



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea magistrale
in INGEGNERIA ELETTRONICA (ELECTRONIC ENGINEERING)

Tesi di Laurea Magistrale

Stato dell'arte dei sistemi radar per l'individuazione di droni

Analisi delle tecnologie attuali e delle prospettive di sviluppo tra
architetture MIMO, radar cognitivi e sensor fusion

Relatore:
Prof.ssa Paola PIRINOLI

Candidato:
Ten. tramat. RN Niccolò RECCHI

Dicembre 2025

SOMMARIO

Negli ultimi anni l'impiego di *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), comunemente noti come droni, ha conosciuto una rapida espansione in ambiti civili, industriali e militari, determinando un crescente interesse verso tecniche di rilevazione e monitoraggio sempre più affidabili. I piccoli UAV presentano caratteristiche, come una *Radar Cross Section* (RCS) molto ridotta, il volo a bassa quota e traiettorie irregolari, che mettono in difficoltà i radar convenzionali. Per questo motivo, la ricerca sta sviluppando soluzioni più avanzate, sulle quali si concentra il presente lavoro.

In questo contesto, l'attività svolta nella tesi si è concentrata sull'analisi dei sistemi radar attualmente disponibili per la rilevazione, localizzazione e classificazione di droni, con particolare attenzione ai principi teorici, alle architetture hardware e alle metodologie di elaborazione del segnale. Dopo una prima introduzione dedicata al contesto tecnologico, il lavoro approfondisce i fondamenti fisici e di funzionamento del radar. Successivamente, vengono esaminati i principali sistemi radar impiegati per l'individuazione di droni: radar a onda continua modulata in frequenza (*Frequency-Modulated Continuous Wave*, FMCW), radar a impulsi, sistemi multistatici e *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), evidenziandone vantaggi, limiti e ambiti applicativi.

La parte centrale è dedicata all'analisi del segnale micro-Doppler e all'uso di tecniche avanzate come *Transformer* e *Deep Reinforcement Learning*, essenziali non solo per la classificazione automatica dei bersagli, ma per l'adattamento cognitivo del radar allo scenario operativo. L'elaborato include inoltre una rassegna dei sistemi radar passivi, dei sensori cooperativi e delle soluzioni di *sensor fusion* con ottiche e acustiche, finalizzate al miglioramento dell'accuratezza di rilevazione. Viene discusso anche il ruolo emergente dei radar cognitivi, capaci di adattare in tempo reale i parametri di trasmissione e di elaborazione per ottimizzare le prestazioni in ambienti dinamici.

Infine, la tesi analizza le principali sfide ingegneristiche legate all'integrazione di queste tecnologie – come gestione delle interferenze, consumo energetico e protezione dei dati – e delinea le prospettive future verso l'integrazione di reti cognitive e cooperative, segnando il passaggio dal singolo sensore a un vero e proprio ecosistema percettivo distribuito. L'obiettivo complessivo è fornire una visione unitaria e aggiornata dell'evoluzione dei sistemi radar per l'individuazione e classificazione dei droni, individuando le soluzioni più promettenti per applicazioni di sicurezza, difesa e monitoraggio civile.

INDICE

SOMMARIO	3
1. INTRODUZIONE	7
1.1 Contesto e motivazioni	7
1.2 Obiettivi e finalità del lavoro.....	8
1.3 Stato dell'arte e problematiche aperte	9
1.4 Approcci complementari e <i>sensor fusion</i>	10
2. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEL RADAR.....	13
2.1 Introduzione.....	13
2.2 L'equazione radar e la misura della distanza.....	14
2.3 La Radar Cross Section (RCS)	15
2.4 L'effetto Doppler e la misura della velocità	17
2.5 I sistemi radar MIMO	18
2.5.1 Principi di funzionamento	19
2.5.2 Vantaggi e limiti dei sistemi MIMO.....	20
2.5.3 Applicazioni pratiche nella rilevazione di droni	20
2.5.4 Radar multistatici e cooperativi	20
2.5.5 Confronto e prospettive.....	21
2.6 Tecniche di elaborazione del segnale radar.....	22
2.6.1 Filtraggio e riduzione del <i>clutter</i>	22
2.6.2 Rilevamento adattivo.....	22
2.6.3 Analisi del micro-Doppler e classificazione automatica	23
2.6.4 Radar cognitivi e adattivi	23
2.6.5 Sintesi	24
3. TIPOLOGIE DI RADAR PER LA RILEVAZIONE DI DRONI	25
3.1 Introduzione.....	25
3.2 Radar a onda continua e FMCW	26
3.3 Radar ad impulsi e UWB.....	27
3.3.1 Applicazioni e risultati sperimentali	27
3.3.2 Vantaggi e limiti	28
3.4 Radar MIMO e multistatici	28
3.4.1 Applicazioni e risultati sperimentali dei radar MIMO	29
3.4.2 Radar multistatici, passivi e cooperativi.....	30

3.4.3 Sintesi comparativa delle architetture radar avanzate	32
3.5 Applicazioni militari e sistemi C-UAS.....	33
3.5.1 Il contesto strategico e operativo	34
3.5.2 Tecnologie radar impiegate in ambito militare	34
3.5.3 Integrazione multi-sensore e strategie C-UAS	34
3.5.4 Confronto dei principali sistemi militari C-UAS e sintesi	35
3.6 Sintesi comparative e prospettive	37
4. SISTEMI RADAR C-UAS ATTUALMENTE IN USO	38
4.1 Introduzione generale	38
4.2 Sistemi radar per applicazioni civili e dual-use.....	39
4.2.1 Radar commerciali per la sicurezza civile	39
4.2.2 Integrazione multi-sensore e piattaforme modulari	40
4.2.3 Tendenze tecnologiche nel settore civile.....	41
4.3 Sistemi radar C-UAS per la difesa e applicazioni militari	41
4.3.1 Spexer 2000 (Hensoldt)	42
4.3.2 Oerlikon Radshield (Rheinmetall).....	42
4.3.3 RADA MHR e Thales Squire.....	43
4.3.4 Tendenze e prospettive operative.....	43
4.4 Confronto e tendenze dei sistemi radar C-UAS	44
4.4.1 Confronto finale.....	44
4.4.2 Tendenze evolutive	45
4.4.3 Conclusioni.....	45
5. INTELLIGENZA ARTIFICIALE E TECNICHE DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO NEI SISTEMI RADAR C-UAS.....	46
5.1 L’evoluzione dall’elaborazione classica ai metodi di apprendimento automatico.....	46
5.2 Analisi micro-Doppler e classificazione basata su Deep Learning	47
5.3 Reti neurali e modelli di Neural Deep Learning.....	48
5.3.1 Reti neurali convoluzionali (CNN) per mappe Range–Doppler	48
5.3.2 Reti ricorrenti e Transformer per dati sequenziali e multimodali.....	49
5.4 Apprendimento per rinforzo e radar cognitivi.....	49
5.4.1 Ottimizzazione cognitiva dei radar MIMO	50
5.4.2 Strategie di decisione multi-target basate su Deep Q-Learning	51
6. SFIDE INGEGNERISTICHE E PROSPETTIVE DI SVILUPPI	52
6.1 Criticità tecniche e operative	52
6.1.1 Interferenze e variabilità dello scenario elettromagnetico	52
6.1.2 Coerenza nei sistemi MIMO e architetture multistatiche	53

6.1.3 Limiti energetici e problemi termici nelle piattaforme compatte	53
6.1.4 Sicurezza informatica e integrità dei dati	53
6.1.5 Sensor fusion e problemi di latenza.....	54
6.2 Tendenze evolutive e innovazione tecnologica	54
6.3 Visione sistemica e direzioni future	55
7. CONCLUSIONI	57
7.1 Sintesi dei risultati principali	57
7.2 Valutazione critica delle tecnologie analizzate	58
7.3 Implicazioni applicative	59
7.3.1 Aspetti economici dell'implementazione dei sistemi C-UAS	60
7.4 Limiti dello studio	61
7.5 Sviluppi futuri: Verso l'ecosistema percettivo cognitivo.....	62
BIBLIOGRAFIA	64

1. INTRODUZIONE

1.1 Contesto e motivazioni

L’impiego di *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), comunemente noti come droni, è cresciuto in modo esponenziale nell’ultimo decennio in numerosi settori: monitoraggio ambientale, rilievi topografici, agricoltura di precisione, ispezione di infrastrutture, ricerca e soccorso, oltre agli ambiti militari e di sicurezza.

La versatilità dei droni, unita al rapido calo dei costi e alla miniaturizzazione dei componenti elettronici, li ha resi accessibili anche ad utenti privati ed aziende civili. Tuttavia, questa diffusione ha introdotto nuove criticità in termini di sicurezza dello spazio aereo, privacy e protezione delle infrastrutture sensibili [1].

Nel contesto militare contemporaneo, i micro-UAV costituiscono un elemento di vulnerabilità crescente, poiché volano a basse altitudini e presentano una sezione radar ridotta. Queste caratteristiche, unite a traiettorie di volo irregolari, mettono in difficoltà i radar tradizionali, che faticano a distinguerli da altri bersagli a bassa quota [2].

Di conseguenza, la ricerca accademica e industriale si è orientata verso lo sviluppo di nuove generazioni di radar più sensibili, compatti e “intelligenti”, capaci di adattarsi dinamicamente al contesto operativo e di sfruttare strategie di elaborazione cognitiva del segnale. In particolare, i sistemi *Frequency-Modulated Continuous Wave* (FMCW), i radar *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) e le configurazioni multistatiche hanno dimostrato di poter migliorare sensibilmente la capacità di individuare e tracciare piccoli UAV.

Un contributo rilevante in tal senso è fornito dalle architetture radar passive bistatiche, nelle quali il trasmettitore e il ricevitore sono collocati in posizioni differenti. Questa configurazione consente di sfruttare segnali di illuminazione “di opportunità” – come quelli emessi da stazioni televisive o sorgenti radio – evitando la necessità di un trasmettitore attivo e riducendo la probabilità di intercettazione.

La Figura 1.1 mostra lo schema concettuale del rilevamento di un drone mediante radar passivo bistatico: il segnale trasmesso da una sorgente esterna viene riflesso dal drone e successivamente captato da un ricevitore dedicato, che ne elabora l’eco per determinarne la posizione e la traiettoria. Tale configurazione rappresenta una delle soluzioni più promettenti per la sorveglianza discreta e continua di ampie aree, con applicazioni sia civili che militari.

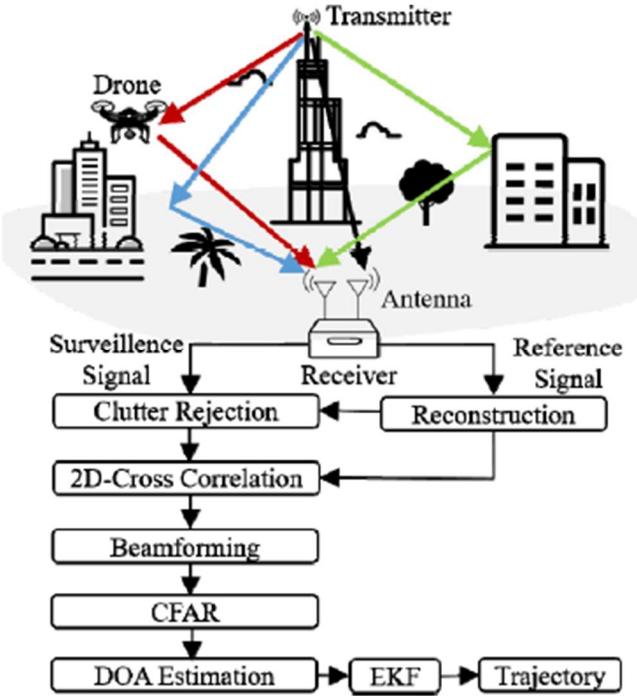


Figura 1.1: Schema concettuale del rilevamento di un drone mediante radar passivo bistatico [1].

