle soluzioni di posizionamento nelle direzione Nord-Sud e Up-Down (quota).

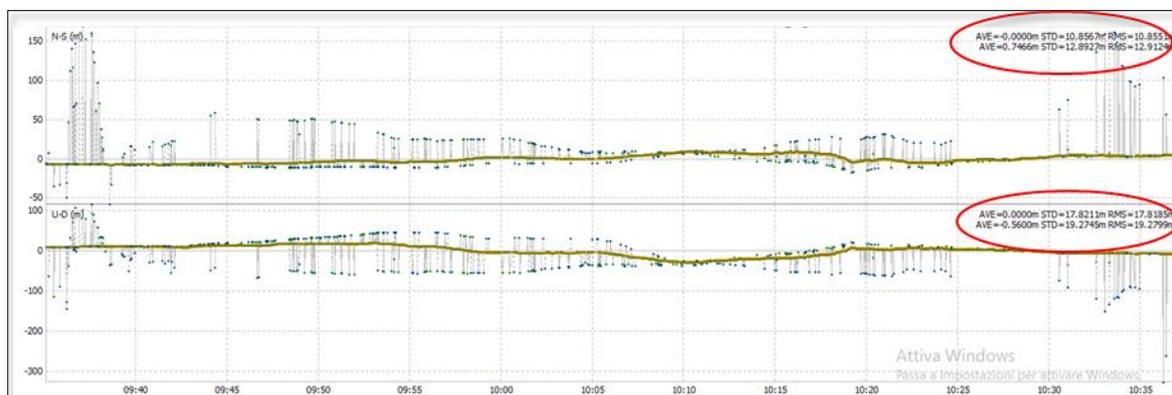


Figura 115: Soluzioni sovrapposte relativo a SNR 30+cutoff10° e soluzione SNR30 + cut off 15° in direzione N-S e U-D

Come si nota dai grafici, le differenze sono impercettibili graficamente. Per cui la scelta della combinazione migliore si basa sui valori di standard deviation osservati che si riportano nella tabella seguente:

Tabella 15: Standard deviation in direzione E-W, N-S e U-D per le due soluzioni analizzate

	Est-Ovest	Nord-Sud	Up-Down
SNR30+cutoff 10°	11.1692 m	10.8567m	17.8211m
SNR30+cutoff 15°	12.3576 m	12.8927m	19.2745m

I valori di standard deviation minori (e dunque le migliori precisioni) si hanno con la combinazione **SNR30 ed il cut-off 10°**. Da qui deriva la scelta di analizzare solo tale combinazione per tutte le restanti campagne di misura.

Relativamente alla soluzione SNR30 + cutoff 10°, si riportano ora i valori delle percentuali di soluzioni ottenute con ambiguità fissate ad intero (%FIX ed indicate dal software con la lettera Q1, graficamente rappresentate in verde) e i valori delle percentuali di soluzioni ottenute con ambiguità non fissate ad intero (%FLOAT ed indicate dal software con la lettera Q2, graficamente rappresentate in giallo), entrambe valutate con modalità di fissaggio FIXandHOLD.

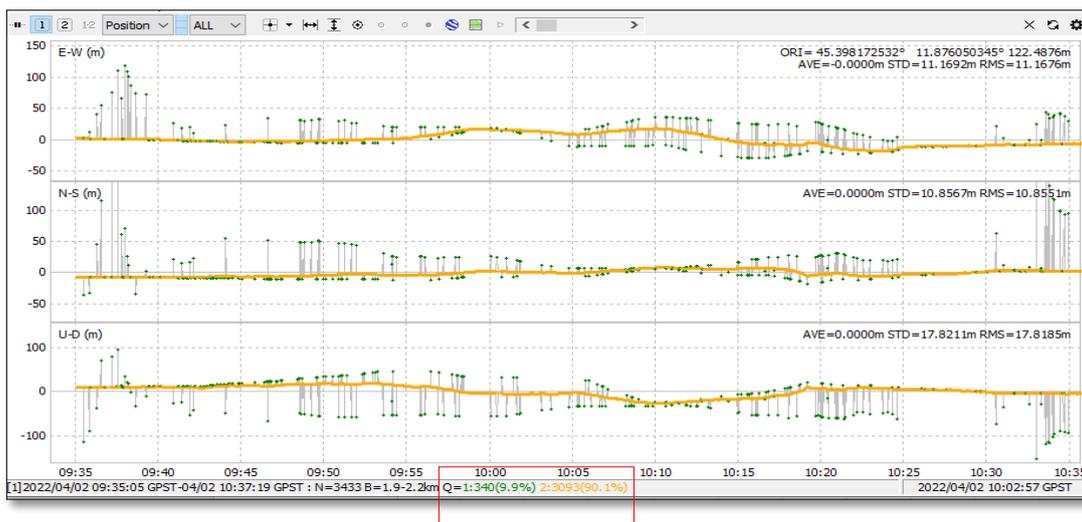


Figura 116: Diagramma della posizione stimata relativamente alle direzioni Est-Ovest, Nord-Sud e Up-Down. Nel riquadro rosso le percentuali di soluzioni totali FIX (verdi) e FLOAT (gialle).

Dal riquadro rosso di figura 116 si legge:

- $Q1 = 9,9\%$  rappresenta la % FIX ossia la percentuale di soluzioni stimate con ambiguità fissata ad intero  $\rightarrow$  solo il 9,9% della nuvola di soluzioni è stata stimata fissando ad intero l'ambiguità di fase, visibili in verde nel diagramma di posizionamento;
- $Q2 = 90,1\%$  rappresenta la % FLOAT ossia la percentuale di soluzioni stimate con ambiguità non fissata ad intero  $\rightarrow$  il 90,1% della nuvola di soluzioni è stata stimata non fissando ad intero l'ambiguità di fase.

Graficamente si nota come le soluzioni float (gialle) siano molto più numerose, stabili e regolari mentre le soluzioni fix (verdi) risultino essere discontinue e saltellanti con punti molto distanti dalla media rappresentata dalla linea dello zero (anche oltre 100 m).

La vista planimetrica potrebbe aiutare a capire il concetto.

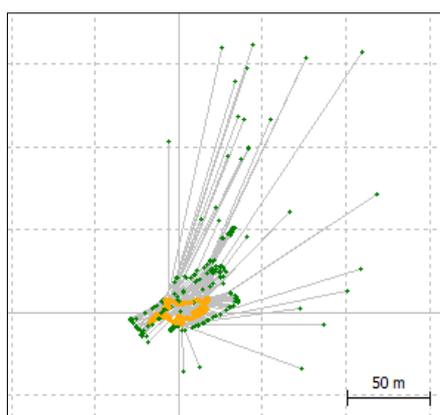


Figura 117: Vista planimetrica della nuvola di soluzioni. Da notare come le soluzioni FIX (verdi) siano molto più disperse rispetto alle soluzioni FLOAT (gialle); queste ultime risultano più concentrate attorno al punto centrale. La dimensione del quadrato (50 m) rende l'idea della dispersione delle soluzioni FIX

Il parametro “valore medio (AVE)” che si legge nei plot della soluzione non viene preso in considerazione perché rappresenta una media delle soluzioni stimate dal software e non ha nessuna

importanza particolare se non essere un riferimento rispetto cui si valuta la dispersione delle soluzioni; infatti non avendo rilevato la posizione esatta e precisa del punto di stazionamento tramite un ricevitore geodetico professionale, non possiamo sapere se la media dei punti stimati dal software (che si basa sul ricevitore dello smartphone) coincida con la media dei punti valutata da un ricevitore professionale o tale da osservarne le differenze, in altre parole non si può eseguire una valutazione dell'accuratezza. Quindi quello che può solo interessare è la standard deviation, che è un indicatore della precisione delle soluzioni ottenute.

Nella seguente tabella si riassumono le standard deviation e la percentuale delle soluzioni FIX e FLOAT ottenuta con modalità di fissaggio dell'ambiguità "FIXandHOLD"

Tabella 16: risultati ottenuti, in termini di standard deviation, per la campagna di misura 1, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 2/04/2022, meteo nuvoloso, mattino; modo FIXandHOLD

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: FIXandHOLD		
$\sigma$	E-W	N-S	U-D
	11.1692 m	10.8567m	17.8211m
%FIX	9,9%		
%FLOAT	90,1%		

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase "CONTINUOS"

Si riesegue l'analisi della campagna di misura 1 settando nelle opzioni di RTKPOST modalità "CONTINUOS" come modalità di fissaggio dell'ambiguità di fase ossia le ambiguità sono stimate e risolte ad intero continuamente, cioè l'algoritmo calcola le ambiguità dell'epoca precedente e le ristima continuamente come fosse un aggiornamento continuo.

Il software in modalità Continuos restituisce risultati identici al FIXandHOLD.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase "OFF"

Dalle analisi precedenti è risultato che la "nuvola" di soluzioni ottenute è influenzata negativamente dalle soluzioni FIX: esse infatti, pur essendo in piccola percentuale, tendono ad essere molto dispersive e di conseguenza tendono ad incrementare la standard deviation della nuvola di soluzioni. Per verificare quanto appena descritto, si esegue ora un processamento della medesima campagna di misura impostando nelle opzioni che non venga fissata alcuna ambiguità di fase, ossia modalità OFF. Ciò corrisponde ad avere soluzioni 100% FLOAT ossia con ambiguità in virgola mobile

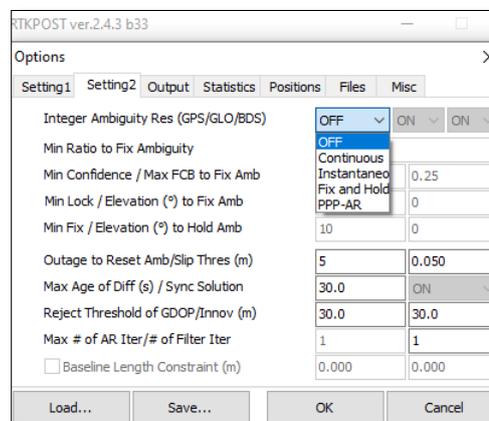


Figura 118: Impostare dalle opzioni il non fissaggio dell'ambiguità di fase selezionando OFF dal menù a tendina

Si è ottenuta la seguente soluzione planimetrica, visualizzata graficamente grazie a RTKPLOT:

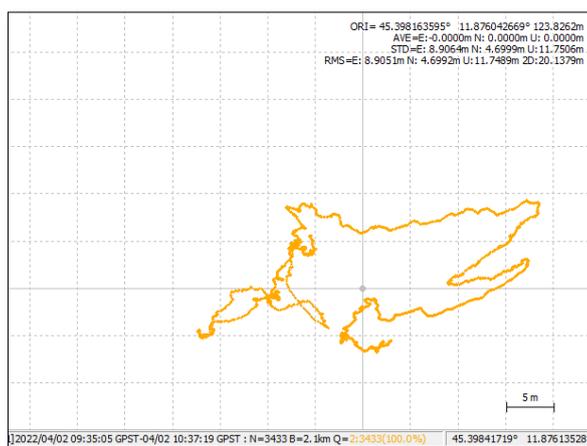


Figura 119: risultato planimetrico (dall'alto) del posizionamento con ambiguità float 100%

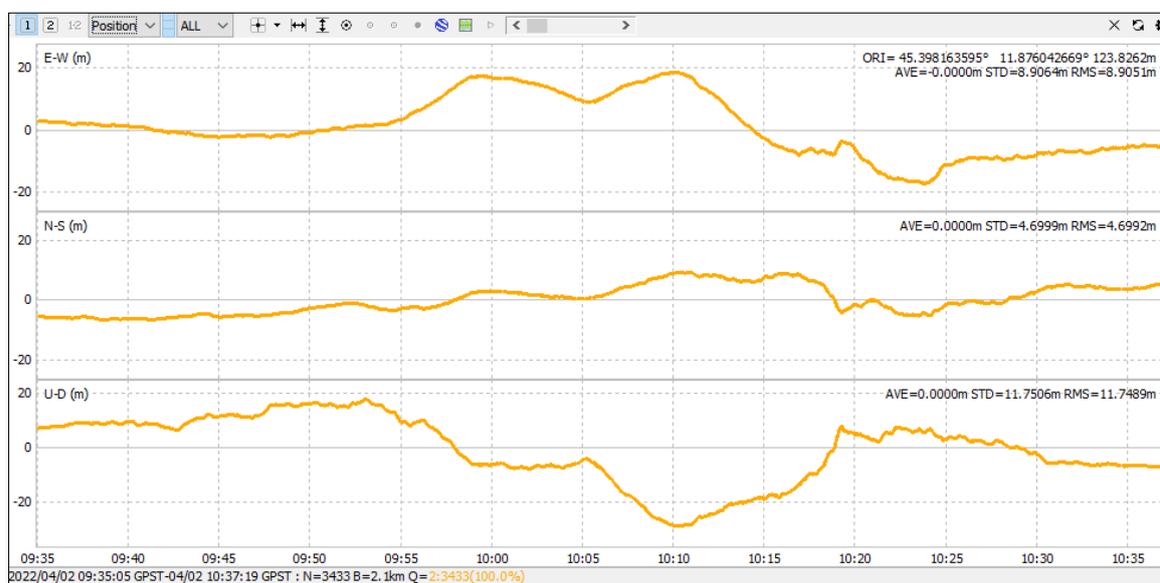


Figura 120: Andamento delle soluzioni in modalità 100% FLOAT

Da notare in figura 119 come il quadratino dello spazio rappresentativo sia ora di soli 5 metri e non 50m: sta a significare che la nuvola di soluzioni è molto più ristretta, quindi migliore precisione nella stima delle soluzioni e perciò ci aspettiamo valori di standard deviation sicuramente migliori.

I valori di standard deviation in questo caso sono riportati nella tabella 17.

Tabella 17: risultati ottenuti, in termini di standard deviation, per la campagna di misura 1, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 2/04/2022, meteo nuvoloso, mattino; modo OFF

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: <b>OFF</b>		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	8,9064 m	4,6999 m	11,7506 m
%FIX	0%		
%FLOAT	100%		

Paragonando i valori della tabella 17 con quelli della tabella 16 si conclude che **la soluzione FLOAT 100% risulta migliore** della soluzione con fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase. Il confronto è riportato in tabella 18.

Tabella 18: Confronto tra le standard deviation ottenute con modalità di fissaggio ambiguità di fase OFF e FIXandHOLD, per la campagna di misura 1

Modalità Fissaggio ambiguità	$\sigma$		
	E-W	N-S	U-D
<b>OFF</b>	8,9064 m	4,6999 m	11,7506 m
<b>FIXandHOLD</b>	11.1692 m	10.8567m	17.8211m

Questo è dovuto al fatto che il ricevitore dello smartphone è di scarsa qualità, se paragonato ad un ricevitore professionale e la qualità del segnale a sua volta risulta bassa e per ciò il software ha difficoltà a risolvere e fissare ad intero l'ambiguità di fase ma poiché dalle opzioni si è vincolato il software ad avere soluzioni fix, l'algoritmo cerca di fissarle in ogni modo anche se effettivamente non riesce a trovarle e quindi impone dei falsi fissaggi ad intero ossia **falsi FIX** a cui corrispondono soluzioni casuali, scollegate e discontinue, molto distanti dalla media delle soluzioni float, come se fossero delle soluzioni outlier. Inoltre con le ambiguità così trovate, l'algoritmo non riesce a mantenerle fisse nelle varie epoche di misura perché l'algoritmo stesso le reputa non affidabili e quindi ne ricalcola altre totalmente differenti e scollegate dalle precedenti (tutto a causa della scarsa qualità del segnale) provocando soluzioni totalmente diverse le une dalle altre tra le varie epoche che generano quei continui salti nel diagramma di posizionamento (figura 116 e 117, punti verdi) e che aumentano la dispersione della totalità delle soluzioni e di conseguenza la standard deviation risulta maggiore.

