

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**I ricevitori GNSS mass market per il
monitoraggio di fenomeni franosi**



Relatore/i

prof. Ambrogio Maria Manzino

firma del relatore

.....

Candidato/i

Valentina Di Grazia

firma del candidato

.....

A.A.2017-2018

Indice

Indice delle tabelle	4
Introduzione.....	5
1. Principi di posizionamento GNSS.....	8
1.1. Organizzazione del sistema GPS	8
1.1.1. La sezione spaziale.....	8
1.1.2. La sezione di controllo	9
1.1.3. La sezione utenza.....	9
1.2. Il tempo GPS	9
1.2.1. Strutturazione del segnale GPS.....	10
1.2.2. Calcolo della posizione.....	11
1.2.3. Errori del sistema GNSS	12
1.3. Modalità di esecuzione delle misure	14
1.3.1. Utilizzo del GNSS in modo statico	14
1.3.2. Utilizzo del GNSS in modo cinematico, statico rapido e “realtime”	15
1.3.2.1. Procedure di posizionamento utilizzate nel lavoro di tesi (PPK e NRTK)	16
2. Sistema di monitoraggio GNSS	17
2.1. Monitoraggio mediante tecnologie ottiche o laser-scanner.....	21
2.2. Trattamento e analisi dei dati GNSS	23
2.3. Acquisizione e trasferimento dei dati geomatici di monitoraggio	24
3. La progettazione delle misure GNSS.....	25
3.1. Planning satellitare	25
3.1.1. Sezione Setting	26
3.1.2. Satellite Library	27
3.1.3. Number of satellites	29
3.1.4. Diluzione della precisione (DOPs)	30
4. Progettazione e realizzazione di un sistema di monitoraggio GNSS mediante ricevitore geodetico RUIDE S680P.....	33
4.1. Descrizione della prova.....	33
5. Utilizzo del software RTKLIB	35
5.1. Post-Processing con RTKPOST.....	36
5.2. Opzioni di calcolo post processing sul software	37
5.3. Osservazione e plottaggio dei risultati con RTKPLOT	43
5.4. Costruzione della verità di misura	44
5.5. Confronto tra le varie opzioni di posizionamento.....	46

5.6. Confronti planimetrici tra Post-processing e la verità	50
5.7. Confronto tra posizionamento in Real time, Post-processing completo di tutte le costellazioni e la verità	56
6. Acquisizione e trattamento dei dati di un sistema di monitoraggio GNSS “mass market” in post elaborazione.....	60
7. Progettazione del sistema integrato di monitoraggio, utilizzo di accelerometri e filtraggio delle accelerazioni.....	62
7.1. Sensori.....	62
7.1.1. Sensore di inclinazione	63
7.2. Filtraggio accelerazioni calcolate tramite il sistema di monitoraggio integrato.....	66
8. Conclusioni	72
ALLEGATI	75
Allegato 1- Configurazione del ricevitore RUIDE S680P.....	75
Allegato 2- Lettura record con solo la costellazione galileo	76
Allegato 3 –Lettura record del posizionamento real-time.....	77
Allegato 4- Filtraggio delle accelerazioni	78
Riferimenti bibliografici	80

Indice delle figure

Figura 1: Frane di Madonna del sasso, Ponte Val Fornazza e Re	6
Figure 2: Mappa dei siti interessati dal monitoraggio con ricevitori GNSS mass market.....	7
Figura 3: Sistema di monitoraggio realizzato a Madonna del Sasso	19
Figura 4: Sistema di monitoraggio con staffa e antenna GARMIN realizzato a Loreglia	19
Figura 5: Sistema di monitoraggio con staffa e antenna GARMIN realizzato a Loreglia e alimentato da un pannello fotovoltaico	20
Figura 6 : Centralina installata a Loreglia.....	21
Figura 7: Droni multi rotore e ad ala fissa	22
Figura 8: Planning online- Sky plot dei satelliti	26
Figura 9: Planning online-Setting	27
Figura 10: Planning online-Satellite Library	28
Figura 11: Planning online-Number of satellites	29
Figura 12: Planning online-DOPs	31
Figura 13: DOPs con solo la costellazione Galileo.....	32
Figura 14: Cut-off satellite	32
Figura 15: Posizionamento cinematico con slitta e ricevitore geodetico RUIDE S680P	34
Figura 16: Funzioni di libreria-RTKLIB	36
Figura 17: Main window –RTKPOST.....	36
Figura 18: Setting 1-Options-RTKPOST	38
Figura 19: Setting 2-Options-RTKPOST	39
Figura 20: Output-Options-RTKPOST.....	40
Figura 21: Positions-Coordinate base station-Options-RTKPOST.....	41
Figura 22: ricevitore geodetico multi frequenza e multi costellazione GPS, GLONASS e GALILEO Leica GRX1200 + GNSS	42
Figura 23: Coordinate e monografia della stazione TORI	43
Figura 24: Costruzione della verità	44
Figura 25: Confronto degli spostamenti in Est del ricevitore tra verità e post-processing con tutte le costellazioni.....	45
Figura 26: Confronto in altimetria tra post processing completo e verità	46
Figura 27: Confronto in direzione Est Tra Post processing completo di tutte le costellazioni, Post processing con solo la costellazione Galileo e la verità	50
Figura 28: Confronto in direzione Nord Tra Post processing complete di tutte le costellazioni e Post processing con solo la costellazione Galileo	51
Figura 29: Confronto delle differenze in EST e Nord Tra Post processing con solo Galileo e la verità	52
Figura 30: Confronto in altimetria tra post processing completo e verità	53
Figura 31: Differenze tra post processing completo e verità	54
Figura 32: Differenze tra post processing con solo la costellazione Galileo e verità	55
Figura 33: Confronto in direzione Est tra Real time ,post processing completo e verità	56
Figura 34: Differenza in direzione Est tra Real time e verità.....	57
Figura 35: Differenza in direzione Nord tra Real time, post processing completo e verità	58
Figura 36: Differenze in altimetria tra verità e real time	59
Figura 37: Varie procedure schedate in JIT scheduler per ogni stazione	60
Figura 38: Madonna del sasso punto B planimetria	61
Figura 39: Madonna del sasso punto B altimetria	61

Figura 40: Accelerometro triassiale	63
Figura 41: verifica planarità e ortogonalità del supporto meccanico per il test delle 6 facce.....	65
Figura 42: calibrazione inclinometro 4030 – misure sulle 6 facce	65
Figura 43: Accelerazioni nelle tre direzione (X, Y, Z) dopo la mediana mobile	66
Figure 44: Filtro low pass di Lancos	68
Figure 45: Variazioni rispetto alla verticale dopo aver applicato la mediana e dopo aver applicato il filtro low pass. In basso la variazione della temperatura con il tempo(120 secondi)	69
Figure 46: Deviazioni rispetto alla verticale grezze e filtrate (mediana mobile più low pass). Tempo di misura di circa 12 ore.....	70
Figura 47: Cross-correlation tra accelerazioni e temperatura	71
Figure 48: Configurazione rete wireless	75
Figure 49 : Configurazione rete wireless (indirizzo IP).....	75

Indice delle tabelle

Tabella 1: Precisione degli orologi satellitari e dei ricevitori	13
Tabella 2: Precisioni effemeridi broadcast e effemeridi precise.....	13
Tabella 3: differenze medie e deviazioni standard tra verità e post processing con solo Galileo e tra verità e post processing con tutte le costellazioni.....	53
Tabella 4: Differenze medie e deviazioni standard in altimetria tra verità e post processing con tutte le costellazioni e verità e post processing con solo la costellazione Galileo.....	55
Tabella 5: Differenze medie e deviazioni standard in Est tra verità e real time e tra verità e post processing con tutte le costellazioni	57
Tabella 6: Differenze medie in Nord tra verità e real time e tra verità e post processing con tutte le costellazioni.....	58
Tabella 7: differenze medie e deviazioni standard in altimetria tra verità e real time e tra verità e post processing con tutte le costellazioni	59
Tabella 8: Confronto dei risultati delle tre opzioni di posizionamento.....	73
Tabella 9: Confronto della deviazione standard tra accelerazioni grezze e filtrate	74

Introduzione

Nel corso della tesi ho seguito attivamente un progetto di ricerca tra il DIATI del politecnico di Torino e il CSI che prevede il monitoraggio con sensori di frane di tipologie diverse e con tecniche geomatiche diverse a basso costo ed integrate fra loro in base alle caratteristiche e alla dinamica dei fenomeni (Figura 1: Frane di Madonna del sasso, Ponte Val Fornazza e Re

Si riportano di seguito le caratteristiche principali dei 5 fenomeni franosi oggetto di studio:

- La frana di **Loreglia** manifesta scivolamenti rotazionali di tipo profondo.
- La frana di **Ponte Val Fornazza** si compone di due diversi cinematismi: crolli rimobilizzazioni di materiale.
- Il fenomeno franoso di **Madonna del Sasso** di tipo granitico.
- La frana di **Crodo** si compone anch'essa di due cinematismi: crolli e rimobilizzazioni di materiale.
- La frana di **Re** situata in depositi glaciali.

Le tecnologie “mass market” sono nuove tipologie di misura utilizzate anche nel monitoraggio di movimenti e deformazioni e in particolare nei fenomeni franosi.

L'utilizzo di questa strumentazione rappresenta una nuova opportunità di misura nel campo del monitoraggio, ed è l'oggetto di studio della seguente tesi.

A questa strumentazione viene affiancata la fotogrammetria e il LiDAR, che permettono un rilievo “estensivo” dell'area da monitorare, consentendo anch'essi delle soluzioni low cost. In particolare, alcuni sensori di limitato ingombro e peso possono essere installati anche sui recenti velivoli senza pilota detti droni o UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o anche UAS.

Inoltre i fenomeni franosi devono essere monitorati in tempo reale, e ciò deve avvenire con elevata efficienza e velocità. Questo risulta essere un problema nel caso di siti franosi in zone di montagna dove non è presente la connessione di rete.

Affinchè l'attività di monitoraggio si svolga al meglio, è necessario effettuare:

- 1) La materializzazione di punti stabili per le operazioni di telerilevamento (fotogrammetria, LIDAR, misure da stazione totale); per le campagne di misura periodiche e l'elaborazione può essere fatta a posteriori.
- 2) L'installazione sul terreno di sensori integrati, solidali al terreno; per le misure in tempo reale.



Figura 1: Frane di Madonna del sasso, Ponte Val Fornazza e Re



Figure 2: Mappa dei siti interessati dal monitoraggio con ricevitori GNSS mass market

Prima di descrivere il funzionamento di tale strumentazione a basso costo è necessario spiegare le caratteristiche principali del posizionamento GNSS; in particolare com'è strutturato e i suoi vantaggi:

1. Principi di posizionamento GNSS

Per GNSS, la cui denominazione completa è “Global Navigation Satellite System”, si intende l'insieme delle costellazioni GPS, Glonass, Beidou, Galileo, QZSS.

Il sistema di navigazione GNSS consente di effettuare il posizionamento di punti terrestri grazie all'emissione di segnali radio da una costellazione di satelliti artificiali.

Parleremo in seguito della prima costellazione che è stata disponibile anche per scopi civili, cioè della costellazione “NAVSTAR GPS” (Global positioning System).

1.1. Organizzazione del sistema GPS

La costellazione di satelliti cui il sistema fa riferimento è costituita da 31 satelliti, progettata in modo da renderne visibili almeno 4 contemporaneamente, da ogni punto della superficie terrestre, in ogni ora del giorno e della notte.

Il posizionamento che si ottiene con il sistema GPS è tridimensionale, quindi contemporaneamente planimetrico e altimetrico.

Il GPS è un sistema abbastanza complesso costituito da tre sezioni con caratteristiche differenti (sezione spaziale, di controllo e dell'utenza).

1.1.1. La sezione spaziale

E' costituita, come anticipato, dalla costellazione di satelliti NAVSTAR; il programma della NASA consta di 31 satelliti (vita media 7-8 anni). Il numero massimo di satelliti è legato alla posizione degli stessi nelle orbite e al tipo di codifica di trasmissione dei dati.

Oltre al suddetto sistema GPS americano esiste il sistema satellitare russo GLONASS, il quale è costituito da una costellazione di 14 satelliti contemporaneamente visibili sull'orizzonte. Le caratteristiche dei GLONASS e dei GPS sono molto simili anche se in questi ultimi l'inclinazione dell'orbita sull'asse polare è maggiore, ciò garantisce una migliore copertura delle regioni a latitudine elevata. I due sistemi sono inoltre elettronicamente compatibili, infatti è possibile usare un ricevitore GNSS con un'unica antenna.

I satelliti GPS orbitano ad una distanza dalla Terra di 20.200 km circa, alla quale non risentono molto delle anomalie del campo gravitazionale. Sono posizionati su 6 piani orbitali intervallati di circa 60 gradi sessagesimali.

Il periodo di rivoluzione attorno alla Terra per la costellazione GPS è di 12 ore siderali, corrispondenti a 11h 56', per cui i satelliti si presentano ogni giorno con 4 minuti di anticipo rispetto al giorno precedente.

I satelliti trasmettono a terra dati contenenti un segnale di tempo, le proprie effemeridi orbitali (ovvero i parametri per il calcolo delle coordinate $X_s(t)$, $Y_s(t)$, $Z_s(t)$), e informazioni varie quali il proprio numero di identificazione, lo stato di salute, ecc.

Il sistema satellitare è in grado di:

- Trasmettere dei segnali radio;
- Avere un riferimento temporale molto preciso, poiché presentano 4 orologi atomici (2 al Cesio e 2 al Rubidio);
- Acquisire e memorizzare le informazioni emesse dal segmento di controllo;
- Effettuare eventuali correzioni d'orbita.

1.1.2. La sezione di controllo

Si tratta del sistema di controllo da terra dei satelliti e delle informazioni da questi trasmesse. È composto essenzialmente da Stazioni fisse chiamate “*tracking*”, disposti in punti fissi nella fascia equatoriale della Terra. Le stazioni di tracking presentano una buona capacità di ricezione del segnale emesso dai satelliti, consentendo così un continuo tracciamento degli stessi.

1.1.3. La sezione utenza

I ricevitori GPS consentono la ricezione, elaborazione e memorizzazione dei dati ricevuti. Elemento essenziale di questi ricevitori è l'antenna che viene fissata su un treppiede o su un pilastrino.. L'antenna è collegata mediante un cavo schermato al ricevitore.

1.2. Il tempo GPS

Il tempo GPS, al momento della nascita e attivazione del sistema, corrispondeva esattamente al tempo UTC (tempo universale coordinato), cioè al tempo medio solare misurato sul meridiano di Greenwich.

A causa del rallentamento della velocità di rotazione della terra, oggi questa corrispondenza non c'è più, attualmente la scala dei tempi GPS è traslata in avanti di 18 secondi.

La precisione del posizionamento è garantita dal fatto che tutte le componenti del segnale sono controllate dagli orologi atomici a bordo dei satelliti e da quelli delle stazioni di controllo che verificano la stabilità del tempo GPS.

In particolare, sui satelliti GPS sono presenti 2 orologi al Cesio e 2 al Rubidio con stabilità dell'ordine di 10^{-12} e 10^{-13} .

1.2.1. Strutturazione del segnale GPS

I satelliti generano in particolare la *frequenza fondamentale*, ovvero $f_0 = 10.23$ MHz.

Tutti i dati sono trasmessi mediante un codice binario modulato su due frequenze portanti radio (i cui valori sono, rispettivamente: $f_1 = 1575$ MHz = $154 f_0$ e $f_2 = 1228$ MHz = $120 f_0$, corrispondenti alle lunghezze d'onda $\lambda_1 = 19$ cm e $\lambda_2 = 24$ cm).

I codici usati nella trasmissione sono tre: il codice C/A (“*coarse acquisition*”, ovvero “acquisizione grezza”) e il P (“*precision*”, consente una precisione maggiore), con frequenza di modulazione rispettivamente pari a circa 1.023 e 10.23 MHz (cioè a $f_0/10$ e f_0). Infine vi è il messaggio navigazionale di frequenza $f_D = 50$ Hz.

Il segnale è quindi composto di tre parti fondamentali:

- *componente portante* : L1 ($\lambda = 19$ cm) e L2 ($\lambda = 24$ cm)
- *componente impulsiva*: C/A ($\lambda = 300$ m) e P ($\lambda = 30$ m)
- *componente navigazionale*: D

Le onde portanti L₁ e L₂ sono modulate secondo i codici C/A e P. Il primo è diverso per ciascun satellite per permetterne l'identificazione, è disponibile per uso civile mentre il secondo è riservato per uso militare e ad altri utenti autorizzati. Entrambi sono codici-binari generati da un complesso algoritmo di calcolo che si ripete nel tempo ogni millisecondo per C/A ed ogni settimana per P. Il codice D contiene i dati relativi alla posizione (effemeridi), allo stato di salute del satellite e agli orologi di bordo.

In base alla diversa acquisizione dei segnali, i ricevitori GPS si classificano in:

- a) Ricevitore a “misura di codice”: acquisiscono solo il codice C/A;
- b) Ricevitori a “misura di fase/singola frequenza”: acquisiscono oltre al codice C/A, anche la portante L1.
- c) Ricevitori “geodetici” acquisiscono C/A, P, L1, L2 e più di una costellazione.

Il nostro progetto utilizzerà ricevitori “mass market”, cioè di basso costo di tipologia b).

1.2.1.1. Effemeridi dei satelliti

Le effemeridi sono trasmesse per mezzo del messaggio navigazionale D che contiene anche altre informazioni: magnitudine, parametri orbitali, coordinate di satelliti, distanza satellite-ricevitore. Le costellazioni GPS, Galileo e BeiDou, utilizzano effemeridi con parametri Kepleriani, ma ciò vale nel caso ideale in cui il satellite si trova in un punto non disturbato da radiazioni solari (vale la legge di Keplero). Nella realtà il satellite è influenzato da perturbazioni che occorre tener conto e che vengono modellate e trasmesse in messaggi contenuti nelle effemeridi.

Il ricevitore deve essere in grado di memorizzare le effemeridi e i file di osservazione, in modo da poter fare un calcolo della posizione in tempo reale. Vengono memorizzati in diversi formati, ma possono essere convertiti in un formato RINEX (formato ASCII leggibile con qualsiasi editor di testo in cui è possibile vedere i numeri memorizzati).

Si fa una distinzione tra:

- *File di navigazione*: Contengono le effemeridi (in 4 colonne, per ogni satellite, datate per un certo anno, mese, giorno ed ora) e dei parametri che mi danno informazioni sulla ionosfera e parametri di correzione degli orologi. È riportato inoltre il “LEAP seconds” che è la differenza tra il tempo UTC e quello GPS. Le effemeridi sono valide per 4 ore e poi aggiornate e controllate da un sistema di controllo a terra
- *File di osservazione*: Contengono le effemeridi (4 colonne). Nella prima colonna vi sono gli pseudorange sulla prima frequenza (P_1). Nella seconda colonna vi è la fase sulla prima frequenza (L_1), nella terza colonna vi sono gli pseudorange sulla seconda frequenza (P_2), sull’ultima colonna vi è la fase sulla seconda frequenza (L_2). I file di osservazione non contengono informazioni sulla ionosfera o sulla correzione degli orologi

1.2.2. Calcolo della posizione

Conoscendo le coordinate dei satelliti nell’istante in cui emettono il segnale e misurando le distanze tra 4 satelliti e il ricevitore è possibile effettuare il posizionamento di punti terrestri.

Le misure GPS possono essere:

- *Statiche*: il ricevitore rimane sul punto per un certo tempo
- *Cinematiche*: il ricevitore è in continuo movimento

Il posizionamento può essere eseguito:

- *In post elaborazione*: vengono elaborati i dati dopo l’acquisizione nelle varie stazioni
- *In tempo reale*: le coordinate del punto sono disponibili direttamente al momento del rilievo

Le modalità di misura possono essere:

- *Misure di codice*: solo sulla componente impulsiva del segnale
- *Misura di fase*: sulle onde portanti del segnale.

Supponendo che il satellite emetta un segnale al tempo t e che viene ricevuto ad un tempo T da un ricevitore. Se conoscessimo l’intervallo di tempo ΔT tra il segnale trasmesso e il segnale ricevuto, potremmo conoscere (moltiplicando questo intervallo per la velocità della luce c) la distanza tra satellite e ricevitore. Detto ciò conoscendo almeno quattro distanze da quattro satelliti al ricevitore che riceve contemporaneamente quattro segnali, e conoscessimo la posizione dei satelliti nell’istante in cui emettono questo segnale, potremmo conoscere la posizione (X,Y,Z) del ricevitore. Il problema consiste nel conoscere tale intervallo , poiché ammesso che tutti i satelliti abbiano la stessa scala dei tempi, il ricevitore non avrà la stessa scala dei tempi (poiché gli orologi sono diversi). Quindi otteniamo una distanza satellite-ricevitore (range) a meno di un errore τ_r (errore dell’orologio). Quindi non si ha una distanza ma una *pseudodistanza o pseudorange*:

$$P_r^j = \rho_r^j - c\tau_r$$

Potremmo scrivere quindi 4 equazioni di pseudodistanza, dove il pedice indica il ricevitore, l'apice il satellite.

Tutto ciò si basa sul rispetto delle ipotesi:

- *Si conosce la posizione dei satelliti in ogni istante*; Tutto è basato su un sistema di riferimento globale, uguale per ogni satellite.
- *Tutti i satelliti emettano il segnale nello stesso istante di tempo*; e che questo segnale sia continuo. I satelliti emettono il segnale allo stesso istante ma questo arriva al ricevitore in tempi diversi poiché ogni satellite presenta una distanza diversa dal ricevitore.

1.2.3. Errori del sistema GNSS

Tuttavia tali distanze tra satelliti e ricevitori possono essere affette da diversi errori che possono essere: *errori accidentali di misura, errori sistematici o di modello, errori di osservazione.*

1. **errori accidentali di misura**: sono stimati come 1 % della lunghezza d'onda. Ciò porta a precisioni diverse in funzione della tipologia di codice ricevuto.
 - codice C/A: +/- 3m
 - codice P: +/- 0.3 m
 - portanti L1 e L2: +/- 2mm
2. **errori sistematici o di modello**: consistono in:
 - **errori di orologio**: sono dovuti agli orologi dei satelliti e dei ricevitori; sono relativi ad una traslazione temporale dell'origine dei tempi rispetto ad un riferimento ideale (Tabella 1: Precisione degli orologi satellitari e dei ricevitori)
 - **errori di orbita** : Ciò riguarda le effemeridi dei satelliti. Queste possono essere note con precisione diversa secondo che si tratti di :
 - *effemeridi trasmesse(broadcast)*: vengono calcolate nelle stazioni di controllo e inviate ai satelliti e hanno precisione di decine di metri.
 - *effemeridi "precise"*: sono calcolate a posteriori e hanno precisione metrica (Tabella 2: Precisioni effemeridi broadcast e effemeridi precise).

Questi errori si manifestano proprio sulle distanze tra satellite e ricevitore. E vengono compensati se il posizionamento è eseguito in maniera relativa o differenziale.

	Precisioni orologi
satellite	± 5-10m
ricevitore	± 10-100m

Tabella 1: Precisione degli orologi satellitari e dei ricevitori

	Precisioni effemeridi
broadcast	$\pm 20\text{-}40\text{m}$
precisi	$\pm 3\text{-}5\text{m}$

Tabella 2: Precisioni effemeridi broadcast e effemeridi precise

- Rifrazione troposferica: è dovuta alla troposfera (parte inferiore dell'atmosfera compresa tra la superficie della terra e un'altezza di circa 40 km) che provoca un ritardo del segnale per cui la misura della distanza risulta più lunga. Il ritardo troposferico è indipendente dalla frequenza ed è dunque identico per le portanti L1 e L2. Dipende dai parametri atmosferici (contenuto di vapore acqueo, temperatura e pressione) e dall'angolo di elevazione del satellite rispetto all'orizzontale.

Per angoli di elevazione dei satelliti rispetto all'orizzontale minori di 15° l'errore aumenta in maniera esponenziale. Per questo motivo è consigliabile non acquisire dati prima che i satelliti abbiano raggiunto tale elevazione sull'orizzonte (angolo di cut-off)

-Rifrazione troposferica $\pm 2\text{-}10\text{ m}$

- Rifrazione ionosferica: gli errori legati alla rifrazione della ionosfera (parte superiore dell'atmosfera, compresa tra un'altezza di 40 km fino a circa 1000 km) dipendono dalla frequenza utilizzata e sono quindi diversi per le portanti L1 e L2. L'effetto della rifrazione ionosferica provoca un ritardo del segnale modificando la distanza satellite-ricevitore. Anche questi vengono compensati facendo misure differenziali.

In particolare per quanto riguarda l'effetto della rifrazione atmosferica fino a distanze inferiori a 15 km è possibile utilizzare ricevitori a singola frequenza, per distanze superiori è necessario utilizzare ricevitori a doppia frequenza che consentono di valutare il ritardo del segnale.

-Rifrazione ionosferica $\pm 20\text{-}50\text{m}$

3. Errori di osservazione

- Multipath (errore di multipercorso): si ha quando parte del segnale arriva all'antenna in maniera indiretta, tramite riflessione da parte di superfici vicine. Si può ridurre usando antenne particolari (choke ring).