1.2 Obiettivi e finalità del lavoro

La rapida diffusione dei droni, sia in ambito civile che militare, ha reso indispensabile lo sviluppo di sistemi di rilevazione sempre più sofisticati. La loro capacità di operare a basse quote e con sezioni radar ridotte, unita alla crescente miniaturizzazione dei componenti elettronici, ha infatti messo in crisi i tradizionali sistemi di sorveglianza.

Da qui nasce l’obiettivo di questo lavoro di tesi: offrire una panoramica accurata e dettagliata delle principali tecnologie radar impiegate per l’individuazione di droni, analizzandone i principi fisici, le evoluzioni architettoniche e gli approcci più moderni basati sull’elaborazione intelligente dei segnali.

L’elaborato intende, quindi, non solo descrivere lo stato dell’arte, ma anche delineare le tendenze emergenti nella ricerca contemporanea, mettendo in luce le strategie che mirano a superare i limiti operativi dei radar convenzionali. Particolare attenzione viene riservata ai sistemi MIMO, ai radar FMCW e ai più recenti approcci cognitivi, in grado di adattare dinamicamente i parametri di funzionamento alle condizioni ambientali.

In parallelo, viene esplorato il tema dell’integrazione multisensoriale, con lo scopo di evidenziare come la fusione di radar, telecamere, sensori acustici e LiDAR (*Light Detection and Ranging*) consenta di ottenere una visione più completa e affidabile dello spazio circostante.

L’obiettivo ultimo della tesi è dunque duplice: da un lato fornire una base teorica solida per comprendere le diverse architetture radar e le loro applicazioni nell’individualizzazione dei

droni, dall’altro proporre una riflessione critica sull’evoluzione tecnologica che sta portando questi sistemi verso forme di intelligenza adattiva e cooperativa.

1.3 Stato dell’arte e problematiche aperte

Lo stato dell’arte testimonia un interesse crescente verso la rilevazione radar di piccoli UAV. Le difficoltà principali della rilevazione derivano dalle dimensioni ridotte dei droni, spesso comprese tra 20 e 50 cm di apertura alare per i modelli di piccole dimensioni e inferiori ai 15 cm per i micro-droni, dalla conseguente limitata potenza riflessa (RCS nell’ordine di 10^{-3} – 10^{-2} m²) e dalla somiglianza delle loro firme radar con quelle di uccelli o altri piccoli oggetti in movimento. Per affrontare queste sfide sono state proposte diverse soluzioni, che spaziano da radar monostatici a onde continue fino a sistemi complessi basati su architetture MIMO e multistatiche.

I radar FMCW, grazie alla modulazione di frequenza continua, consentono di stimare simultaneamente distanza e velocità del bersaglio, risultando particolarmente adatti per applicazioni a corto raggio. Nei radar a onde continue modulate (FMCW), la misura della distanza si ottiene analizzando la differenza di frequenza tra segnale trasmesso e ricevuto, riducendo la complessità hardware [3]. Al contrario, i radar passivi sfruttano segnali d’opportunità (come quelli televisivi o FM - *Frequency Modulated*) per rilevare la presenza di un drone senza dover emettere energia propria [1]. Questa soluzione, oltre a essere economicamente vantaggiosa, offre un’elevata discrezione operativa, rendendola interessante anche in ambito militare.

Negli ultimi anni si sono inoltre affermati sistemi interferometrici in fase, capaci di misurare variazioni micrometriche nella posizione e nell’altitudine dei droni e radar UWB (*Ultra-Wideband*), che, grazie agli impulsi di brevissima durata, garantiscono una risoluzione temporale e spaziale elevata, utile per discriminare i bersagli in scenari complessi [4], [5]. In parallelo, altri studi hanno dimostrato l’efficacia di configurazioni multistatiche passive, basate su ricevitori distribuiti e sincronizzati, per ampliare il campo di copertura e migliorare la robustezza del sistema in presenza di disturbi ambientali [6].

Inoltre, un attuale filone di ricerca riguarda l’utilizzo del micro-Doppler: uno strumento che permette di riconoscere le caratteristiche uniche del movimento delle eliche dei droni. Analizzando le modulazioni periodiche nella frequenza del segnale radar, è possibile distinguere i droni da altri oggetti volanti con una notevole precisione. L’introduzione di tecniche di apprendimento automatico e di *deep neural network* ha ulteriormente potenziato questa capacità, permettendo di automatizzare la classificazione dei bersagli e di ridurre gli errori di riconoscimento [7].

Recentemente, si è affermato il concetto di radar cognitivo, un paradigma in cui il sistema è in grado di “apprendere” dall’ambiente circostante e di modificare in tempo reale i propri parametri operativi per massimizzare le prestazioni. L’adozione di algoritmi di *reinforcement learning* e di strategie adattive di selezione della forma d’onda rappresenta oggi una delle direzioni più promettenti per il futuro dei sistemi radar applicati all’individuazione dei droni [8].

La riduzione della sezione radar equivalente e la crescente varietà di configurazioni di volo rendono necessaria l’adozione di sistemi di sorveglianza più complessi e adattivi, in grado di integrare differenti tecnologie sensoriali. Tra le soluzioni più efficaci rientrano i sistemi radar multifrequenza e multistatici, che consentono una copertura spaziale più ampia e una maggiore accuratezza nella stima della distanza e della velocità del bersaglio.

La Figura 1.2 illustra una panoramica comparativa dei principali sistemi radar impiegati per la rilevazione dei droni, evidenziando la distinzione tra architetture monostatiche, bistatiche e multistatiche. Nello schema, il radar monostatico utilizza la stessa unità per trasmissione e ricezione, mentre quello bistatico separa fisicamente le due componenti. Il radar multistatico, invece, impiega più ricevitori distribuiti nello spazio per migliorare la localizzazione e ridurre le ambiguità di misura, risultando particolarmente efficace nel tracciamento di micro-UAV a bassa quota.

Questa differenziazione operativa consente di adattare la risposta radar al tipo di minaccia e al contesto ambientale, ottimizzando le prestazioni di rilevamento anche in presenza di *clutter* o interferenze multiple.



Figura 1.2: Evoluzione dei sistemi radar anti-drone. Da in alto a sinistra verso il basso a destra: radar VSHORAD RADA (banda S, Rheinmetall), radar AESA Spexer (banda X, Hensoldt), radar da campo Squire (banda X, Thales) e sistema di allarme Oerlikon Radshield (banda W, Rheinmetall) [9].

1.4 Approcci complementari e *sensor fusion*

La ricerca ha evidenziato come, in molti contesti applicativi, una sola tecnologia radar non sia sufficiente a garantire prestazioni ottimali; dunque, si è affermata una tendenza verso l'integrazione di sensori differenti - ottici, acustici e radar - con l'obiettivo di combinare le loro peculiarità e ottenere un sistema con finalità più robuste e attendibili [6], [10]. La cosiddetta *sensor fusion* permette di combinare le informazioni provenienti da sorgenti diverse,

compensando le limitazioni di ciascun sensore e migliorando l'affidabilità complessiva del sistema.

In questo contesto, un ruolo rilevante è ricoperto anche dai radar multistatici passivi, nei quali più ricevitori distribuiti e sincronizzati cooperano per ampliare la copertura e ridurre le zone d'ombra. Tali configurazioni, oltre a fornire dati radar più ricchi e diversificati, possono essere integrate efficacemente con sensori ottici e acustici all'interno di piattaforme di sorveglianza multimodali [6].

Un esempio rappresentativo di questa filosofia progettuale è offerto dal sistema MUTES (*Multimodal UAV 3D Trajectory Exposure System*) [4], che unisce moduli acustici, ottici e LiDAR in un'unica piattaforma di rilevamento. Questa architettura consente di ottenere una visione tridimensionale dello spazio sorvegliato e di estendere la portata di acquisizione oltre il chilometro, garantendo al contempo un'elevata precisione nella localizzazione dei bersagli.

In modo analogo, altre ricerche hanno proposto l'uso di modelli *Transformer Encoder* per fondere i dati radar e acustici in un'unica rete neurale, migliorando la capacità di classificazione e la robustezza del sistema anche in ambienti rumorosi [10]. L'approccio multisensoriale non solo aumenta la precisione nella localizzazione e nella tracciatura dei droni, ma riduce anche la probabilità di falsi allarmi. La fusione delle informazioni visive e acustiche, unite ai dati radar, consente infatti di ottenere un quadro più completo del contesto di applicazione, in grado di discriminare in modo più accurato un bersaglio reale da un disturbo ambientale.

Anche le ricerche accademiche condotte in ambito LiDAR confermano il potenziale di questi sistemi: la tesi magistrale di A. Cerutti [11], ad esempio, ha dimostrato come l'impiego di un LiDAR su piattaforme mobili, accoppiato a strategie di inseguimento adattivo, migliori sensibilmente la stabilità del tracciamento e la continuità delle misure.

La Figura 1.3 illustra in modo sintetico l'architettura di un sistema di rilevamento multimodale che integra sensori radar, acustici e ottici per la localizzazione e classificazione dei droni. Nel diagramma si osserva come i dati provenienti dai diversi sensori vengano acquisiti simultaneamente e convogliati verso un'unità di fusione centrale. In questa fase, algoritmi di *data fusion* combinano le informazioni radar (affidabili in condizioni di scarsa visibilità e a lunga distanza), i segnali acustici (sensibili al rumore caratteristico dei rotori) e le immagini ottiche (utili per l'identificazione visiva del bersaglio). L'obiettivo di tale architettura è sfruttare la complementarietà delle diverse tecnologie per ridurre i falsi allarmi e migliorare la precisione del tracciamento, anche in scenari complessi o rumorosi. Questa configurazione rappresenta un'evoluzione significativa rispetto ai sistemi mono-sensore, consentendo una rilevazione più robusta dei micro-UAV e fornendo la base concettuale per i moderni sistemi integrati di Counter-UAV.

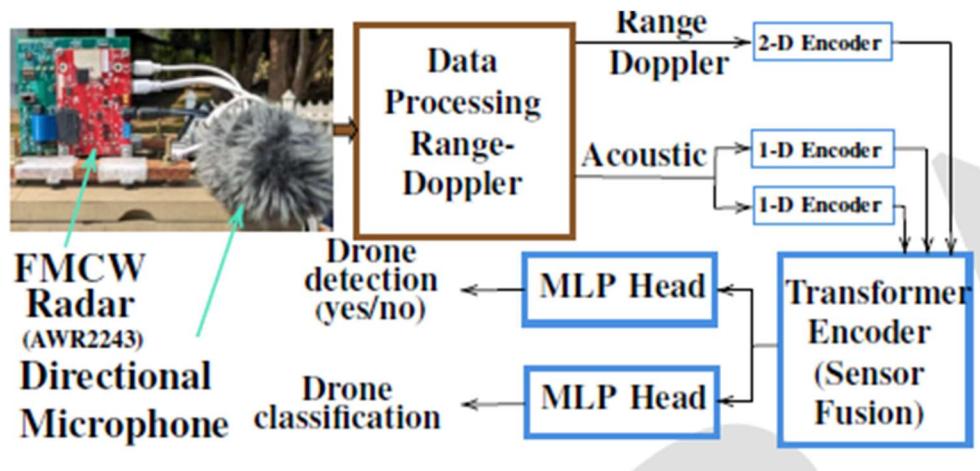


Figura 1.3: Architettura di un sistema multimodale radar-acustico-ottico. Esempio di sensor fusion per la rilevazione e il tracciamento di droni, basato su radar FMCW, microfoni direzionali e telecamere ad alta risoluzione [10].

2. PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DEL RADAR

2.1 Introduzione

Il radar, acronimo di *radio detection and ranging*, è una tecnologia basata sulla trasmissione e riflessione di onde elettromagnetiche, impiegata per individuare la presenza, la distanza e la velocità di un oggetto. Nato come strumento militare negli anni Trenta, il radar si è evoluto in modo straordinario fino a diventare una tecnologia di uso quotidiano, presente nei sistemi di controllo del traffico aereo, nella meteorologia, nell'automotive e, più recentemente, nel rilevamento di droni (UAV).

Il principio fisico alla base del radar è piuttosto semplice: un trasmettitore emette un'onda radio che, dopo aver colpito un bersaglio, viene in parte riflessa e raccolta da un ricevitore. Analizzando il tempo di ritorno e la variazione di frequenza dell'eco riflesso, è possibile determinare la distanza, la velocità e, in certi casi, anche le caratteristiche strutturali dell'oggetto.

Rispetto a sensori ottici o acustici, il radar offre il vantaggio di operare indipendentemente dalle condizioni di luce e meteorologiche: pioggia, nebbia o oscurità non ne limitano l'efficacia, e ciò lo rende ideale per la sorveglianza continua di aree sensibili.

Tuttavia, i droni rappresentano un bersaglio particolarmente complesso per via delle dimensioni ridotte, dei materiali plastici e di una *Radar Cross Section* (RCS) molto piccola, rendendoli difficilmente distinguibili da uccelli o disturbi ambientali [2].

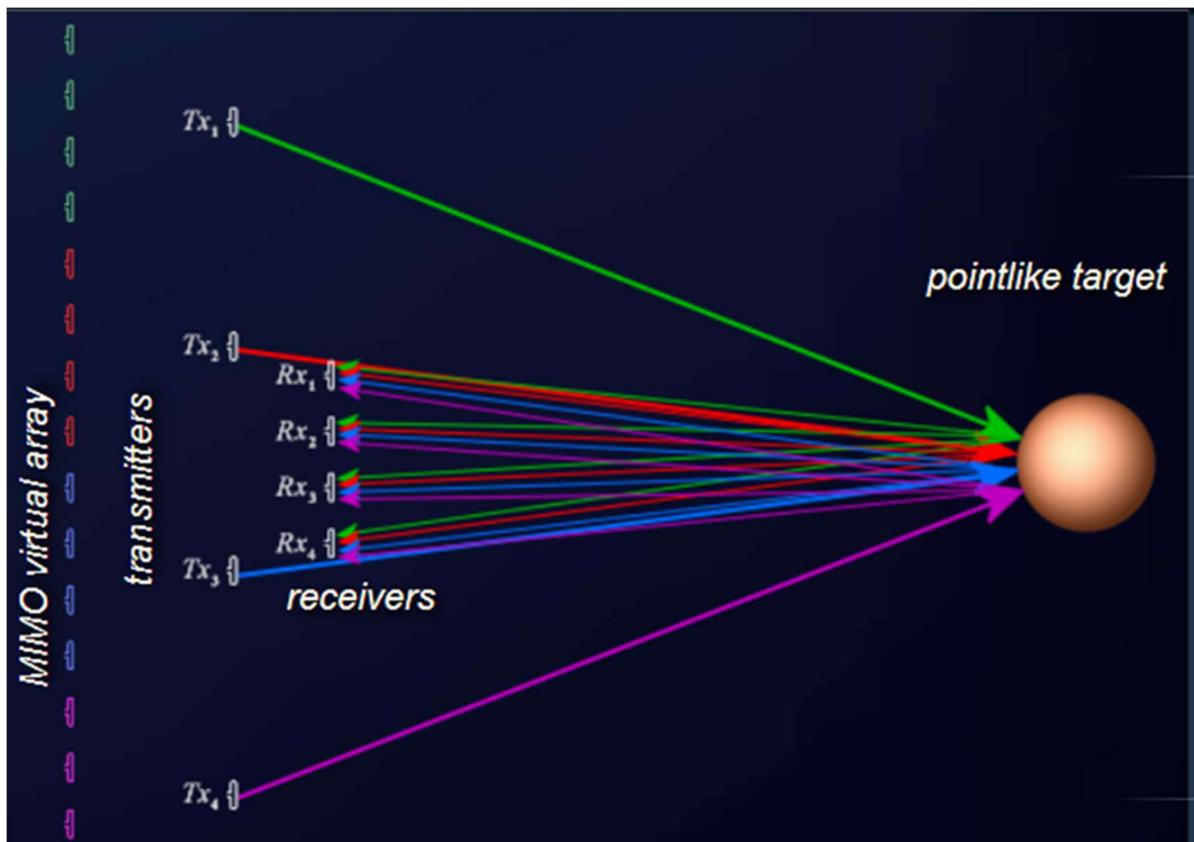


Figura 2.1: Principio di funzionamento di un radar monostatico [12].

La Figura 2.1 mostra lo schema funzionale di un sistema radar dedicato alla rilevazione e identificazione dei droni, tipico delle architetture C-UAS (*Counter-Unmanned Aerial System*). Nel diagramma sono evidenziate le principali fasi del processo di elaborazione: acquisizione del segnale radar, preelaborazione, processamento e classificazione del bersaglio. La catena inizia con l'emissione e la ricezione del segnale riflesso, passa per i moduli di filtraggio e riduzione del *clutter*; quindi, giunge ai blocchi di analisi Doppler e riconoscimento automatico del target. Tale rappresentazione sintetizza il flusso informativo che porta dalla semplice rilevazione all'identificazione del drone, integrando sensori ausiliari (ottici, acustici, RF) e moduli di comando e controllo per la gestione coordinata della risposta operativa. In questo schema è, dunque, rappresentato il principio del radar monostatico: trasmettitore e ricevitore coincidono e il segnale riflesso viene acquisito dalla stessa antenna. Da questa configurazione derivano le architetture più moderne - bistatiche, multistatiche e MIMO - che verranno approfondite nei capitoli successivi.

2.2 L'equazione radar e la misura della distanza

Il funzionamento di un radar può essere descritto mediante l'equazione radar, che mette in relazione la potenza emessa dal trasmettitore (P_t) con quella riflessa e successivamente ricevuta dal sistema (P_r). Questa relazione, derivata dalla teoria classica proposta da Skolnik [1], permette di stimare le caratteristiche del bersaglio in funzione della distanza e delle proprietà dell'antenna.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

dove:

- G_t e G_r sono i guadagni dell'antenna in trasmissione e ricezione;
- λ è la lunghezza d'onda;
- σ è la Radar Cross Section del bersaglio;
- R è la distanza tra radar e target;
- L rappresenta le perdite complessive del sistema.

La potenza ricevuta decresce con la quarta potenza della distanza, il che rende complessa la rilevazione di piccoli droni.

Per migliorare la sensibilità, i radar moderni impiegano i *low noise amplifiers* (LNA), filtri digitali e tecniche di integrazione temporale.

La distanza del bersaglio può essere calcolata mediante il tempo di andata e ritorno dell'onda:

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

dove c è la velocità della luce e Δt il tempo misurato.

Le ricerche più recenti hanno esteso questi principi a frequenze millimetriche (es. 60 GHz), dove la maggiore direttività consente di migliorare la risoluzione spaziale pur mantenendo antenne compatte [13].

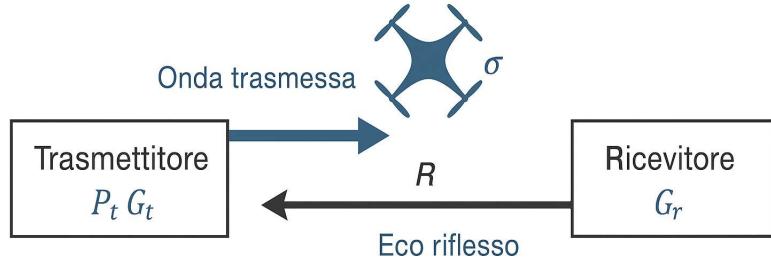


Figura 2.2: Parametri principali dell’equazione radar. Schema concettuale che mostra le grandezze principali dell’equazione radar: potenza trasmessa P_t , guadagni d’antenna G_t e G_r , sezione radar equivalente σ e distanza R . Elaborazione propria tratta da [1].

La Figura 2.2 rappresenta in forma schematica i parametri fondamentali che compongono l’equazione radar, evidenziando le relazioni tra potenza trasmessa, guadagni d’antenna, sezione radar equivalente (RCS) e distanza dal bersaglio.

Nel diagramma sono mostrati i contributi che determinano la potenza del segnale di ritorno ricevuto, fornendo un riferimento visivo per comprendere come le variabili fisiche e geometriche influiscano sull’efficacia del sistema radar. L’obiettivo di questa rappresentazione è chiarire come la portata e la sensibilità del radar dipendano non solo dall’energia emessa e dai guadagni delle antenne, ma anche dalle caratteristiche riflettenti del bersaglio e dalle perdite di propagazione.

Questa figura costituisce, dunque, un utile supporto concettuale per interpretare l’equazione radar introdotta nel paragrafo successivo, consentendo di visualizzare in modo intuitivo i fattori che regolano la capacità di rilevamento di un oggetto, come nel caso dei micro-UAV.

2.3 La Radar Cross Section (RCS)

La Radar Cross Section (σ) può essere intesa come una misura dell’efficienza con cui un bersaglio riflette energia eletromagnetica verso il radar, equivalente all’area che il sistema percepisce come ‘responsabile’ del ritorno ricevuto.

Essa dipende da forma, dimensioni, materiale e orientamento del bersaglio, oltre che dalla polarizzazione del segnale [9].

Ad esempio:

- una sfera metallica di 1 m di diametro ha $\sigma \approx 1 \text{ m}^2$;

- un uomo ha $\sigma \approx 0.5\text{--}1.0 m^2$;
- un drone quadricottero commerciale può scendere fino a $0.01\text{--}0.001 m^2$.

Le superfici plastiche e compositi riducono notevolmente la riflettività.

Oltre alla potenza riflessa complessiva, le variazioni temporali del segnale radar contengono indicazioni utili sul movimento del bersaglio. In particolare, le eliche dei droni inducono piccole modulazioni periodiche nella frequenza del segnale, note come micro-Doppler, che costituiscono una sorta di “impronta dinamica” sfruttabile per il riconoscimento automatico dei target [14].

Gli esperimenti di Fioranelli et al. [15] hanno dimostrato che le firme RCS dei droni differiscono in modo evidente da quelle degli uccelli, rendendo possibile la discriminazione anche in presenza di rumore atmosferico.