Paradossalmente dai grafici si nota che le soluzioni float (punti gialli dei grafici) risultano molto più regolari ed è dovuto al fatto che l'algoritmo non essendo obbligato a fissare ad intero un'ambiguità, è libero di calcolare solo le ambiguità float, senza forzature, cercando di convergere in automatico verso una soluzione corretta e ragionevole ed ecco quindi il perché la sequenza di soluzioni float sono una prossima all'altra.

Processare i dati in modalità 100% FLOAT permette quindi di escludere tutte le soluzioni "false fix" che provocano solo un incremento della dispersione delle soluzioni e di fatti in tal modo si hanno soluzioni più convergenti, con valori di standard deviation minori e quindi precisione delle soluzioni più alta.

**CONCLUSIONE: Con ricevitori di bassa qualità si consiglia di processare in modo 100% FLOAT** poiché permette di avere soluzioni più precise.

### 9.2.1.2 CASO STUDIO 1: CAMPAGNA DI MISURA 2

Si procede ora con la campagna di misura 2: stessa postazione della campagna di misura 1, ossia la panchina frontale alla fontana centrale di Piazza Prato della Valle, solo che il rilievo è stato effettuato di sera. Si procederà più speditivamente rispetto alla campagna di misura 1 poiché le spiegazioni della procedura da effettuare restano le medesime e sono state ampiamente trattate nella sezione precedente.

Ricevitore posizionato su panchina, in centro Prato della Valle, frontale alla fontana.

DATA: 2 aprile 2022.

CONDIZIONE METEREOLÓGICA: nuvoloso.

Ora del posizionamento: Sera ore 20:36 CEST (ora legale italiana) → 18:36 tempo UTC

Durata del posizionamento statico: 1 ora.



Figura 121: Rilievo in serata con ricevitori posti su panchina frontale alla fontana di Prato della Valle; condizione metereologica nuvoloso.

#### Analisi delle osservabili con RTKPLOT

Come già detto in campagna di misura 1, siccome dal sito della regione Veneto, scaricando il file rinex dei dati di navigazione della stazione permanente di Padova, si nota che vi è solo un file con estensione “.n”, significa che si avranno soluzioni relative alla sola costellazione GPS. Dunque è interessante osservare solo i satelliti GPS.

In riferimento al ricevitore Samsung J6, si analizzano i satelliti GPS acquisiti, l'indice PDOP ed il rapporto segnale rumore (SNR).

#### Satelliti acquisiti

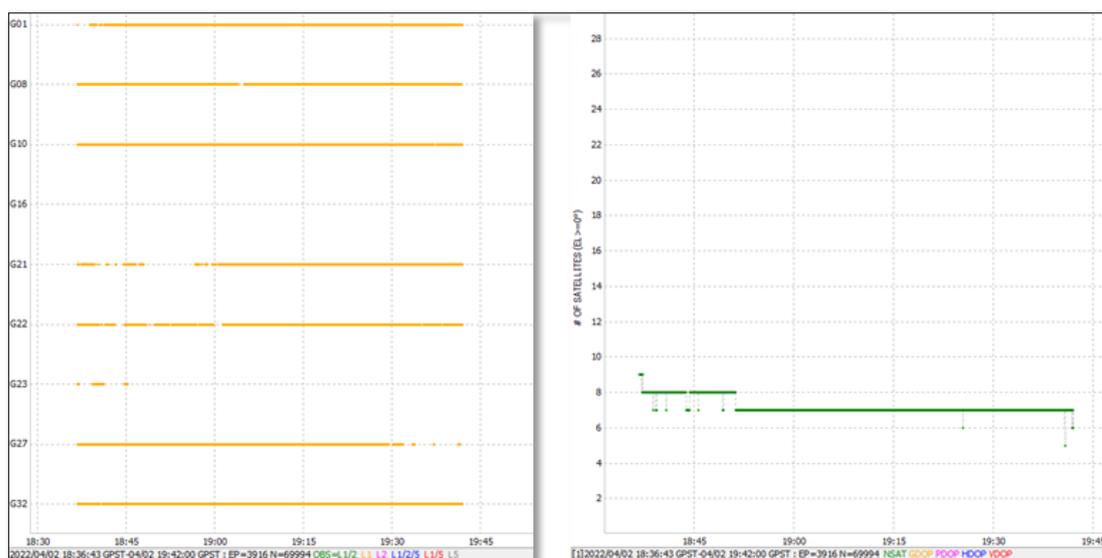


Figura 122: Satelliti GPS (a sinistra) e numerosità satelliti GPS (a destra) acquisiti dal ricevitore Samsung J6

Il ricevitore dello smartphone Samsung J6 ha acquisito da 8 a 7 satelliti GPS nell'ora della campagna di misura. Il satellite G23 dopo le 18:45 UTC non viene più rilevato. Numero di satelliti GPS simile al caso del mattino che oscillava da 9 ad 8 satelliti.

Il satellite G16 appare nella figura 122 ma la sua durata è di pochi minuti quindi non è tenuto in conto nella numerosità dei satelliti.

### Indice PDOP

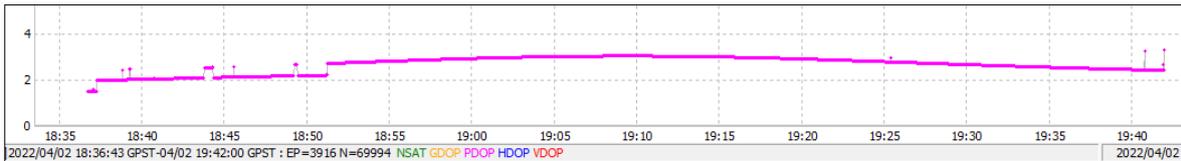


Figura 123: Indice PDOP

I PDOP risultano  $< 3$  per tutto il tempo di acquisizione:  $PDOP_{medio} = 2,7$ .

Rispetto al valore del mattino ( $PDOP_{medio} = 1,9$ ) la configurazione geometrica satellitare è peggiorata.

### SNR

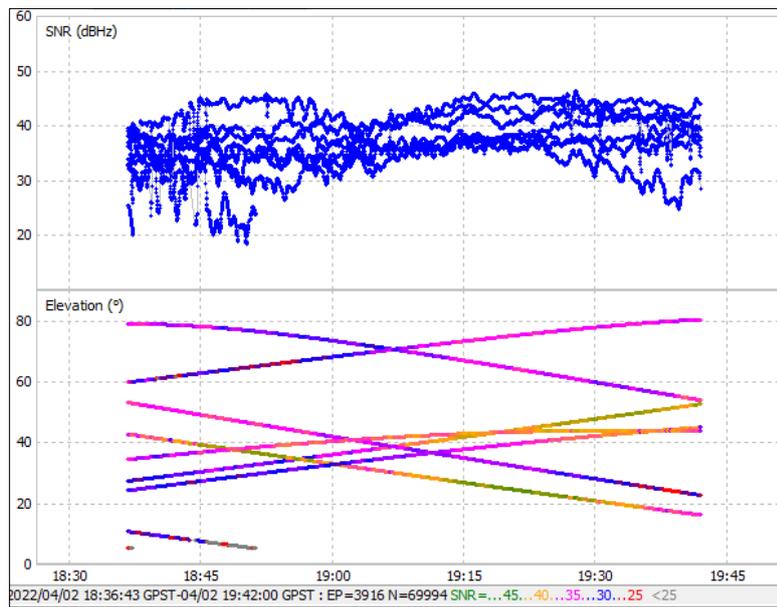


Figura 124: rapporto segnale/rumore relativo alla costellazione GPS

I rapporti segnale/rumore (SNR) sembrano simili a quelli del mattino e si attestano su un valore medio di 35 dBHz.

Solo analizzando i singoli satelliti si hanno maggiori informazioni: ad esempio è da notare il satellite G23 e il G27 sono i più problematici perché presentano SNR più basso.

Il rapporto segnale rumore per il satellite G23 risulta essere il seguente.

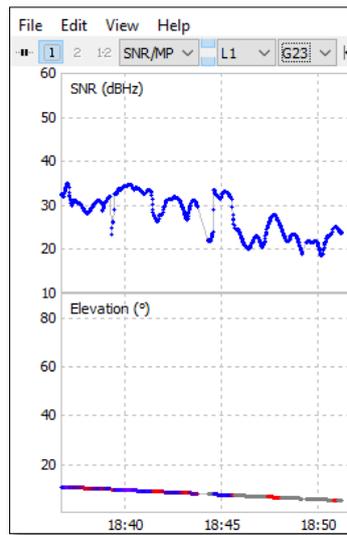


Figura 125: SNR ed elevazione del satellite G23

Il satellite G23 ha elevazioni basse per tutto il tempo in cui viene acquisito: parte da 12° alle 18:36 UTC e poi tramonta alle 18:50 UTC ed il SNR è funzione di tale elevazioni: parte da valori sufficienti (32 dBHz) e poi cala fino a raggiungere valori al di sotto di 20 dBHz al diminuire dell'elevazione satellitare, quindi probabilmente sarà escluso dal processamento dati poiché il filtro che sarà impostato nelle opzioni di RTKPOST è  $SNR \geq 30$  dBHz.

Il satellite G27 ad inizio rilievo ha un buon SNR ma verso la fine del rilievo il satellite inizia a tramontare e di conseguenza, come si nota dalla figura 126, i valori di SNR diminuiscono, giungendo al di sotto dei 30 dBHz, a causa di un aumento del rumore durante la fase di tramonto satellitare.

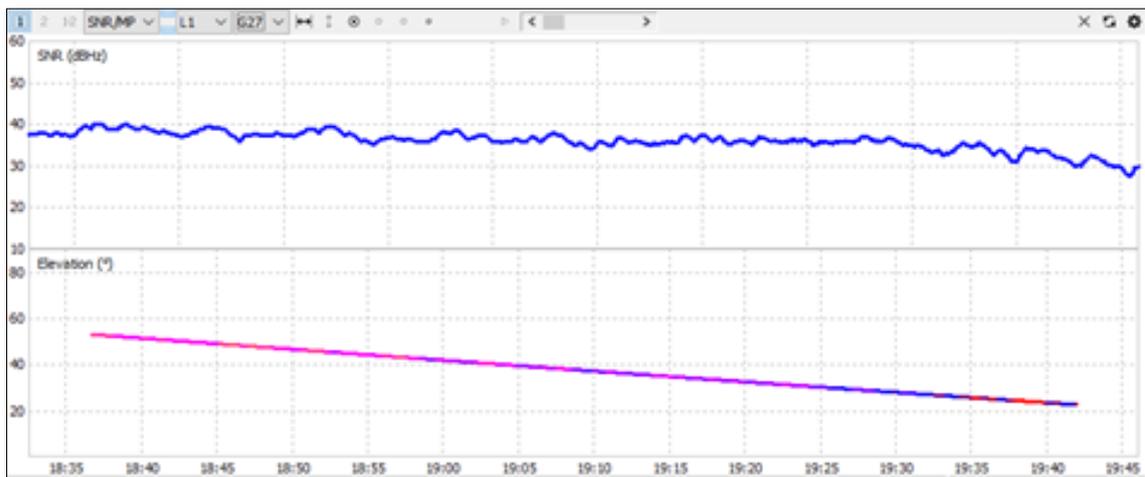


Figura 126: Diagramma SNR ed elevazione del satellite G27.

## Processamento con RTKPOST

Soluzioni ottenute impostando nelle opzioni un rapporto segnale/rumore minimo pari a **SNR30** e angolo di elevazione minimo (**cutoff**) pari a **10°**.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “FIXandHOLD”

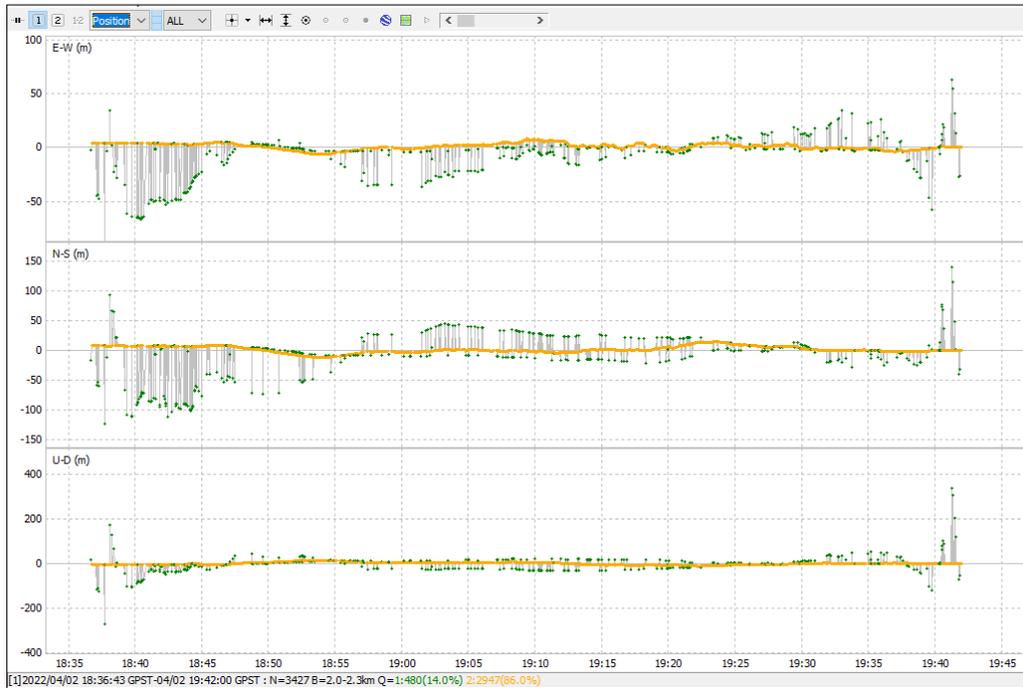


Figura 127: soluzione FIXandHold, campagna di misura 2 nelle direzioni East-West, North-South, Up-Down

Dalla vista planimetrica, riportata nella figura successiva, si nota il mix di soluzioni fix (punti verdi) e float (punti gialli) ottenuti e si osserva la “esplosività” dei punti verdi che appaiono come soluzioni casuali, lontane le une dalle altre a differenza delle soluzioni float che risultano convergenti al centro. La presenza delle soluzioni fix tende ad aumentare la dispersione delle soluzioni. Anche sulla immagine planimetrica sono riportati in alto i valori statistici di standard deviation.

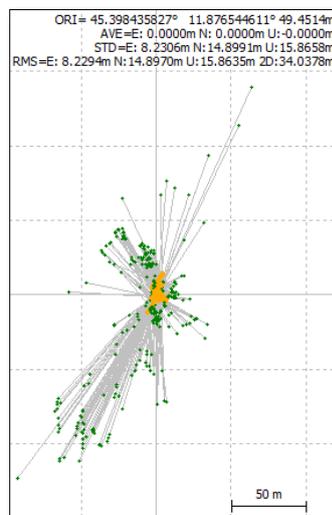


Figura 128: Vista planimetrica delle soluzioni FIXandHOLD, campagna di misura 2. La dimensione del quadrato rappresentativo delle distanze è 50m e si nota la presenza di soluzioni fix (punti verdi) anche oltre 100 metri dal centro

Da RTKPLOT si possono leggere i parametri principali della soluzione di posizionamento ovvero la standard deviation ( $\sigma$ ), la percentuale di soluzioni fix e la percentuale di soluzioni float ottenute. Si riportano tali parametri nella tabella 19.