-Multipath $\pm 0.5\text{m}$

- Variatione della posizione del centro di fase dell'antenna: il centro di fase dell'antenna rappresenta il punto teorico alla quale si fa riferimento per il calcolo della posizione. E' un punto elettronico e non meccanico; varia in funzione della frequenza (es. il centro di fase della L1 può non coincidere con quello della L2) e dell'elevazione del satellite. E' in generale un errore di piccola entità da non sottovalutare per il posizionamento di elevata precisione.

-Centro di fase dell'antenna $\pm 0.01-0.02\text{ m}$

- Interferenze elettromagnetiche: sono dovute alla presenza di eventuali segnali elettromagnetici che possono interferire con il segnale GNSS e causare un aumento del disturbo del segnale.

-Interferenze elettromagnetiche $\pm 1\text{m}$

1.3. Modalità di esecuzione delle misure

Possono essere utilizzate diverse modalità di posizionamento; quelle maggiormente utilizzate sono : il posizionamento statico, cinemático e lo “stop and go”.

1.3.1. Utilizzo del GNSS in modo statico

Il GNSS statico è il metodo più “sicuro” e più frequentemente adottato, specie quando le esigenze di precisione sono elevate ed i punti da determinare sono più importanti. Il metodo consiste nell'eseguire sessioni di misura di una certa durata (da un minimo di 30 min. ad alcune ore) con i ricevitori fissi sugli estremi delle “baselines” da determinare. Le stesse vengono determinate mediante la soluzione “alle differenze triple” ed è necessario ricevere almeno quattro satelliti e non perdere il contatto con essi durante il posizionamento.

Gli accorgimenti da adottare nel posizionamento statico variano a seconda della lunghezza delle basi: per quelle sino a qualche decina di chilometri sono in genere sufficienti ricevitori a singola frequenza e sessioni di durata dell'ordine di 1 ora.

Per basi più lunghe si richiedono ricevitori in doppia frequenza che permettono di compensare gli errori e migliorare la precisione ma le sessioni di misura saranno più lunghe (alcune ore). Per “baselines” di estrema lunghezza (è possibile raggiungere e superare i 1000 km).

Con il GNSS statico si effettuano le misure geodetiche , cioè determinazione di punti isolati o blocchi di punti. Tale posizionamento è da preferire alle tecniche topografiche classiche, sia in termini di precisione che di tempo e di costo. Le “baselines” misurate vengono a formare reti analoghe a quelle trigonometriche, che possono essere così compensate.

1.3.2. Utilizzo del GNSS in modo cinematico, statico rapido e “realtime”

Il GNSS cinematico consiste nel tenere fisso uno dei due ricevitori (“master”) e nel dare spostamenti al secondo (detto “rover”) ed eseguendo un posizionamento a intervalli di tempo regolari. Tale metodo è impiegato in particolare per rilievi di dettaglio. A differenza del posizionamento statico la precisione è normalmente inferiore, ma comunque sufficiente per quasi tutte le applicazioni topografiche.

Il metodo statico rapido è una variante del metodo cinematico, dove il rover viene tenuto fermo per qualche istante. Nel caso del GNSS cinematico (o statico rapido: le due varianti sono identiche dal punto di vista del calcolo) non è possibile ottenere la soluzione con le equazioni alle differenze triple, perché i ricevitori non sono fissi e cadono le ipotesi fatte precedentemente. E’ quindi necessario determinare l’ambiguità iniziale N (non potendola eliminare dalle equazioni).

Nel GNSS cinematico (o statico rapido) è comunque necessario non perdere mai il contatto con i satelliti (se ciò avviene, occorre interrompere il rilevamento e rideterminare un nuovo valore dell’ambiguità N). Ciò costituisce purtroppo una limitazione operativa, che rende il metodo difficilmente applicabile in zone particolari con presenza di vegetazione.

Oltre ai tre principali modi di posizionamento descritti, esistono altre possibili modalità operative quale ad esempio il “*real-time*”.

Questa tipologia di posizionamento è comunemente indicata con l’acronimo RTK (Real Time Kinematic, cioè posizionamento cinematico in tempo reale).

Questo posizionamento è utilizzato di recente a seguito del miglioramento della tecnologia GNSS..

Mentre le procedure di rilevamento cinematico prevedono l’elaborazione dei dati per il posizionamento in ufficio, la procedura RTK prevede la determinazione della posizione di ciascun punto direttamente in sito in tempo reale, cioè al momento stesso in cui il punto da determinare viene occupato dal ricevitore mobile.

Il metodo prevede l’utilizzazione di ricevitori a doppia frequenza, dove il ricevitore fisso (posizionato su un punto di posizione nota) comunica la sua posizione ed i dati satellitari al ricevitore mobile, che è in grado così di calcolare in tempo reale la sua posizione rispetto al ricevitore fisso.

Questa tipologia di posizionamento è molto utile quando si vuole accorciare i tempi di misura, ad esempio quando si effettua il picchettamento o il tracciamento.

1.3.2.1. Procedure di posizionamento utilizzate nel lavoro di tesi (PPK e NRTK)

Nel lavoro di tesi sono state eseguite due procedure per il posizionamento. La prima è l'NRTK (Network RTK); in cui si ha a disposizione di un solo ricevitore (rover) che riceve la correzione RTCM da una rete di stazioni permanenti GNSS mediante una connessione al sito web della rete e acquisisce la correzione mediante un protocollo di comunicazione denominato Ntrip. Il ricevitore invia alla rete la propria posizione (mediante un messaggio NMEA) e la rete risponde inviando al ricevitore una correzione che consente di ottimizzare la sua posizione.

La seconda procedura utilizzata è il post processing cinematico (PPK). Tale procedura si basa sempre sul tenere il "master" fisso e muovere il "rover". Dopo aver scaricato tramite web i dati sia del rover e sia della stazione permanente TORI, questi dati grezzi sono stati rielaborati in ufficio tramite il software RTKLIB. Quindi con tale procedura i dati sono stati rielaborati in ufficio e non in "real time".

2. Sistema di monitoraggio GNSS

Il sistema di monitoraggio seguito nella tesi si può considerare una “*stazione semi permanente GNSS (SSP)*”, integrata con dei sensori inclinometrici low cost per misure di accelerazione. Il sistema così costruito (Figura 3) oltre ai sensori è dotato di acquisizione e trasmissione dei dati, alimentazione autonoma e l'individuazione visiva per riprese LiDAR e fotogrammetriche. In particolare:

- Ogni strumento è di dimensioni piccole ed è composto da un ricevitore low cost (circa 70 euro- u-blox) in grado di tracciare le costellazioni GPS e GALILEO e idoneo a trasmettere e memorizzare i dati di codice e di fase sulla prima frequenza.
- Sensori inclinometrici o accelerometri triassiali per rilevare le accelerazioni nelle tre direzioni (anch'essi di basso costo , circa 80 euro).
- Sensori di temperatura, pressione e umidità, per questi si rimanda al capitolo 7. I sensori di temperatura vengono di solito integrati con i sensori inclinometrici.

Tali strumenti sono integrati all'interno di un sistema composto da un microcomputer, un sistema di batterie ricaricabili, una alimentazione a celle solari per caricare le batterie e dotato di un sistema di trasmissione dati internet in tempo reale e per lo scaricamento dei dati per il post processing;

l'apparecchiatura è ospitata in un box di dimensioni contenute che garantisce una adeguata protezione all'acqua e alla polvere e ne permette il funzionamento in condizioni termiche particolari, anche in alta montagna;

Il sistema di fissaggio è di tipo topografico, con installazione della SSP posizionata o su pilastro di cemento armato o altra tipologia di caposaldo.

Prima della materializzazione presso le zone di frana, il sistema è stato testato e tarato presso i laboratori del Politecnico di Torino, per poter verificare l'accuratezza e le prestazioni del sistema.

La tecnica di verifica consiste nel confrontare i risultati delle misure con spostamenti e rotazioni note, imposte con precisione tramite strumentazioni meccaniche realizzate presso il DIATI. Esse permettono di:

- dare rotazioni ad un sistema GNSS multi antenne o IMU o inclinometro, misurate con un teodolite di precisione.
- dare spostamenti millimetrici all'antenna di un ricevitore GNSS su di una “slitta” graduata.

Nel caso del rilievo con drone o scansioni LiDAR, le SSP saranno riconoscibili grazie ai marker posti sulle antenne e usate come punti di appoggio a terra.

Nel corso del progetto che ho seguito sono state realizzate 5 stazioni semipermanenti che sono attualmente state installate su 3 frane da monitorare. La diversità dei fenomeni di dissesto ha portato a considerare varie soluzioni di monitoraggio per ogni frana (Tabella 1: sintesi delle modalità di monitoraggio sui casi studio

<i>sito</i>	<i>tecnica</i>	<i>materializzazione</i>	<i>tempistica</i>
<i>Madonna del Sasso</i>	<i>GNSS+inclinometro Fotogrammetria Misure terrestri</i>	<i>5 pilastrini preesistenti 6 marker</i>	<i>Tempo reale e PP GNSS, periodica con campagne di misura</i>
<i>Loreglia</i>	<i>GNSS+inclinometro</i>	<i>2 punti su staffa</i>	<i>Tempo reale e PP GNSS</i>
<i>Crodo</i>	<i>GNSS+inclinometro</i>	<i>1 pilastrino preesistente</i>	<i>Tempo reale e PP GNSS</i>
<i>Ponte Val Formazza</i>	<i>fotogrammetria</i>	<i>Marker corpo frana</i>	<i>Dopo ogni campagna di misura</i>
<i>Re</i>	<i>fotogrammetria</i>	<i>Marker corpo frana</i>	<i>Dopo ogni campagna di misura</i>

Tabella 1: sintesi delle modalità di monitoraggio sui casi studio

Sul sito di *Madonna del Sasso*, per l'osservazione dei movimenti dove è situato il Santuario sono stati installati:

- 2 pilastrini in prossimità del Santuario per lo stazionamento con strumentazione topografica;
- 3 pilastrini sull'estremità della rupe con attacco a baionetta per il posizionamento dei prismi. Ne sono stati occupati 2 con supporto per antenna GNSS e accelerometro mentre il terzo è stato inserito nella rete topografica di controllo.
- Marker tassellati su manufatti stabili, per le riprese fotogrammetriche.

In prossimità dei supporti per antenna GNSS e accelerometro sono state installate le centraline con i sensori GNSS, temperatura umidità, acquisizione dati e trasmissione.

Il sistema è operativo e trasmette dati sia sulla piattaforma SDP della Regione Piemonte, sia al centro elaborazione presso il Politecnico di Torino (Figura 3).



Figura 3: Sistema di monitoraggio realizzato a Madonna del Sasso

A Loreglia il sistema di monitoraggio prevede l'utilizzo di una staffa e un'antenna GARMIN. In particolare sono stati installati due sistemi, uno posizionato ad una altezza minore alimentato da una centralina (Figura 4) ed un altro posizionato ad un'altezza maggiore alimentato da pannelli fotovoltaici (Figura 5).



Figura 4: Sistema di monitoraggio con staffa e antenna GARMIN realizzato a Loreglia



Figura 5: Sistema di monitoraggio con staffa e antenna GARMIN realizzato a Loreggia e alimentato da un pannello fotovoltaico

Anche per questo sistema di monitoraggio realizzato a Loreglia sono state installate le centraline con i sensori GNSS, temperatura umidità, acquisizione dati e trasmissione (Figura 6).

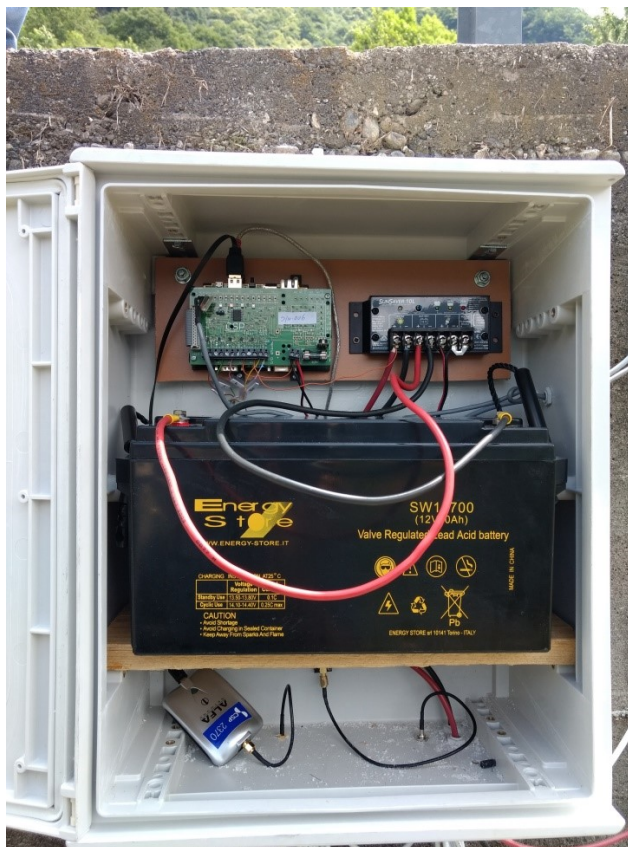


Figura 6 : Centralina installata a Loreglia

2.1. Monitoraggio mediante tecnologie ottiche o laser-scanner

Le tecniche ottiche basate sulla fotogrammetria, nonostante non siano oggetto della presente tesi, devono essere anch'esse di basso costo e di pratico utilizzo. Oggi in particolare è molto diffuso l'utilizzo di UAV come mezzi di trasporto di strumentazione geomatica e acquisizione dati.

Oltre alle misure fotogrammetriche, è possibile acquisire nuvole di punti mediante sistemi LiDAR. Esistono già sistemi commerciali da montare su UAV in grado di svolgere questo tipo di acquisizione, ma i costi sono ancora molto elevati .

Le potenzialità di questa tecnologia sono elevate, in particolare i sistemi UAV consentono di acquisire dati anche senza dover necessariamente accedere al corpo frana, in quando consentono di lavorare ad una certa distanza tra velivolo e oggetto del rilievo (Figura 7).



Figura 7: Droni multi rotore e ad ala fissa

Le tecniche disponibili con UAV possono essere di tipo ottico o LiDAR. La tecnica ottica ha come obiettivo il monitoraggio del fenomeno dinamico di frana in modo:

- completo: le osservazioni puntuali fatte sui vertici GNSS vengono estese su aree più ampie ottenendo delle nuvole dense di punti.
- multitemporale: acquisizione e post-processing devono permettere di ottenere un campo di spostamenti e deformazioni per tutta la superficie analizzata con possibilità di ripetizione della misura ad intervalli di tempo regolari.
- tridimensionale: il campo di spostamenti e deformazioni devono essere tridimensionali.
- corretto: Le misure effettuate devono avere una certa accuratezza e attendibilità, anche in presenza di luoghi avversi (per esempio presenza di vegetazione).
- potenzialmente automatico: per quanto riguarda l'acquisizione, trasmissione dati e elaborazione. .

L'utilizzo di tale strumentazione richiede inoltre una calibrazione dei vari sensori:

- la calibrazione fotogrammetrica della camera da presa che verrà realizzata in laboratorio su opportuno poligono di calibrazione;
- la calibrazione del sistema di navigazione, realizzato mediante opportuno poligono, per la determinazione delle eccentricità tra il centro di fase dell'antenna GNSS e il centro di presa della camera digitale.

Un altro aspetto importante è legato alla realizzazione dei punti di appoggio (GCP, Ground Control Point) necessari in una applicazione fotogrammetrica di precisione se si definiscono i centri di presa con precisione centimetrica.

Tale procedura è stata utilizzata per la frana di *Ponte Val Formazza*, che si estende per circa 1 km con un dislivello di circa 600 m, sulla quale sono stati posti marker per appoggio fotogrammetrico.

In tale procedura sono stati materializzati diversi punti, per individuare la posizione iniziale "zero".

2.2. Trattamento e analisi dei dati GNSS

Gli strumenti GNSS basso costo, così come sensori di accelerazione e inclinometri non sono dotati di memoria interna. A questi si è ovviato con un micro PC di caratteristiche adeguate che memorizza i dati con modalità tipo *ring-buffer*, cioè con la cancellazione automatica dei dati meno recenti in caso dell'esaurimento dello spazio nel disco. Tale micro PC è indispensabile anche per la gestione e il trasferimento dati dai vari sensori, per eseguire programmi di acquisizione dati GNSS come quello open source RTK-LIB o eseguire se necessario elaborazioni direttamente in sito.

Le tecniche di elaborazione dei dati GNSS si basano su cinque punti fondamentali descritti di seguito:

- 1) Acquisizione automatica dei dati dei ricevitori singola frequenza (ublox);
- 2) Impacchettamento giornaliero dei dati . Il formato RINEX è quello standard utilizzato per la post elaborazione. In tempo reale i dati vengono raccolti in uno stream secondo il formato RTCM che contiene correzioni o misure grezze;
- 3) Acquisizione dei dati delle stazioni master reali o virtuali per il post processing;
- 4) Post processing automatico delle stazioni rover con le corrispondenti stazioni master;
- 5) Invio automatico di un report dei risultati del post processing

Per quanto riguarda il primo punto è necessario scegliere quale costellazione tracciare in funzione del possibile e rapido miglioramento delle diverse costellazioni e per una migliore compatibilità del fissaggio delle ambiguità dei software. La soluzione adottata è stata quella di scegliere le costellazioni GPS e Galileo.

L'impacchettamento giornaliero dei dati potrebbe non solo portare ad una elaborazione di dati in tempo reale ma essere anche alternativa alla trasmissione periodica. È stato possibile infatti “catturare” il flusso dei dati GNSS e trasformarlo in un file RINEX direttamente dall'ufficio.

2.3. Acquisizione e trasferimento dei dati geomatici di monitoraggio

Per il trasferimento al centro di elaborazione dei dati registrati dalle centraline posizionate sulle frane identificate sono state utilizzate due tipologie di comunicazione:

- Comunicazione a Banda Larga o Ultralarga tramite tecnologia Wireless.
- Comunicazione a Banda Stretta tramite tecnologia LoRa.

Per comunicazione a Banda Larga si intende generalmente la trasmissione e ricezione di dati informativi ed una velocità di connessione superiore a 144 kb/s. Si parla di Banda Ultralarga quando la velocità di connessione è di almeno 30 Mb/s. Per valori di velocità inferiori a 144 kb/s si parla invece di banda stretta.

Una volta trasferite le informazioni raccolte in campo al centro di elaborazione, queste saranno elaborate e rese disponibili all'utente. I dati che verranno trasferiti alla piattaforma della regione Piemonte sono i seguenti:

- 3 coordinate WGS84, ottenute dal processing dei dati GNSS (latitudine, longitudine e altezza ellissoidica oppure EstUTM, NordUTM, altezza ellissoidica).
- Le 3 accuratezze corrispondenti alle coordinate nel sistema WGS84.
- 3 angoli di inclinazione calcolati a partire dai dati grezzi dell'accelerometro.

3. La progettazione delle misure GNSS

Data l'innovatività del progetto di monitoraggio e la possibilità dei ricevitori mass market di acquisire anche la nuova costellazione Galileo, si è voluto capire quanto questa potesse migliorare il posizionamento. Dato che la costellazione non è ancora completa (il 25/07/2018 saranno aggiunti altri 4 satelliti), è stato fondamentale il progetto del giorno e dell'ora di misura per poter avere a disposizione il numero di satelliti Galileo idoneo al posizionamento di precisione. Le prove sono state condotte presso il dipartimento DIATI del Politecnico di Torino.

3.1. Planning satellitare

Appositi programmi di calcolo, forniti con i ricevitori, permettono di definire in un certo momento (data e ora) e per una certa località (coordinate geografiche), il numero di satelliti registrabili e il corrispondente valore GDOP (si riporta al paragrafo 3.1.4).

In tal modo è possibile individuare facilmente i periodi di tempo durante i quali è più conveniente e proficuo eseguire le osservazioni.

Quando si è in presenza di "ostruzioni" si usa un diagramma polare (proiezione piana della volta celeste) sul quale sono tracciati lo zenit e alcuni cerchi concentrici che rappresentano le elevazioni sull'orizzonte. Utilizzando gli azimut e gli angoli di elevazione, durante il sopralluogo, si tracciano le aree nelle quali non c'è ricezione per la presenza di ostacoli (zone d'ombra). I dati relativi vengono poi introdotti nel programma che consente di sovrapporre le zone d'ombra alla proiezione delle orbite satellitari nella località e nell'intervallo temporale prescelto per la sessione di misura. In tal modo è possibile verificare se e quali satelliti vengono oscurati e se i rimanenti sono sufficienti per operare in sicurezza (

Figura 8).

Nel nostro progetto le misure sono state effettuate dalle 12:12 PM alle 12:54 PM. È stato scelto questo intervallo orario guardando il planning ONLINE (www.gnssmissionplanning.com). Lo scopo di tale pianificazione è di avere un buon indice DOP, anche con i soli satelliti Galileo, poiché i ricevitori "mass market" riescono a tracciare tale costellazione.

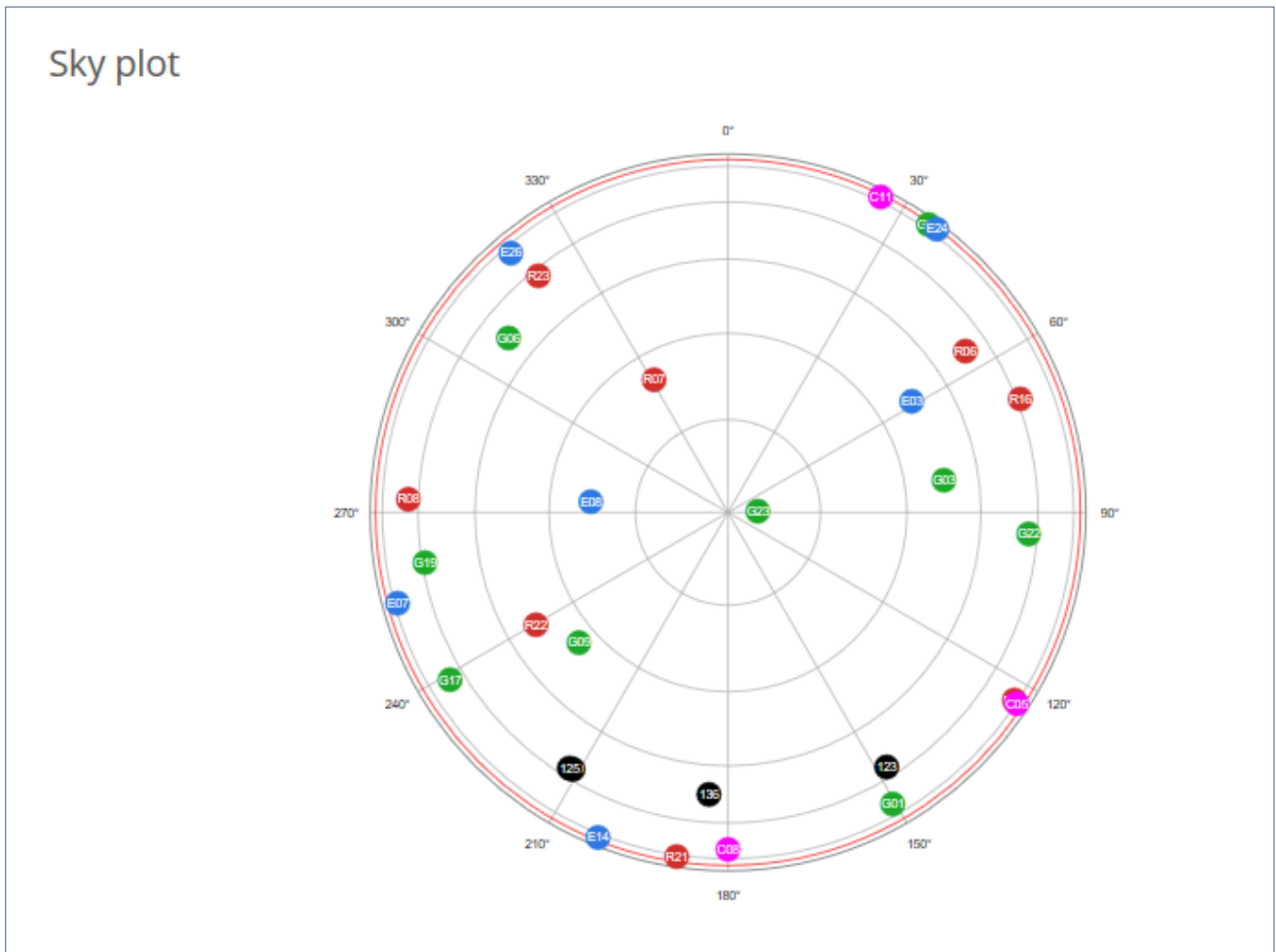


Figura 8: Planning online- Sky plot dei satelliti

3.1.1. Sezione Setting

Per prima cosa è stata compilata la sezione “**Settings**”, nel quale sono stati inseriti i valori di latitudine, longitudine, altezza ellissoidica, Cutoff (si tratta dell’elevazione minima che deve avere un satellite per essere considerato affidabile). È stato scelto anche la durata in cui verrà effettuato il rilievo che va dalle 12:00 PM alle 18:00 PM (6 ore di rilievo) Figura 9 .