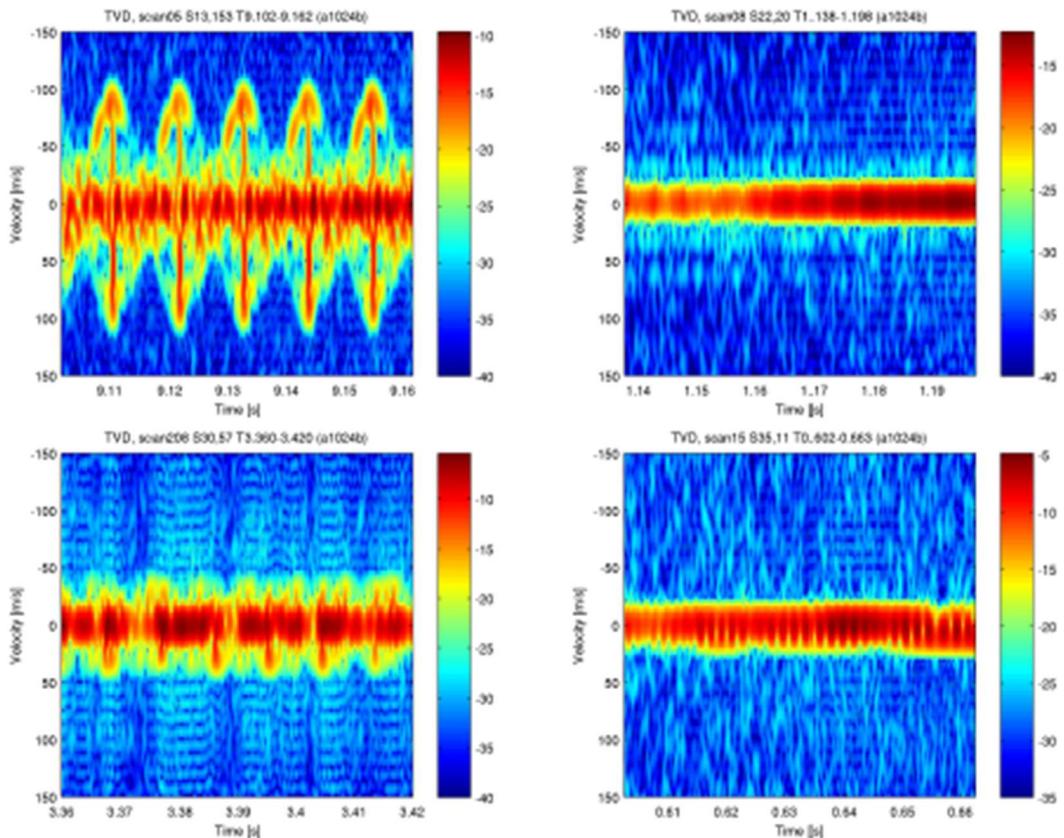


Figura 2.3: Esempi di diagrammi tempo–velocità (TVD). Confronto tra le firme radar di diversi bersagli: elicottero (TREX 450), drone ad ala fissa (Yak54), quadricottero (AR. Drone) e uccello (falco di Harris). I grafici mostrano le diverse componenti Doppler caratteristiche dei vari tipi di movimento [14].

I diagrammi tempo-velocità (TVD) nella Figura 2.3 evidenziano come le firme micro-Doppler dei droni differiscano sensibilmente da quelle degli uccelli, consentendo una classificazione affidabile anche in scenari complessi.

Come mostrato nella Tabella 2.1, le diverse architetture radar impiegate per la rilevazione dei droni presentano caratteristiche e prestazioni fortemente differenziate. I radar monostatici si distinguono per la loro semplicità strutturale e compattezza, poiché utilizzano la stessa antenna per trasmettere e ricevere il segnale. Tuttavia, risultano più sensibili al *clutter* e offrono una minore capacità di discriminazione tra bersagli multipli a breve distanza.

Tabella 2.1: Confronto tra firme micro-Doppler in differenti condizioni [14], [15].

Caso	Frequenza Doppler media	Simmetria dello spettro	Principale fonte del segnale
Hovering	0 Hz	Simmetrica	Rotazione eliche
Avvicinamento	$+ \Delta f$	Spostata verso l'alto	Moto radiale + rotazione
Allontanamento	$- \Delta f$	Spostata verso il basso	Moto radiale opposto
Movimento laterale	≈ 0 Hz	Debole, irregolare	Solo micromovimenti eliche

I radar bistatici, grazie alla separazione fisica tra trasmettitore e ricevitore, riducono gli effetti delle interferenze dirette e permettono una migliore rilevazione di bersagli a bassa quota, ma richiedono sincronizzazione accurata e infrastrutture più complesse. L'evoluzione naturale di questa configurazione è rappresentata dai radar multistatici, che sfruttano una rete di ricevitori distribuiti per ottenere una copertura volumetrica più ampia e una maggiore robustezza ai disturbi ambientali, a scapito di una maggiore complessità di coordinamento e di comunicazione tra i nodi.

I radar passivi, che utilizzano segnali d'opportunità come quelli televisivi o FM, offrono elevata discrezione operativa e ridotti costi di implementazione, poiché non necessitano di un trasmettitore attivo. Tuttavia, le loro prestazioni dipendono fortemente dalla qualità e disponibilità dei segnali esterni, limitandone l'efficacia in contesti privi di illuminatori adeguati.

Infine, i radar FMCW (*Frequency-Modulated Continuous Wave*) si rivelano particolarmente efficaci per la rilevazione di micro-UAV a corto raggio, grazie alla possibilità di stimare simultaneamente distanza e velocità del bersaglio con un hardware compatto e a basso consumo energetico. Il principale limite rimane la ridotta portata operativa, che ne circoscrive l'impiego a scenari locali o a sistemi mobili.

In sintesi, la Tabella 2 evidenzia come non esista una configurazione radar universalmente ottimale, ma piuttosto un equilibrio da ricercare tra prestazioni, complessità e costi. Le tendenze più recenti si orientano verso soluzioni ibride o multimodali, in grado di combinare più principi di funzionamento radar o integrare sensori eterogenei (ottici, acustici, RF), per ottenere una rilevazione più affidabile e adattiva anche dei micro-droni in scenari dinamici.

2.4 L'effetto Doppler e la misura della velocità

Quando il bersaglio si muove rispetto al radar, la frequenza del segnale riflesso cambia proporzionalmente alla velocità radiale v :

$$f_D = \frac{2v}{\lambda}$$

dove f_D è lo spostamento di frequenza e λ la lunghezza d'onda [3].

L'analisi Doppler consente di distinguere bersagli in movimento da oggetti statici e di stimarne la velocità: in un radar operante a 10 GHz ($\lambda = 3$ cm), un drone che vola a 10 m/s produce uno spostamento di circa 667 Hz, un valore facilmente misurabile [3].

I radar FMCW e interferometrici in fase combinano le variazioni Doppler con misure di fase, ottenendo una risoluzione millimetrica nella stima della posizione e dell'altitudine del drone [4].

Tali approcci permettono di seguire con precisione anche manovre rapide e oscillazioni dovute al vento.

Una rappresentazione concettuale dell'effetto Doppler, con evidenza dello spostamento di frequenza generato dal moto radiale del bersaglio, è riportata in Figura 2.4.

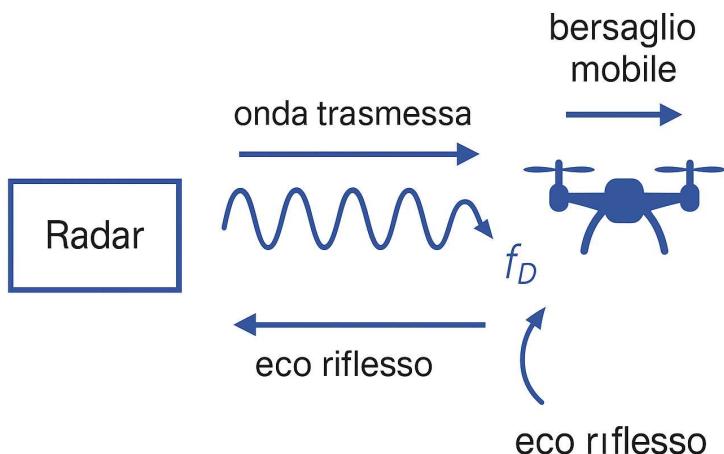


Figura 2.4: Rappresentazione concettuale dell'effetto Doppler in un sistema radar. Schema illustrativo del principio Doppler: il fenomeno consente al radar di stimare la componente radiale della velocità del bersaglio, misurando lo spostamento di frequenza tra il segnale trasmesso e quello ricevuto. Elaborazione propria tratta da [15].

2.5 I sistemi radar MIMO

La ricerca condotta sui radar ha conosciuto un profondo rinnovamento grazie all'introduzione dei sistemi MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), che rappresentano una naturale evoluzione dei radar phased array tradizionali.

L'architettura MIMO nasce con l'intento di incrementare la risoluzione angolare e la capacità del radar di distinguere più bersagli simultaneamente. Ciò avviene grazie all'impiego coordinato di diverse antenne trasmissenti e riceventi, i cui segnali combinati consentono di ottenere un'apertura virtuale molto più ampia della struttura fisica del sistema.

Combinando i segnali provenienti da ciascuna coppia TX–RX, il sistema è in grado di generare una “apertura virtuale” molto più ampia di quella fisica, aumentando la risoluzione angolare e la sensibilità [2], [4].

2.5.1 Principi di funzionamento

In un radar MIMO, ogni antenna trasmittente emette una forma d’onda distinta (ad esempio codificata in frequenza o in fase), e ogni ricevitore riceve l’eco di tutti i trasmettitori; ne risulta una matrice di dati con $N_t \times N_r$ combinazioni, dove N_t e N_r sono rispettivamente il numero di antenne trasmittenti e riceventi.

Combinando i dati ricevuti dai vari canali TX–RX è possibile ricostruire lo scenario radar in modo più ricco, ottenendo una risoluzione angolare e spaziale superiore.

A differenza di un *phased array* convenzionale, in cui tutte le antenne trasmettono lo stesso segnale con fasi diverse, un radar MIMO trasmette forme d’onda indipendenti, rendendo possibili schemi adattivi di radiazione e ricezione [12].

Questo consente di ottenere:

- maggiore risoluzione angolare,
- migliore discriminazione dei bersagli,
- incremento del rapporto segnale/rumore (SNR) grazie alla diversità spaziale.

Come mostrato nelle Figura 2.5, la modulazione lineare di frequenza tipica dei radar FMCW (chirp) consente di generare un segnale la cui variazione temporale di frequenza è proporzionale alla distanza del bersaglio. L’interferenza tra il segnale trasmesso e quello riflesso produce una frequenza di battimento, che rappresenta la misura diretta della distanza del target. Queste rappresentazioni grafiche chiariscono il principio fisico e l’elaborazione del segnale alla base del funzionamento dei radar FMCW.

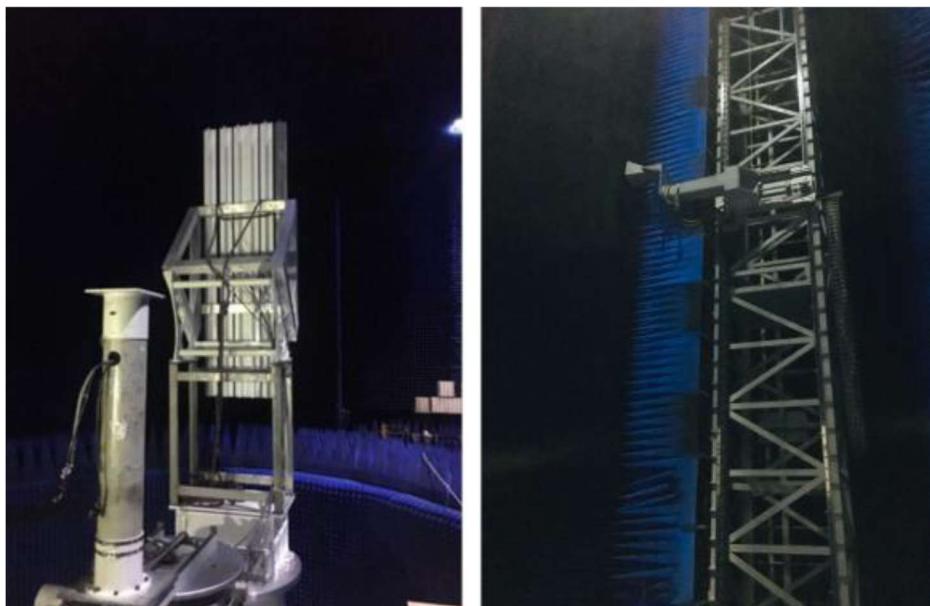


Figura 2.5: Configurazione sperimentale con antenne multiple per la creazione di un’apertura virtuale e il miglioramento della risoluzione spaziale [2].

2.5.2 Vantaggi e limiti dei sistemi MIMO

I radar MIMO permettono di raggiungere prestazioni elevate anche in spazi ridotti, con una risoluzione angolare che può scendere fino a 1–2°.

L'utilizzo di canali multipli indipendenti rende il sistema più robusto alle riflessioni multiple e alle interferenze generate dall'ambiente urbano.