Tabella 19: risultati ottenuti, in termini di standard deviation, per la campagna di misura 2, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 2/04/2022, meteo nuvoloso, sera; modo FIXandHOLD

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: <b>FIXandHOLD</b>		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	8,2306 m	14,8991 m	15,8658 m
%FIX	14%		
%FLOAT	86%		

**Processamento dati** → **modalità fissaggio ambiguità di fase “CONTINUOS”**: si ripete il processamento variando solo la modalità di fissaggio dell’ambiguità impostando ora “continuos”; si ottengono gli stessi risultati del FIXandHOLD.

**Processamento dati** → **modalità fissaggio ambiguità di fase “OFF”**

Si ripete il processamento variando solo la modalità di fissaggio dell’ambiguità: si metta ora **OFF** ossia si impone al software di non fissare ad intero l’ambiguità e di avere soluzioni 100% FLOAT. Da notare nella vista planimetrica come il quadratino rappresentativo della misura sia 5 metri, quindi soluzioni molto più ravvicinate che nel caso FIXandHOLD e CONTINUOS



Figura 129: In alto grafico di posizionamento della nuvola di soluzioni ottenute nelle direzioni East-West, North-South, Up-Down; in basso vista planimetrica della nuvola di soluzioni 100 % FLOAT (modalità fissaggio ambiguità: OFF)

I risultati vengono riassunti in tabella 20.

Tabella 20: risultati ottenuti, in termini di standard deviation, per la campagna di misura 2, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 2/04/2022, meteo nuvoloso, ora serale; modo OFF

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: OFF		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	2,7379 m	5,2978 m	5,5945 m
%FIX	0%		
%FLOAT	100%		

Si nota come nella soluzione OFF (ossia ambiguità 100% float) i valori di standard deviation sono minori di quelli ottenuti per la medesima campagna di misura con modalità di fissaggio dell'ambiguità "FIX and HOLD" e "Continuos" e questo conferma che la soluzione OFF offre una precisione migliore nella stima della nuvola di soluzioni.

**Osservazioni:** confrontando i valori di standard deviation ottenuti dalle analisi delle nuvole di soluzioni ottenute per la campagna di misura 1 e 2 (rispettivamente rilievo effettuato al mattino ed alla sera nella medesima postazione e in eguali condizioni meteorologiche) relative alle sole soluzioni 100% FLOAT, poiché queste sono le migliori ottenibili con ricevitori di basso livello come quello posseduto dagli smartphone e riportandole nella tabella 21, si nota che si hanno delle differenze nelle standard deviation tra mattino e sera. Le differenze di standard deviation esistenti possono essere dovute a errori indotti da ionizzazione che si massimizzano al mattino fino a mezzogiorno oppure da un surriscaldamento dello smartphone al mattino dovuto alle temperature maggiori del mattino che provocherebbero un peggioramento delle prestazioni del ricevitore o ancora la presenza di interferenze di ricezione dello smartphone al mattino piuttosto che la sera.

Tabella 21: Confronto in termini di standard deviation tra i risultati delle campagne di misura 1 e 2 con soluzioni 100% FLOAT

Campagna di misura	Standard deviation; 100%FLOAT		
	E-W	N-S	U-D
1→mattino	8,9064 m	4,6999 m	11,7506 m
2→sera	2,7379 m	5,2978m	5,5945m

Si conclude asserendo che tra un rilievo effettuato al mattino ed uno effettuato in serata nella stessa giornata, con uguale condizioni meteo (nuvolosa) le differenze di precisione della soluzione sono tuttavia accettabili se paragonate al fatto che il ricevitore dello smartphone è un ricevitore non professionale, con precisione metrica e dunque l'errore massimo di  $\pm 6$  metri che si nota in tabella 21 tra le due soluzioni rientra nelle prestazioni tipiche di un ricevitore di basso livello, più simili a quelle dei ricevitori a ricezione di codice piuttosto che singola fase.

### 9.2.1.3 CASO STUDIO 1: campagna di misura 3

Ricevitore posizionato su panchina, in centro Prato della Valle, frontale alla fontana.

DATA: 22 marzo 2022.

CONDIZIONE METEOROLOGICA: sereno.

Ora del posizionamento: Mattino ore 10:40CET (ora solare italiana) → 9:40 tempo UTC

Durata del posizionamento statico: 1 ora.



Figura 130: Rilievo in mattinata durante una giornata soleggiata, con ricevitori posti su panchina frontale alla fontana di Prato della Valle

Si è scelto di descrivere tale campagna di misura successivamente alla campagna di misura 1 e 2, sebbene queste cronologicamente posticipate rispetto alla campagna 3, perché in questo caso RTKLIB non è riuscito a processare le soluzioni con rate 1 secondo ma solo quelle a 30 secondi, generando delle **soluzioni di qualità inferiore** e dunque di secondo piano, come si vedrà a breve. Probabilmente ciò è dovuto ad una cattiva qualità dei dati di osservazione ad 1 secondo ottenuti dallo smartphone per problemi non noti ma che **presumibilmente potrebbero essere dovuti all'elettronica interna, surriscaldamento della batteria, presenza di interferenze elettromagnetiche esterne, aggiornamenti firmware dello smartphone**. Anche la ricezione di una telefonata potrebbe provocare questi danni, ma in questo caso nell'ora di rilievo non è stata ricevuta alcuna telefonata. Per cui in questa campagna di misura data la difficoltà a reperire dati di osservazione di qualità, l'unica soluzione ottenibile dal processamento dati è stata ottenuta impostando output di soluzioni ogni 30 secondi (il software non forniva alcuna soluzione con processamento ad 1 secondo): la nuvola di soluzioni sarà quindi composta da soluzioni intervallate ogni 30 secondi anziché 1 al secondo come nei casi precedenti perdendo quindi tutte le informazioni relative ai 29 secondi intermedi e nel complesso avremo soluzioni di bassa precisione.

#### Analisi delle osservabili con RTKPLOT

RICEVITORE SAMSUNG: si analizzano i satelliti GPS acquisiti, l'indice PDOP ed il rapporto segnale rumore (SNR).

##### Satelliti acquisiti

Dalla figura 131 si nota subito lo scarso numero di satelliti acquisiti dallo smartphone e la brevità della durata di intervisibilità satellitare oltre che la discontinuità. La previsione immediata è che con queste condizioni si avranno dati non di qualità e di conseguenza soluzioni con alto indice di dispersione.

##### Indice PDOP

Gli indici DOP rappresentano un indicatore della bontà della configurazione geometrica satellitare. Sono consigliati valori di PDOP < 3. In questo caso si ha  $PDOP_{medio} = 2,7$  ma dalla figura 131 si evince, a differenza degli altri casi, che dalle 9:50 alle 10:25 vi è un **cycle slip**, ovvero una totale

assenza di segnale, il che significa che il ricevitore avrà una banca dati di osservabili bassa dato che riceve il segnale in un modo non ottimale.

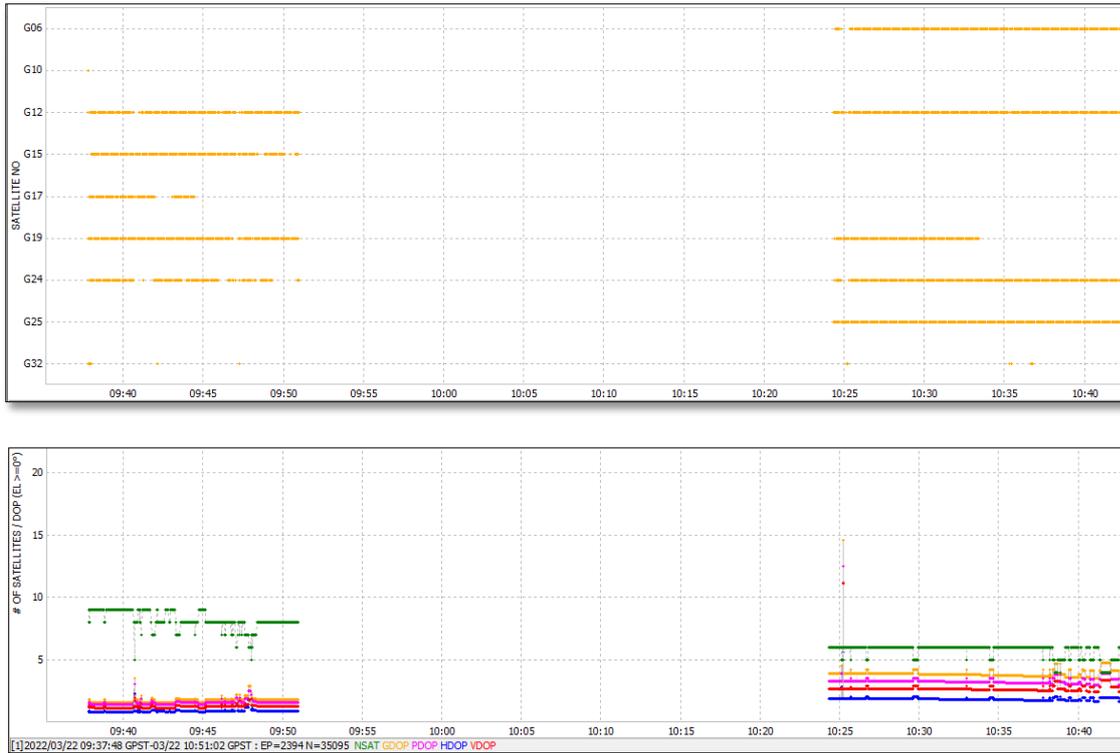


Figura 131: In alto satelliti GPS visibili dal ricevitore smartphone Samsung J6; in basso la numerosità dei satelliti (grafico verde) e tutti gli indici DOP colorati come da legenda a fondo immagine

Si è preferito in tal caso rappresentare tutti gli indici DOP per osservare che ove non c'è segnale non vi sono indici DOP, mentre nelle zone dove i satelliti sono acquisiti, le discontinuità sulla numerosità satellitare si ritrovano sulle corrispondenti discontinuità degli indici DOP dovuto ad un peggioramento della configurazione geometrica satellitare.

SNR: Rapporto segnale/rumore

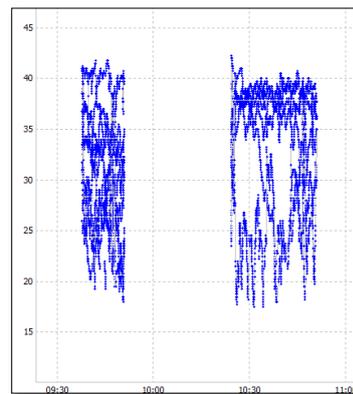


Figura 132: si nota come tra le 9:50 e le 10:25 si ha praticamente l'assenza di segnale (cycle slip) e questo è indice di elevata interferenza che ostacola totalmente la ricezione o problemi nel ricevitore

In figura 132 sono riprodotti gli SNR di tutti i satelliti: non avendo continuità di acquisizione dati, si prevedono risultati non affidabili o comunque molto dispersi dal post-processamento con rtkplot.

### Processamento con RTKPOST

Soluzioni ottenute impostando nelle opzioni un rapporto segnale/rumore minimo pari a **SNR30** e angolo di elevazione minimo (**cutoff**) pari a **10°**.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “FIXandHOLD”

I risultati ottenuti sono visibili graficamente con un'immagine planimetrica della soluzione in figura 133: come predetto si osserva la bassa qualità delle soluzioni, con addirittura soluzioni Fix che raggiungono i 400 m di dispersione

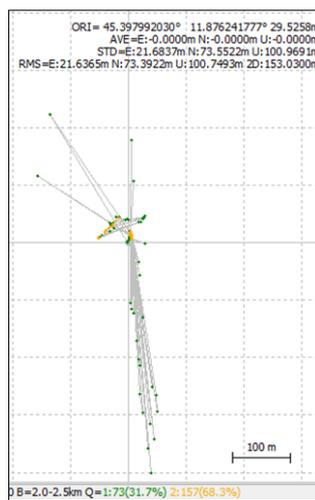


Figura 133: vista planimetrica delle soluzioni ottenute con FIXandHOLD; da notare l'elevatissima dispersione delle soluzioni soprattutto fix (punti verdi)

Si riportano solo i valori finali riassunti in tabella 22.

Tabella 22: risultati ottenuti, in termini di standard deviation ( $\sigma$ ), per la campagna di misura 3, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 22/03/2022, meteo sereno, periodo: mattino;

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: <b>FIXandHOLD</b>		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	21,6837 m	73,5522 m	100,9691 m
%FIX	31,7%		
%FLOAT	68,3%		

Come previsto i risultati sono veramente pessimi, bassissima precisione se confrontati con la campagna 1e 2 del 2 aprile e quindi in generale non affidabili.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “CONTINUOS”

Con modalità di fissaggio Continuos si hanno gli stessi risultati del FIXandHOLD.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “OFF”

Con analisi 100% FLOAT, nonostante i risultati abbiano una standard deviation alta (si veda tabella 23), sono comunque migliori rispetto alla soluzione FIXandHOLD a conferma che con questo tipo di ricevitori conviene non ricercare il fissaggio ad intero della ambiguità di fase ma processare solo con modalità 100% FLOAT ossia “ambiguità di fase con virgola mobile”.

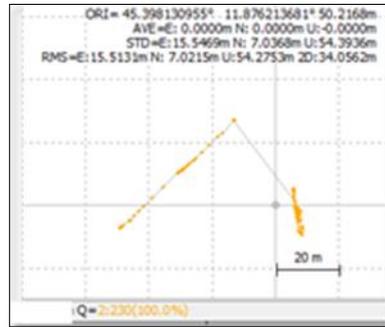


Figura 134: Planimetrica delle soluzioni 100% FLOAT; sebbene siano più concentrate rispetto alla modalità FIXandHOLD, la scarsa qualità dei dati osservati ha provocato soluzioni 100% float molto più dispersive rispetto alle campagne 1 e 2.

Si riassumono in tabella i risultati ottenuti dall’analisi 100% float.

Tabella 23: risultati ottenuti, in termini di standard deviation, per la campagna di misura 3, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 22/03/2022, meteo soleggiato, periodo: mattino; la standard deviation risulta migliore del caso FIX, ma comunque peggiore della campagna 1 e 2 in modalità OFF (si veda tabella 21) a causa della scarsa qualità dei dati

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: OFF		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	15,5469 m	7,0368 m	54,3936 m
%FIX	0%		
%FLOAT	100%		

Siccome la precisione dei risultati non è soddisfacente, dovuto alla bassa qualità dei dati acquisiti e alla presenza del lungo cycle slip, i risultati di tale campagna di misura non sono paragonabili a quelli della campagna di misura 1 (giornata nuvolosa mattutina ovvero tabella 17 pagina 163), quindi un confronto dei risultati tra rilievo effettuato al mattino sia con tempo nuvoloso che soleggiato in queste condizioni non può effettuarsi.

Infatti riportando di seguito i dati di standard deviation della tabella 17 (risultati ottenuti con modalità fissaggio ambiguità di fase OFF):

$$\sigma_{E-W} = 8,9064 \text{ m}; \sigma_{N-S} = 4,6999 \text{ m}; \sigma_{U-D} = 11,7506 \text{ m}$$

si arriverebbe a concludere che i risultati della campagna di misura 1, condotta in condizioni meteo nuvolose siano migliori di quelli condotta in condizione meteorologica serena, il che non è attendibile o logico poiché la presenza di nubi e la maggiore umidità dell’aria in condizioni climatiche nuvolose contribuiscono ad aumentare le interferenze elettromagnetiche e l’errore troposferico.