Settings

Latitude

Longitude

Height

Cutoff

Date

From

For

Time Zone

Map
Obstructions

Search Address

Search Results

Figura 9: Planning online-Setting

3.1.2. Satellite Library

Successivamente si è passati alla scelta della costellazione che utilizzeremo “**Satellite Library**” tra quelle disponibili, tra cui: il satellite GPS, GONASS, GALILEO, BEIDOU, QZSS. Consiste nel scartare con “none” i satelliti che non ci interessano. Da notare che nella libreria dei satelliti è stata spuntata solo la costellazione europea Galileo, poiché ci interessa che il ricevitore riesca a tracciarla (Figura 10).

Satellite library

Satellites with red name are considered unhealthy and won't be used in calculations.

☐ GPS	☐ Glonass	☒ Galileo	☐ BeiDou	☐ QZSS	☐ SBAS
☐ G01	☐ R01	☒ E01	☐ C01	☐ J01	☐ I20
☐ G02	☐ R02	☒ E02	☐ C02	☐ J02	☐ I22
☐ G03	☐ R03	☒ E03	☐ C03	☐ J03	☐ I23
☐ G04	☐ R04	☒ E04	☐ C04	☐ J07	☐ I25
☐ G05	☐ R05	☒ E05	☐ C05		☐ I27
☐ G06	☐ R06	☒ E07	☐ C06		☐ I28
☐ G07	☐ R07	☒ E08	☐ C07		☐ I29
☐ G08	☐ R08	☒ E09	☐ C08		☐ I31
☐ G09	☐ R09	☒ E11	☐ C09		☐ I32
☐ G10	☐ R10	☒ E12	☐ C10		☐ I35
☐ G11	☐ R11	☐ E14	☐ C11		☐ I36
☐ G12	☐ R12	☐ E18	☐ C12		☐ I37
☐ G13	☐ R13	☒ E19	☐ C13		☐ I38
☐ G14	☐ R14	☒ E22	☐ C14		☐ I40
☐ G15	☐ R15	☒ E24	☐ C19		
☐ G16	☐ R16	☒ E26	☐ C20		
☐ G17	☐ R17				
☐ G18	☐ R18				
☐ G19	☐ R19				
☐ G20	☐ R20				
☐ G21	☐ R21				
☐ G22	☐ R22				
☐ G23	☐ R23				
☐ G24	☐ R24				
☐ G25					
☐ G26					
☐ G27					
☐ G28					
☐ G29					
☐ G30					
☐ G31					
☐ G32					

Figura 10: Planning online-Satellite Library

3.1.3. Number of satellites

L'opzione "**number of satellites** " è costituita da istogrammi a barre verticali che, per ogni ora riportata sull'asse orizzontale, sono proporzionali al numero di satelliti osservabili (Figura 11).

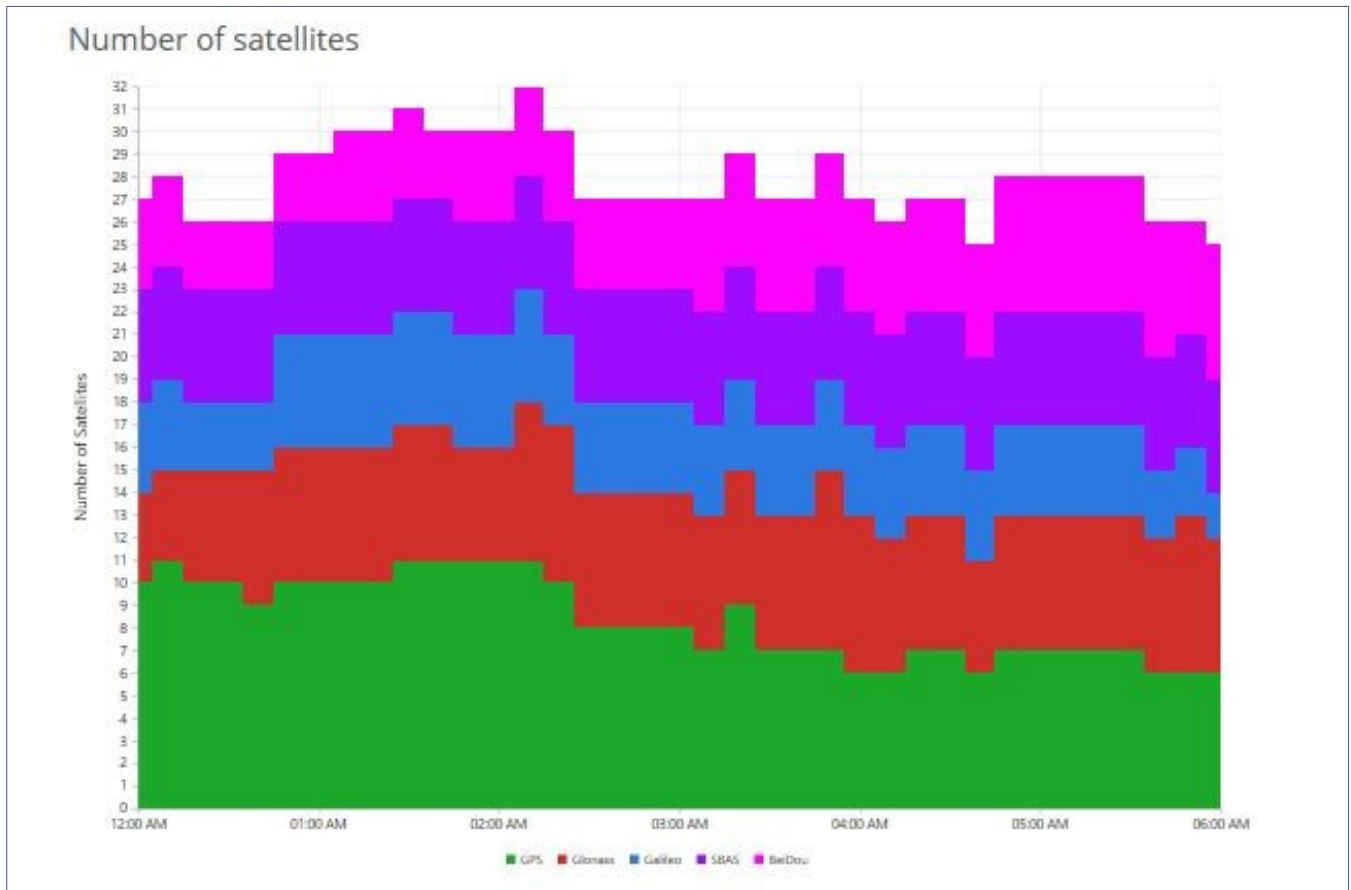


Figura 11: Planning online-Number of satellites

Dalla *Figura 11* si può notare come tra le 12:00 PM e le 13:00 PM sono visibili fino a 21 satelliti se si prendono in considerazione le costellazioni GPS, Glonass e Galileo.

3.1.4. Diluzione della precisione (DOPs)

La buona configurazione geometrica dei satelliti si misura con l'indice GDOP (Geometric Dilution Of Precision, che è la precisione globale) ed influisce sulla precisione del posizionamento σ , che è pari a:

$$\sigma = \text{GDOP} \times \sigma_0$$

Dove:

σ_0 = precisione della misura

Se tutti i satelliti sono nello stesso quadrante e allineati la diluzione della precisione è bassa. Il valore dell'indice GDOP non deve superare 6-7.

In particolare si ha:

- $\text{Hdop} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$ Per la planimetria ;
- $\text{Pdop} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$ Per la posizione 3D ;
- $\text{Vdop} = \sqrt{\sigma_z^2}$ Per la verticale .

Tanto più è piccolo lo scarto tanto più si ha precisione. Tanto più è grande lo scarto tanto più la precisione è diluita (piccola).

Sono riportate di seguito le diluizioni della precisione (**DOPs**) nell'istanti di osservazione; dove **Gdop** è la precisione globale, **Vdop** quella in Z, e **tdop** che è la precisione nel tempo. Tanto più è piccolo σ (scarto) tanto più si ha precisione. Tanto più è grande tanto più la precisione è diluita (piccola). In realtà quello che ci interessa maggiormente è il **Pdop** (relativo alla posizione del satellite). Tali valori sono stati ricavati dalla matrice di precisione calcolata come: $\sigma^2 N^{-1}$ (dove σ^2 è pari a 1 m²).

Si può notare come il DOP sia piccolo proprio nel lasso di tempo che va dalle 12:00 PM alle 13:00 PM, e quindi viene raggiunta una precisione maggiore (Figura 12).



Figura 12: Planning online-DOPs

Questa è una progettazione della precisione che avremo se mettessimo il ricevitore in un certo punto piuttosto che in un altro.

È importante inoltre verificare come solo la costellazione Galileo, in quel lasso di tempo di misura, dia valori di DOP molto piccoli; valori massimi pari a 5 e accettabili minori di 3. Quindi la costellazione Galileo da una precisione elevata durante l'intervallo di misura, i DOP saranno invece elevati (cioè superiori a 5) tra le 15 p.m. e le 16 p.m. (

Figura 13).

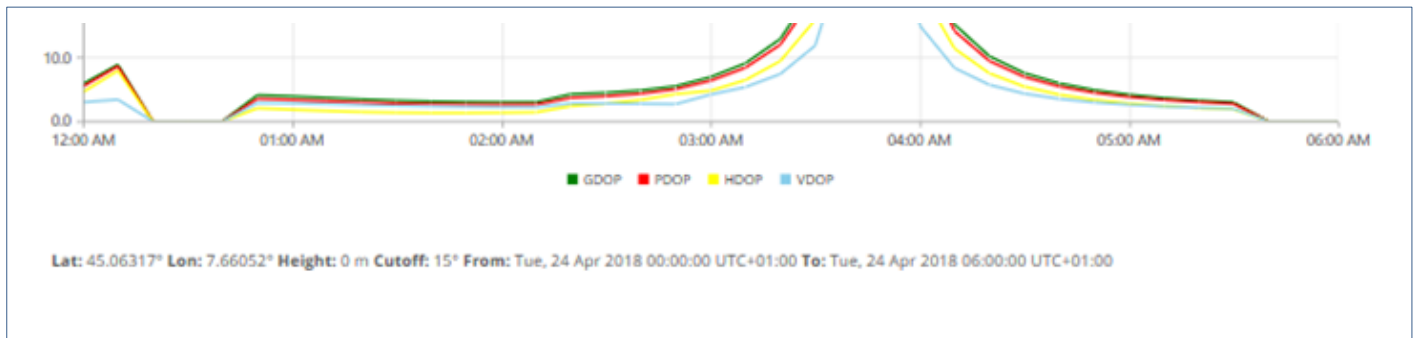


Figura 13: DOPs con solo la costellazione Galileo

3.2.1.1 Elevazione dei satelliti

Molto importante, in particolare nei rilievi con modalità cinematiche, è l'elevazione sull'orizzonte dei satelliti. Questa grandezza è definita come l'angolo formato dalla direzione antenna-satellite con il piano orizzontale. Naturalmente l'elevazione di un certo satellite è legata alla sua traiettoria e perciò varia istantaneamente da valori iniziali piccoli per poi aumentare fino a raggiungere, in un certo momento, un valore massimo (comunque non superiore a 90°), per poi diminuire tornando a valori piccoli (tramonto del satellite). Quando i satelliti sono bassi sull'orizzonte attraversano uno strato atmosferico (ionosfera e troposfera) di molti km perciò non solo questi errori sistematici aumentano ma diminuisce di molto il rapporto segnale / rumore del dato e i valori di multipath. Pertanto è consigliabile non avere un elevazione dei satelliti sotto i $10\text{-}15^\circ$ (Figura 14).

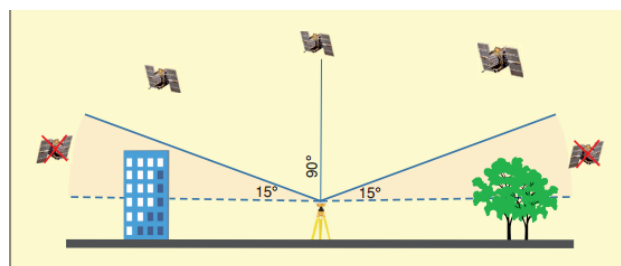


Figura 14: Cut-off satellite

4. Progettazione e realizzazione di un sistema di monitoraggio GNSS mediante ricevitore geodetico *RUIDE S680P*

Prima di valutare le precisioni di un sistema “mass market” descritto al Capitolo 2 occorre vedere le precisioni raggiungibili dal ricevitore geodetico, e quali vantaggi può portare l’uso della costellazione Galileo.

Verranno pertanto descritte di seguito le prove eseguite con il ricevitore della Ruide Surveying Instrument. Tale ricevitore è geodetico ma di fascia di costo media (intorno ai 3000 euro) e si colloca quindi in una fascia di costo compresa tra i ricevitori mass market e quelli professionali di costo attorno ai 10000 euro.

4.1. Descrizione della prova

In base alla progettazione la finestra temporale di misura scelta è stata dalle 12:00 A.M. alle 13:00 A.M. ora locale.

La prova consisteva nel dare spostamenti controllati in orizzontale e in verticale a un ricevitore geodetico Ruide su un apparecchio costruito appositamente e spostabile di quantità note, denominato “slitta” (Figura 15). Per far ciò abbiamo organizzato la prova pianificando il giorno e l’ora di massima visibilità dei satelliti Galileo (valori DOP ottimali).

La misura è stata eseguita sul tetto del dipartimento DIATI del Politecnico di Torino. Per garantire l’orizzontalità della strumentazione è stata utilizzata una livella torica posizionata sia longitudinalmente che trasversalmente alla slitta. Dopo aver calcolato la posizione iniziale del ricevitore, quest’ultimo è stato spostato in planimetria di 2 centimetri ogni 30 secondi in avanti e poi indietro. Infine è stato spostato verticalmente verso l’alto e poi verso il basso di 1 centimetro ogni 30 secondi e poi di 2 cm ogni 30 secondi.

Ciò è stato fatto per poter calcolare lo spostamento del ricevitore rispetto alla posizione iniziale nota in modalità cinematica.



Figura 15: Posizionamento cinematico con slitta e ricevitore geodetico RUIDE S680P

5. Utilizzo del software RTKLIB

Nell'ottica di un sistema di monitoraggio a basso costo sia per il tempo reale che per il post-processing si è scelto di utilizzare un software open source (free) RTKLIB, che è costituito da una serie di programmi che sono di seguito descritti. I dati del ricevitore Ruide, dopo lo scaricamento della memoria interna dello stesso sono stati trattati con questo software. Prima di descrivere i risultati ottenuti vediamo le potenzialità del software.

Dopo aver configurato la rete del ricevitore (Allegato 1- Configurazione del ricevitore RUIDE S680P), i dati grezzi si scaricano via wifi con il menu: Data Record/data download, inserendo la corrispondente data nella quale è stato eseguito il rilievo. In tal modo è stato possibile scaricare i dati in formato rinex del ricevitore rover. I dati della base (master), sono stati scaricati dal ricevitore della stazione permanente di Torino. Successivamente tali dati sono stati caricati nel software RTKLIB, in particolare nella sezione. Le caratteristiche del software sono le seguenti:

- Supporta algoritmi di posizionamento standard e precisi con: GPS, GLONASS , Galileo, QZSS, Beidou e SBAS .
- Supporta diverse modalità di posizionamento con il GNSS ; nel nostro caso è stato scelto il Post-processing cinematico.
- Supporta molti formati standard per il GNSS; nel nostro caso i dati di input sono file RINEX.
- Supporta diversi ricevitori GNSS; nel nostro caso il ricevitore supportato è di tipo geodetico (Ruide).
- Sostiene la comunicazione esterna via: Seriale, TCP/IP, NTRIP.
- Permette di applicare modelli di atmosfera, modelli di antenna, modelli di maree terrestri, modelli Geoide, effemeridi precise, flusso di dati di input, calcolo delle ambiguità ad intero, posizionamento standard, posizionamento preciso, posizionamento post-processing, posizionamento RTK.
- Include i seguenti GUI (interfaccia utente grafica) e CUI (interfaccia utente da riga di comando).

Questi ultimi i comandi sono stati utilizzati per programmare a tempi determinati il calcolo della posizione dei ricevitori mass market sui siti di monitoraggio.

Nel nostro caso si è scelta la funzione post-processing utilizzando l'applicazione RTKPOST (Figura 16).

Function	GUI AP	CUI AP	Notes
(a) AP Launcher	RTKLAUNCH (3.1)	-	
(b) Real-Time Positioning	RTKNAVI (3.2, 3.3, 3.5)	RTKRCV (3.11, A.1)	
(c) Communication Server	STRSVR, (3.3)	STR2STR (3.11, A.5)	
(d) Post-Processing Analysis	RTKPOST (3.4, 3.5)	RNX2RTKP (3.11, A.2)	
(e) RINEX Converter	RTKCONV (3.6)	CONVBIN (3.11, A.4)	
(f) Plot Solutions and Observation Data	RTKPLOT (3.7, 3.8)	-	
(g) Downloader for GNSS Products and Data	RTKGET (3.9)	-	
(h) NTRIP Browser	SRCTBLBROWS (3.10)	-	

Figura 16: Funzioni di libreria-RTKLIB

5.1. Post-Processing con RTKPOST

RTKLIB consente di effettuare il post processing tramite la sezione RTKPOST, dove è possibile caricare i file RINEX dei dati di osservazione e di navigazione. È possibile inoltre scegliere diverse modalità di posizionamento tra: punto singolo, DGPS / DGNSS, cinematico, statico, PPP-cinematico e PPP-statico.

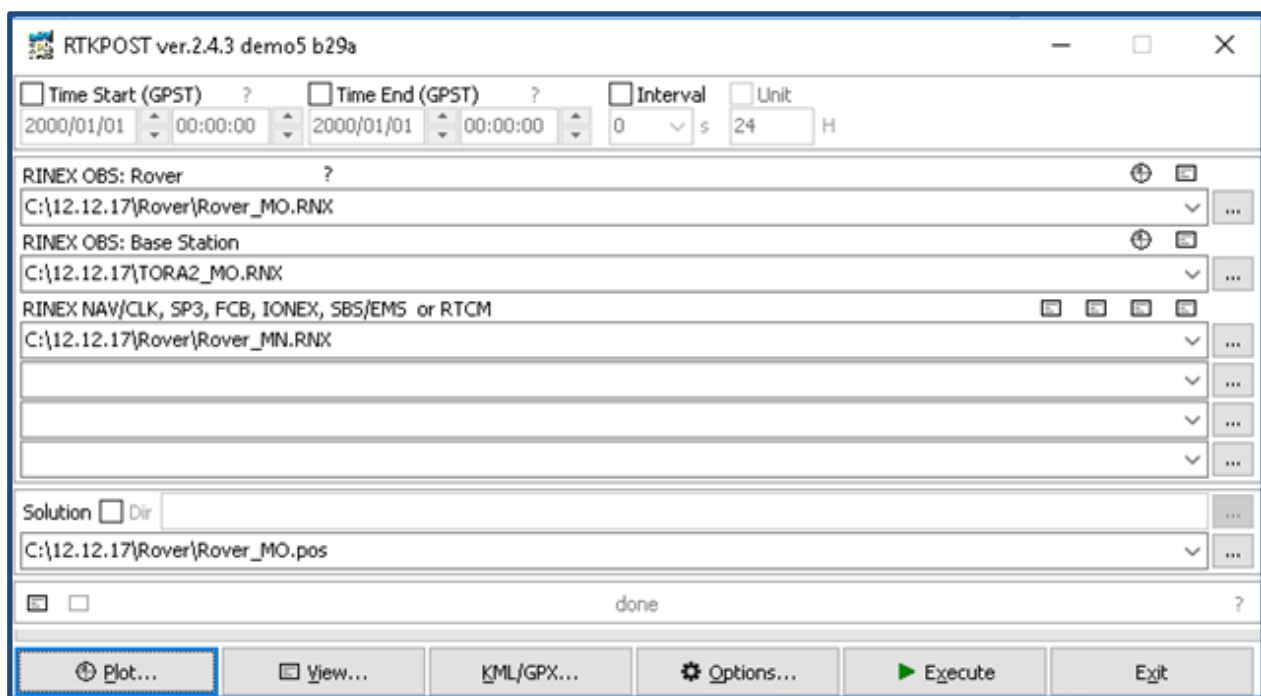


Figura 17: Main window –RTKPOST

Dopo aver inserito i file di osservazione è necessario immettere il percorso dei file di messaggi di navigazione delle costellazioni GPS, GLONASS, Galileo, QZSS e SBAS.

Successivamente si inserisce il percorso del file di output con estensione sostituita da .pos o .nmea. Nel nostro caso l'estensione è “.pos”, dato che i file sono stati ottenuti da un post processing tra Rover e Master. Ovvero ciò significa che in tali file è stato applicato il “*Filtering*” e lo “*smothing*” . È possibile modificare manualmente il percorso del file di output modificando il file contenuto del campo (Figura 17).

5.2. Opzioni di calcolo post processing sul software

La finestra “Opzioni” permette di imporre diverse tipologie di posizionamento per mezzo di altre sotto-finestre denominate “setting”.

5.2.1. Setting 1:

In tale sotto-finestra è possibile scegliere il tipo di posizionamento, le correzioni ionosferiche e troposferiche, le effemeridi e l'orologio dei satelliti, tipo di filtro , le frequenze del segnale, l'elevazione dei satelliti, e l'Earth tides correction (Figura 18).

Nel nostro caso si è scelto:

- Positioning Mode: Kinematic; in quanto ogni 30 secondi si spostava l'antenna sulla slitta.
- Frequencies: L1+ L2, double frequency.
- Filter type: Backward; cioè calcolo di filtraggio e lisciamento.
- Elevation Mask: 15° (cut-off).
- Rec Dynamics: indica il modello dinamico del ricevitore. Nel nostro caso il modello dinamico non è stato usato (OFF). Nel caso in cui si scelga di mettere ON: vengono stimate le velocità e le accelerazioni del ricevitore. La posizione del ricevitore viene così determinata tramite i valori di velocità e accelerazione trovati.
- Earth Tides Correction: Indica la correzione delle maree terrestri. OFF: se non è applicata. Solid: è applicata una correzione delle maree terrestri (nel nostro caso). Solid/OTL: correzione solida delle maree, OTL (tiene conto delle maree oceaniche e ai poli).
- Ionosphere Correction: Broadcast; cioè utilizza i parametri ionosferici letti dal file di navigazione.
- Troposphere Correction: Saastamoinen model (modello idrostatico).
- Satellite Ephemeris: Broadcast (per basi corte non servono effemeridi precise)
- RAIM FDE: RAIM(monitoraggio dell'integrità autonoma del ricevitore) FDE (rilevazione guasti ed esclusioni). Nel caso in cui viene spuntata l'opzione RAIM FDE, un satellite viene escluso se la somma degli scarti al quadrato delle misure di quel satellite supera un valore di soglia.¹

¹ Manuale del software RTKLIB versione 2.4.3

- Navigation System: vengono spuntate le costellazioni che vengono usate; nel nostro caso sono: GPS, Glonass e Galileo.²

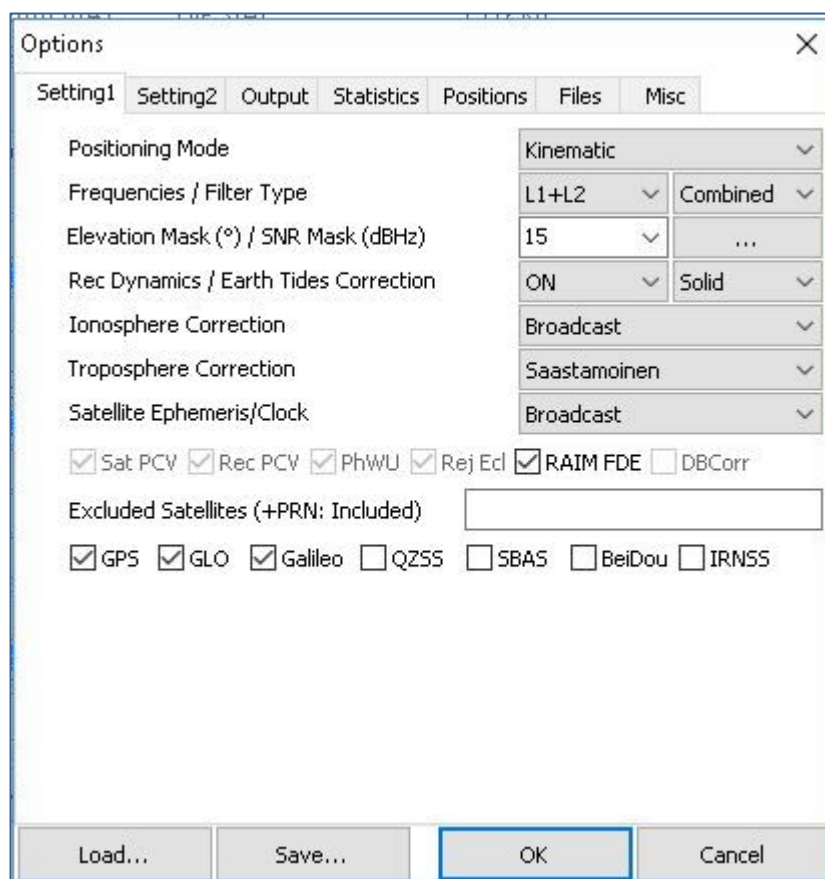


Figura 18: Setting 1-Options-RTKPOST

5.2.2. Setting 2

In tale sotto-finestra è possibile scegliere diverse opzioni come si è fatto nel setting 2 , (Figura 19).