Inoltre, l'architettura MIMO può essere facilmente integrata con algoritmi di *beamforming* digitale e di *machine learning*, migliorando ulteriormente la capacità di tracciamento e classificazione [7].

Tuttavia, l'aumento dei canali indipendenti comporta una maggiore complessità elaborativa e la necessità di una sincronizzazione accurata tra antenne trasmissenti e riceventi. Anche minimi sfasamenti di fase possono introdurre errori nella stima della direzione di arrivo (*Direction of Arrival*, DOA), con conseguente degradazione della risoluzione.

2.5.3 Applicazioni pratiche nella rilevazione di droni

In uno studio sperimentale condotto da Yang et al. [2], un radar MIMO operante nella banda S (2–4 GHz) ha mostrato la capacità di individuare micro-UAV con una sezione radar di circa 0,01 m² fino a distanze prossime ai 400 m, raggiungendo una precisione angolare di circa 2°.

Ulteriori lavori hanno mostrato che i radar MIMO di nuova generazione possono impiegare strategie di *beamforming* adattativo per migliorare l'illuminazione del bersaglio e ridurre le zone d'ombra tipiche dei micro-UAV a bassa quota. Nei sistemi più avanzati, la configurazione dei sotto-array trasmissenti e riceventi viene ottimizzata in funzione dello scenario, consentendo di concentrare l'energia solo nelle regioni angolari rilevanti e di mitigare gli effetti dell'interferenza proveniente da sorgenti indesiderate o *multipath*.

Questi approcci permettono di incrementare la probabilità di rilevazione in ambienti complessi senza introdurre costi computazionali elevati e rappresentano un'evoluzione naturale delle architetture MIMO tradizionali verso forme più flessibili e adattive, particolarmente adatte alla sorveglianza di micro-UAV in scenari urbani e periurbani [13], [16].

2.5.4 Radar multistatici e cooperativi

Parallelamente ai sistemi MIMO, si è diffuso l'interesse verso i radar multistatici, nei quali più trasmettitori e ricevitori sono collocati in posizioni diverse.

Nei radar multistatici, trasmettitore e ricevitore non sono co-localizzati, ma disposti in posizioni differenti. Questa configurazione permette di osservare il bersaglio da prospettive diverse, ottenendo informazioni tridimensionali più ricche e una maggiore affidabilità nella discriminazione di oggetti multipli [6].

I radar multistatici passivi sfruttano sorgenti di illuminazione d'opportunità (TV, FM, 5G) e una rete di ricevitori sincronizzati.

Questo approccio offre notevoli vantaggi:

- assenza di emissione attiva, quindi elevata discrezione operativa;
- riduzione dei costi e semplicità d'integrazione;
- maggior copertura grazie alla diversità geometrica e spaziale.

L'esperimento di Cheng et al. [6] hanno mostrato come un sistema multistatico con un singolo illuminatore e tre ricevitori distribuiti sia in grado di tracciare piccoli UAV a oltre 2 km con buona precisione, avvicinando le prestazioni di radar attivi di classe superiore.

Un'estensione naturale di questa architettura è rappresentata dai radar cooperativi distribuiti, nei quali più unità MIMO o multistatiche scambiano informazioni in tempo reale, creando reti radar intelligenti in grado di coprire aree molto vaste con elevata affidabilità [10].

2.5.5 Confronto e prospettive

I radar MIMO e multistatici rappresentano due approcci complementari con l'obiettivo comune di incrementare la precisione e la resilienza del sistema radar.

Come evidenziato nella Tabella 2.2, il confronto tra le principali tipologie di radar impiegate per la rilevazione dei droni mostra differenze significative in termini di portata, risoluzione e complessità di elaborazione. I radar a impulsi garantiscono elevate distanze operative ma richiedono potenze trasmissive maggiori e sistemi di ricezione più sensibili. I radar FMCW, invece, offrono buona risoluzione e *hardware* compatto, risultando ideali per applicazioni a corto raggio. I sistemi UWB (*Ultra-Wideband*) eccellono nella risoluzione spaziale grazie all'ampia banda di emissione, mentre i radar MIMO e multistatici rappresentano soluzioni più avanzate e versatili, capaci di fornire coperture tridimensionali e una maggiore robustezza contro interferenze e *clutter*.

Questa analisi comparativa sottolinea come la scelta della tecnologia radar più adeguata debba basarsi sul compromesso tra prestazioni operative, complessità implementativa e contesto applicativo, aprendo la strada a soluzioni ibride e integrate per il futuro sviluppo dei sistemi *Counter-UAS* (C-UAS), ossia sistemi di contrasto ai velivoli senza pilota), progettati per individuare, tracciare e neutralizzare potenziali minacce nello spazio aereo.

Nel primo caso, la molteplicità dei canali virtuali migliora la risoluzione angolare; nel secondo, la diversità geometrica dei ricevitori consente di ampliare la copertura spaziale e ridurre i falsi allarmi.

Tabella 2.2: Confronto tra radar MIMO e multistatici [2], [6], [16].

Caratteristica	MIMO Radar	Multistatico Passivo
Apertura effettiva	Virtuale	Distribuita
Sincronizzazione	Elevata precisione	Necessaria tra ricevitori
Complessità elaborativa	Alta	Media
Emissione attiva	Sì	No (sorgenti d'opportunità)
Costo	Alto	Basso
Robustezza al rumore	Alta	Alta (diversità spaziale)
Applicazioni tipiche	Tracking UAV, radar imaging	Sorveglianza discreta, sensor fusion

L'integrazione dei due approcci, nota come MIMO multistatico, è oggi uno dei campi più interessanti dalla ricerca.

Tali sistemi combinano array MIMO locali con reti distribuite di ricevitori passivi, ottenendo prestazioni superiori in termini di copertura, precisione e capacità di adattamento [16].

In prospettiva, l'unione tra radar MIMO, architetture cognitive e reti cooperative distribuite costituisce il futuro della radaristica applicata al Counter-UAV, aprendo la strada a sensori intelligenti capaci di analizzare, riconoscere e reagire in modo autonomo all'ambiente operativo.

2.6 Tecniche di elaborazione del segnale radar

L'elaborazione del segnale radar rappresenta la fase più importante nella rilevazione e classificazione dei droni di piccole dimensioni, che avendo bassa RCS e ridotte potenze riflesse, rendono i micro-UAV difficilmente distinguibili dal clutter di fondo o da altri oggetti in movimento [2], [9]. Le moderne architetture radar combinano, dunque, filtraggio adattivo, rilevamento dinamico e intelligenza artificiale per aumentare la probabilità di rilevazione e ridurre quella di falso allarme [8], [13].

2.6.1 Filtraggio e riduzione del *clutter*

Il *clutter* rappresenta uno dei principali limiti nella rilevazione di piccoli droni, poiché genera echi multipli da edifici, vegetazione e terreno. Per ridurlo, vengono impiegati filtri Doppler adattivi in grado di separare i bersagli in movimento dai riflessi statici e tecniche basate sulla coerenza temporale dei segnali ricevuti [6].

Nel lavoro di Wellig et al. [9], ad esempio, sono stati analizzati diversi scenari in cui la riflessione multipla dovuta a superfici naturali e artificiali genera falsi allarmi. Gli autori dimostrano come l'utilizzo di una finestra di integrazione temporale e di soglie adattive possano migliorare la discriminazione dei micro-UAV.

Similmente, nei radar UWB (*ultra-wideband*) studiati da Kim et al. [5], si può osservare come grazie all'ampia banda disponibile offrano una risoluzione temporale notevolmente fine, utile per separare echi molto ravvicinati e ridurre gli effetti del *clutter* impulsivo.

2.6.2 Rilevamento adattivo

Per mantenere costante la probabilità di falso allarme, molti sistemi utilizzano il principio del CFAR (*Constant False Alarm Rate*), in cui la soglia di rilevamento viene aggiornata dinamicamente in funzione del rumore locale [1], [9].

Nei radar anti-drone, questo metodo è spesso integrato con algoritmi di tracciamento adattivo, come il *moving target indicator* (MTI) o filtri predittivi leggeri, che consentono di stimare la traiettoria del bersaglio e filtrare variazioni dovute al vento o a movimenti non lineari.

Un esempio è fornito dallo studio di Yang et al. [13], che combina il rilevamento CFAR con un sistema radar MIMO per separare i droni da oggetti di disturbo in ambiente urbano: questo approccio consente di aumentare la sensibilità del radar senza incrementare il numero di falsi allarmi.

2.6.3 Analisi del micro-Doppler e classificazione automatica

Le componenti micro-Doppler prodotte dalla rotazione delle eliche definiscono un *pattern* caratteristico, utile per distinguere i droni da altri bersagli. Nella pratica rappresentano una sorta di ‘firma dinamica’ facilmente riconoscibile dai moderni algoritmi di analisi.

Le evidenze sperimentali mostrano che tali firme consentono di distinguere in modo affidabile i droni da uccelli e da altri bersagli non cooperativi anche in condizioni di forte *clutter*. Islam et al. [14] hanno dimostrato come l’impiego di rappresentazioni tempo–frequenza combinate con reti neurali convoluzionali (*Convolutional Neural Networks*, CNN) migliori significativamente la capacità di classificazione in scenari reali. Fioranelli et al. [15] hanno confermato che la firma micro-Doppler riduce in modo sostanziale i falsi allarmi, soprattutto nel monitoraggio di micro-UAV a bassa velocità.

Gli sviluppi più recenti introducono architetture più sofisticate, come i modelli *Transformer*, capaci di catturare dipendenze temporali e strutturali complesse nelle rappresentazioni radar. Tecniche basate su *Reinforcement Learning* (RL), come mostrato da Chen et al. [17], consentono inoltre di ottimizzare dinamicamente forma d’onda e parametri operativi del radar, migliorando la robustezza della classificazione in presenza di rumore, interferenze e riflessioni multiple.

2.6.4 Radar cognitivi e adattivi

“L’ultimo stadio evolutivo dell’elaborazione radar è rappresentato dai radar cognitivi, ossia sistemi in grado di apprendere dall’ambiente operativo e di adattare in tempo reale i propri parametri di trasmissione e ricezione” [8].

Questi radar modificano dinamicamente la forma d’onda, la frequenza operativa e il tempo di integrazione in base al contesto, migliorando l’efficienza energetica e la capacità di tracciamento.

Il lavoro di Feng et al. [8] descrive un radar cognitivo basato su *reinforcement learning*, in cui il sistema valuta continuamente la qualità della rilevazione per selezionare la forma d’onda più adatta.

Analogamente, Zhang et al. [16] hanno proposto una strategia di ottimizzazione intelligente multi-bersaglio, in grado di gestire contemporaneamente più UAV con priorità variabile. Infine, Ganganath et al. [10] hanno dimostrato, come anche rappresentato nella Figura 2.6, che la fusione tra radar e sensori acustici, mediata da reti *Transformer Encoder*, può incrementare la robustezza del rilevamento anche in scenari rumorosi.

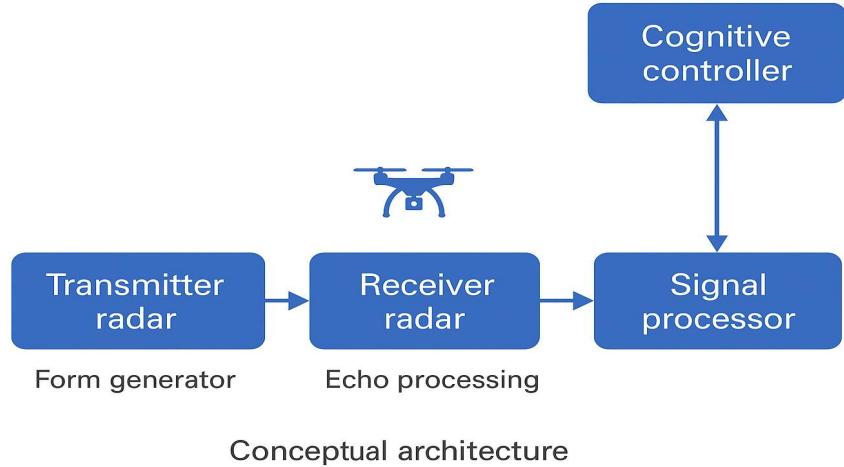


Figura 2.6: Architettura concettuale di un radar cognitivo. Lo schema semplificato che illustra il principio di funzionamento di un radar cognitivo: il sistema trasmette un segnale verso il bersaglio (drone), elabora l'eco riflesso, valuta le prestazioni e adatta in tempo reale i parametri di trasmissione tramite un ciclo di feedback cognitivo. Elaborazione propria su base tratta da [8], [10], [16].