Per confermare ciò si effettueranno altre due campagne di misura (campagna 5 e 6) al mattino in condizioni meteo nuvoloso e sereno.

### 9.2.1.4 CASO STUDIO 1: campagna di misura 4

Ricevitore posizionato su panchina frontale alla fontana in centro Prato della Valle (Padova).

DATA: 22 marzo 2022.

CONDIZIONE METEOROLOGICA: sereno.

Ora del posizionamento: Sera ore 19:37 CET (ora solare italiana) → 18:37 tempo UTC

Durata del posizionamento statico: 1 ora.



Figura 135: Rilievo in serata durante una giornata serena, con ricevitori posti su panchina frontale alla fontana di Prato della Valle (Padova)

#### Analisi delle osservabili con RTKPLOT

RICEVITORE SAMSUNG J6: si analizzano i satelliti acquisiti, l'indice PDOP ed il rapporto segnale rumore (SNR).

#### Satelliti acquisiti

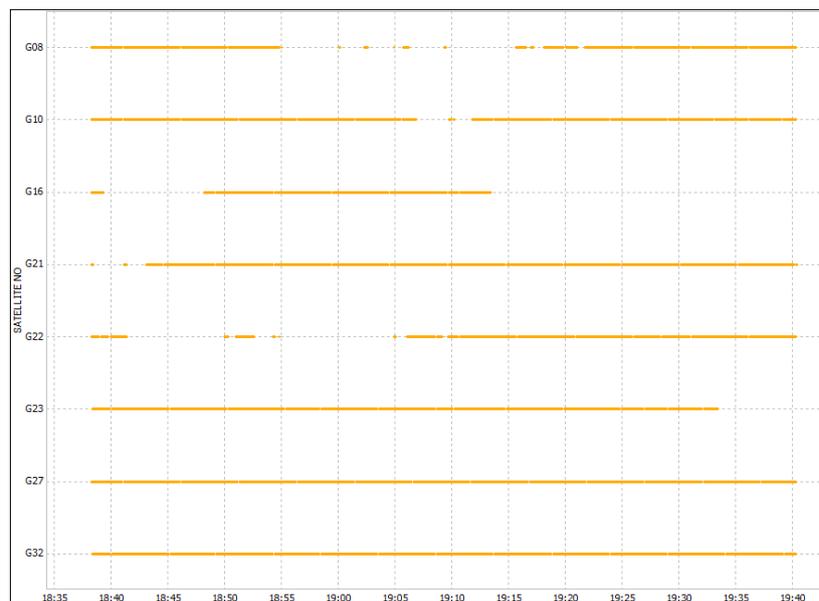


Figura 136: Satelliti GPS acquisiti

La situazione del numero di satelliti visibili e la durata della intervisibilità è nettamente migliore rispetto a quella del mattino (campagna di misura 3). Quindi lo smartphone è ritornato ad acquisire dati senza problemi.

Il satellite G08, il G16 ed il G22 sembrerebbero quelli con minore intervisibilità o comunque visibilità non continua.

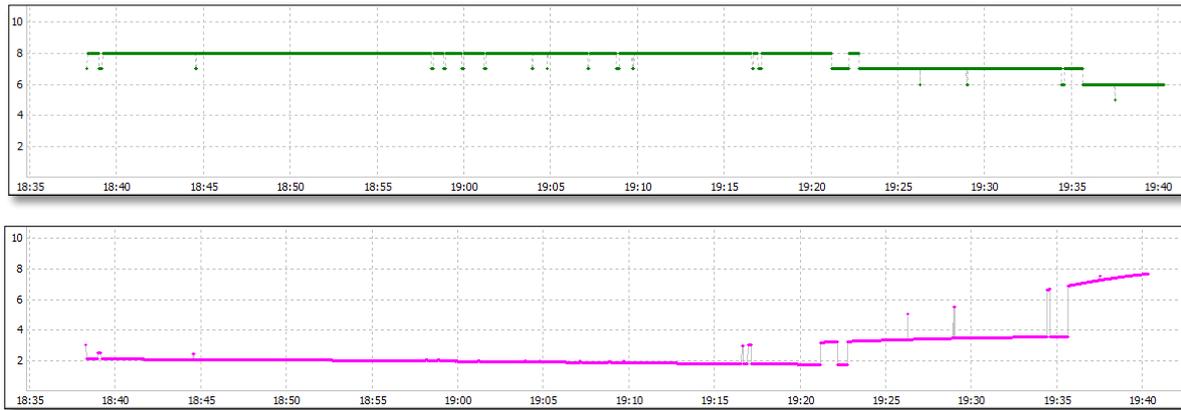
*Indice PDOP e numerosità satelliti*

Figura 137: In verde il numero di satelliti acquisiti nel tempo, mentre in rosa l'indice PDOP

Gli indici DOP rappresentano un indicatore della bontà della configurazione geometrica satellitare. Sono consigliati valori di PDOP < 3. In questo caso si ha  $PDOP_{medio} = 2,7$  tuttavia si nota che il PDOP è circa costante pari a 2 da inizio campagna fino alle 19:23 circa, poi si ha una discontinuità che porta ad un aumento del PDOP (indicante un peggioramento della configurazione geometrica satellitare) dovuta al tramonto di un satellite (si veda linea verde), che quindi ha lasciato un vuoto nella configurazione satellitare e alle 19:35 subisce un ulteriore salto dovuto al tramonto ancora di un altro satellite che lo porta a valori > 6: questo è dovuto al fatto che la numerosità dei satelliti (verde) diminuisce provocando un peggioramento della configurazione geometrica satellitare.

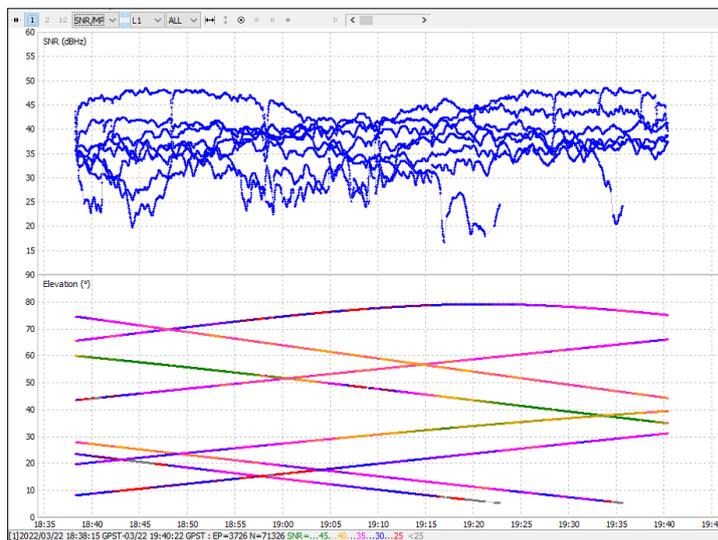
SNR

Figura 138: Segnale rumore e angoli di elevazione dei satelliti

I valori di SNR sono mediamente superiori a 35 dBHz, raggiungendo medie di 37 dBHz, quindi un buon segnale ricevuto. Maggiori dettagli si hanno analizzando brevemente i satelliti che deficitano di più nella intervisibilità ovvero i satelliti G16, G22 ed G08.

Dalla figura 139 risulta che

- il satellite G08 ha un buon angolo di elevazione e tuttavia subisce un aumento della rumorosità nella zona temporale centrale del rilievo. Tale aumento di rumore quindi non è da assegnare ad una diminuzione di elevazione satellitare ma alla presenza di interferenze elettromagnetiche o altri tipi di interferenze (aggiornamenti firmware dello smartphone, riscaldamento della batteria, ecc.) che hanno disturbato quel segnale proveniente da quel satellite e la sua visibilità;
- il satellite G16 è un satellite che tende a tramontare quindi verso la fine del rilievo avendo elevazioni basse ha anche maggiori rumorosità (disturbi) che inficiano sulla qualità stessa del segnale e sulla sua ricezione;
- il satellite G22 è un satellite che tende a sorgere e quindi presenta elevazioni gradualmente crescenti rispetto all'orizzontale: per questo motivo a inizio rilievo, sorgendo, ha basse elevazioni e alta rumorosità e invece una volta raggiunto l'elevazione  $\geq 20^\circ$  inizia ad avere un costante miglioramento del SNR.

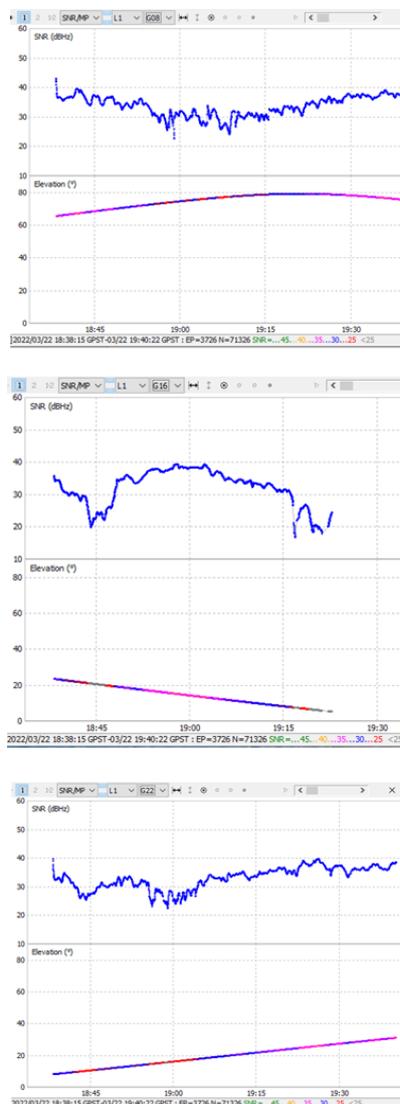


Figura 139: Rapporto segnale/rumore ed elevazione satellitare, dall'alto verso il basso dei satelliti: G08, G16 e G22. Se non vi è collegamento tra diminuzione SNR e diminuzione dell'angolo di elevazione rispetto l'orizzontale, significa che vi sono altre interferenze esterne o problemi nel ricevitore.

## Processamento con RTKPOST

Soluzioni ottenute impostando nelle opzioni un rapporto segnale/rumore minimo pari a **SNR30** e angolo di elevazione minimo (**cutoff**) pari a **10°**.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “FIXandHOLD”

Con modalità FIX and HOLD si ottiene il seguente grafico di posizionamento nelle direzioni East-West, North-South e Up-Down.

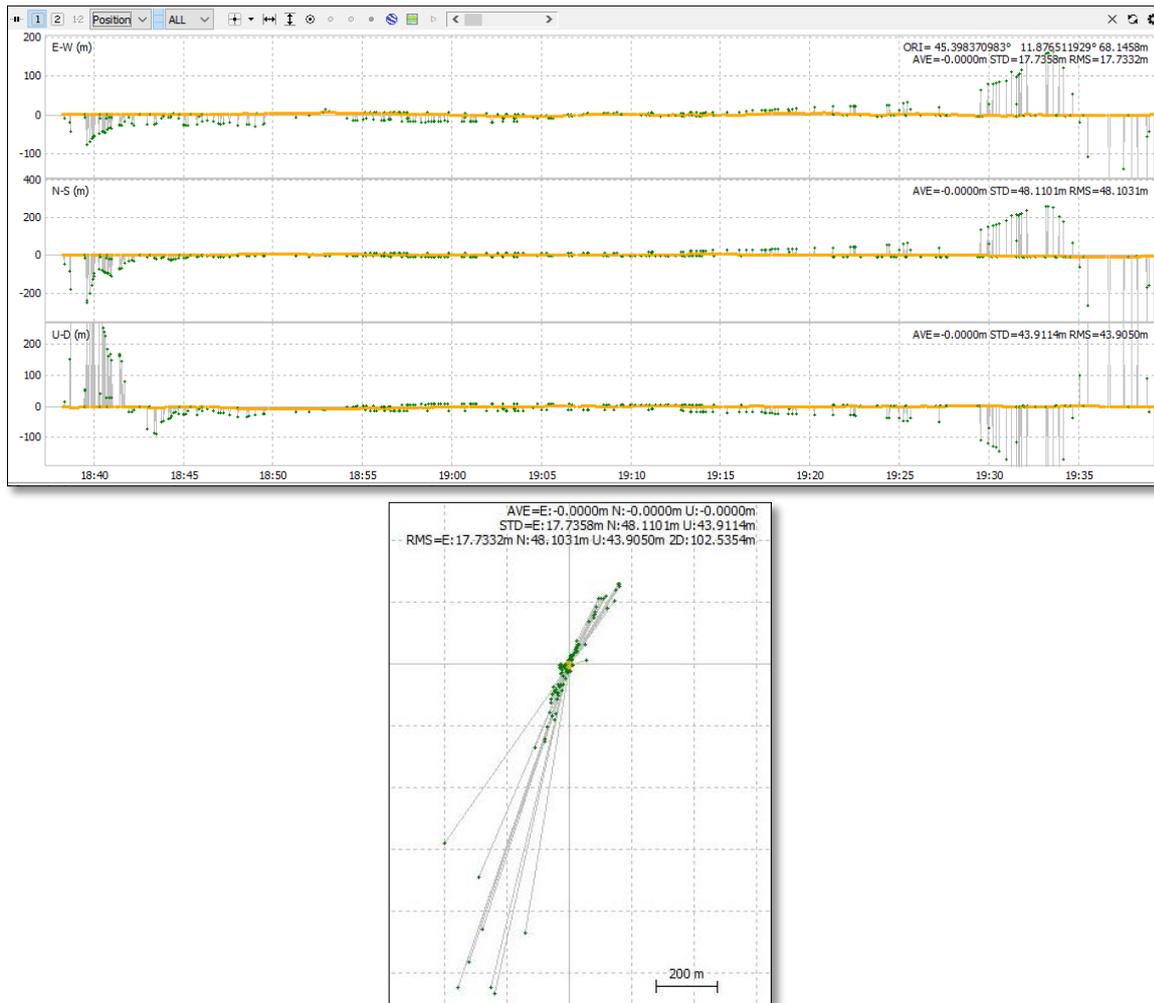


Figura 140: Sequenza delle soluzioni (1 al secondo) diagrammate. In alto le soluzioni stimate nelle direzioni East-West, North-South e Up-Down. In verde le soluzioni FIX, in giallo le soluzioni Float.

Nella seguente tabella si riportano i parametri di standard deviation, % soluzioni FIX e % soluzioni FLOAT.

Tabella 24: risultati ottenuti, in termini di standard deviation, per la campagna di misura 4, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 22/03/2022, meteo sereno; periodo: sera; modo FixandHold

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: <b>FIXandHold</b>		
$\sigma$	E-W	N-S	U-D
	17,7358 m	48,110 m	43,9114 m
%FIX	11,5%		
%FLOAT	88,5%		

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “CONTINUOS”

Per la modalità Continuos non si registrano differenze rispetto alla modalità Fix and Hold.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “OFF”

I risultati della modalità di fissaggio ambiguità OFF, ossia soluzioni 100% float, sono espressi sia nella immagine planimetrica, in cui si nota la convergenza delle soluzioni rispetto alle modalità FIXandHOLD e Continuos, che riportati nella tabella 25.