- Integer ambiguity resolution : Fix and Hold; L'ambiguità è fissata a un numero intero e mantiene tali valori (ciò è stato fatto solo per GPS, in quando il software non è in grado di dare risultati validi nel caso si fissasse l'ambiguità di fase anche per Glonass).
- Minimum ratio to fix ambiguity: Viene definita la soglia di convalida dell'ambiguità intera per il "ratio-test", che utilizza il rapporto dei residui al quadrato della migliore combinazione rispetto alla seconda migliore. Nel nostro caso è pari a 3.
- Elevation (°) to fix ambiguity: 0.
- Minimum fix : 10
- Elevation (°) to hold ambiguity: 0

² Manuale del software RTKLIB versione 2.4.3

- Outage to reset ambiguity/slip thres: Si imposta il conteggio delle interruzioni per ripristinare l'ambiguità. Se il risultato è superiore al valore stimato, l'ambiguità viene reimpostata sul valore iniziale. Viene inserito un numero di interruzioni per ripristinare l'ambiguità pari a 5. Slip Thres: è impostata la soglia di scorrimento del ciclo (metri), pari a 0.005.
- Max age of differential: Imposta il valore massimo dello sfasamento (in secondi) tra il rover e il master (30).
- Reject threshold of GDOP: Imposta la soglia di rifiuto di epoche con GDOP (pari a 30). Se il GDOP è oltre il valore di soglia, queste epoche sono escluse dalla stima come valore anomalo.
- Number of iteration: Imposta il numero di iterazioni della misura aggiornando il filtro di stima. Se la lunghezza della baseline è molto piccola (come ad esempio 1 m), l'iterazione può essere efficace per gestire la non linearità dell'equazione di misura (viene posta pari a 1).

3

Options	
Setting2	
Integer Ambiguity Res (GPS/GLO/BDS)	Fix and OFF OFF
Min Ratio to Fix Ambiguity	3
Min Confidence / Max FCB to Fix Amb	0.9999 0.25
Min Lock / Elevation (°) to Fix Amb	5 0
Min Fix / Elevation (°) to Hold Amb	10 0
Outage to Reset Amb/Slip Thres (m)	5 0.050
Max Age of Diff (s) / Sync Solution	30.0 ON
Reject Threshold of GDOP/Innov (m)	30.0 30.0
Max # of AR Iter/# of Filter Iter	1 1
☐ Baseline Length Constraint (m)	0.000 0.000
Min Fix Sats / Min Hold Sats	2 2
Min Drop Sats / Use Rcv StdDevs	20 OFF
Max Pos Var for AR / AR Filter	0.9900 ON
Hold Amb Var / Hold Amb Gain	0.0010 0.0100

Load... Save... OK Cancel

Figura 19: Setting 2-Options-RTKPOST

³ Manuale del software RTKLIB versione 2.4.3

5.2.3. Output

Su tale menù di configurazione è possibile scegliere le seguenti opzioni (Figura 20).

- Solution format: Nel nostro caso si è scelto: Latitudine, Longitudine e altezza. È possibile anche scegliere le coordinate X,Y,Z oppure E,N,U, che sono le componenti della baseline.
- Time format: hh:mm:ss GPST : è il tempo GPS, espresso come anno/mese/ora.
- Latitudine/Longitudine format: ddd mm ss.sss : gradi, minuti e secondi.
- Datum: WGS84.
- Height: ellissoidica. Si sceglie quindi l'ellissoide di riferimento e non il geoide. Di conseguenza tutte le opzioni relative al geoide non vengono utilizzate.⁴

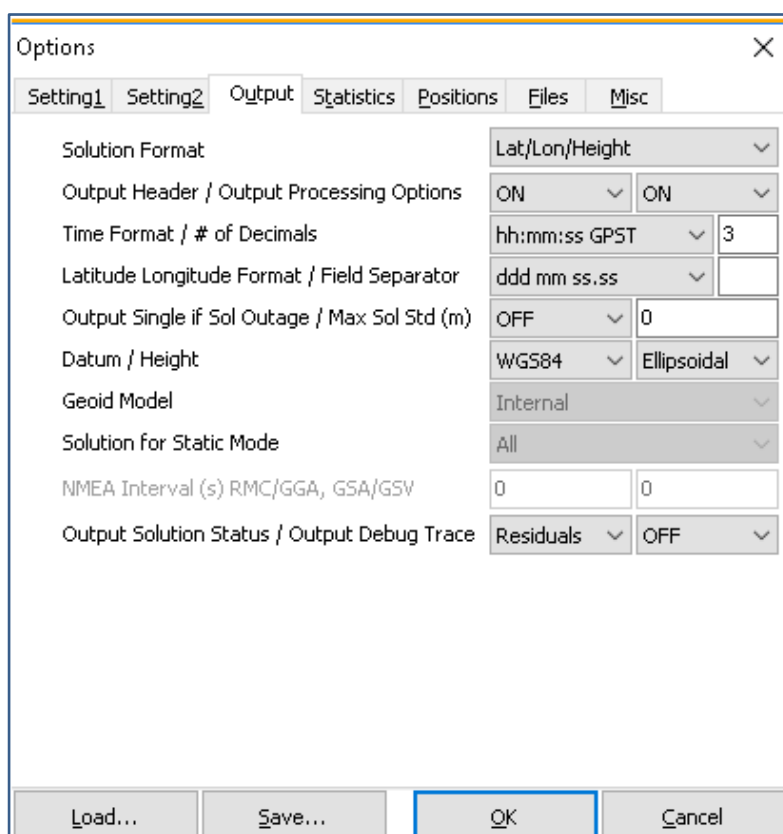


Figura 20: Output-Options-RTKPOST

⁴ Manuale del software RTKLIB versione 2.4.2

5.2.4. Positions

In tale finestra è possibile scegliere delle opzioni relative sia al ricevitore Rover e sia al Master (Figura 21). Per quanto riguarda il Rover si riferimento ai dati RINEX di input. Per quanto riguarda il Master, sono stati inseriti i valori di latitudine, longitudine in gradi sessagesimali e di altezza in metri (Figura 21). Tali valori sono stati estrapolati dal sito: “*SPIN GNSS regione Piemonte*”, che fornisce informazioni riguardo la stazione permanente di Torino (Tori) Figura 23.

La stazione permanente GNSS opera in continuo dal 1996 ed è stata una delle prime realizzazioni italiane. Usata come ricevitore “base” nel posizionamento di precisione, contribuisce alla definizione e al mantenimento del sistema di riferimento geodetico europeo ETRF essendo inquadrata nella rete EUREF (European Reference Frame) e nazionale, come vertice attivo della rete RDN (Rete Dinamica Nazionale) dell’IGM. Il ricevitore GNSS fornisce dati in tempo reale e fa parte del servizio di posizionamento della Regione Piemonte. La stazione si trova al terzo piano del dipartimento DIATI – Politecnico di Torino, si tratta di un ricevitore geodetico multi frequenza e multi costellazione GPS, GLONASS e GALILEO- Leica GRX1200 + GNSS (Figura 22), con antenna di tipo choke ring.

The screenshot shows the 'Options' dialog box with the 'Positions' tab selected. It contains settings for both a Rover and a Base Station. The Rover section has a 'RINEX Header Position' dropdown and three input fields for coordinates: 90.000000000, 0.000000000, and -6335367.6285. Below these are checkboxes for 'Antenna Type (*: Auto)' and 'Delta-E/N/U (m)' with values 0.0000, 0.0000, and 0.0000. The Base Station section has an 'X/Y/Z-ECEF (m)' dropdown and three input fields for coordinates: 4472544.6165, 601634.0909, and 4492544.9710. It also has checkboxes for 'Antenna Type (*: Auto)' and 'Delta-E/N/U (m)' with values 0.0790, 0.0000, and 0.0000. At the bottom, there is a 'Station Position File' field and buttons for 'Load...', 'Save...', 'OK', and 'Cancel'.

Figura 21: Positions-Coordinate base station-Options-RTKPOST



*Figura 22: ricevitore geodetico multi frequenza e multi costellazione GPS, GLONASS e GALILEO
Leica GRX1200 + GNSS*

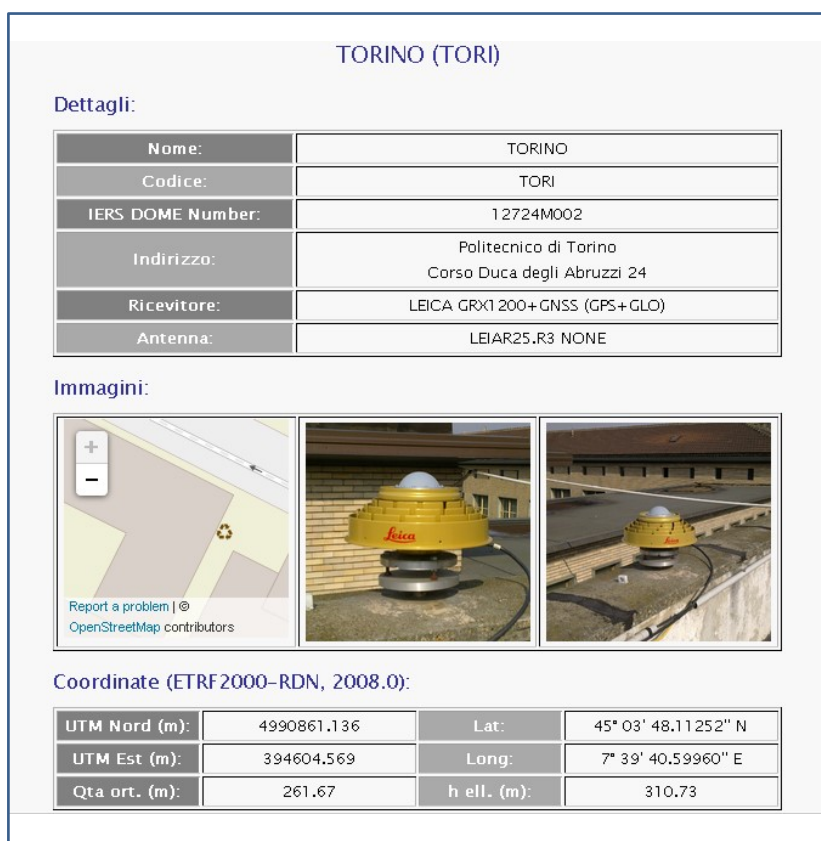


Figura 23: Coordinate e monografia della stazione TORI

5.3. Osservazione e plottaggio dei risultati con RTKPLOT

Dall'esecuzione del menù "Edit"- "Solution source", è possibile osservare i dati di output come un file di testo. Il file di output ci fornisce la latitudine, longitudine in gradi sessagesimali e altezza ellissoidica in metri, calcolate ogni istante dalle 12:12:15 PM alle 12:54:59 PM, ora locale in cui sono state eseguite le misure. Inoltre ci fornisce la qualità (Q) della misura, il numero di satelliti individuati (n_s), gli scarti sulle posizioni nord, est e sulla verticale (z).

Si ottiene in questo lasso di tempo una qualità del fissaggio dell'ambiguità accettabile, che oscilla tra 1 e 2. Dove Q=1 indica il fissaggio del posizionamento GPS e Q=2 indica il fissaggio del posizionamento differenziale DGPS. Gli scarti in planimetria (est ed ovest) risultano essere piccoli (intorno a 0,5 cm) rispetto a quelli in altimetria che risultano essere intorno a 1-2 cm, cioè tanto quanto lo spostamento imposto.

5.4. Costruzione della verità di misura

È importante verificare che i risultati ottenuti dalle varie opzioni di posizionamento siano conformi alla nostra verità di misura. Tale verità è stata realizzata tenendo conto dei valori iniziali e finali delle Est e delle Nord relative al post processing realizzato con tutte le costellazioni, in quanto si è visto come questo sia più stabile rispetto alle altre opzioni di posizionamento.

Partendo dai valori iniziali di E_0 , N_0 e H_0 , è possibile costruire la “verità” e quindi come variano le coordinate (E,N) spostando la slitta di 2 cm ogni 30 secondi. I valori iniziali di E_0 e N_0 sono stati calcolati come media dei primi valori stabili, in cui la differenza tra il secondo valore e il primo e così via si mantiene a 0.02 in Est e 0.01 in Nord. Questi risultano essere:

$$E_0 = 394540,732 \text{ m}$$

$$N_0 = 4990854,582 \text{ m}$$

$$H_0 = 311,25 \text{ m}$$

Conoscendo i valori finali E_p , N_p , corrispondenti al punto in cui il ricevitore viene spostato indietro, è possibile determinare gli incrementi ΔE e ΔN (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

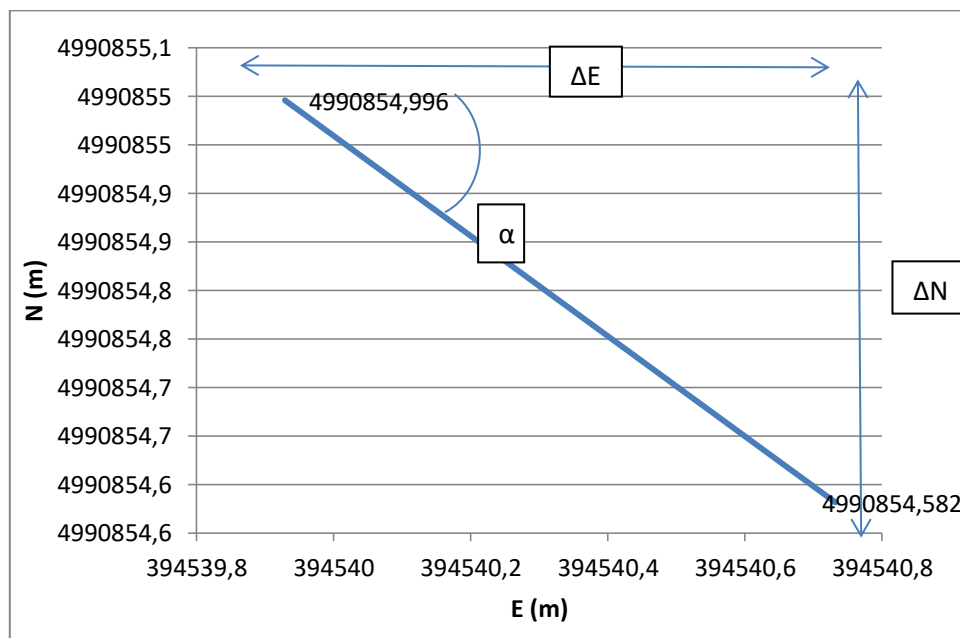


Figura 24: Costruzione della verità

Dove l'angolo α si può calcolare come :

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{N_P - N_0}{E_P - E_0}$$

Sapendo che lo spostamento del ricevitore è di 2 cm ogni 30 secondi, conoscendo anche α , si può calcolare l'incremento ΔE e ΔN , come di seguito:

$$\Delta E = 0.02 \times \cos(\alpha)$$

$$\Delta N = 0.02 \times \sin(\alpha)$$

Quindi infine possiamo calcolare le coordinate (E, N) ogni volta che il ricevitore viene spostato di 2 cm come:

$$E_{i+1} = E_{i-1} + \Delta E$$

$$N_{i+1} = N_{i-1} + \Delta N$$

I valori così ottenuti possono essere confrontati con il post processing in Est () e in Nord () Figura 25.

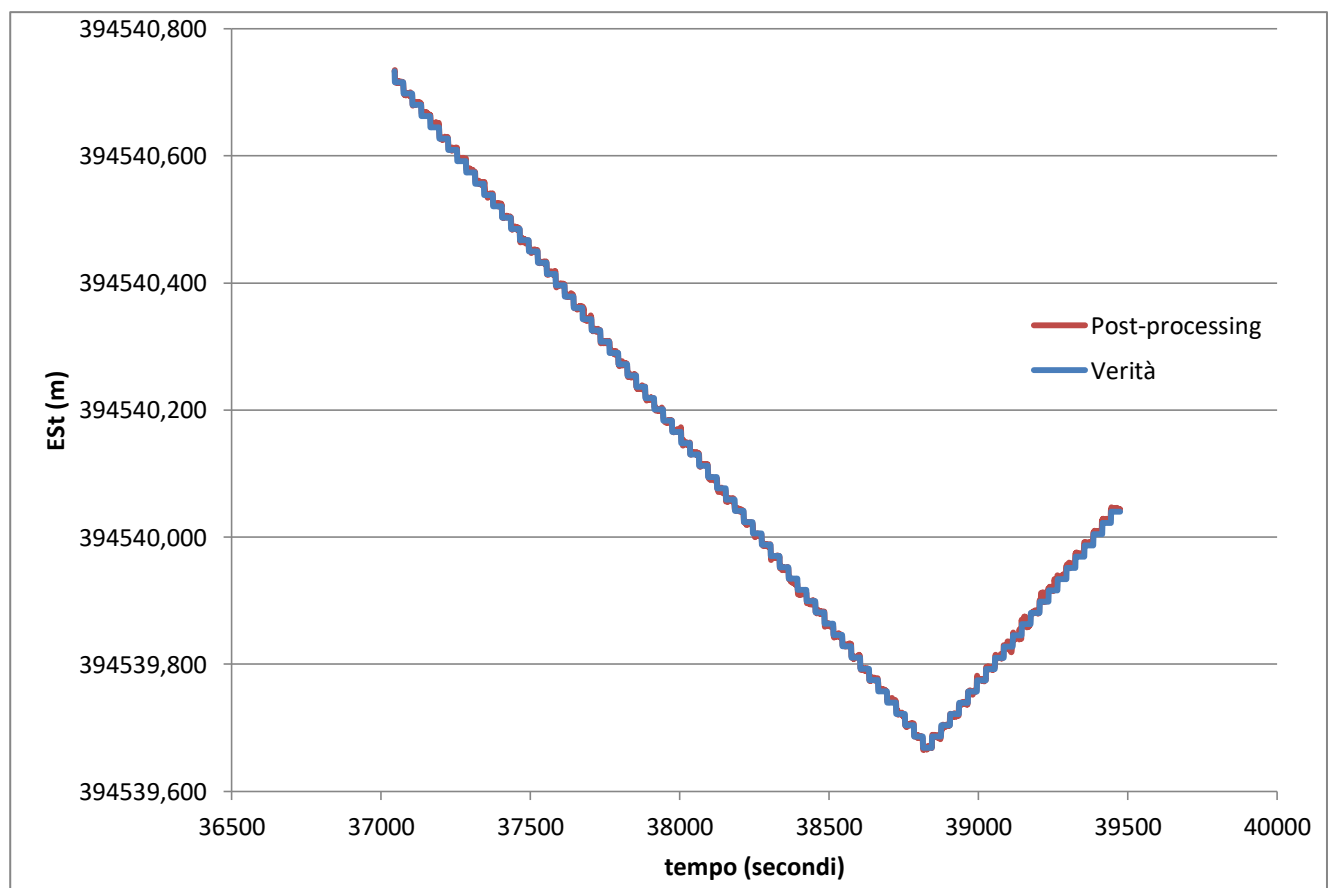


Figura 25: Confronto degli spostamenti in Est del ricevitore tra verità e post-processing con tutte le costellazioni

Successivamente si è costruita la verità anche in altimetria, tenendo conto della scarsa precisione dovuta allo spostamento manuale (Figura 26).

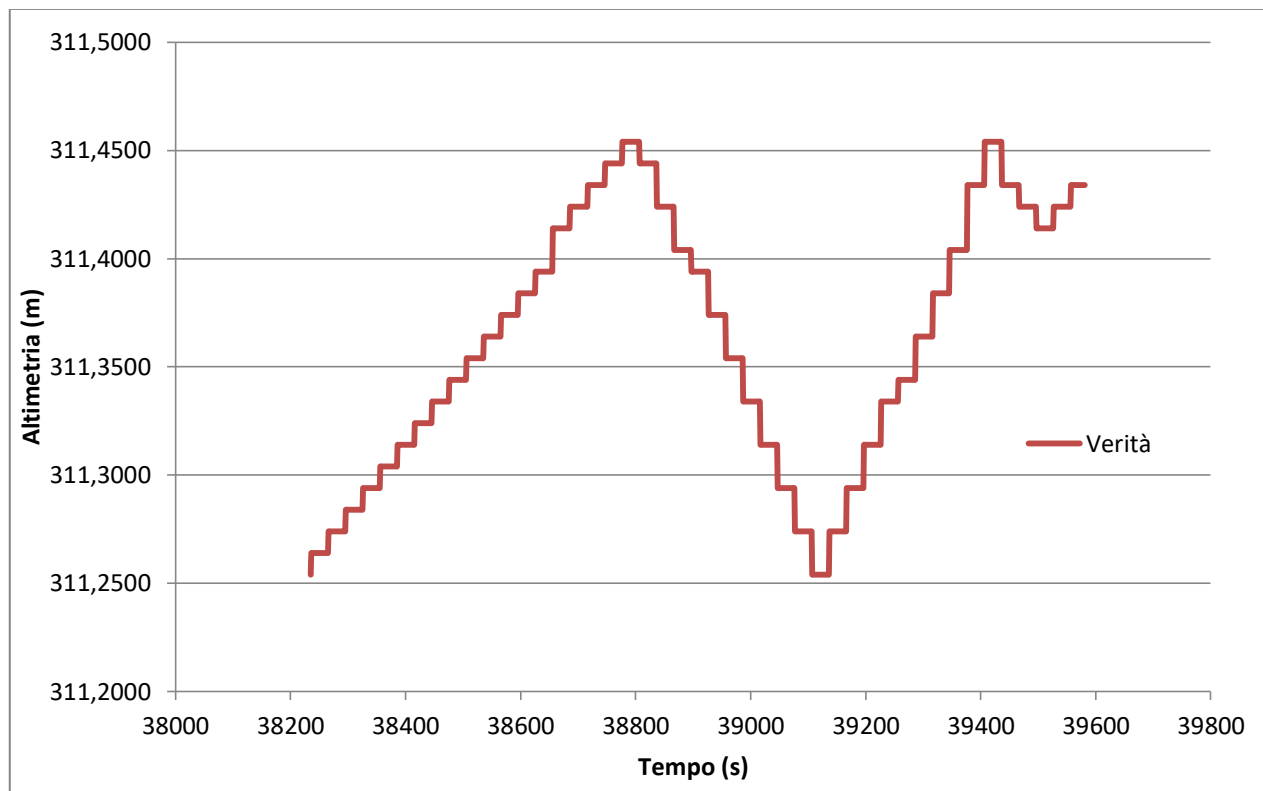


Figura 26: Confronto in altimetria tra post processing completo e verità

5.5. Confronto tra le varie opzioni di posizionamento

I risultati ottenuti utilizzando le costellazioni: Glonass, GPS e Galileo, scegliendo il fissaggio dell'ambiguità di fase solo per la costellazione GPS e considerando la doppia frequenza L1+L2, non sono tuttavia gli unici risultati. Nonostante vedremo come tale soluzione risulta essere la migliore, sono stati analizzati anche i risultati ottenuti togliendo la costellazione Glonass e quelli ottenuti effettuando il posizionamento con solo la costellazione Galileo.

5.5.1. Post-processing con le costellazioni Galileo e GPS

Il trattamento cinematico base-rover con RTKPOST, usando i dati delle costellazioni GPS e Galileo ed escludendo Glonass ha raggiunto il fissaggio dell'ambiguità di fase ad intero testimoniato dal fattore di qualità ($Q=1$) e dal "ratio test" (ratio >999). Il numero di satelliti utilizzati oscilla dalle 12:15 A.M. alle 13 A.M. tra 8 e 10. Il confronto con la verità, cioè con le posizioni note della slitta, mostra un'ottima corrispondenza planimetrica ma minore in altimetria.

5.5.2. Post-processing con solo la costellazione Galileo

In questo caso è stato effettuato un post-processing utilizzando solamente la costellazione Galileo. È importante effettuare il posizionamento con le frequenze combinate L1+L5 anziché L1+ L2. Nonostante si riesce a ottenere una qualità pari a 1, il software non riesce a fornirci un file di testo che contiene le informazioni del relativo posizionamento. Tuttavia il “Solution Status file” non contiene solo il file di output “.pos” ma contiene anche le informazioni stimate del filtro di Kalman “pos.stat” e misure residue per analizzare la qualità della soluzione. Il format del record è così schematizzato:

\$POS, week, tow, stat, posx, posy, posz, posxf, posyf, poszf

Dove:

- Week/tow: sono la settimana GPS, e il tempo (secondi);
- Stat: stato della soluzione (qualità);
- Posx, posy, posz : posizione x, y, z ecef (m) float (non fissate);
- Posxf, posyf, poszf: posizione x, y, z_{ecef} (m) fixed (fissate).