2.6.5 Sintesi

Le moderne tecniche di elaborazione del segnale hanno reso il radar un sensore intelligente e adattivo, capace non solo di rilevare ma anche di riconoscere e classificare i droni in tempo reale.

L'integrazione di metodi di filtraggio adattivo, rilevamento dinamico e apprendimento automatico rappresenta oggi il nucleo dei sistemi radar di nuova generazione, in cui la capacità cognitiva e la cooperazione tra sensori costituiscono la chiave per garantire la sicurezza dello spazio aereo in ambienti complessi [8], [10], [16].

3. TIPOLOGIE DI RADAR PER LA RILEVAZIONE DI DRONI

3.1 Introduzione

Il progresso delle tecnologie radar ha portato, negli ultimi dieci anni, alla realizzazione di un'ampia gamma di sensori specificamente progettati per la rilevazione dei droni di piccole dimensioni (*small UAVs*).

Come nella Tabella 3.1, gli *small UAVs* presentano in genere un'apertura alare compresa tra 20 e 50 cm, mentre i *micro-UAV* si collocano al di sotto dei 15 cm. Queste ridotte dimensioni comportano un'evidente diminuzione della *Radar Cross Section* e rendono più complessa la rilevazione, specialmente in scenari *clutterated* o a bassa quota, dove il segnale riflesso tende a confondersi con il rumore di fondo.

Tabella 3.1: Le differenze tra UAVs

Categoria UAV	Apertura alare tipica	Caratteristiche rilevanti	Implicazioni radar
Small UAVs	20–50 cm	Struttura leggera bassa quota operativa velocità moderata	RCS ridotta → riflessioni deboli e facilmente sommerse dal clutter
< 15 cm Micro-UAVs	< 11 cm	Dimensioni estremamente ridotte profilo metallico minimo	RCS molto bassa → rilevazione difficile, soprattutto in scenari clutterati o a bassa quota

Le architetture oggi impiegate spaziano dai radar monostatici a onda continua ai più sofisticati sistemi MIMO, multistatici passivi e cognitivi, ciascuno caratterizzato da un diverso equilibrio tra costo, portata, risoluzione e complessità di elaborazione [2], [9].

Non esiste una soluzione unica adatta a tutti gli scenari: la scelta del radar dipende fortemente dal contesto operativo (civile o militare, urbano o rurale, mobile o fisso) e dal livello di precisione richiesto [15].

In questa sezione vengono analizzate le principali categorie di radar utilizzate nelle applicazioni *Counter-UAS* (C-UAS), evidenziando i principi di funzionamento, i vantaggi e i limiti sperimentali.

3.2 Radar a onda continua e FMCW

I radar a onda continua modulata in frequenza rappresentano una delle soluzioni più diffuse per il rilevamento dei droni di piccole dimensioni, grazie alla loro compattezza, basso consumo energetico e costi ridotti.

A differenza dei radar impulsivi, che inviano brevi impulsi di alta potenza, i radar FMCW trasmettono un segnale continuo la cui frequenza varia linearmente nel tempo (*chirp*) [9]. La differenza di frequenza tra il segnale trasmesso e quello ricevuto, detta frequenza di battimento (*beat frequency*), permette di stimare simultaneamente distanza e velocità del bersaglio [15].

Questa tecnologia è particolarmente indicata per l'individuazione di micro-UAV a bassa quota, poiché consente di ottenere informazioni tridimensionali (*range*, velocità e angolo di arrivo) anche con potenze di trasmissione molto contenute.

Nel lavoro di Wang et al. [3], un radar FMCW in banda C (5.3 GHz) ha rilevato droni con sezione radar equivalente (RCS) inferiore a 0.01 m^2 fino a 250 m, mentre Ghadimi et al. [13], operando in banda millimetrica a 60 GHz, hanno raggiunto una risoluzione in distanza dell'ordine di pochi centimetri.

L'elevata frequenza di modulazione consente inoltre di discriminare i bersagli statici dai movimenti periodici delle eliche, permettendo di sfruttare le componenti micro-Doppler per la classificazione automatica [18]. Questa caratteristica, combinata con l'elaborazione digitale dei segnali, rende i radar FMCW ideali per installazioni fisse o mobili in ambito urbano, aeroportuale e militare.

Tuttavia, i radar FMCW presentano alcune limitazioni strutturali e operative che ne influenzano le prestazioni nel contesto delle applicazioni Counter-UAS.

In primo luogo, la portata massima risulta generalmente inferiore rispetto a quella dei radar a impulsi di pari potenza, in quanto la trasmissione continua comporta vincoli sulla potenza di picco irradiata. Per valori tipici di potenza trasmessa dell'ordine di pochi watt e larghezze di banda comprese tra 100 MHz e 1 GHz, la portata effettiva di rilevamento si colloca tra 500 m e 3 km, variando in funzione della *Radar Cross Section* del bersaglio. A titolo di riferimento, un micro-UAV con RCS compresa tra 0.01 e 0.05 m^2 può essere individuato entro distanze massime di 800–1000 m, mentre uno small UAV con RCS pari a circa 0.1 m^2 può essere rilevato fino a 2–3 km in condizioni favorevoli.

Un'ulteriore limitazione riguarda la risoluzione angolare, fortemente dipendente dalle dimensioni dell'antenna secondo la relazione $\Delta\theta \approx \lambda/D$. Operando, ad esempio, a 24 GHz ($\lambda \approx 1.25 \text{ cm}$), un'antenna con apertura di 10 cm consente di ottenere una risoluzione angolare di circa 7° , mentre per raggiungere valori prossimi a 1 – 2° sarebbe necessario un *array* di almeno 0.6 – 1 m , difficilmente compatibile con piattaforme compatte o mobili.

Infine, la presenza simultanea di più bersagli può generare fenomeni di ambiguità in frequenza, con sovrapposizione dei segnali di battimento in intervalli dell'ordine di decine di kHz. Tali effetti rendono necessarie tecniche di elaborazione avanzate, come il *beamforming* digitale, l'*adaptive CFAR* o l'analisi tempo-frequenza mediante *Short-Time Fourier Transform* (STFT) e algoritmi di tipo *MUSIC* o *CLEAN*, per una corretta separazione dei ritorni [2], [15].

Per mitigare questi limiti, la ricerca più recente si orienta verso sistemi multicanale FMCW e architetture MIMO, nelle quali più ricevitori cooperano per formare aperture virtuali. Tale approccio consente di migliorare significativamente la risoluzione spaziale, riducendola anche a meno di 1° , e di estendere la portata utile fino a 4–6 km, aumentando la robustezza al rumore e la capacità di discriminare bersagli ravvicinati [13], [16].

3.3 Radar ad impulsi e UWB

I radar impulsivi a banda ultra-larga (UWB, *Ultra-Wideband*) rappresentano una delle tecnologie più promettenti per la rilevazione di droni a corto raggio. A differenza dei sistemi FMCW, che trasmettono onde continue modulate in frequenza, i radar UWB emettono impulsi brevissimi, della durata tipicamente compresa tra 0,1 e pochi nanosecondi, coprendo una larghezza di banda superiore a 500 MHz o, più formalmente, una frazione di banda (B/f_c) maggiore del 20% rispetto alla frequenza centrale [9].

Questa ampiezza spettrale consente di ottenere una risoluzione temporale dell'ordine di poche centinaia di picosecondi, traducendosi in una risoluzione spaziale estremamente elevata, calcolabile come $\Delta R = c/(2B)$. Ad esempio, con una banda di 1 GHz, si ottiene una risoluzione in distanza di circa 15 cm, che può migliorare fino a 3–5 cm con larghezze di banda di 3–5 GHz, rendendo possibile distinguere bersagli molto ravvicinati e identificare micromovimenti delle eliche o vibrazioni strutturali del drone [15], [18].

Dal punto di vista fisico, la grande larghezza di banda implica una ridotta densità spettrale di potenza: l'energia di ciascun impulso è distribuita su un ampio spettro di frequenze, riducendo le interferenze con altri sistemi radio e garantendo una maggiore compatibilità elettromagnetica. Inoltre, le onde UWB presentano una notevole capacità di penetrazione in materiali non metallici come plastica, legno o vegetazione leggera, con perdite contenute fino a pochi decibel per centimetro di spessore [2].

Tali proprietà rendono i radar UWB particolarmente adatti per la rilevazione in ambienti complessi o indoor, dove la presenza di superfici riflettenti e ostacoli può compromettere il funzionamento dei radar convenzionali. In questi scenari, la combinazione di elevata risoluzione spaziale, bassa potenza irradiata e resistenza alle interferenze consente di individuare anche micro-UAV a distanza di 50–200 m, con un'elevata affidabilità di classificazione del segnale riflesso.

3.3.1 Applicazioni e risultati sperimentali

Nel lavoro di Kim et al. [5], un radar UWB operante a 24 GHz è stato utilizzato per rilevare oggetti in rapido movimento a distanze comprese tra 5 e 30 metri, dimostrando la capacità di distinguere oscillazioni periodiche dovute alle eliche dei droni. L'elevata risoluzione in distanza, combinata con l'analisi micro-Doppler, ha permesso di identificare correttamente i piccoli UAV anche in presenza di forti riflessioni di fondo.

Allo stesso modo, Fioranelli et al. [15] hanno evidenziato che l'uso di radar UWB può migliorare significativamente la separazione temporale dei segnali di ritorno in scenari con più bersagli, riducendo la probabilità di confondere i droni con uccelli o detriti aerotrasportati. Lo schema di principio di un radar UWB impulsivo, che evidenzia la generazione degli impulsi, la sincronizzazione del clock e la catena di ricezione con amplificazione a basso rumore, è riportato in Figura 3.1.

La capacità del sistema di catturare micro vibrazioni e variazioni di fase rende inoltre possibile un'analisi dettagliata della firma radar del bersaglio [18].

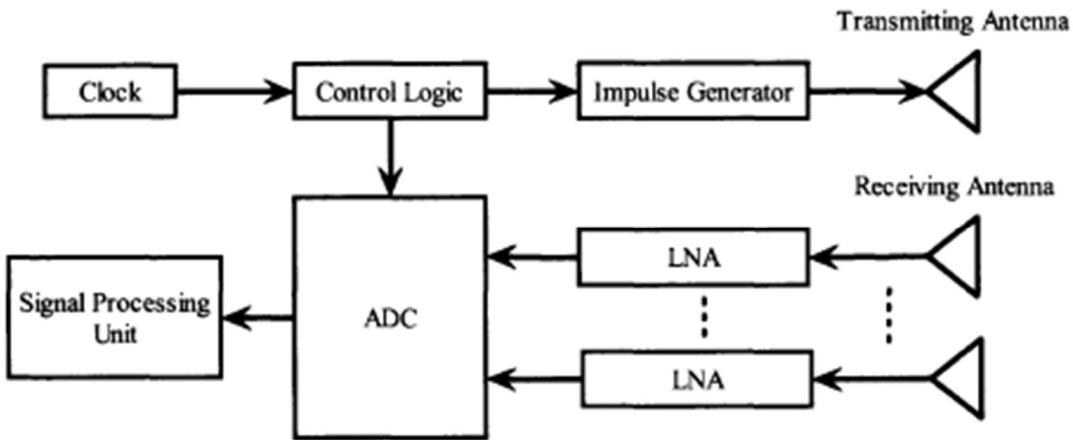


Figura 3.1: Schema di principio di un radar UWB impulsivo. Il sistema trasmette impulsi a larga banda e misura i tempi di ritorno delle riflessioni, ottenendo una risoluzione spaziale dell’ordine dei centimetri [5].