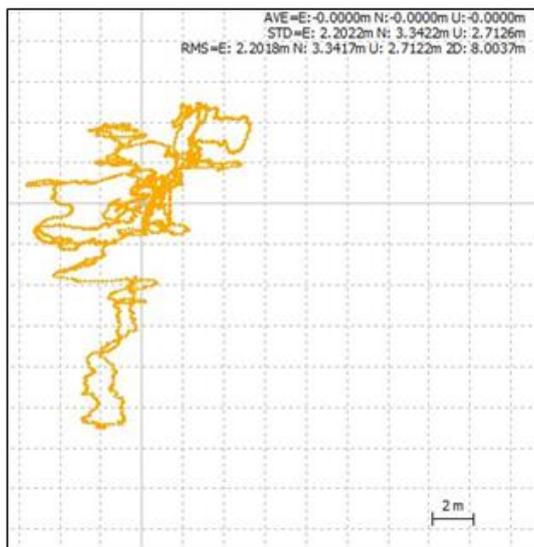


Figura 141: vista planimetrica della nuvola di soluzioni ottenute in modalità 100% float (fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase non imposto)

In tabella si riassumo i risultati in termini di precisione (standard deviation) ottenuti con modalità di fissaggio dell'ambiguità di fase OFF ossia soluzioni 100% float (ambiguità di fase in virgola mobile).

Tabella 25: risultati ottenuti, in termini di standard deviation, per la campagna di misura 4, posizionamento su panchina frontale alla fontana centrale in Prato della Valle (Pd), in data 22/03/2022, meteo sereno; periodo: sera; modo OFF

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: OFF		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	2,2022 m	3,3422 m	2,7126 m
%FIX	0%		
%FLOAT	100%		

Si ha la conferma che le soluzioni 100% float siano le migliori per questo tipo di ricevitore, ossia per ricevitori di basso livello come quelli contenuti all'interno di smartphones, le soluzioni stimate hanno una dispersione molto più bassa se non si impone al software il fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase.

Si effettua ora un confronto tra questa ultima soluzione ottenuta e quella OFF ottenuta dalla campagna di misura 2 (tabella 20): in tal modo è possibile trarre conclusioni sul posizionamento di precisione effettuato nella stessa fascia oraria (fascia serale) ma con diverse condizioni meteorologiche (sereno e nuvoloso). Un riepilogo è riportato nella tabella seguente.

Tabella 26: Confronto tra le soluzioni 100% FLOAT ottenute dalle campagne di misura 4 e 2, condotte in serata con condizioni meteorologiche differenti ossia sereno e nuvoloso

Campagna di misura	Data, meteo, periodo	Standard deviation		
		E-W	N-S	U-D
4	22 marzo 2022, sereno, sera	2,2022m	3,3422m	2,7126m
2	2 aprile 2022, nuvoloso, sera	2,7379m	5,2978m	5,5945m

Dal confronto si evince che non vi sono differenze sostanziali tra le due campagne anche se vi è un leggero peggioramento della precisione nella soluzione della campagna di misura 2 (meteo nuvoloso), a causa di:

- minore visibilità satellitare: per la maggior parte del rilievo nella campagna di misura 2 si hanno 7 satelliti mentre nella campagna di misura 4 si hanno 8 satelliti;
- maggiore percentuale di umidità nell'aria nel cielo nuvoloso che incrementa l'errore troposferico;
- qualche interferenza elettromagnetica causata dalla presenza di grosse nuvole e lampi e infatti SNR nella campagna 2 è leggermente minore (quindi maggiori disturbi) rispetto a SNR campagna 4 (vedere figure 124 e 138).

Invece non è stato possibile effettuare un confronto sullo stesso sito tra tempo sereno e tempo nuvoloso al mattino (ossia campagna 1: giornata nuvolosa, mattina e campagna 3: giornata soleggiata, mattina) poiché i risultati della campagna 3 non sono stati ritenuti soddisfacenti per la presenza del cycle slip.

Quindi si è proceduto con **ulteriori 2 campagne di misura** su un sito differente, ma sempre interno a Prato della Valle, condotte entrambe di mattina, di cui una con condizione meteorologica nuvolosa e l'altra con condizione meteorologica serena.

Per la ragione poc'anzi definita si sono condotte quindi altre due campagne di misura sempre in Piazza Prato della Valle ma su un altro sito ossia sulla panchina posta lungo il viale alberato (segnata in foto 142) e si è proceduto con il rilievo in modalità statica sempre della durata di 1 ora. Entrambe le campagne saranno eseguite di giorno, sia con giornata nuvolosa che soleggiata.

### 9.2.1.5 CASO STUDIO 2: campagna di misura 5

Ricevitore posizionato su una panchina sita nel viale alberato di Piazza Prato della Valle.

DATA: 29 marzo 2022.

CONDIZIONE METEREEOLOGICA: nuvoloso.

Ora del posizionamento: mattina ore 9:30 CEST (ora legale italiana) → 07:30 tempo UTC

Durata del posizionamento statico: 1 ora.



#### Padua, Province of Padua

Wed 09:00, Cloudy

11°C | °F

Precip: 18%  
Humidity: 81%  
Wind: 11 km/h



TUE	WED	THU	FRI	SAT
18° 8°	16° 9°	15° 9°	14° 7°	10° 4°

weather.com Feedback



Figura 142: Campagna di misura effettuata presso la panchina situata sul viale alberato che conduce al centro della piazza di Prato della Valle in condizione metereologica nuvolosa

### Analisi delle osservabili con RTKPLOT

RICEVITORE SAMSUNG J6: si analizza il numero satelliti acquisiti, l'indice PDOP ed il rapporto segnale rumore (SNR).

#### Satelliti acquisiti

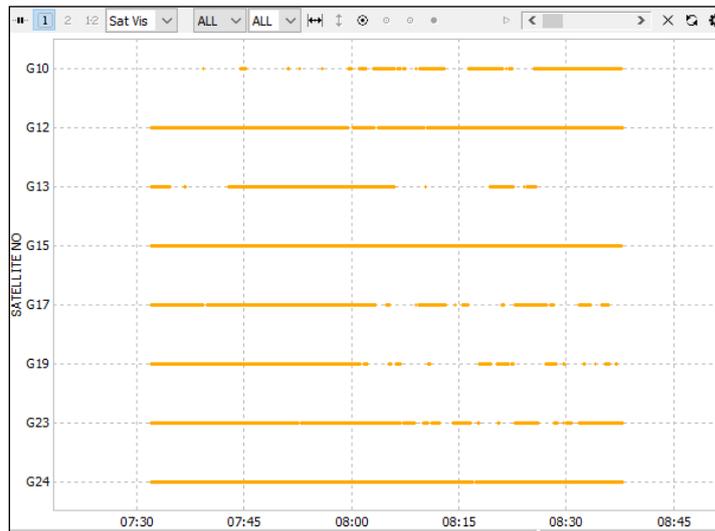


Figura 143: Satelliti GPS acquisiti

Rispetto alla campagna di misura 1 (figura 101 pagina 151) svolta anch'essa al mattino in condizioni meteo nuvolosa, cambia l'orario di rilievo: ora è dalle 7:30 UTC mentre campagna 1 è stata effettuata dalle 9:35 UTC e mentre in campagna 1 si avevano solo 3 satelliti non eccellenti su una media di 8,5 satelliti presenti durante l'ora di rilievo, adesso si hanno 5 satelliti non eccellenti su una media di 8 satelliti acquisiti. Dunque le condizioni sono peggiorate probabilmente dovute al cambio di postazione di rilievo (ora vicino agli alberi del corso alberato che hanno potuto deviare/ostacolare qualche segnale in più rispetto alla postazione della campagna 1: panchina frontale alla fontana) e al cambio dell'orario che comporta non acquisire gli stessi satelliti. La numerosità dei satelliti GPS è riprodotta nella figura seguente: si hanno 8 satelliti per l'86,4 % del tempo, 7 per il restante 13,5 % del tempo e 6 per lo 0,1% del tempo.

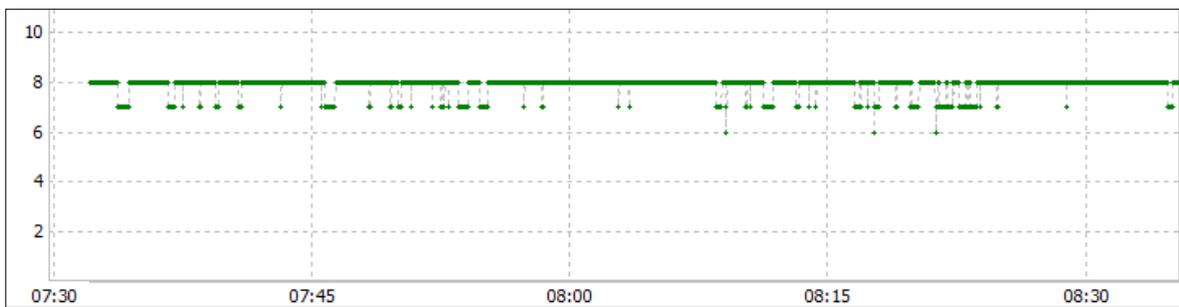


Figura 144: numerosità dei satelliti acquisiti durante il rilievo

### Indice PDOP

In figura si è riportato contemporaneamente la numerosità satellitare (grafico verde) accoppiata con l'indice PDOP (grafico rosa) così da notare la corrispondenza tra le discontinuità presenti nei 2 diagrammi: per ogni satellite non più acquisito (ad esempio quando la numerosità passa da 8 a 7 satelliti) corrisponde una discontinuità con incremento del PDOP poiché la conformazione geometrica satellitare peggiora.

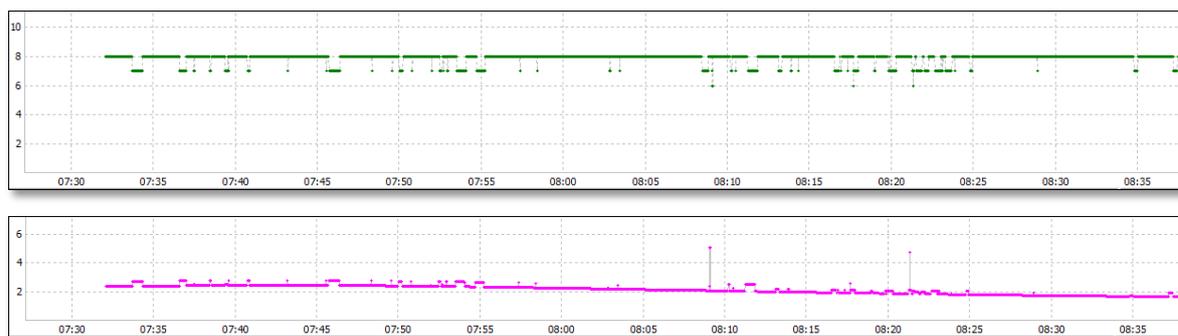


Figura 145: Indici DOP (grafici colorati in vario modo) e numerosità satelliti (grafico verde)

Gli indici PDOP sono valutati con continuità per tutto il periodo di misura e risultano corretti nel senso che si ha  $PDOP < 3$  e in particolare  $PDOP_{medio}=2,2$ .

### SNR

Il rapporto segnale rumore non presenta discontinuità. Tuttavia per una migliore diagnosi si analizzano i satelliti che presentavano maggiori problemi in fase di acquisizione dati.

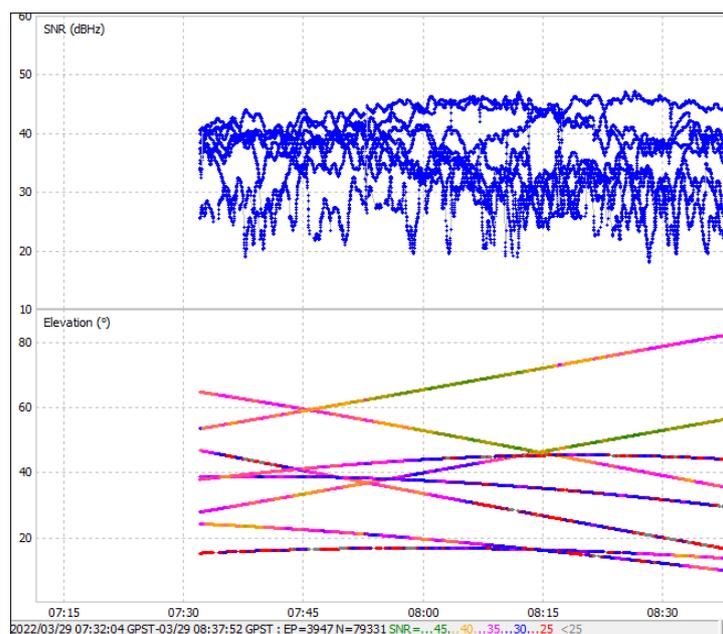


Figura 146: Valori di SNR ed elevazione dei satelliti GPS

I satelliti: G10, G13, G19 e G23 hanno valori medi di SNR  $\leq 30$  dBHz o comunque presentano tratti al di sotto dei 30 dBHz. Di seguito un estratto dei rapporti segnale rumore di tali satelliti.

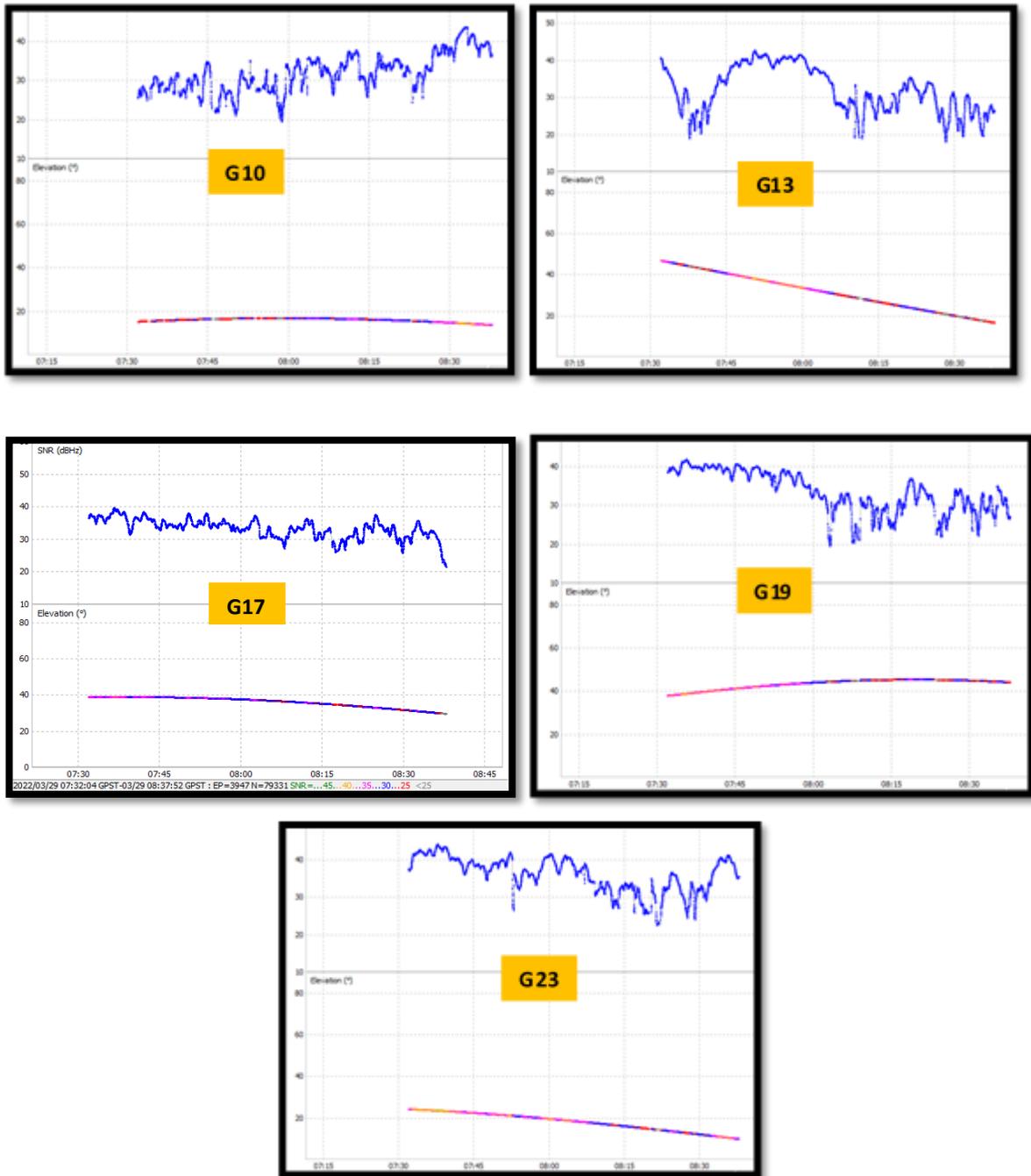


Figura 147: satelliti che presentano disturbi maggiori e quindi intervalli temporali con valori di SNR al di sotto di 30 dBHz

I satelliti G10, G13, G23 e G17 avendo valori di elevazioni bassi o in fase calante automaticamente presentano un peggioramento del rapporto segnale/rumore. Il G19 invece non dimostra problematiche particolari in termini di elevazione rispetto l'orizzontale tuttavia i valori non buoni di SNR significano la bassa potenza del segnale che giunge da tale satellite soprattutto dopo le 08:00 UTC.