Per la lettura di tale file e l’extrapolazione solo dei record denominati con “\$pos” è stato utilizzato il software MATLAB (Allegato 2- Lettura record con solo la costellazione galileo).

Dal record si può notare come è possibile avere le coordinate in x, y e z non fissate e le posizioni x, y e z fissate. Entrambe le soluzioni si hanno quando si raggiunge una qualità pari a 1. Nel caso in cui si raggiunge una qualità pari a 2, le posizioni fissate saranno pari a zero. Si ottengono quindi solo posizioni float.

Delle tre soluzioni, quella migliore è sicuramente la prima, che tiene conto delle costellazioni Glonass, Galileo e GPS, fissando l’ambiguità di fase solo per GPS e combinando le frequenze L1 e L2. Si può notare infatti come nel record si raggiunge una qualità pari a 1 e il numero di satelliti oscilla tra 13 e 17 anziché tra 8 e 10 come nel posizionamento senza la costellazione Glonass. Inoltre gli scarti in x, y e z risultano più piccoli, anche se in verticale si mantengono sempre dell’ordine di 1 cm. Per quanto riguarda invece il ratio, questo si mantiene sempre elevato senza Glonass, invece raggiunge valori di 3-4 con la costellazione Glonass.

5.5.3. Posizionamento RTK : Kinematic real-time

Il RUIDE è in grado di restituire non solo i file in formato RINEX, ma anche in formato NMEA. La differenza tra i due è che i primi (RINEX) sono stati extrapolati da un “post-processing” dalla rete wifi del RUIDE. Invece i dati NMEA sono stati ottenuti in “real-time” (quindi non ancora trattati), tramite un software installato sul telefono (NTRIP client).

5.5.4. Trasferimento dati dal Ruide al telefono tramite il software NTRIP Client

Il protocollo NTRIP (Network Transport of RTCM) viene utilizzato dalla rete S.P.I.N GNSS Piemonte-Lombardia per il trasferimento di dati RTK attraverso internet.. Oggi è infatti possibile ricevere le correzioni RTK utilizzando i telefoni cellulari. Il protocollo NTRIP consiste in tre componenti:

- NTRIP Client: è la componente che riceve il flusso dati RTK. L’NTRIP Client si connette via internet all’NTRIP Caster utilizzando il corretto indirizzo IP dell’NTRIP Caster. L’utente (NTRIP Client) per connettersi all’NTRIP Caster deve fornire un username ed una password, che gli vengono forniti al momento dell’iscrizione al servizio.
- NTRIP Server : Questa componente è responsabile del trasferimento dei dati RTK dalla stazione di riferimento GNSS all’NTRIP Caster. L’NTRIP Server si connette via internet all’NTRIP Caster utilizzando il corretto indirizzo IP di quest’ultimo.
- NTRIP Caster: è un server che gestisce i diversi flussi di dati in ingresso ed in uscita. Questo connette gli NTRIP Clients ai flussi RTK richiesti.⁵

Tuttavia il protocollo NTRIP ci consente solo di vedere le costellazioni GPS e GLONASS e non tutte le costellazioni. Pertanto il software consente di salvare nella sezione “NTRIP settings” diversi profili e di poter effettuare le misure RTK scegliendo il profilo che si vuole. Nel nostro caso si è scelto il protocollo che fa riferimento alla stazione permanente Leica, e che esegue delle correzioni differenziali senza la necessità di inserire user e password come nel protocollo Ntrip. Tali correzioni vengono mandate al Ruide e successivamente trasferite al telefono. Tale protocollo è in grado di vedere tutte le costellazioni, tra cui la costellazione europea “Galileo”.

La procedura di posizionamento RTK tramite NTRIP client, utilizzando il protocollo Leica , si basa sui seguenti step:

- Scelta del profilo e inserimento ID e Port in NTRIP settings;
- Connessione tramite Bluetooth tra il Ruide e il telefono;
- Inserimento Data Stream : RTK_VRS_RTCM3;
- Scelta del file sul telefono dove salvare i dati GPS.

Connettendo il telefono al Ruide, questo sarà in grado di ricevere i dati e di salvarli nella directory impostata in precedenza. Le misure sono iniziate alle 12:12:15 PM e finite alle 12:54:59 PM. Il software è in grado di fornire in real-time il numero di satelliti visibili, la precisione e il fissaggio dell’ambiguità di fase. Quest’ultima è stata fissata dopo pochi minuti dall’inizio delle misure (12:12:36 PM).

⁵ SPIN GNSS regione Piemonte- Lombardia

5.5.5. Elaborazione dati NMEA

Il file dei dati in txt è stato trasferito al computer e successivamente modificato tramite il software MATLAB (Allegato 3 –Lettura record del posizionamento real-time). Ciò si è basato su estrapolare dai dati NMEA solo i dati \$GNGGA (dati di precisione che forniscono la posizione 3D) nella seguente forma:

\$GNGGA,101519.00,4503.79948721,N,00739.62804664,E,1,19,0.7,264.680,M,48.047,M,,*7D

Dove:

- GGA Sistema di posizionamento globale (dati fissati)
- 101519 Fase fissata alle 10:15:19 UTC (2 ore in meno dell'ora reale)
- 4503.799, N Latitudine 45 deg 03.799' N
- 00739.628, E Longitudine 07 deg 39.628' E
- 1 Qualità fissata: 0 = errore:
 - 1 = GPS fissata (SPS)
 - 2 = DGPS fissata
 - 3 = PPS fissata
 - 4 = Real Time Kinematic
 - 5 = Float RTK
 - 6 = Stimata
 - 7 = Modalità di input manuale
 - 8 = Modalità di simulazione
- 19 Numero di satelliti individuati
- 0.7 Diluzione della posizione orizzontale (HDOP)
- 264.68, M Altitudine in metri, sopra il livello del mare
- 48.047, M Altezza del geoide (media, sopra il livello del mare)

(campo vuoto) tempo in secondi dall'ultimo aggiornamento dei dati DGPS

(campo vuoto) numero ID della stazione DGPS

- *7D il “checksum data”, preceduto sempre da *. ⁶

E importante scartare i dati che hanno una qualità fissata inferiore o superiore a 4 (posizionamento cinematico in “real time”), e prendere quindi solo quelli con qualità pari a 4.

Se l'altezza del Geoide manca allora l'altitudine non è affidabile. Alcune implementazioni non standard segnalano l'altitudine rispetto all'ellissoide piuttosto che al Geoide. Alcune unità non segnalano altitudini

⁶ SPIN GNSS regione Piemonte- Lombardia

negative. Per il posizionamento globale 3D usando 4 satelliti, avere HDOP pari a 1.0 è ottimo, tuttavia per le soluzioni sovrastimate è possibile vedere valori sotto 1.0.

5.6. Confronti planimetrici tra Post-processing e la verità

Per poter effettuare un confronto tra i risultati post-processing con tutte le costellazioni e i risultati con solo la costellazione Galileo, è necessario prima di tutto effettuare un allineamento dei tempi; visto che i risultati con solo Galileo restituiscono i tempi di misura in TOW (tempo della settimana GPS), i risultati con tutte le costellazioni restituiscono il tempo in UTC (sfasato di 18 secondi rispetto al tempo GPS). Allineando i tempi, è stato possibile restituire un valido confronto degli spostamenti in direzione Est, riportato in Figura 27.

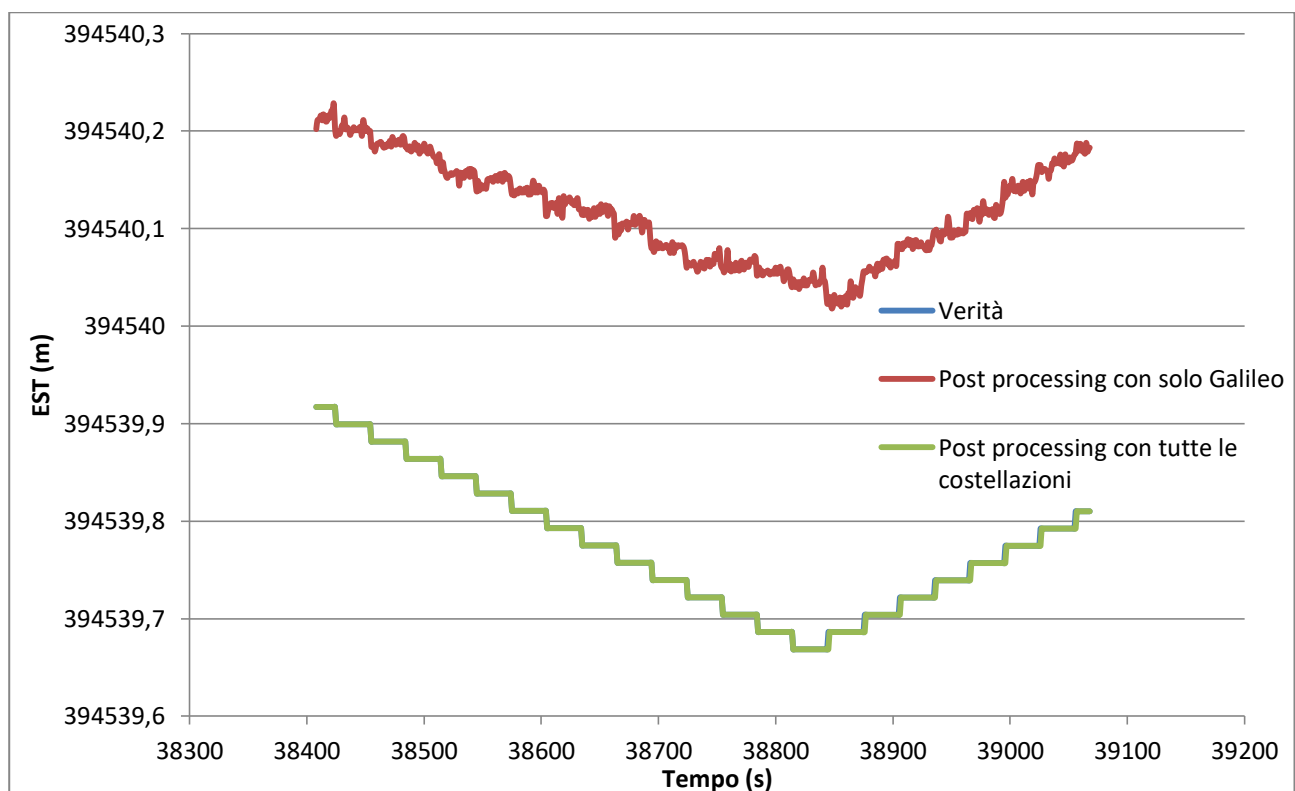


Figura 27: Confronto in direzione Est Tra Post processing completo di tutte le costellazioni, Post processing con solo la costellazione Galileo e la verità

Si può notare che la verità non è visibile in quanto è sovrapposta quasi completamente al post processing con tutte le costellazioni.

È possibile fare un confronto anche per gli spostamenti in direzione Nord, che risultano aumentare facendo avanzare il ricevitore di 2 cm ogni trenta secondi e poi diminuire dal momento in cui il ricevitore viene fatto tornare indietro. Tale confronto è riportato in Figura 28.

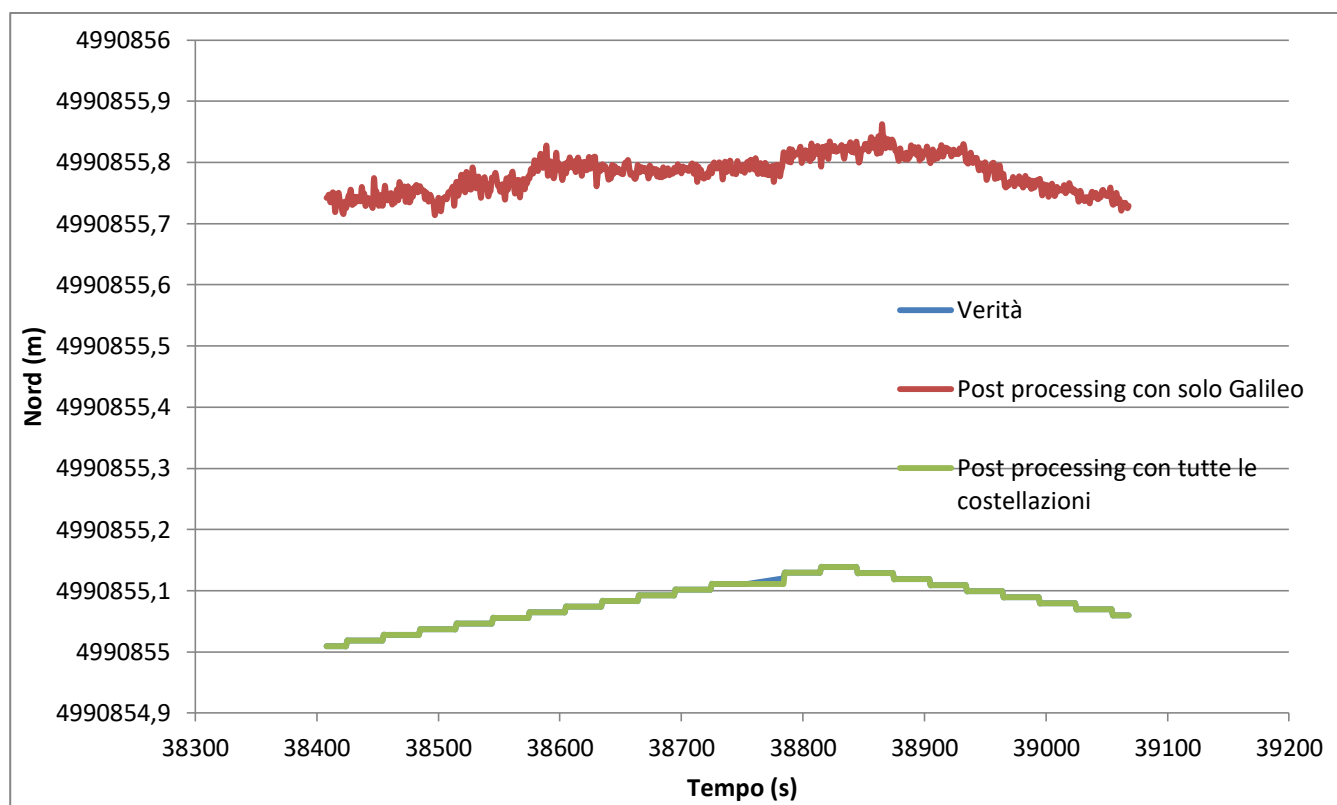


Figura 28: Confronto in direzione Nord Tra Post processing complete di tutte le costellazioni e Post processing con solo la costellazione Galileo

Anche in questo caso si può notare che la verità non è visibile in quanto è sovrapposta quasi completamente al post processing con tutte le costellazioni.

Si nota come le differenze tra i due risultati sono superiori in Nord, che risultano essere di circa 70 cm. Rispetto invece agli spostamenti in direzione Est che risultano avere una differenza media di circa 30 cm. Si riporta il confronto tra le differenze dei due report in Nord e in Est in Figura 29.

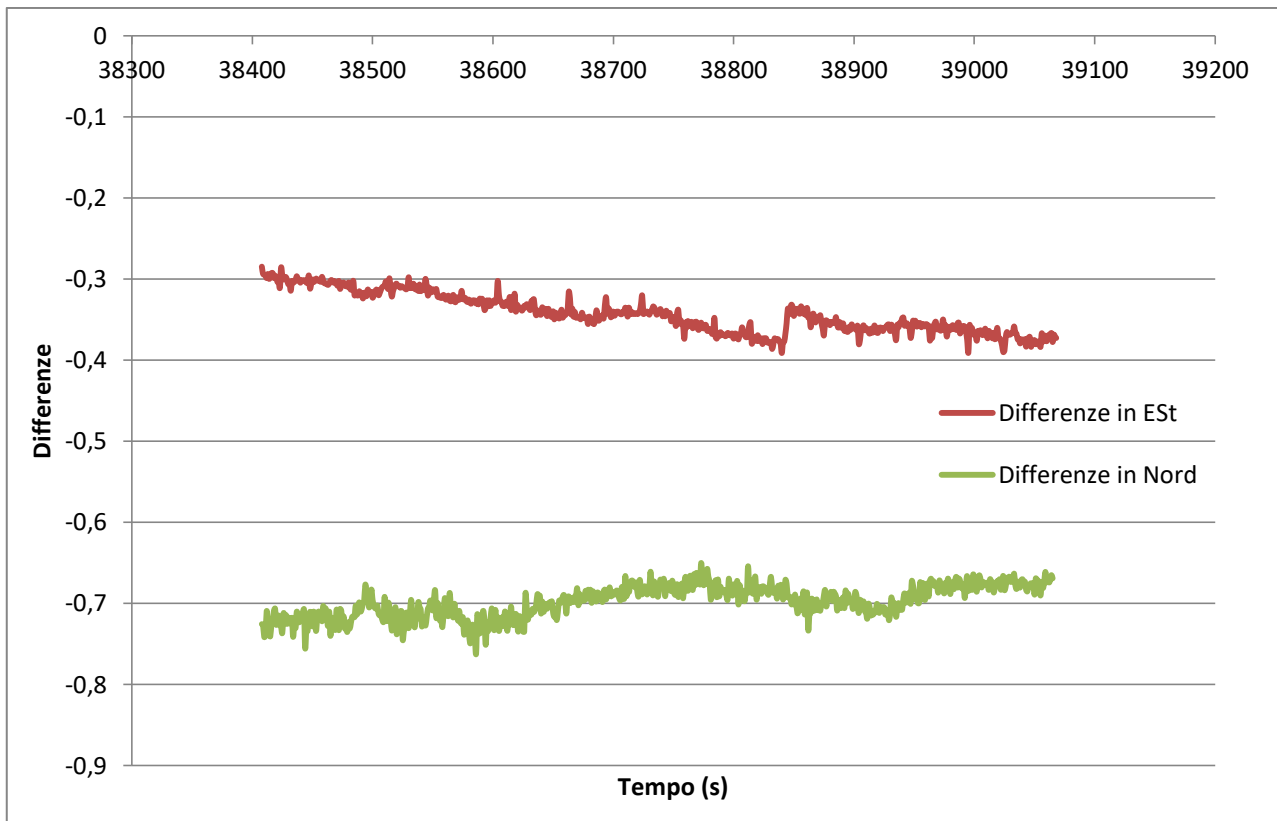


Figura 29: Confronto delle differenze in EST e Nord Tra Post processing con solo Galileo e la verità

Da tali confronti è possibile osservare come le differenze tra verità e post processing con solo Galileo risultano maggiori delle differenze con il post processing completo di tutte le costellazioni, che risultano quasi coincidenti. Inoltre le differenze tra Galileo e verità risultano avere una discontinuità intorno ai 38850 secondi. Da tali considerazioni possiamo dedurre che il software RTKLIB non riesce a fissare l'ambiguità nel caso in cui facciamo il posizionamento con solo Galileo. Lo stesso non si può dire per il post processing completo di tutte le costellazioni, che risulta essere il più stabile e quasi coincidente con la verità.

Si riporta in Tabella 3 un confronto delle differenze medie e le deviazioni standard tra verità e post processing con solo Galileo e tra verità e post processing con tutte le costellazioni.

	Verità - PPK con solo Galileo	Verità - PPK con tutte le costellazioni
Differenze medie in Est (mm)	343	1
Differenze medie in nord (mm)	698	2
Deviazione standard in Est (mm)	24	4
Deviazione standard in Nord (mm)	21	5

Tabella 3: differenze medie e deviazioni standard tra verità e post processing con solo Galileo e tra verità e post processing con tutte le costellazioni.

Successivamente dopo aver costruito la verità in altimetria, questa è stata confrontata con l'altimetria del post processing con tutte le costellazioni. La verità risulta coincidere di meno con il post processing con tutte le costellazioni rispetto che in planimetria, ciò è dovuto alla scarsa precisione dello spostamento manuale (Figura 30).

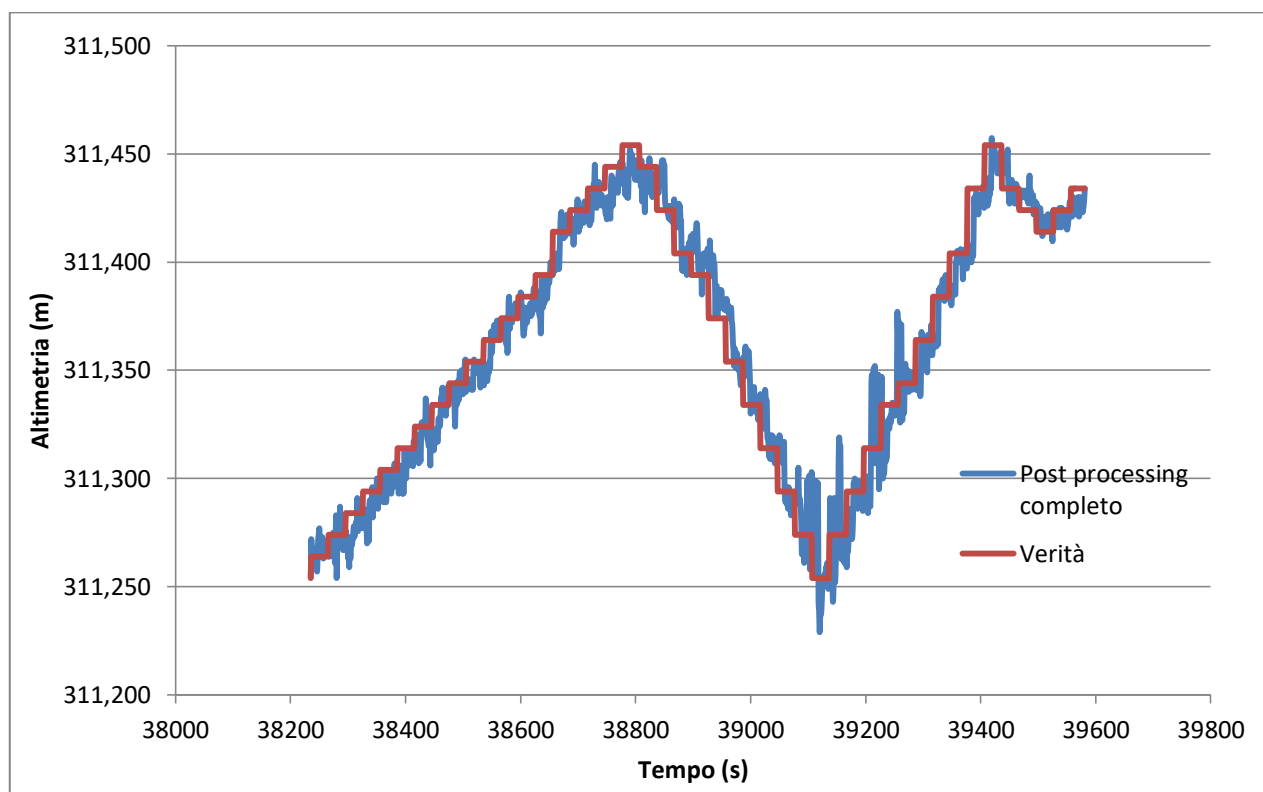


Figura 30: Confronto in altimetria tra post processing completo e verità

Si riportano di seguito le differenze tra post processing completo di tutte le costellazioni e verità (Figura 31) e tra post processing con solo Galileo e verità (Figura 32).

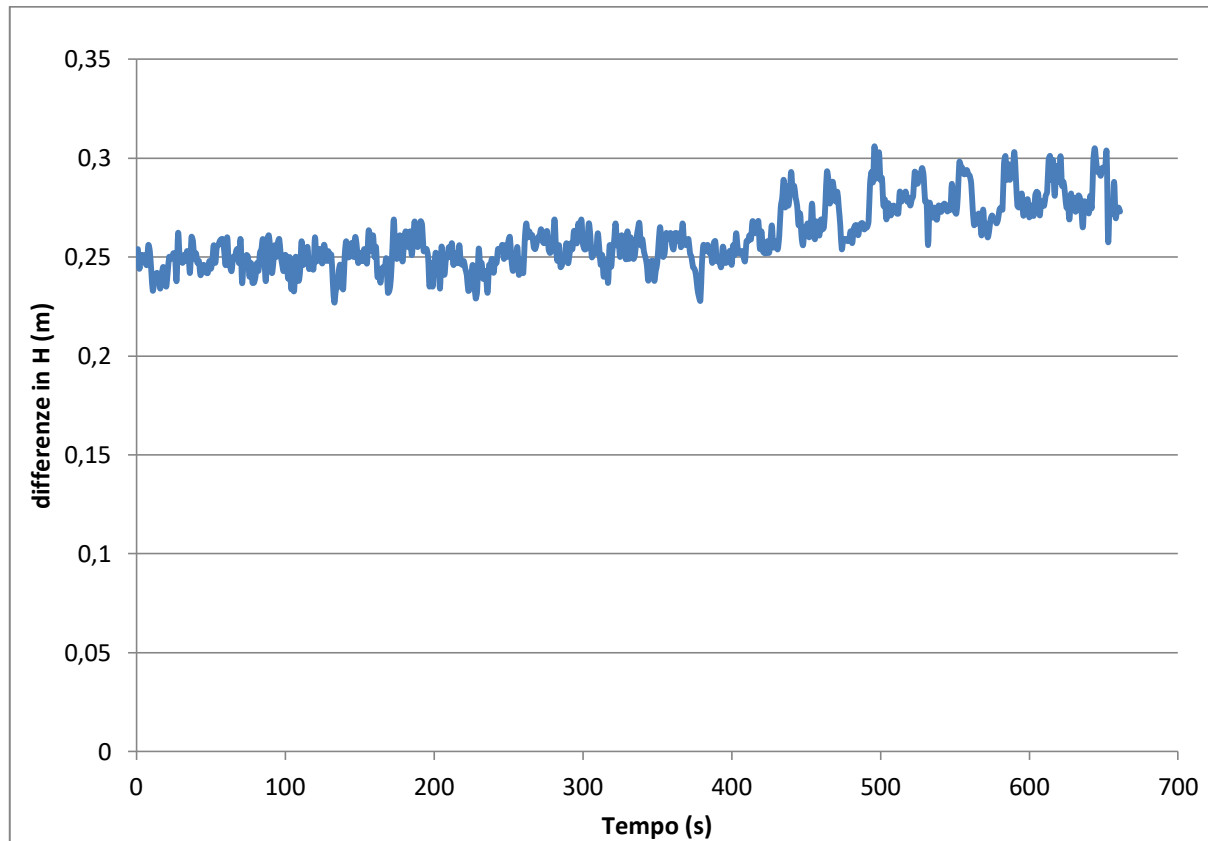


Figura 31: Differenze tra post processing completo e verità

In questo caso la differenza media risulta essere di 0,6 millimetri e la deviazione standard di 11 millimetri.