3.3.2 Vantaggi e limiti

I principali vantaggi dei radar UWB rispetto ad altre architetture sono:

- alta risoluzione in distanza (pochi centimetri);
- resistenza al clutter grazie alla natura impulsiva del segnale;
- ridotta interferenza spettrale e possibilità di operare in ambienti saturi di segnali [2], [5].

Tuttavia, la tecnologia presenta anche alcune criticità:

- la bassa energia irradiata riduce la portata operativa, tipicamente inferiore a 100–200 m;
- l’ampiezza spettrale richiede autorizzazioni regolamentari specifiche;
- i circuiti di generazione e sincronizzazione degli impulsi sono complessi e costosi [5], [9].

Per questi motivi, i radar UWB vengono spesso impiegati come sensori complementari a sistemi FMCW o MIMO, contribuendo a migliorare la precisione complessiva di tracciamento e classificazione [17], [18].

I radar UWB si distinguono come strumenti di grande efficacia nel riconoscimento a corto raggio di droni e micro-UAV, grazie alla loro capacità di catturare dettagli temporali e micro-Doppler altrimenti non rilevabili. Le ricerche più recenti ne evidenziano il ruolo all’interno di piattaforme multi-sensore, dove la loro precisione in distanza si combina con la capacità angolare dei radar MIMO, aprendo la strada a sistemi radar sempre più precisi e intelligenti [5], [17].

3.4 Radar MIMO e multistatici

Negli ultimi anni l’evoluzione della tecnologia radar ha portato allo sviluppo di architetture MIMO e multistatiche, capaci di offrire prestazioni nettamente superiori rispetto ai sistemi monostatici tradizionali.

Nei radar MIMO, l'impiego simultaneo di più canali trasmittenti e riceventi consente di generare una grande apertura virtuale, aumentando la risoluzione angolare e la capacità di formare immagini tridimensionali del bersaglio. In configurazioni tipiche con 8–16 antenne virtuali, si ottengono risoluzioni angolari dell'ordine di 0,5–1°, contro i 5–10° dei radar monostatici equivalenti.

Dal punto di vista operativo, le architetture MIMO a onda continua modulata (FMCW-MIMO) possono raggiungere una portata di 4–6 km per bersagli con *Radar Cross Section* di circa 0.1 m², e fino a 8–10 km in sistemi ad alta potenza (oltre 10 W EIRP) o in configurazioni bistatiche o multistatiche con illuminatori cooperanti [2], [9]. La risoluzione in distanza, determinata dalla larghezza di banda del segnale trasmesso, può scendere a 7–15 cm con bande di 1–2 GHz, mentre la risoluzione in velocità ($\Delta v = \lambda/2T$) raggiunge valori inferiori a 0.1 m/s, rendendo possibile distinguere micro-droni con eliche in rotazione da piccoli uccelli o altri disturbi ambientali.

Nei sistemi multistatici, più radar cooperano scambiandosi informazioni di fase e tempo d'arrivo, migliorando la copertura spaziale e la robustezza al mascheramento del segnale causato da ostacoli o riflessioni multiple. Questa configurazione consente di mantenere un'elevata probabilità di rilevamento ($P_d > 0.9$) anche in scenari complessi, come aree urbane o boschive, e di ottenere un'accuratezza di localizzazione inferiore ai 20 cm mediante tecniche di *time-difference-of-arrival* (TDOA) e *phase interferometry*.

Grazie a tali caratteristiche, alta risoluzione spaziale e temporale, capacità di tracciamento simultaneo di bersagli multipli (oltre 20 target indipendenti) e robustezza al rumore e al *clutter*, le architetture MIMO e multistatiche si stanno affermando come lo standard tecnico di riferimento per la rilevazione e il tracciamento di droni in scenari complessi, civili e militari.

3.4.1 Applicazioni e risultati sperimentali dei radar MIMO

I radar MIMO rappresentano la naturale evoluzione dei *radar phased array*: utilizzano più antenne trasmittenti e riceventi per generare canali indipendenti, la cui combinazione consente di creare aperture virtuali molto più ampie di quelle fisiche.

Questa caratteristica si traduce in una migliore risoluzione angolare e in una maggiore sensibilità nella rilevazione di micro-UAV, soprattutto in ambienti ad alta riflettività [2], [15].

Nel lavoro di Yang et al. [2], un radar MIMO operante in banda S (2–4 GHz) ha dimostrato di poter rilevare droni con *Radar Cross Section* di appena 0,01 m² fino a 400 m di distanza, mantenendo una precisione angolare inferiore a 2°.

La struttura, composta da 4 trasmettitori e 8 ricevitori, è stata testata in ambienti semi-urbani, dove l'elaborazione digitale tramite *beamforming* adattivo ha ridotto sensibilmente gli effetti del *clutter*.

In configurazioni più avanzate, i radar MIMO hanno introdotto strategie di *beamforming* adattativo capaci di concentrare l'energia trasmessa solo nelle regioni angolari di interesse, migliorando la separazione dei bersagli anche in scenari caratterizzati da forte *clutter* o *multipath*. Questo approccio consente di incrementare significativamente la probabilità di rilevazione dei micro-UAV, riducendo allo stesso tempo l'impatto delle interferenze generate dall'ambiente circostante.

Studi hanno [15] esteso tali configurazioni verso forme più evolute di MIMO adattativo, in cui la selezione dei sotto-array attivi e la gestione dinamica delle direzioni di puntamento vengono

ottimizzate in base alla scena osservata. Queste tecniche si sono dimostrate particolarmente efficaci in scenari complessi, come ambienti semi-urbani o contesti con forte densità elettromagnetica, permettendo una maggiore stabilità della rilevazione e una riduzione delle zone d'ombra, soprattutto in scenari complessi.

Questi risultati dimostrano come l'approccio MIMO, unito a tecniche di apprendimento automatico, rappresenti oggi la base per i sistemi Counter-UAS intelligenti, come mostrato nella fig. 12.

Dal punto di vista tecnico-operativo, i radar MIMO presentano numerosi vantaggi:

- Risoluzione angolare elevata, anche inferiore a 1° in configurazioni a elevato numero di canali virtuali;
- Capacità di rilevare bersagli multipli e di discriminare segnali sovrapposti grazie alla diversità spaziale e di fase;
- Robustezza al *clutter* e alle interferenze, migliorata mediante tecniche di *beamforming* adattivo;
- Flessibilità architetturale, che consente configurazioni multistatiche o distribuite per incrementare la copertura e ridurre le zone d'ombra;
- Compatibilità con l'intelligenza artificiale, che consente l'ottimizzazione automatica dei parametri di trasmissione e la classificazione dei bersagli in tempo reale.

Accanto a tali benefici, esistono tuttavia anche alcuni svantaggi che limitano l'adozione estensiva di questa tecnologia:

- Elevata complessità hardware e computazionale, dovuta alla necessità di sincronizzare più canali e gestire grandi quantità di dati;
- Costi maggiori rispetto ai radar monostatici tradizionali, specialmente in applicazioni mobili o su piattaforme UAV di piccole dimensioni;
- Sensibilità alla calibrazione: errori di fase o di tempo tra i canali possono degradare significativamente la qualità dell'immagine radar;
- Consumo energetico superiore, dovuto alla moltiplicazione delle catene trasmittenti e riceventi;
- Difficoltà di integrazione su piattaforme compatte, dove peso e spazio risultano limitanti.

Nonostante tali criticità, i radar MIMO rappresentano oggi il compromesso ottimale tra prestazioni, adattabilità e capacità di integrazione con l'intelligenza artificiale, delineando la direzione evolutiva dei moderni sistemi C-UAS.

3.4.2 Radar multistatici, passivi e cooperativi

I radar multistatici e passivi hanno assunto negli ultimi anni un ruolo centrale nella sorveglianza dei micro-UAV, grazie alla possibilità di osservare il bersaglio da angolazioni multiple e di combinare le informazioni provenienti da più sensori distribuiti nello spazio. La diversità geometrica tra trasmettitori e ricevitori permette di ridurre le zone d'ombra, aumentare la probabilità di rilevamento e mitigare gli effetti del *multipath*, aspetti particolarmente critici per velivoli di piccole dimensioni operanti a bassa quota [6].

- Radar multistatici e passivi

Nei sistemi multistatici attivi, più antenne trasmittenti e riceventi cooperano per stimare tempo, fase e direzione del segnale riflesso, consentendo una localizzazione accurata anche in scenari complessi. Lo studio di Cheng et al. [6] rappresenta un caso emblematico: utilizzando un illuminatore e tre ricevitori distribuiti, gli autori hanno dimostrato la capacità di tracciare micro-UAV fino a 2 km di distanza con un errore medio inferiore a 15 m.

I radar passivi multistatici sfruttano invece sorgenti di illuminazione d’opportunità, come DVB-T, FM o segnali 5G, eliminando la necessità di trasmettere energia propria. Liu et al. [1] hanno mostrato che piccoli droni possono essere rilevati fino a 1 km anche in condizioni di rapporto segnale-rumore negativo (-8 dB). Queste architetture offrono costi contenuti, elevata discrezione operativa e minore vulnerabilità al jamming, risultando ideali per applicazioni di sorveglianza urbana e protezione di infrastrutture critiche.

- Reti cooperative e radar cognitivi

L’evoluzione più recente consiste nella nascita di reti radar cooperative, in cui i nodi distribuiti condividono misure ed elaborazioni per migliorare in modo collettivo la stima del bersaglio. In queste configurazioni, ogni nodo agisce come un sensore intelligente: combina osservazioni locali, riceve informazioni dagli altri nodi e adatta i propri parametri operativi in funzione dello scenario.

Feng et al. [8] hanno dimostrato che l’integrazione di algoritmi cognitivi in una rete cooperativa può incrementare fino al 30% la probabilità di rilevamento in ambienti ad elevata variabilità elettromagnetica. Parallelamente, Zhang et al. [17] hanno mostrato come l’assegnazione dinamica di priorità ai bersagli consenta di ridurre i tempi medi di reazione del 25%. Approcci multimodali, come quello di Ganganath et al. [10], basati sulla fusione radar–acustica tramite *Transformer encoder*, confermano che la cooperazione tra sensori eterogenei migliora sensibilità e stabilità anche in presenza di rumori ambientali intensi.

La Figura 3.2 mostra una rete radar composta da un trasmittitore d’opportunità (Tx) e tre ricevitori distribuiti (Rx1–Rx3) impiegata per la rilevazione di micro-UAV. Il bersaglio, illuminato indirettamente dal segnale trasmesso, viene localizzato tramite correlazione incrociata dei segnali ricevuti e stima di tempo e fase di arrivo. L’esperimento, descritto da Cheng et al. [6], ha evidenziato la possibilità di rilevare micro-UAV fino a 2 km, con errore di localizzazione inferiore a 15 m.



Figura 3.2: Configurazione sperimentale di un radar passivo multistatico [6].

- Sintesi operativa

I radar MIMO garantiscono eccellente risoluzione angolare e capacità di classificazione dei bersagli, mentre i sistemi multistatici e passivi offrono copertura ampia, resilienza al clutter e discrezione operativa. L'integrazione di tali architetture in reti cooperative cognitive costituisce oggi la direzione più promettente per i moderni sistemi C-UAS, capaci di apprendere dall'ambiente, condividere informazioni e reagire dinamicamente alle condizioni operative.