## Processamento con RTKPOST

Soluzioni ottenute impostando nelle opzioni un rapporto segnale/rumore minimo pari a SNR 30 e angolo di elevazione minimo (cutoff) pari a  $10^\circ$ .

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “FIXandHOLD”

Il settaggio “FIXandHOLD” genera alcune soluzioni ad ambiguità effettivamente fissata (soluzioni fix) e altre soluzioni con ambiguità in virgola mobile (soluzioni float).

Con modalità FIX and HOLD si ottiene il seguente grafico di posizionamento nelle direzioni East-West, North-South e Up-Down e la vista planimetrica. Ancora una volta da notare la “esplosività” delle soluzioni Fix (verdi) che presentano addirittura 150-200 m di incertezza.

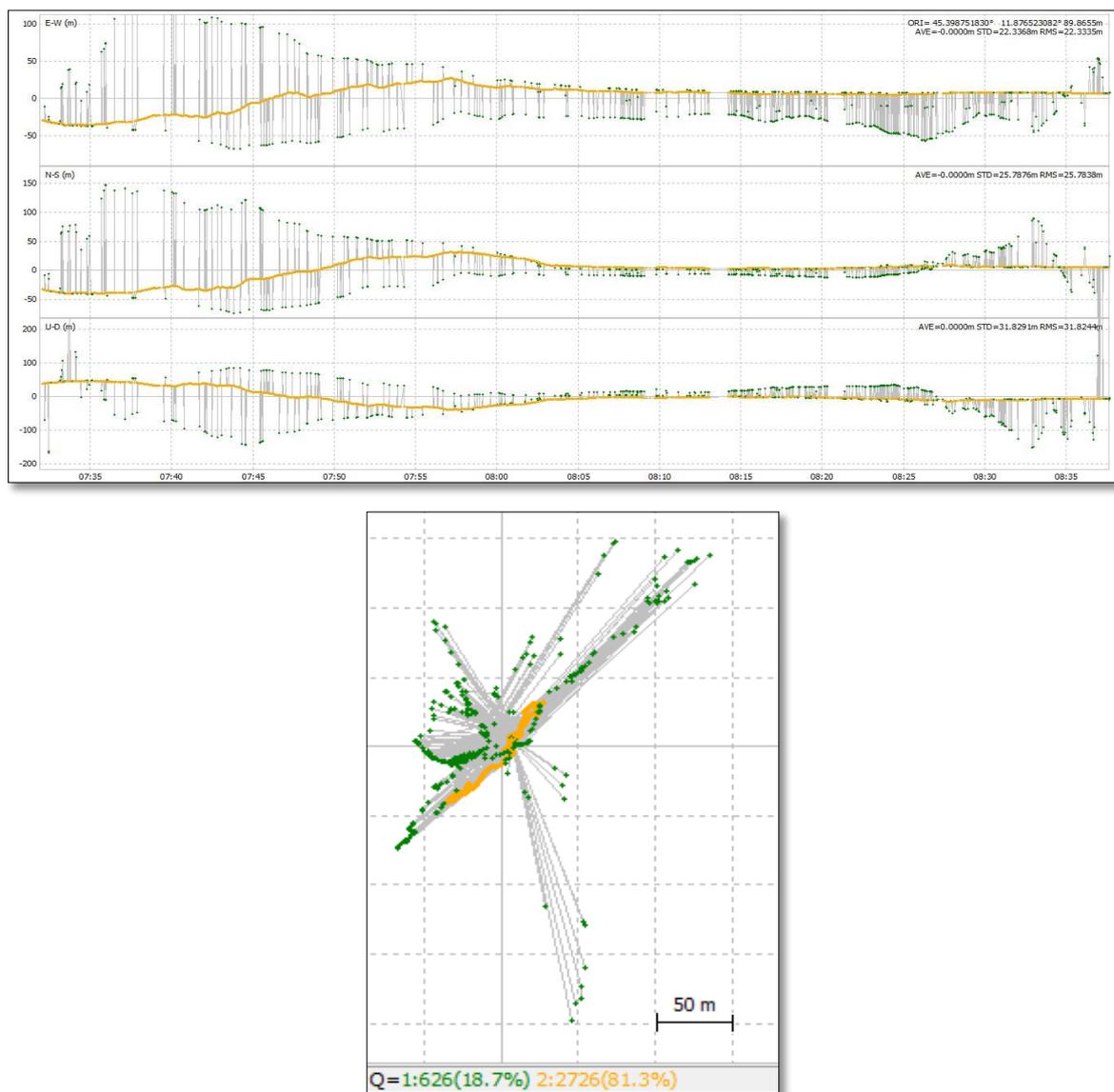


Figura 148: in alto diagramma di posizione delle soluzioni stimate nelle direzioni E-W, N-S e U-D; in basso vista planimetrica della nuvola di soluzioni ottenute; in verde le soluzioni fix, in giallo le float

Si riassumono in tabella i valori di standard deviation e le percentuali di soluzioni fix e float ottenute dall'analisi della campagna di misura 5 in settaggio FIXandHOLD.

Tabella 27: risultati ottenuti per il posizionamento effettuato su panchina del viale alberato, il 29/03/2022, meteo nuvoloso, periodo: mattino, modalità fissaggio ambiguità Fix and Hold.

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: <b>FIXandHOLD</b>		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	22,3368 m	25,7876 m	31,8291 m
%FIX	18,7%		
%FLOAT	81,3%		

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “CONTINUOS”

Per la modalità Continuos non si registrano differenze rispetto alla modalità Fix and Hold.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “OFF”

I risultati della modalità di fissaggio ambiguità OFF, ossia soluzioni 100% float, sono visibili nella vista planimetrica e riportati nella tabella 28.

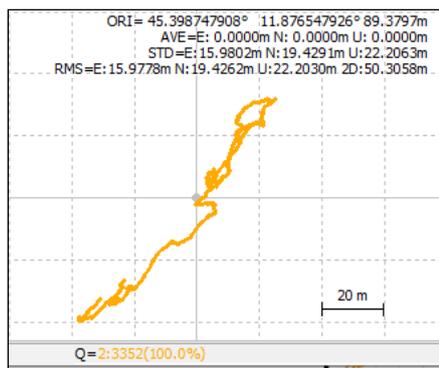


Figura 149: vista planimetrica soluzione 100% FLOAT (modalità fissaggio ambiguità OFF)

Si riassumono in tabella i risultati ottenuti in termini di precisione ovvero di standard deviation.

Tabella 28: risultati ottenuti per il posizionamento effettuato su panchina del viale alberato, il 29/03/2022, meteo nuvoloso, periodo: mattino, modalità fissaggio ambiguità OFF

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: <b>OFF</b>		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	15,9802 m	19,4291 m	22,2063 m
% FIX	0%		
% FLOAT	100%		

### 9.2.1.6 CASO STUDIO 2: campagna di misura 6

Ricevitore posizionato su panchina sita in viale alberato Prato della Valle.

DATA: 5 aprile 2022; CONDIZIONE METEREEOLOGICA: soleggiato.

Ora del posizionamento: matino ore 9:30 CEST (ora legale italiana) → 07:30 tempo UTC

Durata del posizionamento statico: 1 ora.

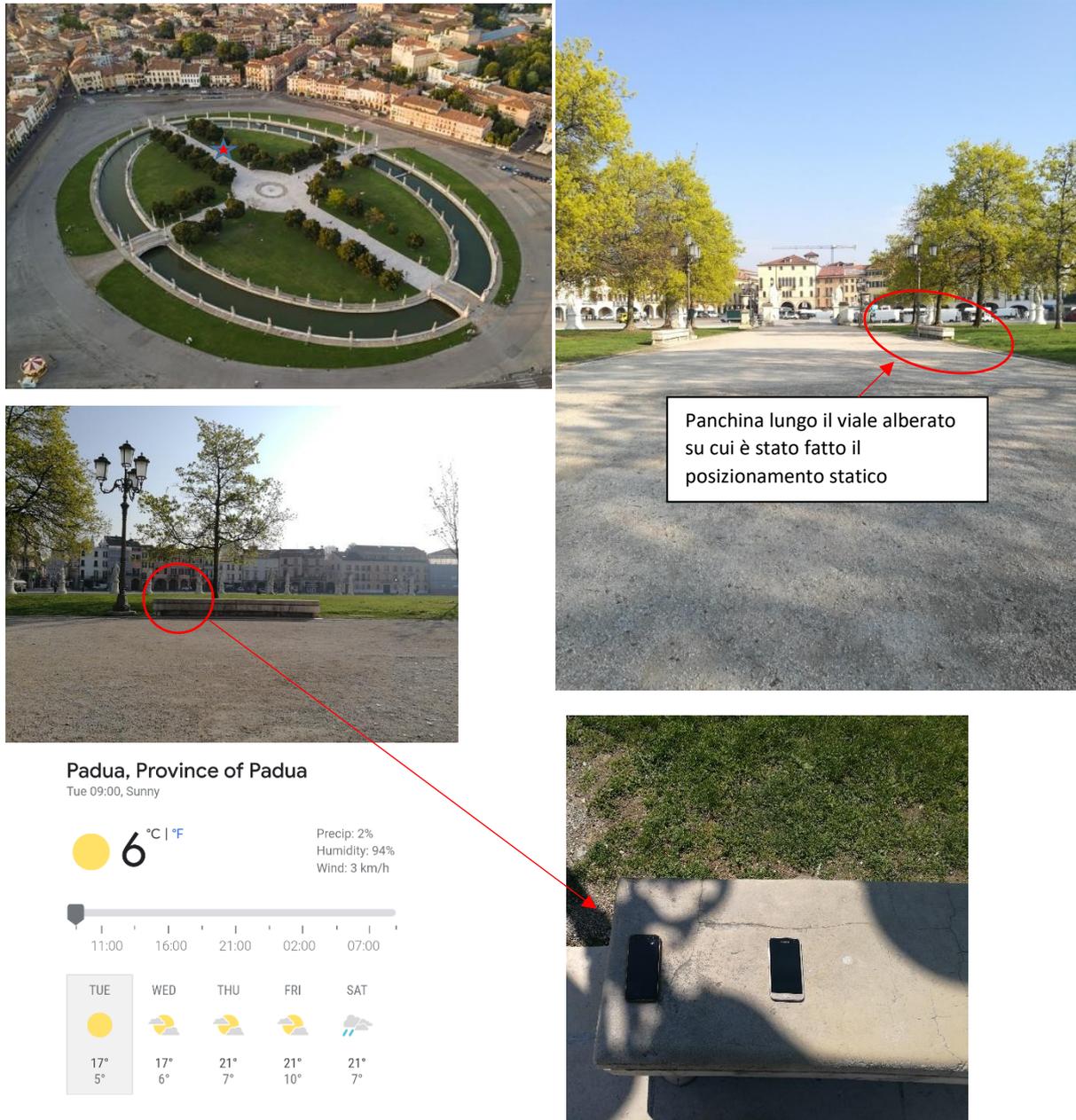


Figura 150: Campagna di misura effettuata presso la panchina situata sul viale alberato che conduce al centro della piazza di Prato della Valle in condizione meteorologica serena; le immagini riproducono i due smartphone affiancati a circa 30 cm che contemporaneamente effettuano il rilievo satellitare.

### Analisi delle osservabili con RTKPLOT

RICEVITORE SAMSUNG J6: si analizza i satelliti acquisiti, l'indice PDOP ed il rapporto segnale rumore (SNR).

#### Satelliti acquisiti

I satelliti GPS che hanno problemi alla ricezione sono il G13, il G17 e il G23.

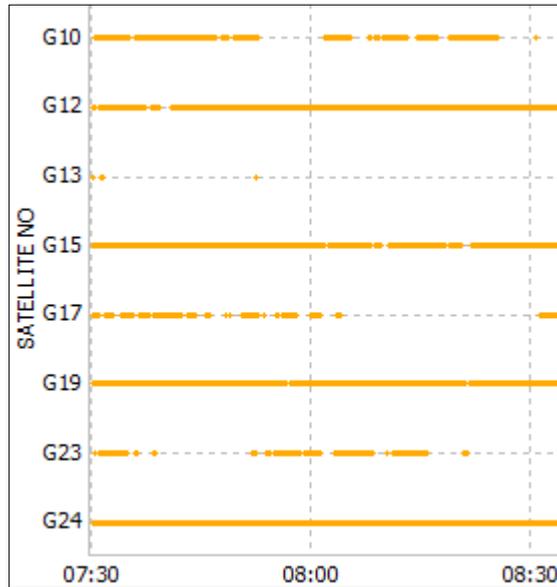


Figura 151: Satelliti visibili

#### Numerosità Satelliti

Nella seguente immagine abbiamo una rappresentazione più nitida della numerosità dei satelliti acquisiti che oscilla tra 7 e 8 per la maggior parte del tempo con tratti in cui ve ne son solo 6.