Tra post processing con solo la costellazione Galileo e la verità si ottiene invece una differenza media di 229 millimetri e una deviazione standard di 152 millimetri. Si riporta un confronto in Tabella 4.

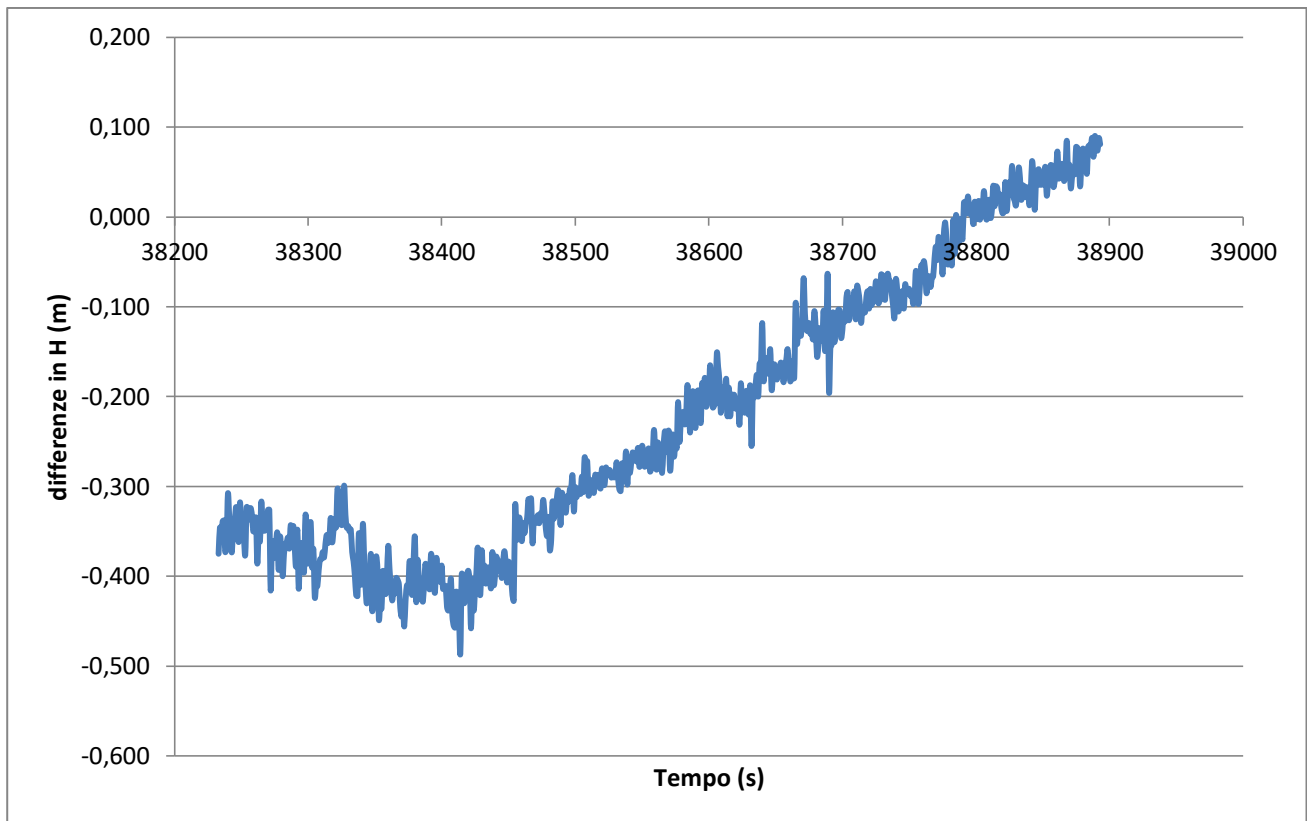


Figura 32: Differenze tra post processing con solo la costellazione Galileo e verità

	Verità - PPK con solo Galileo	Verità - real time	Verità - PPK con tutte le costellazioni
Differenze medie in quota (mm)	229	251	0,6
Deviazione standard in Quota (mm)	152	12	11

Tabella 4: Differenze medie e deviazioni standard in altimetria tra verità e post processing con tutte le costellazioni e verità e post processing con solo la costellazione Galileo

5.7. Confronto tra posizionamento in Real time, Post-processing completo di tutte le costellazioni e la verità

Per poter effettuare un confronto tra i risultati del post-processing con tutte le costellazioni e i risultati in real time è stato necessario effettuare un allineamento dei tempi; dopo aver effettuato una conversione dei tempi da gradi sessagesimali a secondi. Facendo ciò, è stato possibile restituire un valido confronto degli spostamenti in direzione Est, riportato in Figura 33.

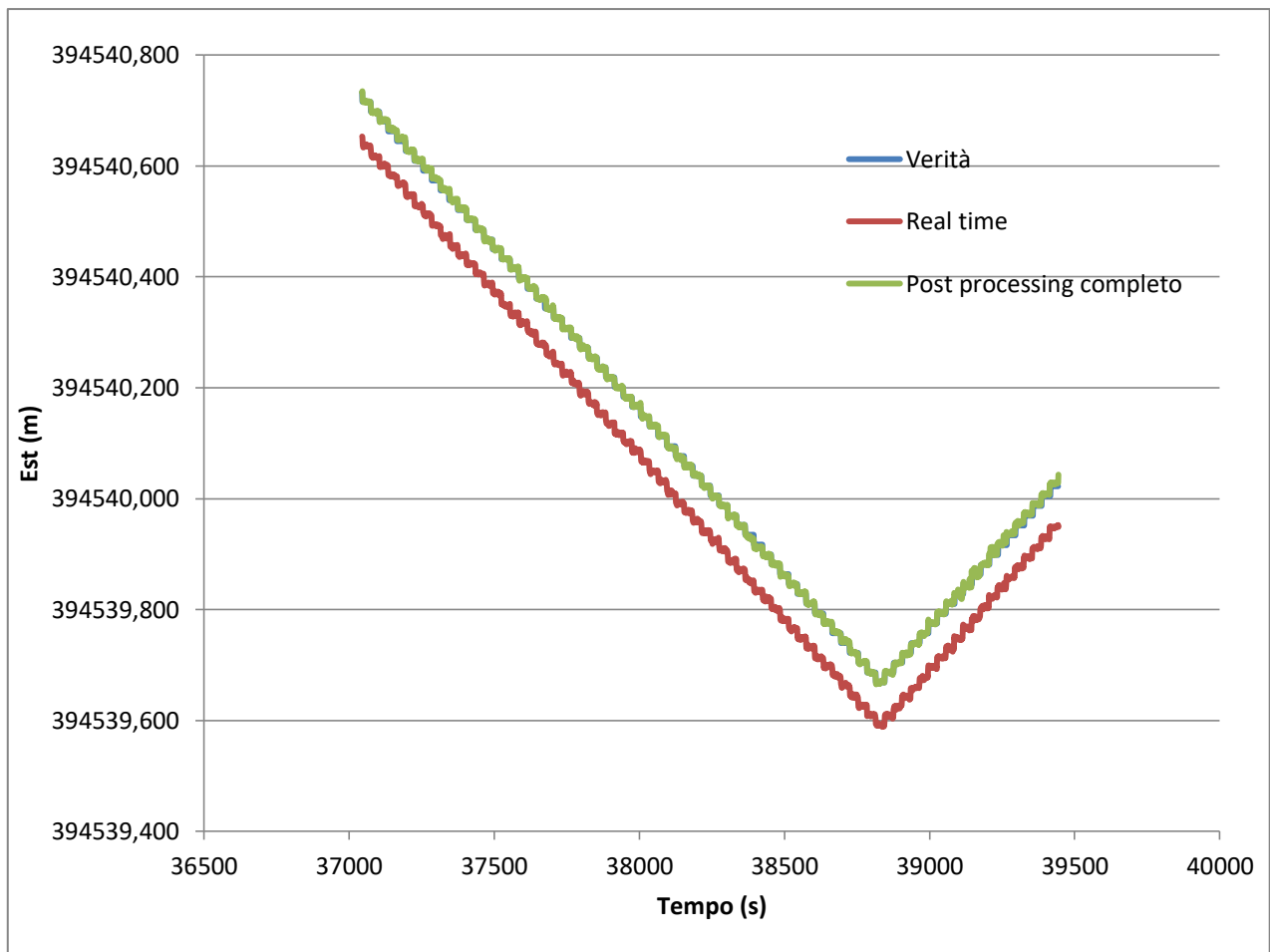


Figura 33: Confronto in direzione Est tra Real time ,post processing completo e verità

Come si può già notare le differenze degli spostamenti in direzione Est per il post processing completo e il real time sono considerevolmente minori di quelle confrontate con il post processing con solo la costellazione Galileo.

La differenza media risulta infatti essere di 79 mm e la deviazione standard di 3 millimetri (Tabella 5). Si riporta la differenza in direzione Est tra il posizionamento in Real time e la verità (Figura 34).

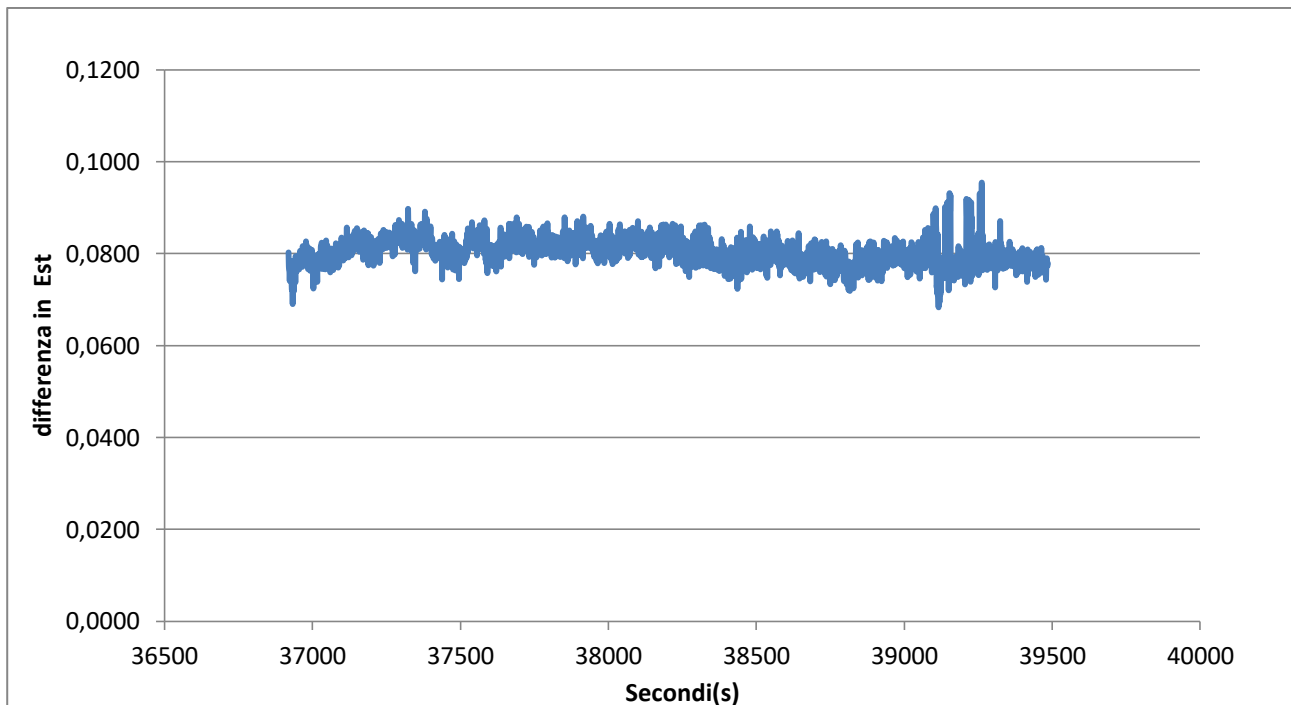


Figura 34: Differenza in direzione Est tra Real time e verità

	Verità - real time	Verità - PPK con tutte le costellazioni
Differenze medie in Est (mm)	79	1
Deviazione standard in Est (mm)	3	4

Tabella 5: Differenze medie e deviazioni standard in Est tra verità e real time e tra verità e post processing con tutte le costellazioni

Per quanto riguarda gli spostamenti in direzione Nord , risultano essere quasi coincidenti per entrambi i risultati (Figura 35). La differenza media risulta infatti essere di 15 millimetri e la deviazione standard di 4 millimetri (Tabella 6).

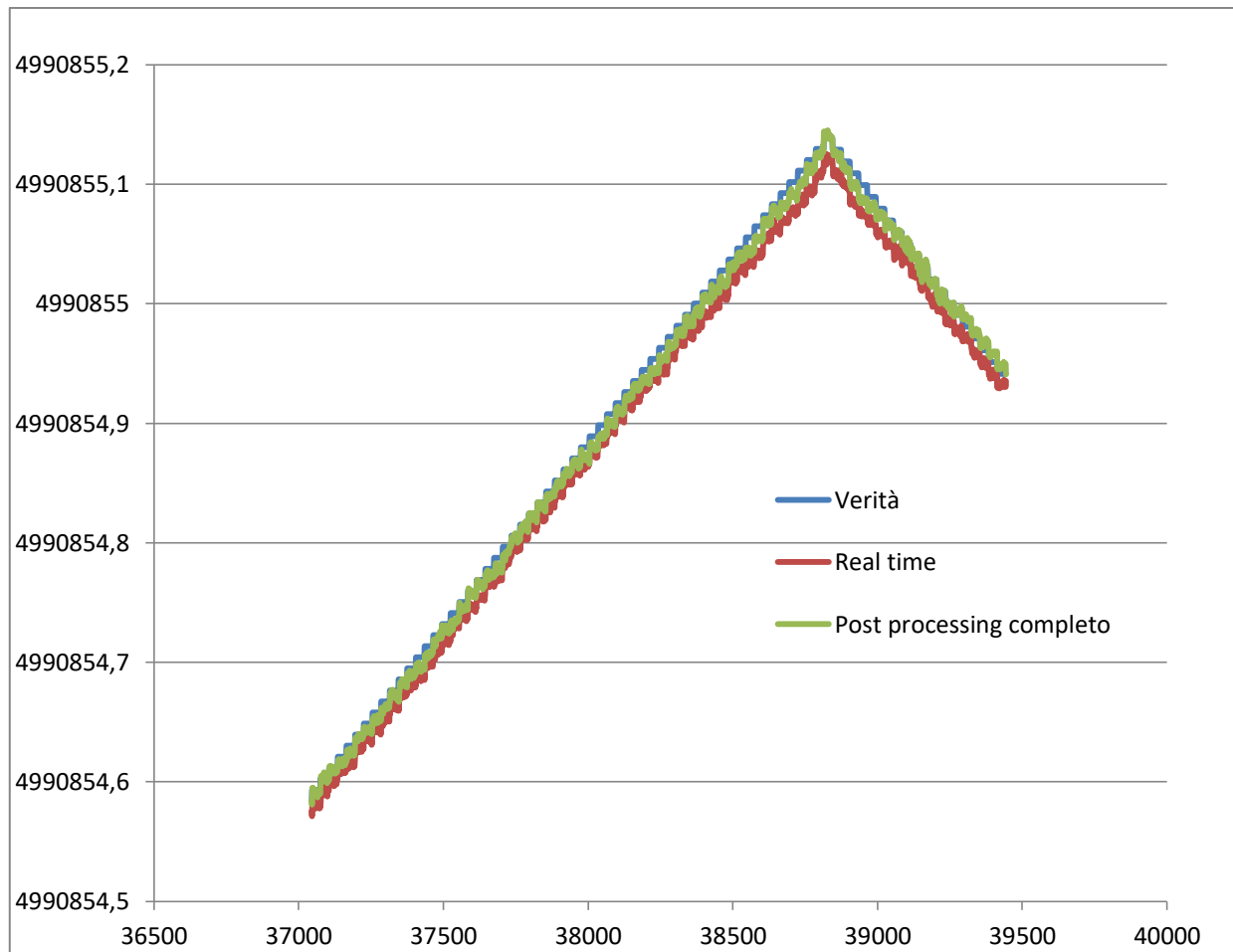


Figura 35: Differenza in direzione Nord tra Real time, post processing completo e verità

	Verità - real time	Verità - PPK con tutte le costellazioni
Differenze medie in nord (mm)	15	2
Deviazione standard in Nord (mm)	4	5

Tabella 6: Differenze medie in Nord tra verità e real time e tra verità e post processing con tutte le costellazioni

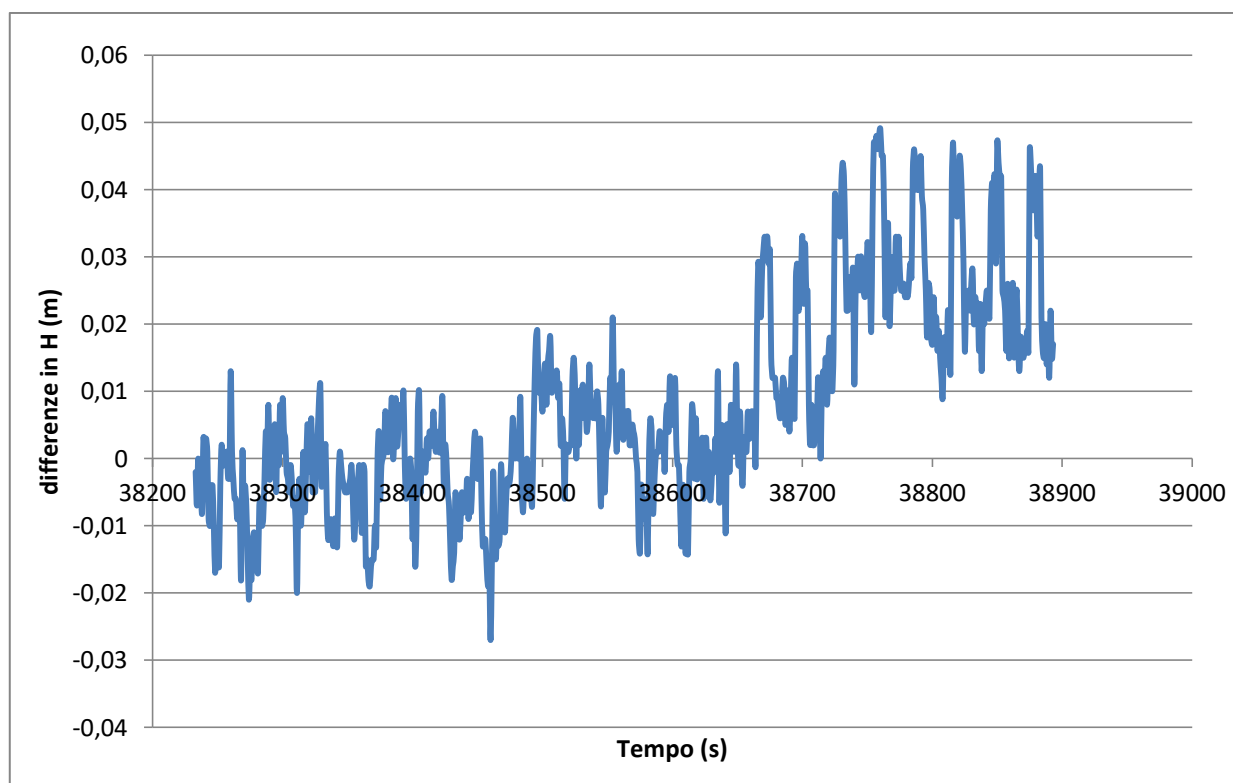


Figura 36: Differenze in altimetria tra verità e real time

La differenza media risulta tuttavia maggiore in altimetria che planimetria, cioè pari a 251 millimetri e la deviazione standard risulta essere 12 millimetri. Ciò è sempre computabile al disturbo maggiore che si ha in altimetria (Figura 36).

Si riportano le differenze medie e deviazioni standard in altimetria tra verità e real time e tra verità e post processing con tutte le costellazioni (Tabella 7).

	Verità - real time	Verità - PPK con tutte le costellazioni
Differenze medie in quota (mm)	251	0,6
Deviazione standard in Quota (mm)	12	11

Tabella 7: differenze medie e deviazioni standard in altimetria tra verità e real time e tra verità e post processing con tutte le costellazioni

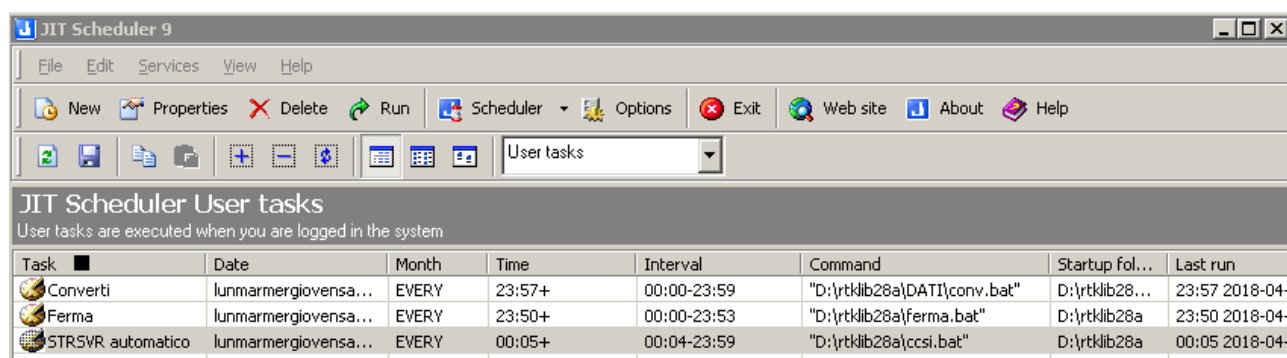
6. Acquisizione e trattamento dei dati di un sistema di monitoraggio GNSS “mass market” in post elaborazione

A seguito dell’installazione dei sistemi di monitoraggio GNSS nelle tre frane oggetto di studio, è necessario acquisire i dati trasmessi dalle stazioni posizionate in loco di ciascuna giornata e memorizzarli in un file RTCM3 (ciò viene fatto con il software STRSVR del pacchetto RTKLIB).

La conversione di tali dati in formato RINEX per il successivo trattamento differenziale con i dati RINEX delle stazioni master viene fatta utilizzando il comando CONVBIN. Dopo aver convertito i file rinex di osservazione e navigazione questi vanno compressi cancellando il file RTCM3 di origine. Infine per avere solo i dati della giornata di interesse, viene calcolato il giorno giuliano e tutte le procedure per ciascuna stazione vengono schedate in un software gratuito JIT scheduler (Figura 37). Tale procedure sono eseguite dal file di comandi CONV.BAT.

Il trattamento differenziale statico dei dati delle stazioni rover e master avviene con il software RN2RTKP che è la versione a linea di comando del software RTKPOST.

I file così trattati sono raccolti in un report degli output del post processing. In tal modo è possibile avere le coordinate, relativi scarti quadratici medi (SQM), e relativi grafici che vengono aggiornati giornalmente. Si riportano di seguito gli spostamenti in planimetria (fissati) registrati in Madonna del Sasso (Figura 38) e gli spostamenti in altimetria (fissati) per lo stesso punto (Figura 39).



The screenshot shows the JIT Scheduler 9 application window. It has a menu bar (File, Edit, Services, View, Help) and a toolbar with icons for New, Properties, Delete, Run, Scheduler, Options, Exit, Web site, About, and Help. Below the toolbar is a section titled 'JIT Scheduler User tasks' with a subtitle 'User tasks are executed when you are logged in the system'. A dropdown menu labeled 'User tasks' is visible. The main area contains a table with the following data:

Task	Date	Month	Time	Interval	Command	Startup fol...	Last run
Converti	lunmarmergiovensa...	EVERY	23:57+	00:00-23:59	"D:\rtklib28a\DATI\conv.bat"	D:\rtklib28...	23:57 2018-04-
Ferma	lunmarmergiovensa...	EVERY	23:50+	00:00-23:53	"D:\rtklib28a\ferma.bat"	D:\rtklib28a	23:50 2018-04-
STRSVR automatico	lunmarmergiovensa...	EVERY	00:05+	00:04-23:59	"D:\rtklib28a\ccsi.bat"	D:\rtklib28a	00:05 2018-04-

Figura 37: Varie procedure schedate in JIT scheduler per ogni stazione

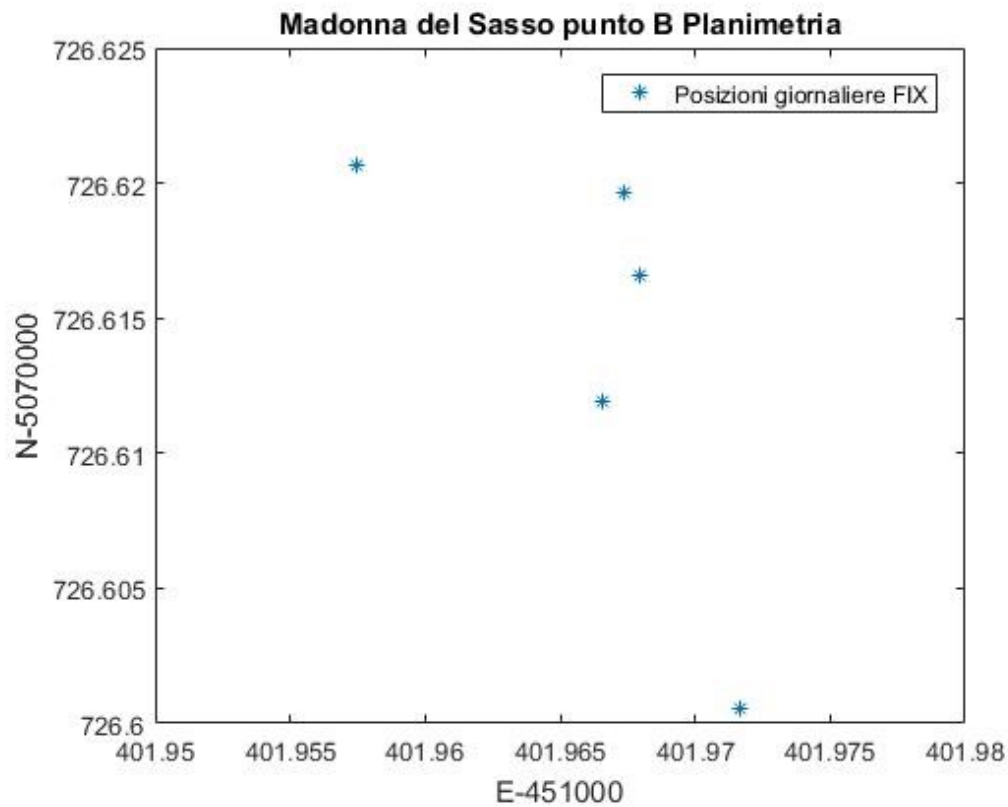


Figura 38: Madonna del sasso punto B planimetria

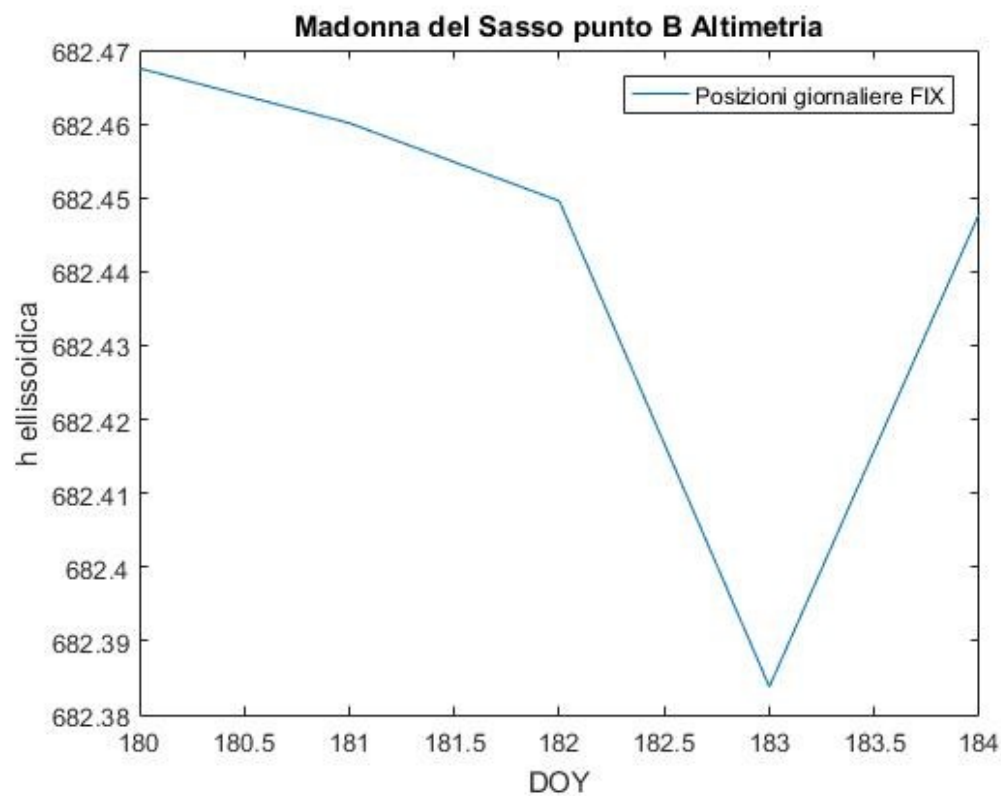


Figura 39: Madonna del sasso punto B altimetria

7. Progettazione del sistema integrato di monitoraggio, utilizzo di accelerometri e filtraggio delle accelerazioni

Finora ci siamo occupati del monitoraggio con misure GNSS. Come accennato tuttavia, il prototipo costruito e installato su 5 siti di misura è qualcosa di più complesso, che chiamiamo “sistema integrato di monitoraggio”. Anche se la sua descrizione dettagliata esula dagli scopi della tesi, occorre descriverlo in breve per comprenderne la capacità di monitoraggio e i problemi superati durante l’installazione. Vedremo infine in sintesi come si possono anche utilizzare le misure accelerometriche.

Per poter funzionare 24 ore su 24 e gestire i vari sensori, il sistema preleva energia da una batteria alimentata da pannelli fotovoltaici. Il governo di tutti i sensori descritti in 7.1 è affidato a un micro calcolatore con sistema operativo Linux.

Le caratteristiche principali del sistema integrato sono:

- Range di temperature di funzionamento che vadano bene per le installazioni in alta montagna;
- Bassi consumi energetici: minori o inferiori a 1 W. Infatti in caso di installazione in luoghi non raggiunti dalla rete elettrica, questi vengono alimentati da un sistema a pannello solare e batteria, ma tale sistema deve essere in grado di assorbire poca energia.
- Dotati di sistema operativo LINUX, in grado di fornire servizi per la gestione e la memorizzazione dei dati .

7.1. Sensori

I sensori del sistema di monitoraggio sono di tre tipi, e vengono descritti di seguito:

- Sensori di posizionamento GNSS: si tratta del sensore descritto in precedenza, il cui flusso di dati viene acquisito tramite porta seriale di comunicazione denominata COM e trasmesso via internet in formato RTCM3.1.
- Sensore di inclinazione: Si tratta di un accelerometro triassiale che verrà descritto di seguito. L’uscita di tale sensore è in tensione e varia tra 0,5 volt e 4,5 volt: viene acquisita da un ADC (Analog-to-Digital converter).
- Sensore di temperatura, pressione e umidità: con uscita in tensione, anch’esso acquisibile tramite ADC. Tale sensore deve garantire la copertura del range termico specialmente in luoghi di montagna.

Infine, tramite ADC, viene acquisita la tensione della batteria, in modo da poter misurare continuamente la disponibilità di energia della batteria e consente di gestire e ottimizzare l’invio dei dati, passando se è necessario da real-time a near real-time e viceversa in base al livello di carica delle batterie.

Il sensore di posizionamento GNSS e il sensore di inclinazione acquisiscono effettivamente le misure che servono per il monitoraggio dei fenomeni franosi. Invece il sensore di temperatura e la misura della tensione delle batterie sono strumenti che servono per il funzionamento e la gestione del sistema integrato di monitoraggio.

7.1.1. Sensore di inclinazione

Il sensore di inclinazione o accelerometro triassiale (*modello 4030* della TE Connectivity) fornisce in output i valori di accelerazione “grezzi” sui tre assi e l’indicazione del tempo. È un sensore di piccole dimensioni e poco peso, consigliato per monitoraggi strutturali (Figura 40).

Anche se questo sensore può monitorare le accelerazioni del punto di misura, si è deciso di utilizzarlo solo per calcolare l’inclinazione del punto misurando i rapporti tra accelerazione verticale e le due componenti orizzontali. In pratica tale sensore funge da inclinometro.

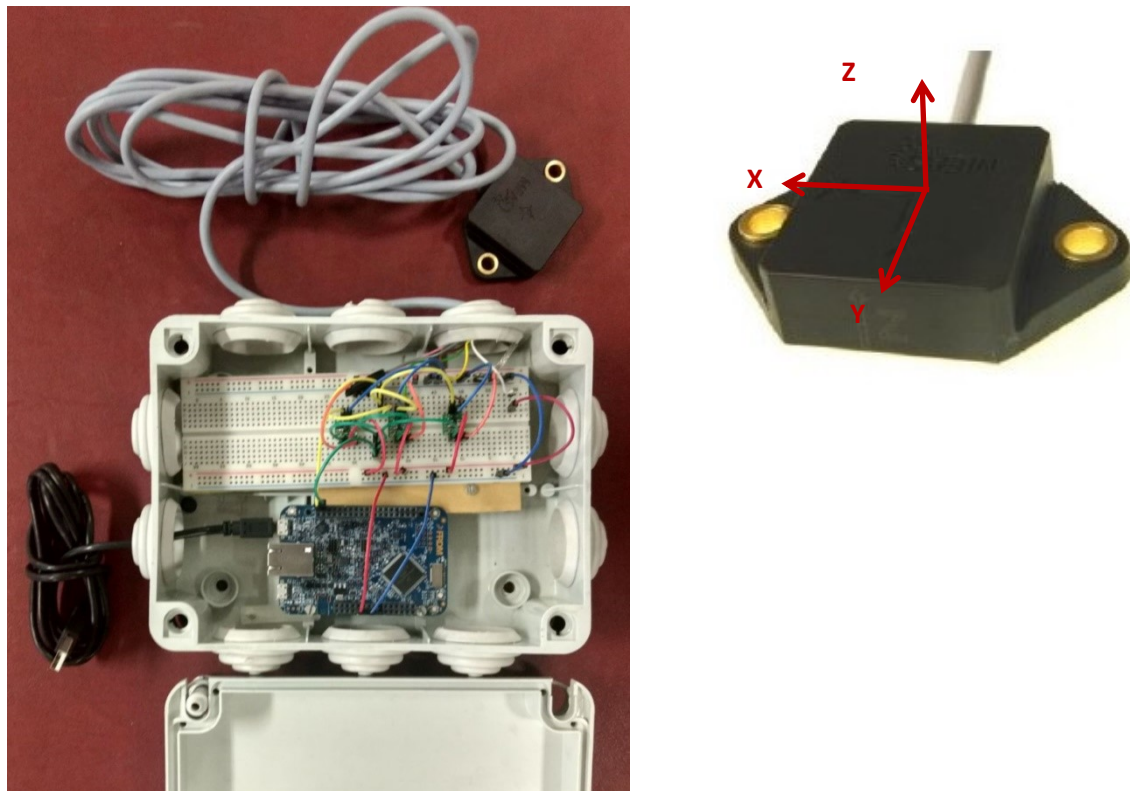


Figura 40: Accelerometro triassiale

Il sensore è composto da tre accelerometri ortogonali. Come ogni sensore di questo tipo può essere influenzato da tre errori sistematici su ogni asse:

- Un bias;
- Un fattore di scala;
- Non ortogonalità dei tre assi.

Ognuno di questi accelerometri ha errori sistematici diversi. Prima dell'istallazione del sensore, questi sono stati accuratamente calcolati con diverse ore di misura mediante il “test delle sei facce”.

Il modello di errore può essere espresso attraverso la matrice di calibrazione, riportata di seguito:

$$\begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^1 & e_1^2 & e_1^3 & e_1^4 \\ e_2^1 & e_2^2 & e_2^3 & e_2^4 \\ e_3^1 & e_3^2 & e_3^3 & e_3^4 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Dove:

- La quarta colonna contiene i valori dei bias sui tre assi;
- Gli elementi diagonali della matrice 3×3 sono i fattori di scala dei tre assi;
- Gli elementi fuori diagonale rappresentano i fattori di non ortogonalità;
- l_x , l_y e l_z sono le letture sui tre assi
- t_x , t_y e t_z sono i valori teorici che dovrebbero avere le letture. Per le sei facce questi sono per ogni epoca di misura:

$$\begin{pmatrix} g \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} -g \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ g \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ g \\ 1 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \\ 1 \end{pmatrix}$$

In questo modo si ottengono 3 equazioni per ogni epoca di misura. Per la prima epoca i voli teorici delle

letture sono $\begin{pmatrix} g \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, quindi si ottengono tre equazioni del tipo :

$$\begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^1 \times g & 0 & 0 & e_1^4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_2^1 \times g & 0 & 0 & e_2^4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_3^1 \times g & 0 & 0 & e_3^4 \end{bmatrix}$$

Allo stesso modo si ottengono le 3 equazioni per le altre 5 epoche di misura, riportate precedentemente.

Il sistema di equazioni ridondanti può essere risolto con il principio dei minimi quadrati. I 12 parametri stimati vengono poi usati per la correzione delle misure degli accelerometri, compensando i bias e migliorando la precisione degli assetti angolari. Il test delle 6 facce deve essere eseguita rispettando le condizioni di ortogonalità, non sempre garantite dalle pareti del box che racchiude il sensore. Allo scopo sono state eseguite misure di planarità e ortogonalità delle superfici, su diversi oggetti (tra cui un supporto meccanico) Figura 41.



Figura 41: verifica planarità e ortogonalità del supporto meccanico per il test delle 6 facce

La modalità del test delle 6 facce è riportata in Figura 42. È necessario verificare oltre all'ortogonalità delle pareti del supporto anche l'ortogonalità della posizione delle facce. Il piano di appoggio del supporto è stato rettificato al centesimo di millimetro e reso orizzontale con livelle toriche di precisione (2 secondi per 2 millimetri).



Figura 42: calibrazione inclinometro 4030 – misure sulle 6 facce

I valori di accelerazione grezzi sono corretti con i valori di calibrazione ottenuti dalla (1).

7.2. Filtraggio accelerazioni calcolate tramite il sistema di monitoraggio integrato

Il sensore di inclinazione (accelerometro triassiale) integrato con il sensore di temperatura misura i valori di accelerazione nelle tre direzioni. Dopo la calibrazione del sensore di inclinazione, è stata posizionata la strumentazione sul terrazzo del DIATI del Politecnico di Torino.

I valori di accelerazione presentano alta rumorosità con picchi elevati al variare del tempo se l'acquisizione avviene ogni secondo.

L'obiettivo è stato quello di filtrare i valori di accelerazione nelle tre direzioni (X,Y,Z) e vedere infine la correlazione che queste hanno con la temperatura che viene fatta anch'essa variare con il tempo.

Dopo aver importato i dati relativi alle tre accelerazioni: a_x , a_y , a_z , il tempo di acquisizione e le temperature da un file di testo letto da un software scritto in MATLAB (Allegato 4- Filtraggio delle accelerazioni), è stata effettuata un primo filtraggio, ovvero sono stati eliminati i rumori grossolani. Ciò è stato effettuato tramite una mediana mobile (movmedian) su 11 valori.

E' possibile notare come le accelerazioni nelle tre direzioni siano correlate, ovvero si osservano gli stessi picchi negli stessi istanti di tempo (Figura 43).

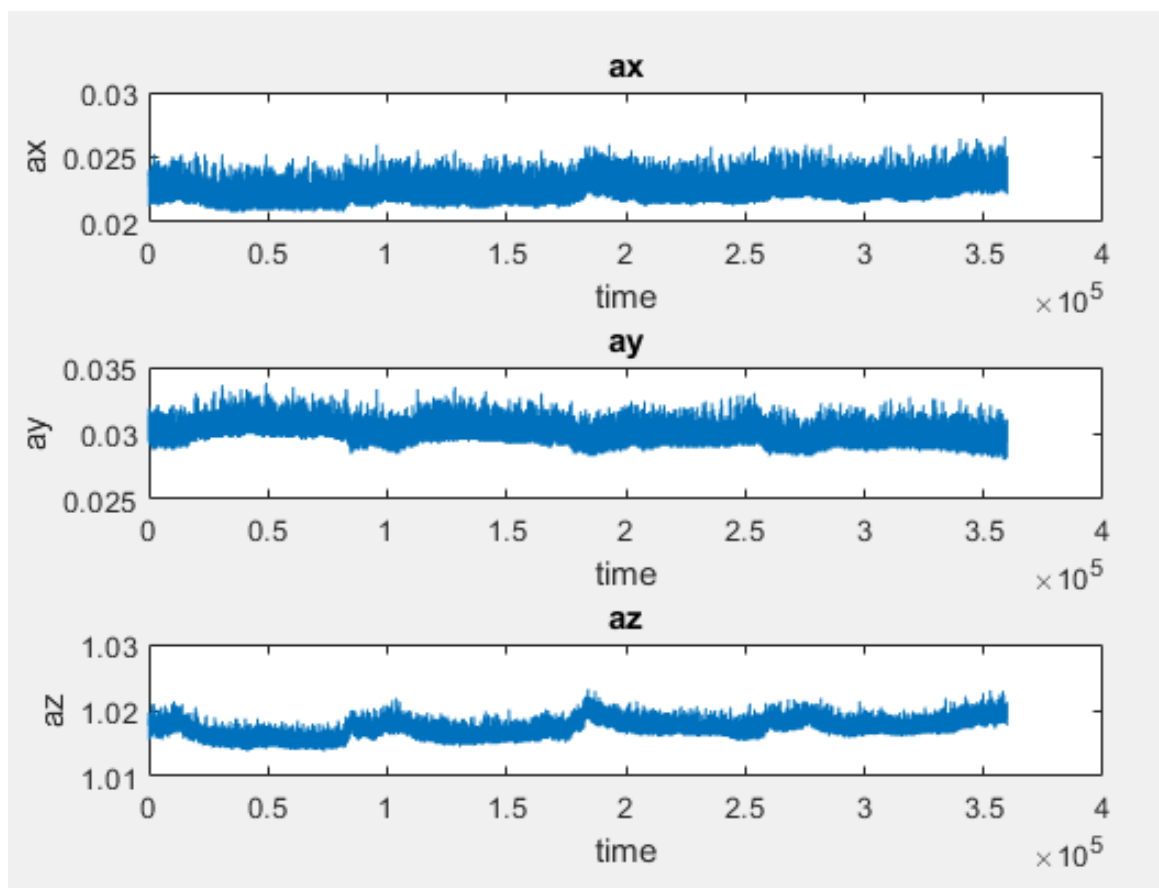


Figura 43: Accelerazioni nelle tre direzione (X, Y, Z) dopo la mediana mobile

Per tale motivo conviene considerare il modulo delle accelerazioni lungo x e y, calcolato come di seguito:

$$a_{plan} = \sqrt{(accx_m^2 + accy_m^2)}$$

dove:

a_{plan} = accelerazione planimetrica

$accX_m$ = accelerazione dopo la prima filtrazione lungo x

$accY_m$ = accelerazione dopo la prima filtrazione lungo y

Inoltre, se le accelerazioni sono usate per calcolare l'inclinazione, è corretto valutare anche il modulo di tale inclinazione e a maggior ragione considerare assieme le due componenti X e Y planimetriche.

Siccome poi ci interessa studiare come varia l'accelerazione rispetto alla verticale. Analizzeremo il rapporto:

$$\varepsilon = \frac{a_{plan}}{acc_{zm}}$$

Dove:

acc_{zm} = accelerazione dopo la prima filtrazione lungo z

Successivamente viene progettato un filtro che consenta di eliminare i rumori (picchi) che si hanno proprio nella variazione ε in funzione del tempo.

Il metodo più utilizzato per costruire un filtro low pass è quello di Lanczos. Tale metodo si basa su definire la lunghezza del filtro (m). Se si aumenta la lunghezza m si migliora il risultato ma si scartano tanti dati all'inizio e alla fine della serie.

Prima di definire la lunghezza del filtro si sceglie la “*cutoff frequency*”. Questa frequenza segna il passaggio tra le frequenze ammesse ($f < f_{cut}$) e quelle da rimuovere ($f > f_{cut}$). Nel nostro caso i picchi più elevati si hanno in un intervallo di circa 300 secondi, quindi la f_{cut} sarà 0.005 Hz. Viene scelta allora una passband frequency pari a 0.001 Hz e una stopband frequency pari a 0.02 Hz.

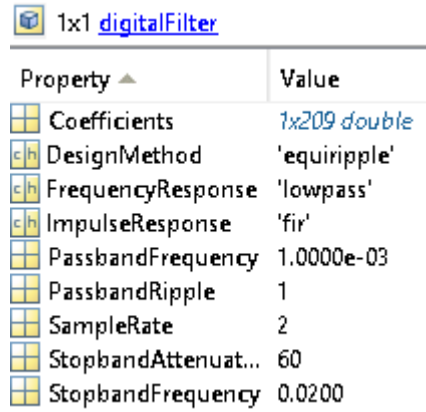
I filtri in MATLAB operano su vettori. La funzione $Y = \text{filtfilt}(b,a,x)$ elabora i dati in ingresso, memorizzati nel vettore x mediante il filtro descritto dai vettori a e b generando l'output y (Figure 44).

L'output y è una combinazione lineare di dati precedenti e futuri, come è riportato di seguito:

$$a(1)y(n) = b(1)x(n) + b(2)x(n-1) + \dots + b(nb)x(n-nb+1) - a(2)y(n-1) - \dots - a(na)y(nna+1)$$

Dove:

- $a = 1$;
- b = coefficienti di Lanczos



Property ▲	Value
Coefficients	1x209 double
DesignMethod	'equiripple'
FrequencyResponse	'lowpass'
ImpulseResponse	'fir'
PassbandFrequency	1.0000e-03
PassbandRipple	1
SampleRate	2
StopbandAttenuat...	60
StopbandFrequency	0.0200

Figure 44: Filtro low pass di Lancos

Si osserva che:

- 1) La somma dei coefficienti di Lanczos deve essere uno: ciò assicura che la risposta sia uno per $f = 0$; la media dei dati non cambia (stima corretta). Per far ciò i coefficienti vengono normalizzati rispetto la somma.
- 2) I coefficienti sono simmetrici. Ciò assicura che il filtro non sposta massimi e minimi e non produce slittamenti.
- 3) I coefficienti sono circa pari alla lunghezza del filtro (209).

Si riporta di seguito un confronto dell'angolo ε , deviazione della verticale, dopo il primo filtraggio e dopo il secondo filtraggio (low pass) e infine come varia la temperatura in funzione del tempo (Figure 45).