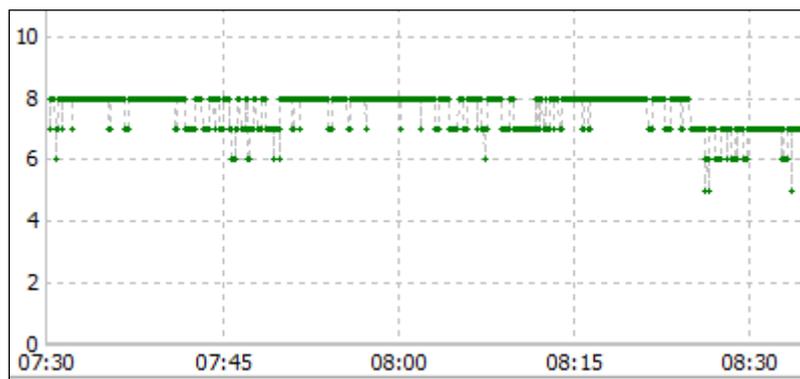


Figura 152: Numero dei satelliti acquisiti nel corso del rilievo

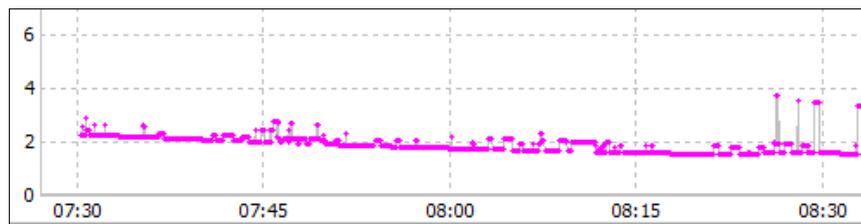
Indice PDOP

Figura 153: andamento dell'indice PDOP durante la campagna di misura

L'indice PDOP risulta quasi sempre minore di 3 ( $PDOP_{medio} = 2$ ) il che indica una buona configurazione geometrica dei satelliti, tranne verso fine rilievo a cui corrisponde un minor numero di satelliti visibili (si veda figura 152) poiché più di qualcuno tramonta e la vacanza lasciata genera vuoti nella configurazione geometrica satellitare che non è più ottimale e comporta l'innalzamento del PDOP. Non si osservano cycle slip e quindi non vi sono perdite totali di collegamento satellite-ricevitore.

I salti che si notano nel grafico PDOP corrispondono agli istanti in cui uno o due satelliti non vengono più acquisiti durante il rilievo, mentre nel momento in cui ritornano ad essere nuovamente acquisiti anche il PDOP ritorna a valori normali.

SNR

La media di SNR di tutti i segnali L1 appare buona, ha una media  $\geq 30$ dBHz; in realtà se si osservano singolarmente i satelliti che presentano maggiori discontinuità nell'acquisizione dati (G13, il G17 e il G23) si nota che la potenza del segnale tendenzialmente peggiora gradualmente a causa delle loro elevazioni: sono 3 satelliti in tramonto.

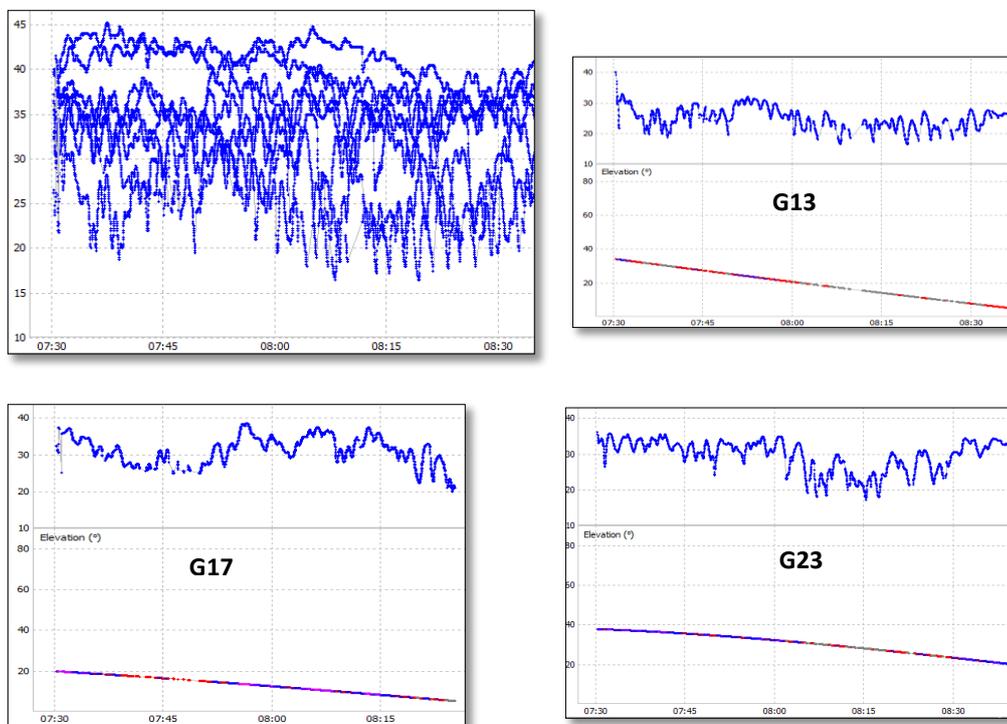


Figura 154: In alto a destra Rapporto segnale rumore di tutti i satelliti; a lato si hanno i grafici SNR dei satelliti G13, G17 e G23

## Analisi delle osservabili con RTKPOST

Soluzioni ottenute impostando nelle opzioni un rapporto segnale/rumore minimo pari a SNR 30 e angolo di elevazione minimo (cutoff) pari a 10°.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “FIXandHOLD”

Il settaggio “FIXandHOLD” genera alcune soluzioni ad ambiguità effettivamente fissata (soluzioni fix) e altre soluzioni con ambiguità in virgola mobile (soluzioni float).

Di seguito si riporta solo la vista planimetrica della nuvola di soluzioni ottenute, mentre in tabella 29 si riportano le soluzioni ottenute in termini di standard deviation, riportando le percentuali delle soluzioni fix e le percentuali delle soluzioni float.

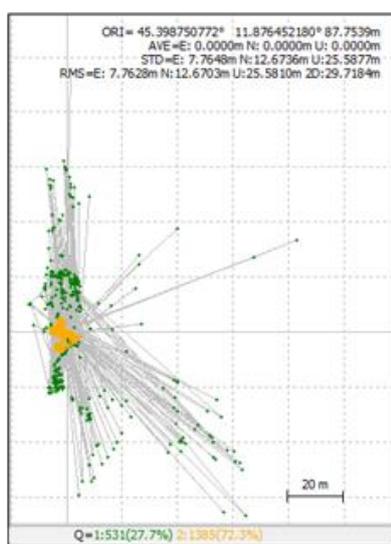


Figura 155: planimetria della nuvola di soluzioni FIXandHOLD; in verde le soluzioni fix in cui si nota la grande dispersione e in giallo le soluzioni float molto più concentrate

Si riassumono in tabella i risultati ottenuti in termini di precisione ovvero di standard deviation.

Tabella 29: risultati ottenuti per il posizionamento su panchina del viale alberato, il 5/04/2022, meteo soleggiato, periodo: mattino, modalità fissaggio ambiguità Fix and Hold

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: OFF		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	7,7648 m	12,6736 m	25,5877 m
%FIX	27,7%		
%FLOAT	72,3%		

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “CONTINUOS”

Impostando modalità di fissaggio Continuos si ottengono gli stessi valori della modalità FixandHold.

### Processamento dati → modalità fissaggio ambiguità di fase “OFF”

In tal caso si hanno soluzioni totalmente FLOAT o 100%FLOAT (ossia modalità fissaggio ambiguità OFF) che risultano molto più convergenti, meno dispersive e dunque in generale più precise, come già osservato dalle precedenti campagne di misura.

Di seguito un immagine planimetrica della nuvola di soluzioni ottenute.

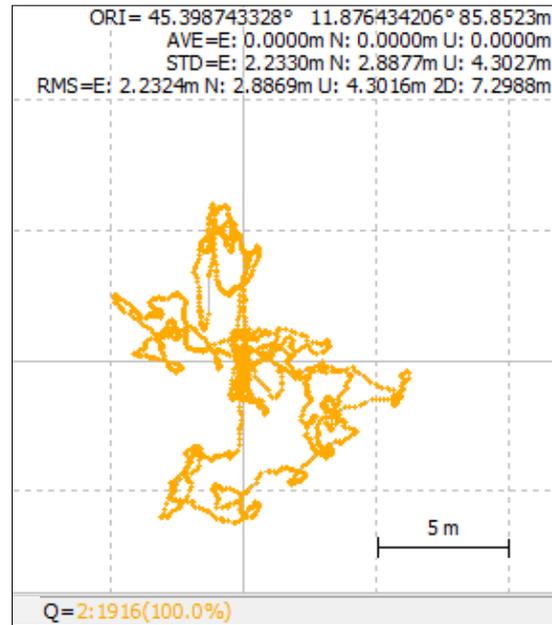


Figura 156: planimetrica delle soluzioni 100% float; da notare come siano molto più concentrate

Le soluzioni sono più concentrate e l'indicazione della dimensione del quadrato (5 metri) offre una indicazione sul range di dispersione delle soluzioni.

In tabella si riportano i risultati in termini standard deviation ( $\sigma$ ) della soluzione ottenuta in modalità fissaggio dell'ambiguità di fase totalmente float.

Tabella 30: risultati ottenuti per il posizionamento su panchina del viale alberato, il 05/04/2022, meteo soleggiato, periodo: mattino; modalità fissaggio ambiguità OFF (ovvero soluzioni 100% float)

Parametri di interesse	Modalità Fissaggio ambiguità: OFF		
	E-W	N-S	U-D
$\sigma$	2,2330 m	2,8877 m	4,3027 m
%FIX	0 %		
%FLOAT	100 %		

Si conclude affermando che tra le campagne di misura 5 e 6, effettuate entrambe al mattino, una in condizione metereologica nuvolosa e l'altra in condizione meteorologica serena, le migliori soluzioni in termine di precisione si hanno in tutti i casi impostando nel software la modalità 100%FLOAT, ossia ambiguità solo ed esclusivamente in virgola mobile.

Confrontando le due soluzioni 100% FLOAT, come di seguito riportato in tabella 29, si deduce che **le misura condotte con tempo nuvoloso al mattino, inducono sicuramente un peggioramento della precisione della stima di posizionamento**. I valori sono riportati in tabella 29.

Tabella 31: Confronto tra le precisioni delle soluzioni 100% FLOAT, ottenuti dalle campagne di misura 5 e 6, condotte entrambe in mattinata con condizioni meteo differenti

Campagna di misura	Data, meteo, periodo	Standard deviation; 100% FLOAT		
		E-W	N-S	U-D
5	29 marzo, nuvoloso, mattino	15,9802 m	19,4291 m	22,2063 m
6	5 aprile, sereno, mattino	2,2330 m	2,8877 m	4,3027 m

La spiegazione del peggioramento di soluzioni con tempo nuvoloso è dovuta non tanto alla numerosità dei satelliti acquisiti, che sostanzialmente restano i medesimi, ma alla qualità del dato acquisito: se infatti si osservano i grafici del rapporto segnale/rumore (SNR) delle campagne 5 e 6 si nota un segnale più disturbato nella campagna 5 (ossia meteo nuvoloso) con un maggior numero di satelliti che presentano valori di SNR calanti o che per molti tratti presentano  $SNR \leq 30$  dBHz probabilmente dovuto alle **interferenze elettromagnetiche** provocate dalla presenza delle nubi e di qualche lampo oltre ai rumori indotti sui satelliti in fase di tramonto; oltre questo poi vi è l'effetto dell'umidità dell'aria che provoca un aumento dell'**errore troposferico**.

In realtà i dati ottenuti in campagna 5 sembrano un po' troppo differenti da quelli ottenuti dalla campagna 6 sebbene la conclusione tratta è valida; quindi si cerca una conferma in quello appena detto confrontando le standard deviation della campagna 1 (mattino, tempo nuvoloso) in modalità 100% float, con quelli della campagna 6 (mattino, tempo sereno) in modalità 100% float, dato che in queste campagne si è visto che le standard deviation ( $\sigma$ ) posseggono simile ordine di grandezza.

Tabella 32: Confronto tra le precisioni (standard deviation) delle soluzioni 100% FLOAT, ottenuti dalle campagne di misura 1 e 6, condotte entrambe in mattinata con condizioni meteo differenti

Campagna di misura	Data, meteo, periodo	Standard deviation; 100% FLOAT		
		E-W	N-S	U-D
1	2 aprile, nuvoloso, mattino	8,9064 m	4,6999 m	11,7506 m
6	5 aprile, sereno, mattino	2,2330 m	2,8877 m	4,3027 m

Si conferma che questo tipo di ricevitore in condizioni nuvolose offre precisioni minori.

## 9.2.2 ANALISI CON HUAWEI P9 EVA-L09

Il posizionamento statico effettuato con il ricevitore Huawei P9 Eva-L09 è stato effettuato nelle medesime condizioni e siti su cui è stato effettuato il posizionamento con il ricevitore Samsung J6. I due smartphone erano distanti 30 cm così da effettuare un posizionamento della stessa postazione.



Figura 157: Smartphones in fase di rilievo, affiancati e distanti 30 cm

### Analisi delle osservabili con RTKPLOT

I dati di osservabili acquisite dal ricevitore Huawei P9 EVA-L09 sono state analizzate e studiate con RTKPLOT, allo stesso modo di quanto fatto per il ricevitore Samsung J6 prima del processamento con rtkpost, e risulta che per tutte le 6 campagne di misura vi è una qualità molto inferiore rispetto a quanto ottenuto dallo studio preliminare dello stesso tipo visto per il ricevitore Samsung J6.

Con il Huawei i dati di osservabili acquisiti presentano satelliti con bassa intervisibilità o comunque molto più discontinua rispetto a quelli del Samsung, presenza di numerose interruzioni totali di segnale (cycle slip), gli indici PDOP mediamente alti (maggiori di 3) con valori che in diverse campagne di misura schizzavano oltre 20 a causa della scarsa qualità del ricevitore che non riusciva a stimare correttamente la sua posizione e quindi la posizione del satellite rispetto al ricevitore subisce problematiche, infine i rapporti segnale/rumore (SNR) sono mediamente più bassi rispetto a quelli visualizzati con il ricevitore Samsung J6 ( $SNR_{\text{medio HUAWEI}} \leq 25 \text{ dBHz}$  contro  $SNR_{\text{medio SAMSUNG}} \leq 30 \text{ dBHz}$ ) dovuti sicuramente alla qualità scadente del ricevitore Huawei, dato che vi erano le medesime condizioni metereologiche per il Samsung J6 essendo i rilievi svolti in contemporanea e sulla stessa postazione (a meno della distanza tra i due smartphone di 30 cm).

Di seguito viene riportato, come esempio della qualità ottenuta con Huawei, le osservabili della campagna 4, che risultavano di sufficiente qualità con il Samsung; ora vedremo quanto la qualità si sia ribassata.

Di seguito si riporta i satelliti acquisiti, la numerosità dei satelliti, l'indice PDOP e il rapporto segnale/rumore (SNR) del ricevitore Huawei P9.