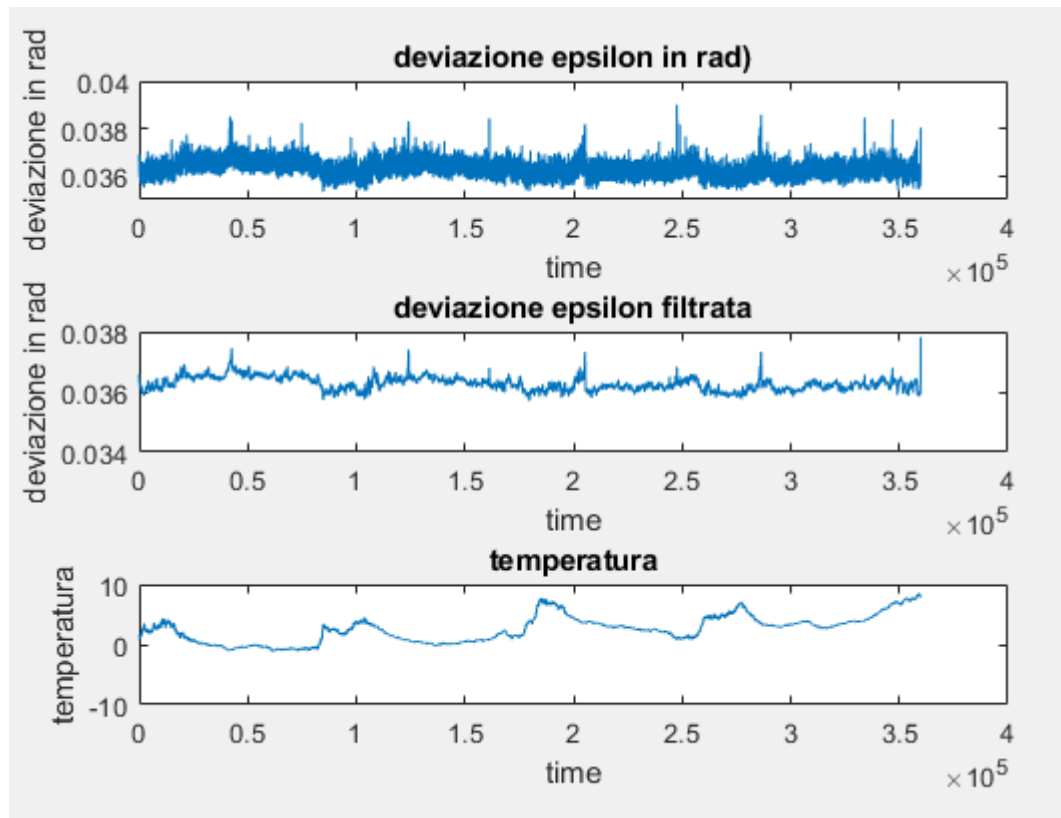


Figure 45: Variazioni rispetto alla verticale dopo aver applicato la mediana e dopo aver applicato il filtro low pass. In basso la variazione della temperatura con il tempo(120 secondi)

Si può notare come il filtro passa basso progettato con lunghezza pari a 300, riesce ad eliminare in gran parte gli errori grossolani e ridurre i picchi.

È possibile inoltre fare un confronto tra le deviazioni grezze e quelle filtrate dalla media, che risultano private in gran parte dagli errori grossolani

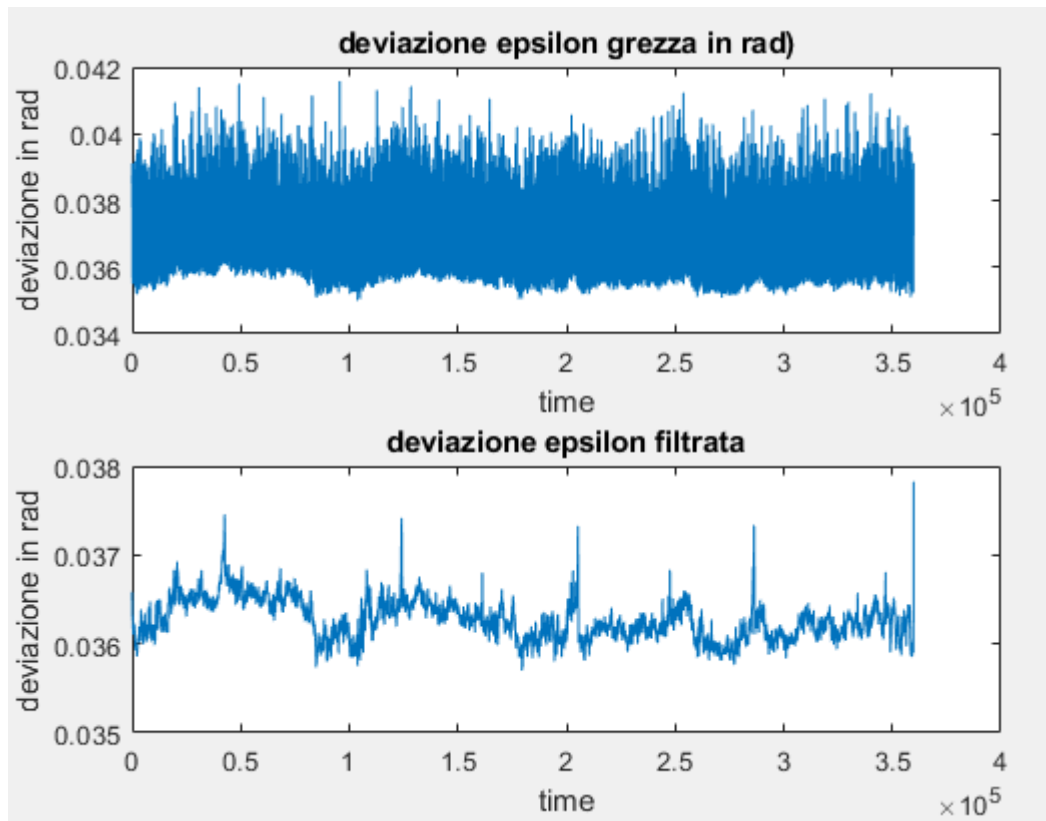


Figure 46: Deviazioni rispetto alla verticale grezze e filtrate (mediana mobile più low pass). Tempo di misura di circa 12 ore.

La deviazione standard per le variazioni delle accelerazioni grezze rispetto alla verticale è pari a 6.4518×10^{-4} rad.

Applicando il primo filtro tramite la mediana la deviazione standard si riduce a 3.0006×10^{-4} rad.

Infine applicando il filtro low pass si ottiene una riduzione della deviazione standard che risulta essere pari a 2.2304×10^{-4} rad, pari a circa 40 secondi sessagesimali.

Si può notare come tali deviazioni filtrate presentano una piccola correlazione con la temperatura che viene misurata contemporaneamente con il sensore di temperatura. Già graficamente si può osservare come le variazioni repentine delle deviazioni si hanno negli stessi istanti di tempo in cui si verificano per la temperatura. Tuttavia gli andamenti sembrano invertiti. Una verifica di ciò è stata fatta tramite il comando: “*xcorr*” su MATLAB, che permette di calcolare la cross-correlation di due segnali come valore medio del prodotto delle deviazioni e le temperature.

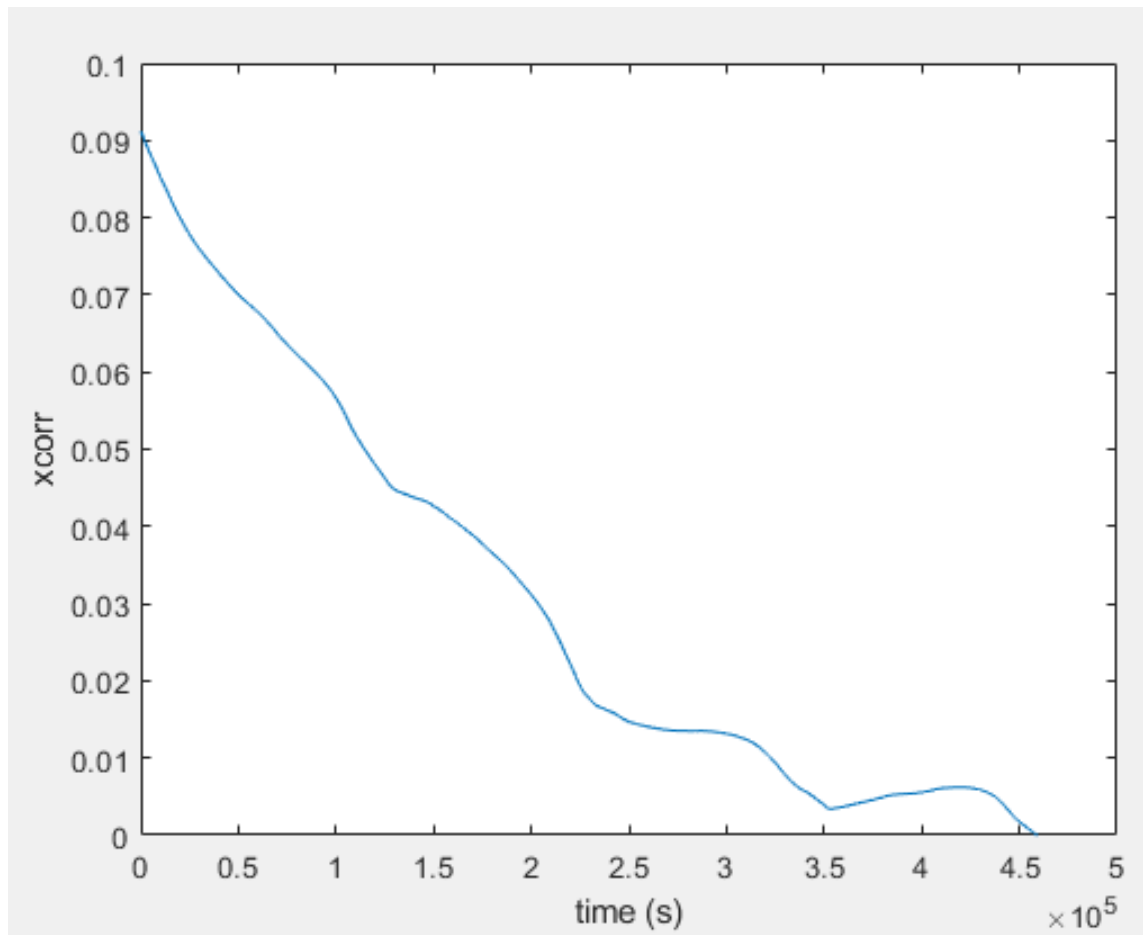


Figura 47: Cross-correlation tra accelerazioni e temperatura

Si può notare dalla Figura 47 come la cross-correlation assume valori piccoli (0.09), e diminuisce all'aumentare del tempo.

8. Conclusioni

L'obiettivo della tesi è stato quello di analizzare le prestazioni reali della strumentazione GNSS a basso costo se utilizzata sia come stazione master che come rover in una rete di stazioni permanenti (SP).

L'utilizzo di tali ricevitori permette un raffittimento della maglia della rete, cioè più strumenti distribuiti "low cost".

Prima di verificare l'efficacia di tale strumentazione nei 3 fenomeni franosi è stato necessario studiarne l'affidabilità delle misure effettuate, ovvero gli spostamenti.

Si è voluto verificare se era possibile osservare spostamenti appositamente imposti ad un ricevitore geodetico, che si colloca in una fascia intermedia di costo tra i ricevitori professionali e quelli mass market. La prova consisteva nel dare spostamenti controllati al ricevitore su di una slitta sia in planimetria e sia in altimetria. Il ricevitore è stato in grado di fornirci un posizionamento in real time direttamente sul telefono tramite il software NTRIP *Client* e un posizionamento in post processing tramite rete wireless alla fine delle misure. A tale scopo si è scelto di usare un software free (RTKLIB) per poter rimanere nel basso costo e poter effettuare diverse modalità di posizionamento. Interessante è stato il confronto tra posizionamento post-processing tenendo conto di tutte le costellazioni, ovvero Glonass, Galileo e GPS e post-processing con solo la costellazione Galileo.

Tale confronto ha dimostrato che il software non riesce a fissare bene l'ambiguità con la sola costellazione Galileo. I risultati ottenuti infatti sono più instabili degli altri e si discostano dal posizionamento con tutte le costellazioni. Ciò è relativo ad un problema di fissaggio dell'ambiguità di fase per il software quando la costellazione Galileo funziona senza l'appoggio delle altre costellazioni. Questo non è computabile solo ad una scarsa visibilità della costellazione Galileo, poiché prima di iniziare le misure il planning online ci ha permesso di progettare le misure con valori di DOP bassi (minori di 4). Quindi anche se la costellazione Galileo non è completa è stato interessante vedere come migliori solamente il posizionamento di precisione anche se non è ancora autonoma.

Il post processing con tutte le costellazioni risulta essere più stabile e non si discosta di tanto dal posizionamento Real time. Perciò non è altro che lo spostamento imposto definito come verità di confronto.

La verità risulta avere piccole differenze con il posizionamento real-time e ancora di meno con il post processing completo di tutte le costellazioni. Lo stesso non si può dire con il posizionamento con solo la costellazione Galileo. Si riporta in Tabella 8 un confronto delle medie e deviazioni standard tra la verità di misura e le tre opzioni di posizionamento.

	Verità - PPK con solo Galileo	Verità - real time	Verità - PPK con tutte le costellazioni
Differenze in Est (mm)	697	79	1
Differenze in nord (mm)	343	15	2
Differenze in quota (mm)	229	251	0,6
Deviazione standard in Est (mm)	24	3	4
Deviazione standard in Nord (mm)	21	4	5
Deviazione standard in Quota (mm)	152	12	11

Tabella 8: Confronto dei risultati delle tre opzioni di posizionamento

L'utilizzo di strumentazione GNSS mass market pone due problemi:

- l'utilizzo di particolari algoritmi in grado di fissare l'ambiguità in breve tempo senza l'utilizzo di entrambe le frequenze.
- Distanze limitate tra master e rover sia per quanto riguarda il real-time che il post processing .

Per far fronte a ciò sono state create delle VRS (*Virtual Reference Station*) in posizione prossima al sito da monitorare. Ciò porta ad un aumento della precisione anche se il tempo di acquisizione è limitato. Così che, anche le misure in real time possono essere eseguite con successo in singola frequenza.

In tal modo è possibile acquisire dalle stazioni virtuali le coordinate, i relativi SQM, i grafici in planimetria e altimetria per ogni sito, che vengono schedati e aggiornati giornalmente.

Il lavoro di tesi è stato concluso verificando l'affidabilità di un sistema integrato di monitoraggio costituito da diversi sensori. Particolare importanza è stata data al sensore di inclinazione in grado di fornirci i valori di accelerazione nelle tre direzioni, utile al fine di misurare spostamenti e deformazioni di una frana.

Il sensore di inclinazione integrato con il sensore di temperatura misura i valori di accelerazione nelle tre direzioni. Queste risultano avere picchi elevati e quindi errori grossolani. L'obiettivo dopo la calibrazione è stato quello di filtrare i valori di accelerazione nelle tre direzioni (X,Y,Z) e vedere infine la correlazione che queste hanno con la temperatura che viene fatta anch'essa variare con il tempo.

Importante notare come varia la deviazione standard tra le variazioni delle accelerazioni grezze rispetto alla verticale e quelle ottenute applicando il filtro low pass (Tabella 9).

	Variazioni delle accelerazioni grezze rispetto alla verticale (rad)	Variazioni delle accelerazioni filtrate rispetto alla verticale (rad)
Deviazione standard	6.4518e-04	2.2304e-04

Tabella 9: Confronto della deviazione standard tra accelerazioni grezze e filtrate

La correlazione tra le variazioni delle accelerazioni e la temperatura risulta essere molto piccola; si raggiunge infatti una cross-correlazione media di 0,05 ed è quindi stata trascurata.

ALLEGATI

Allegato 1- Configurazione del ricevitore RUIDE S680P

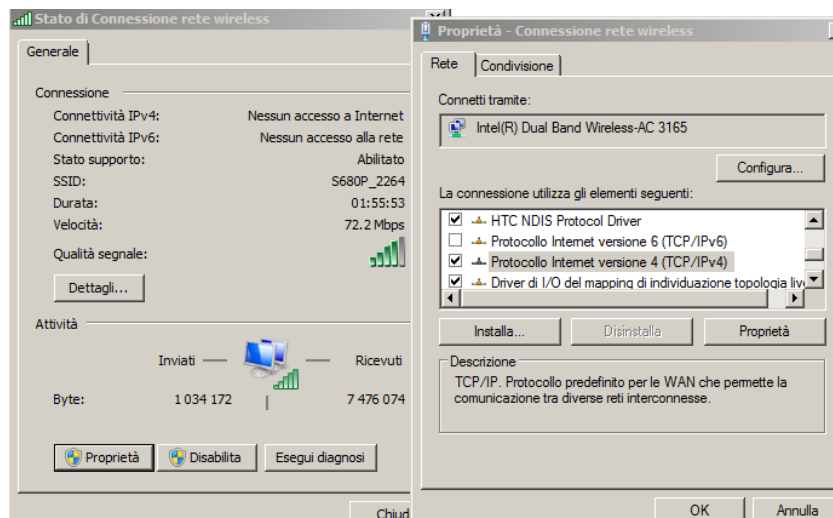


Figure 48: Configurazione rete wireless

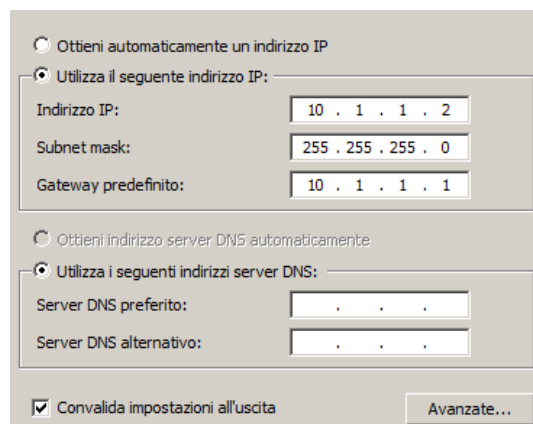


Figure 49 : Configurazione rete wireless (indirizzo IP)

Allegato 2- Lettura record con solo la costellazione galileo

```

%% LETTURA RECORD "$POS"
clc
deg=180/pi;
sa=6378137;
alfa = 1/298.257223563;
l0=9;
E0=500000;

pos='2018/04/24';
fid = fopen('PostprocessingTUTTE.txt');
% fileoutput= output('pos.txt');
fid2=fopen('postproTutte.txt','wt');
tline = fgetl(fid); %Legge la prima riga
% "1" se è position fix e 2 triplette di coordinate. la prima tripletta
% è con float, la seconda è con position fix
deltag=2*86400; %Giorni dall'inizio settimana
deltautc=18;
ir=0;
while ischar(tline) %Ciclo che consente di leggere tutte le righe con prefisso
$POS
    if strfind(tline,pos)==1;
        dati=str2num(tline(25:end)); %Converto un vettore separato da virgole in
numeri
        ora=str2num(tline(12:13));
        minuti=str2num(tline(15:16));
        secondi=str2num(tline(18:23));
        tow=ora*3600+minuti*60+secondi;
        if dati(4)==1; %Se la posizione è "fix"
            ir=1+ir;
            tempo(ir)=tow;
            % disp(tline(6:end)) %Se la linea contiene 'POS', questa
viene stampata
            % [E(ir),N(ir)]=deg2utm(dati(1),dati(2));
            [E(ir),N(ir),mi]=getone(sa,alfa,dati(1),dati(2),l0,E0);
            H(ir)=dati(3);
            % fprintf(fid2, '%12.3f %12.3f %8.3f\n', tline(6:end)); %Stampa il
file di output
            end
        end
        tline = fgetl(fid);
    end

for i=1:ir
    fprintf(fid2, '%15.3f %12.3f %12.3f %8.3f\n', tempo(i),E(i),N(i),H(i)); %Stampa
output inverso
    % sprintf('%15.3f %12.3f %12.3f %8.3f\n', tempo(i),E(i),N(i),H(i)) %Stampa
output inverso
end

fclose(fid);
fclose(fid2);

```


Allegato 3 –Lettura record del posizionamento real-time

```

%% Lettura Record "$GNNGGA"
% fileinput= input('REALTIME.txt');
clc
deg=180/pi;
gnnga='$GNNGGA';
sa=6378137;
alfa = 1/298.257223563;
l0=9;
E0=5000000;

fid = fopen('REALTIME.txt');
% fileoutput= output('pos.txt');
fid2=fopen('Real_time.txt','wt');
tline = fgetl(fid); %Legge la prima riga del file nella quale c'è wek,
gpstweek
% "1" se è position fix e 2 triplette di coordinate. la prima tripletta
% è con float, la seconda è con position fix
format long g;
ir=0;
while ischar(tline) %Ciclo che consente di leggere tutte le righe con prefisso
$GNNGGA
    if strfind(tline,gnnga);
        dati=str2num(tline(6:end)); %Converto un vettore separato da virgole in
numeri
        if dati(3)==1;
            ir=1+ir;
            tempo(ir)=dati(2);
            % disp(tline(6:end)) %Se la linea contiene 'POS', questa
viene stampata
            [F,L,H(ir)]=ecef2lla(dati(7),dati(8),dati(9)); %Converto in
latitudine longitudine,h
            % [E(ir),N(ir)]=deg2utm(F*deg,L*deg)
            [E(ir),N(ir),mi]=getone(sa,alfa,F*deg,L*deg,l0,E0);
            % fprintf(fid2, '%12.3f %12.3f %8.3f\n', tline(6:end)); %Stampa il
file di output
            end
        end
        tline = fgetl(fid);
    end

for i=ir:-1:1
    fprintf(fid2, '%15.3f %12.3f %12.3f %8.3f\n', tempo(i),E(i),N(i),H(i)); %Stampa
output inverso
    % sprintf('%15.3f %12.3f %12.3f %8.3f\n', tempo(i),E(i),N(i),H(i)) %Stampa
output inverso
end

fclose(fid);
fclose(fid2);

```

Allegato 4- Filtraggio delle accelerazioni

```
%FILTRO STATICO DEI SEGNALE

% LETTURA DATI DA FILE TXT
stringa = 'accelerazioni.txt'; % legge file testo generato nell'acquisizione
dati

matrice=load(stringa, '-ascii');

accl_X=matrice(:,2); %accelerazioni nelle tre direzioni
accl_Y=matrice(:,3);
accl_Z=matrice(:,4);

ap=sqrt(accl_X.^2+accl_Y.^2); %modulo delle accelerazioni
epsigr=ap./accl_Z; %variazione rispetto alla verticale

t1 = matrice (1:1);
t = matrice (:,1)-t1; % il tempo di acquisizione è ogni secondo

n_ril=size (matrice); %numero elementi rilevati
temp = matrice(:,5); %temperatura

% CALCOLO DELLE ACCELERAZIONI MEDIE

accl_Xm=movmedian(accl_X,11); %calcolo la mediana su 11 valori %In tal modo si
eliminano gli errori grossolani
accl_Ym=movmedian(accl_Y,11);
accl_Zm=movmedian(accl_Z,11);

aplan=sqrt(accl_Xm.^2+accl_Ym.^2); %modulo delle accelerazioni in x e in y
epsi=aplan./accl_Zm; %variazione rispetto alla verticale
(modulo/az)

% ACCELERAZIONI FILTRATE

% progettazione filtro low pass (passa basso)
% a*y(k)=b*x(k)+b*x(k-1)...

a=1;
filt = designfilt('lowpassfir', 'PassbandFrequency', .001, 'StopbandFrequency',
.02, 'PassbandRipple', 1, 'StopbandAttenuation', 60);
%Si eliminano i picchi che si hanno nei 300 secondi (dimensione filtro). Quindi
la frequenza
%che vogliamo togliere è 1/300 (0.005 Hz)

b=filt.Coefficients;
b=b./sum(b); %Normalizziamo i coefficienti in modo tale che la somma
sia 1
%Inoltre i coefficienti devono essere simmetrici
%I coefficienti devono essere intorno ai 300

epsif= firlfilt(b,a,epsi); %filtro ottimizzato
```

```

Nfig=1;
figure (Nfig)
Nfig=Nfig+1;

subplot(3,1,1),plot(t,epsi),title('deviazione epsilon in
rad'),xlabel('time'),ylabel('deviazione in rad');
subplot(3,1,2),plot(t,epsif),title('deviazione epsilon
filtrata'),xlabel('time'),ylabel('deviazione in rad');
subplot(3,1,3),plot(t,temp),title('temperatura'),xlabel('time'),ylabel('temperat
ura');

[r,t] = xcorr(epsif,temp,'biased');           %La crosscorrelazione di due segnali è
il valor medio del prodotto di x e y          % r = xcorr(x,y)

r=r(t>0);           %Prende solo i valori per t>0. Il vettore di crosscorrelazione
avrà quindi la stessa lunghezza dei due segnali
t = t(t>0);
figure
plot(t,r)
xlabel('time (s)')
    % [s,t]= xcorr(accl_Ym,accl_Zm);
    %s = s(s>0);
    %plot(t,s);

```

Riferimenti bibliografici

- Relazione tecnica- Allegato B, “*Procedura negoziata per l’acquisizione di attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie e strumento della geomatica per il monitoraggio di versanti in dissesto e infrastrutture (n. 30/16)*”.
- CSP- Innovazione nelle ICT, “*Attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie e strumenti della geomatica per il monitoraggio di versanti in dissesto e infrastrutture*”, 2° consegna deliverables: D4.1, D2.2, D3.2 (CNR IRPI).
- CSP- Innovazione nelle ICT, “*Attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie e strumenti della geomatica per il monitoraggio di versanti in dissesto e infrastrutture*”, 4° consegna deliverables: D5.2 (CNR IRPI).
- A. Manzino, Corso di Geomatica, “*Principi di posizionamento GPS*”.
- RTKLIB ver. 2.4.2, “*Manuale*”.
- A. Manzino , Esercitazioni, “*Dispense di Topografia*” .
- Prof. Morzenti.- Informatica B, “*Funzioni matlab per le gestione dei file*”.
- P. Dabove, A.Manzino, A. Cina, M. Piras , “*Towards real-time geodetic monitoring of landslides with GNSS mass-market devices*”, 6° Congresso Nazionale AIGA, Courmayeur, 28 giugno 2018.
- GNSS calendar and utility, <http://gnsscalendar.com/>.
- GNSS planning online, www.gnssmissionplanning.com.
- SPIN GNSS , servizio di posizionamento interregionale GNSS, www.spingnss.it.
- DIATI, Stazione permanente GNSS, www.diati.polito.it.