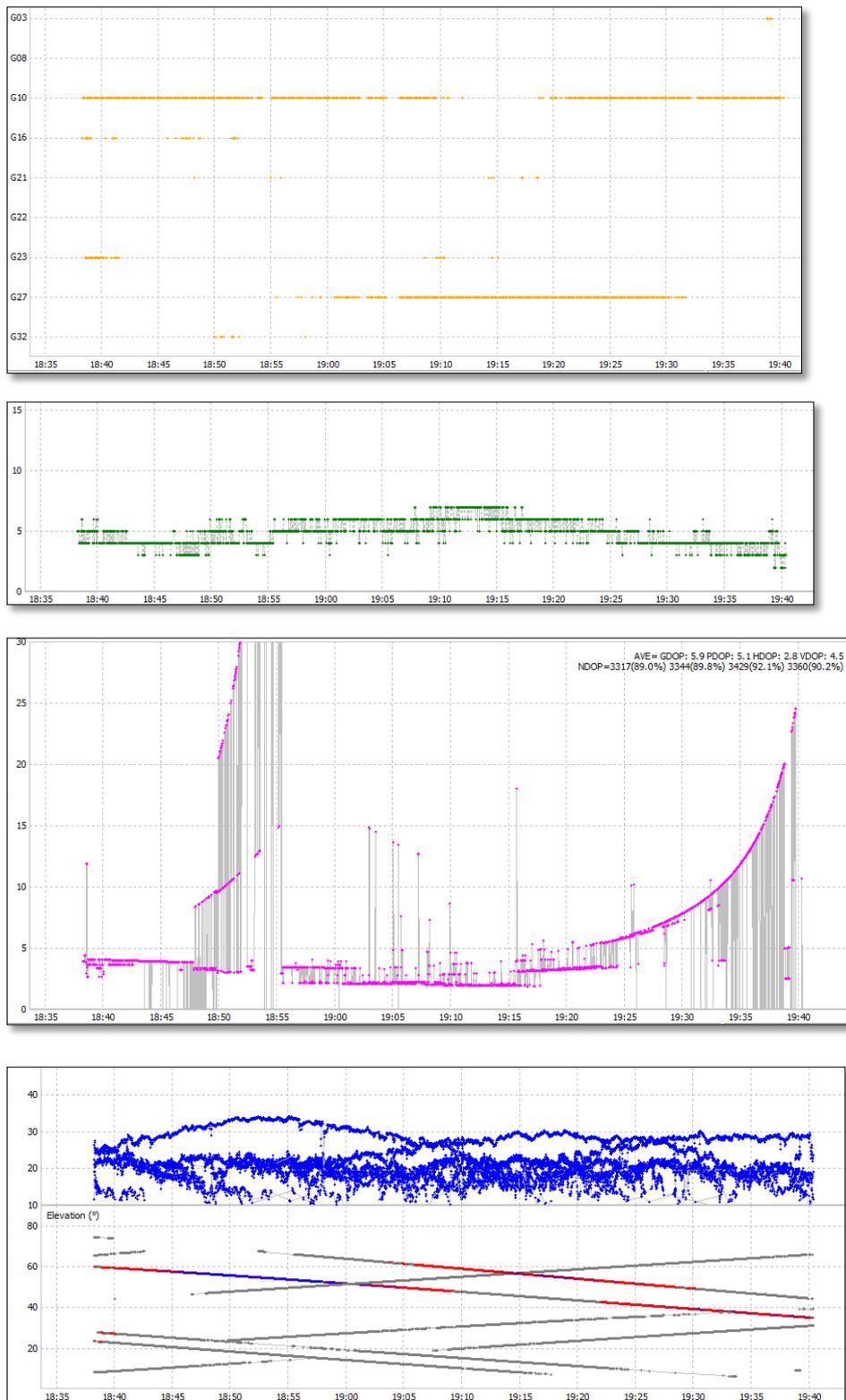


Figura 158: Osservabili ottenute tramite ricevitore HUAWEI P9 EVA-L09, durante la campagna di misura 4: sera del 22 marzo, meteo sereno. Dall'alto verso il basso: satelliti acquisiti, numerosità dei satelliti, indice PDOP, rapporto segnale/rumore ed elevazione dei satelliti rispetto l'orizzontale

Da figura 158 potrebbe sembrare esserci una incongruenza tra i satelliti acquisiti e la numerosità dei satelliti; in realtà è una impressione grafica e fa fede la numerosità dei satelliti (grafico verde) poiché se si zoomma sulla figura relativa ai satelliti acquisiti se ne osserva la presenza.

Come si può notare non vi è paragone con la qualità dei dati ottenuti con il ricevitore Samsung J6 per la medesima campagna di misura 4.

Una simile qualità delle osservabili si è riscontrata praticamente su tutte le campagne di misura effettuate.

### **Analisi delle osservabili con RTKPOST**

Con una qualità di dati così bassa, il processamento dei dati da RTKPOST non ha dato quindi risultati soddisfacenti.

Innanzitutto la combinazione SNR 30 +cut off 10° non forniva praticamente mai alcuna soluzione in nessuna campagna di misura; quindi si è proceduto con un lavoro di combinazioni tra SNR e angolo di elevazione tale da individuare quale fosse quella che desse dei risultati.

Con le campagne 3 e 4 non si sono avute soluzioni in nessuna combinazione possibile. Quei pochi risultati ottenuti si sono avuti nella campagna di misura 1 e 2 con SNR  $\geq 20$  ed angolo di elevazione 10° ma erano soluzioni relative solo ai primi 20 minuti di posizionamento, mentre per le campagne 5 e 6 si sono avute rispettivamente solo 28 soluzioni e 14 soluzioni totali (ogni soluzione è relativa ad una epoca di misura della durata di un secondo, quindi si sono risolti solo 28 secondi, o 14 secondi, su 1 ora di rilievo).

Tutto ciò non è paragonabile con la nuvola di soluzioni ottenute dal ricevitore smartphone Samsung J6 che offriva 1 soluzione al secondo per tutta l'ora di rilievo o quasi.

Per cui i risultati relativi al ricevitore Huawei e ottenuti con RTKPOST non sono stati ritenuti accettabili e per questo non riportati.

Quindi un paragone tra la precisione delle soluzioni delle varie campagne di misura effettuate tra i due smartphone non ha senso effettuarlo poiché non affidabile.

La ragione della bassa qualità del ricevitore Huawei P9 è sia intrinseca al ricevitore stesso nel senso che risulta oggettivamente più scadente del Samsung per la qualità di dati e di satelliti acquisiti e ciò è avvalorato dal fatto che nell'uso quotidiano dello smartphone, quando si attivava l'applicazione del navigatore satellitare o azionando Google Maps, il segnale faceva fatica ad essere ricevuto o spesso si perdeva lasciando l'utente in balia dei segnali stradali mentre con il Samsung J6 la stessa applicazione (Google Maps) risultava molto più affidabile.

A onor del vero va anche detto che durante le campagne di misura la batteria dello smartphone Huawei si surriscaldava abbastanza rapidamente (non accadeva invece per il Samsung) quindi lo smartphone in fase di surriscaldamento attiva delle procedure di autoprotezione che limitano le prestazioni tra cui quelle del ricevitore stesso. Quindi probabilmente anche per questo la qualità dei dati era scadente.



## 10. CONCLUSIONI

La tesi ha trattato il posizionamento GNSS di precisione in ambiente urbano tramite l'utilizzo di smartphones.

Dalla tesi si evince che con lo smartphone Samsung Galaxy J6, benché fornito di un ricevitore a ricezione di singola frequenza (L1) e multi-costellazione, le massime precisioni ottenute con posizionamento relativo (come stazione base si è usata la stazione permanente di Padova) sono dell'ordine dei  $2,5 \div 3$  metri; esse sono ottenibili solo se non si impone il fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase e infatti le migliori soluzioni sono state ottenute proprio con soluzioni 100% FLOAT (ossia ambiguità in virgola mobile).

Effettivamente durante il post-processamento il software RTKLIB non riusciva a fissare ad intero le ambiguità di fase in modo logico e ragionevole a causa della bassa qualità del ricevitore dello smartphone rispetto ad un ricevitore professionale: di conseguenza si sono rilevati dei dati acquisiti non ottimali e segnali disturbati da rumori dovuti alla qualità mediocre del ricevitore stesso tali da ostacolare o impedire il corretto fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase. Infatti se si forzava l'algoritmo a trovare obbligatoriamente degli interi da fissare, essi venivano fissati in modo casuale (poiché l'algoritmo non riusciva a stabilirli in modo logico) ed infatti le soluzioni di tipo FIX erano, seppur in bassa percentuale, molto ma molto più dispersive (sembravano letteralmente esplodere) rispetto alle soluzioni FLOAT che invece riuscivano ad avere una convergenza di risultati e di fatto dai grafici di posizionamento delineavano traiettorie di soluzioni nel tempo, nelle varie direzioni, abbastanza regolari o planimetrie di punti abbastanza concentrati.

Il fatto di avere soluzioni FIX così disperse influiva negativamente sulla standard deviation (ossia sulla precisione) della nuvola di soluzioni finali: si ricorda infatti che l'algoritmo era impostato per offrire in output una soluzione al secondo relativa a tutta l'ora di rilievo statico.

Riprocessando i dati ed impostando dalle opzioni “modalità di fissaggio ambiguità: OFF” si autorizzava il software ad ottenere soluzioni solo ad ambiguità non fissata ossia 100% FLOAT che sono risultate di gran lunga migliori delle soluzioni aventi un mix di soluzioni fissate ed altre float.

Quindi la prima conclusione è che con ricevitori di questo livello è meglio effettuare processamenti senza la ricerca del fissaggio ad intero dell'ambiguità di fase ma procedere con soluzioni totalmente float poiché generano precisioni migliori.

La seconda conclusione è che pur effettuando un posizionamento con due smartphones aventi caratteristiche tecniche simili, dello stesso budget economico, che montano entrambi sensori GNSS non professionali ma comunque in grado di ricevere sia segnali di codice che in singola frequenza L1 ed entrambi in grado di ricevere da multi-costellazioni si sono avuti risultati molto diversi: con il Samsung Galaxy J6 è possibile effettuare un posizionamento statico di precisione, analizzare i dati acquisiti, post processarli e si riesce sempre o quasi sempre ad avere una soluzione, invece con il Huawei P9 EVA-L09 i dati acquisiti risultano di una qualità peggiore, i segnali molto più rumorosi (SNR mediamente più bassi) tanto che si è faticato a trovare una combinazione tra SNR e angoli di elevazione che desse delle soluzioni ma purtroppo quelle poche soluzioni ottenute, qualora trovate,

non erano tali da renderle paragonabili a quelle ottenute col Samsung proprio perché il software non trovava soluzioni sufficienti.

Quindi smartphone dello stesso budget economico possono offrire prestazioni in termini di precisione di posizionamento molto differenti.

La terza conclusione è che tra posizionamenti effettuati di giorno e di sera, nella medesima condizione atmosferica, le prestazioni sono sostanzialmente simili o presentano differenze trascurabili per la precisione metrica degli smartphones.

Invece comparando i risultati ottenuti tra giornate nuvolose e giornate soleggiate, le giornate nuvolose tendono a generare soluzioni con precisione leggermente peggiori sia perché sono acquisiti meno satelliti, sia perché vi è maggiore umidità nell'aria (aumenta l'errore troposferico) e sia perché possono nascere interferenze elettrostatiche nel cielo (lampi e tuoni) che potrebbero potenzialmente deviare o aumentare il rumore/disturbo del segnale satellitare. Quindi questi tipi di ricevitori risultano più sensibili alle condizioni metereologiche nuvolose.

Di sicuro un surriscaldamento dello smartphone causato usura o da un uso intensivo della batteria oppure dal sole in cielo che picchia sul cellulare in stazione su una panchina scoperta, potrebbero provocare una diminuzione delle capacità del ricevitore GNSS con conseguente aumento del rumore che inficia sulla qualità del segnale satellitare che risulta quindi di qualità inferiore e perciò si avrà un peggioramento della prestazione in termini di precisione.

L'utilizzo di tali dispositivi in ambiente lavorativo potrebbe dunque essere relativo ad un ambito trasporti/navigazionale o logistico purché sia richiesta una precisione metrica e non centimetrica.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gurtner W., Mader G.: *Receiver Independent Exchange Format Version 2*, 1990
- [2] Cina A., Manzino A.M.: *Le stazioni permanenti GPS: caratteristiche e modalità di utilizzo*, 1999
- [3] Cina A., *GPS: principi, modalità e tecniche di posizionamento*, 2000
- [4] Cina A.: *Trattamento delle misure topografiche*, 2002
- [5] Manzino A. M.: *Stazioni permanenti GNSS in Italia: scopi usi e prospettive*, 2002
- [6] Carosio A., Cina A., Piras M.: *The robust Statistics method applied in the Kalman filter: theory and application*, 2005
- [7] Hofmann-Wellenhof: *Gnss: Global Navigation Satellite System*, 2008
- [8] Biagi L., *I fondamentali del GPS*, 2009
- [9] Dabove P., De Agostino M., Manzino A. M.: *Achievable positioning accuracies in a network of GNSS reference station*, 2012
- [10] Cina A., *Dal GPS al GNSS (Global Navigation Satellite System)*, 2014
- [11] Gandolfi S., Gusella L., Milano M.: *Precise point positioning: studio sulle accuratèzze e precisioni ottenibili*, 2005

## SITOGRAFIA

<https://spiegato.com/cose-un-loran>

<https://it.wikipedia.org/wiki/LORAN>

<https://it.abcdef.wiki/wiki/Loran-C>

[https://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System)

<https://www.gps.gov/>

[https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/what\\_is\\_gps](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/what_is_gps)

<https://www.gpsworld.com/launch-of-first-glonass-k2-satellite-postponed-until-2022/>

<https://www.astronautinews.it/2018/06/il-gps-global-positioning-system/>

[https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/gps](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/gps)

<https://www.settorezero.com/wordpress/i-ricevitori-gps-come-sono-cosa-sono-quali-sono-le-caratteristiche/>

<https://www.glonass-iac.ru/guide/index.php>

<https://www.fastweb.it/fastweb-plus/digital-magazine/come-funziona-glonass-l-alternativa-russa-al-gps/>

<https://www.avionews.it/item/1230437-nascera-una-nuova-stazione-glonass-in-brasile.html>

[https://www.outofbit.it/glonass-cose-funziona-approfondimento/#Cose\\_e\\_come\\_funziona\\_Glonass](https://www.outofbit.it/glonass-cose-funziona-approfondimento/#Cose_e_come_funziona_Glonass)

<https://www.astronomiamo.it/StrumentiAstronomici/Scheda-Lancio-Missione-Spaziale/ba876342-7fcf-45f1-b432-65a975190f1f>

[https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SDD\\_v1.1.pdf](https://galileognss.eu/wp-content/uploads/2020/08/Galileo-OS-SDD_v1.1.pdf)

ASI | Agenzia Spaziale Italiana : <https://www.asi.it/tlc-e-navigazione/galileo/>

<https://www.affarinternazionali.it/archivio-affarinternazionali/2019/02/galileo-punto-programma-spaziale/>

<https://www.difesaonline.it/evidenza/approfondimenti/galileo-il-gps-europeo-aggiornamento>

<https://www.telespazio.com/it/programmes/galileo>

<https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo>

<https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/faq#FOC>

<https://www.bbc.com/news/technology-16337648>

<https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>

<http://en.beidou.gov.cn/>

<https://www.astrospazio.it/2020/04/14/il-sistema-di-navigazione-beidou-e-le-sue-radici-europee-spazio-doriente/>

[https://www.ansa.it/sito/notizie/mondo/dalla\\_cina/2021/12/22/cina-completato-il-sistema-di-navigazione-satellitare-bds\\_1386ec1b-a92c-4ab3-b05a-a7896262b1f3.html](https://www.ansa.it/sito/notizie/mondo/dalla_cina/2021/12/22/cina-completato-il-sistema-di-navigazione-satellitare-bds_1386ec1b-a92c-4ab3-b05a-a7896262b1f3.html)

<https://it.topwar.ru/163170-kitajskaja-navigacionnaja-sistema-bjejdou-potesnit-gps.html>

<https://qzss.go.jp/en/index.html>

<https://topcardiofrequenzimetro.com/cose-il-qzss-e-a-che-cosa-serve/>

[https://www.wikiwand.com/en/Global\\_Positioning\\_System](https://www.wikiwand.com/en/Global_Positioning_System)

<https://www.gfoss.it/>

<https://www.navcen.uscg.gov/global-positioning-system-overview>

<https://3dmetrica.it/gps-nel-rilievo-topografico/>

<https://3dmetrica.it/sistemi-di-riferimento/>

<https://www.venetostoria.com/?p=2295>

<https://padovanet.it/informazione/prato-della-vallen>

<http://retegnssveneto.cisas.unipd.it/Web/index.php>

<https://www.ilmeteo.it/>