3.4.3 Sintesi comparativa delle architetture radar avanzate

Dal confronto tra le diverse architetture radar emergono differenze sostanziali in termini di portata, risoluzione e impiego operativo.

I radar MIMO, operanti tipicamente nelle bande S, X o K (2–24 GHz), rappresentano oggi la soluzione con le prestazioni più elevate: grazie alla creazione di aperture virtuali e all'uso di elaborazione digitale avanzata, offrono una risoluzione angolare inferiore al grado e una risoluzione in distanza compresa tra 7 e 15 cm per larghezze di banda di 1–2 GHz. La portata di rilevamento può raggiungere 6 km per bersagli con *Radar Cross Section* di 0,1 m², arrivando fino a 8–10 km in configurazioni ad alta potenza o con antenne distribuite. Inoltre, la combinazione con tecniche di *beamforming* adattivo e reti neurali permette di mantenere la capacità di discriminare più di venti bersagli indipendenti, anche in presenza di clutter intenso o SNR prossimi a -3 dB.

Il principale svantaggio di questi sistemi risiede nella complessità hardware e computazionale, nei costi di sincronizzazione e calibrazione dei canali e, soprattutto, nel consumo energetico, che ne limita l'integrazione su piattaforme UAV di piccole dimensioni.

I radar multistatici, operanti di norma tra 1 e 10 GHz, costituiscono un compromesso tra prestazioni e copertura.

La presenza di più trasmettitori e ricevitori consente di osservare il bersaglio da diverse geometrie, riducendo le zone d'ombra e migliorando l'accuratezza del tracciamento. Le portate operative variano tra 1 e 4 km, con risoluzioni in distanza di 15–30 cm e angolari di 1–3°, a seconda del numero di stazioni e della larghezza di banda disponibile. La fusione dei dati provenienti dai vari nodi migliora la robustezza al rumore e consente di mantenere elevate probabilità di rilevamento anche in scenari urbani complessi. Il limite principale di queste architetture è rappresentato dalla necessità di una sincronizzazione precisa tra le unità e da un canale di comunicazione ad alta velocità per lo scambio dei dati in tempo reale.

I radar passivi, infine, sfruttano sorgenti di illuminazione d'opportunità – come segnali DVB-T, FM o 5G – e offrono la massima discrezione operativa poiché non richiedono alcuna emissione propria.

Le sperimentazioni più recenti, come quelle di Liu et al. [1] e Cheng et al.[6] , hanno dimostrato la possibilità di rilevare micro-UAV fino a 1–2 km anche in condizioni di SNR negativi (-8 dB), con errori di localizzazione inferiori a 15 m.

La risoluzione dipende fortemente dal segnale trasmesso: per sorgenti televisive o FM si ottengono valori di 20–50 cm, sufficienti per applicazioni di sorveglianza o allerta precoce. Il principale vantaggio di tali sistemi è la capacità di operare in modo continuo e poco

appariscente, con costi estremamente contenuti; tuttavia, la dipendenza da sorgenti esterne e la portata limitata ne riducono l'efficacia in scenari ad ampio raggio.

In sintesi, i radar MIMO eccellono per precisione e capacità di classificazione, i multistatici per copertura e robustezza, e i passivi per discrezione e sostenibilità operativa.

L'evoluzione naturale della ricerca converge verso reti radar cognitive e cooperative, che combinano i punti di forza di ciascuna architettura: l'alta risoluzione dei MIMO, la copertura dei multistatici e la furtività dei passivi.

Tali sistemi, capaci di apprendere dall'ambiente e adattarsi in tempo reale, rappresentano la base tecnologica dei futuri sensori Counter-UAV intelligenti, in grado di garantire sorveglianza continua, riduzione dei falsi allarmi e resilienza operativa anche in contesti fortemente interferiti.

3.5 Applicazioni militari e sistemi C-UAS

L'evoluzione delle minacce aeree negli ultimi anni ha reso la rilevazione e la neutralizzazione dei droni un elemento centrale per la sicurezza militare.

I conflitti recenti e le operazioni di peacekeeping hanno mostrato come i piccoli UAV (spesso commerciali o autocostituiti) possano essere impiegati per sorveglianza, attacco o disturbo elettronico, rappresentando una sfida complessa per le tradizionali difese radar [15], [19]. Per rispondere a questa esigenza, le forze armate di numerosi Paesi hanno sviluppato sistemi integrati *Counter-Unmanned Aircraft Systems* (C-UAS), in cui i radar rivestono il ruolo principale nella rilevazione e classificazione iniziale della minaccia [6], [9].

Nella Figura 3.3 viene mostrato lo sviluppo progressivo delle principali soluzioni impiegate nei sistemi C-UAS: dai sensori radar, acustici e RF dei primi anni 2010, all'introduzione della visione artificiale e delle reti neurali, fino alle attuali architetture basate su *data fusion* ed *edge computing*.

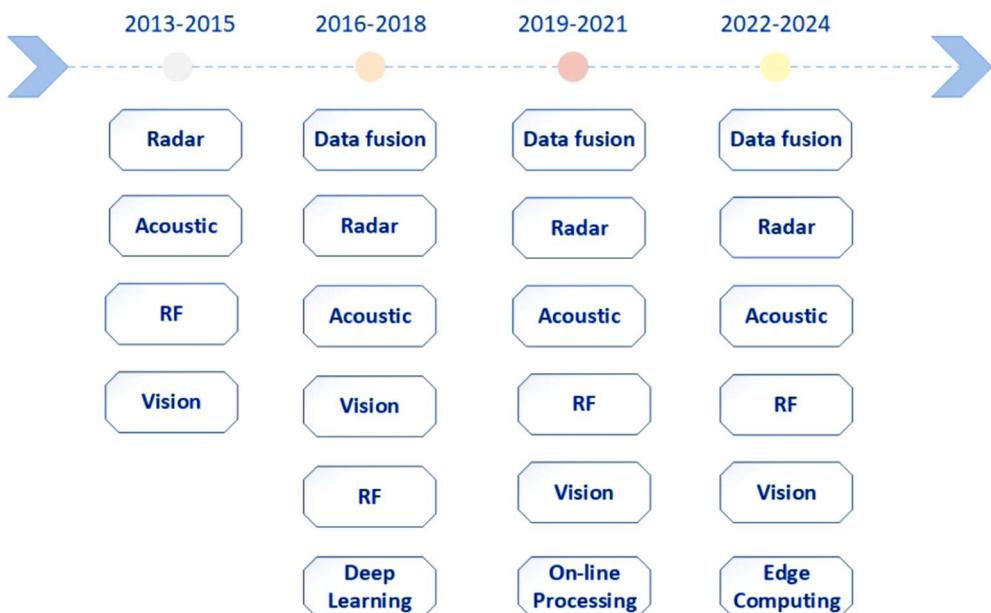


Figura 3.3: Evoluzione delle tecnologie di rilevazione anti-drone (2013–2024) [20].

3.5.1 Il contesto strategico e operativo

Il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti, nel rapporto 2025 “*Counter-Unmanned Aircraft Systems (C-UAS)*” [21], definisce la minaccia dei piccoli droni come «una priorità strategica di difesa perimetrale».

Tra i sistemi schierati in ambito operativo figurano il M-LIDS (*Mobile Low, Slow Small Unmanned Aircraft Integrated Defense System*) e il M-SHORAD (*Maneuver Short-Range Air Defense*), entrambi basati su radar a scansione elettronica in banda X e S. Queste piattaforme combinano sensori radar, ottici e RF per coprire le fasi di rilevazione, identificazione e tracciamento.

Anche l’Unione Europea ha avviato programmi di ricerca analoghi nell’ambito dell’*European Defence Fund (EDF)* e del (*North Atlantic Treaty Organization Science and Technology Organization*) NATO STO, mirati a sviluppare reti radar cognitive e multistatiche per la protezione di infrastrutture critiche e basi operative [22].

Queste iniziative sottolineano il crescente interesse strategico verso la *sensor fusion* e la cooperazione tra radar distribuiti, già trattata nei capitoli precedenti come soluzione ottimale per la copertura di scenari complessi.

3.5.2 Tecnologie radar impiegate in ambito militare

Le tecnologie radar presentate nei capitoli precedenti trovano ampia applicazione in contesti di difesa.

I radar FMCW e MIMO sono spesso scelti per le unità mobili o portatili, grazie alla loro compattezza e basso consumo, mentre i radar multistatici e cognitivi vengono impiegati in sistemi fissi per la sorveglianza di area estesa [8], [17].

Nel lavoro di Yang et al. [2], un radar MIMO in banda S è stato integrato in una piattaforma tattica per il tracciamento di UAV di piccole dimensioni, raggiungendo precisione angolare di 2°.

Analogamente, Feng et al. [16] hanno dimostrato che un radar cognitivo multistatico può aumentare del 30 % la probabilità di rilevamento in scenari ad alta densità di *clutter*.

Un contributo particolarmente significativo proviene dal paper “*UAV Detection with Passive Radar: Algorithms, Applications and Challenges*” [23], che analizza l’impiego dei radar passivi militari per la sorveglianza discreta.

Il lavoro mostra come i segnali d’opportunità (TV, FM, 5G) possano essere sfruttati per rilevare UAV fino a 2 km con errori di localizzazione inferiori a 10 m, rendendo questi sistemi adatti per missioni in cui è richiesta bassa rilevabilità del sensore.

3.5.3 Integrazione multi-sensore e strategie C-UAS

Nei moderni scenari operativi, la sola componente radar non è più sufficiente a garantire l’intero ciclo C-UAS (Detect – Track – Identify – Defeat).

Come mostrato in figura 3.7, i moderni sistemi C-UAS integrano diverse tipologie di sensori (radar, ottici, acustici, infrarossi e RF) ciascuno specializzato nell’acquisizione di caratteristiche

complementari del bersaglio e, per questo motivo, le architetture integrano questi moduli in reti di sorveglianza cooperative.

Il documento *Anti-UAV Detection and Identification Technology* (Elsevier, 2025) [20] descrive diversi prototipi ibridi radar-ottici, nei quali la *sensor fusion* consente di ridurre del 40 % i falsi allarmi rispetto ai radar autonomi.

Anche le strategie di classificazione basate su reti neurali profonde sono sempre più diffuse in ambito militare.

Nel lavoro di Zhang et al. [16], un radar cognitivo cooperativo con IA distribuita ha dimostrato di adattare dinamicamente la forma d'onda in funzione della manovra del bersaglio, anticipandone la traiettoria.

Questo approccio, mutuato dal dominio C4ISR (*Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*), costituisce la base dei radar intelligenti di prossima generazione.

3.5.4 Confronto dei principali sistemi militari C-UAS e sintesi

Tabella 3.2: Principali sistemi militari C-UAS

Sistema radar C-UAS	Banda operativa	Portata (km)	Tipo di architettura	Caratteristiche principali	Fonte
Spexer 2000 (Hensoldt)	Banda X	3–5 km	AESA monostatico	Alta risoluzione, rilevamento simultaneo di UAV e personale.	[9]
Oerlikon Radshield (Rheinmetall)	Banda W	4 km	Multistatico cooperativo	Copertura 360°, integrazione con moduli ottici.	[9], [20]
RADA MHR (Multi-Mission Hemispheric Radar)	Banda S	10 km	MIMO cognitivo	Ampia apertura virtuale, tracking di più droni.	[9], [16]
Thales Squire	Banda X	2–3 km	FMCW portatile	Elevata mobilità, impiego in missioni tattiche.	[2], [9]
M-LIDS (US Army)	Banda X	6 km	Rete cooperativa	Integrazione radar- EO/IR-RF, neutralizzazione automatica.	[20], [21]

La crescente minaccia rappresentata dai micro-UAV in ambito militare ha spinto governi e industrie della difesa a sviluppare piattaforme radar sempre più avanzate, in grado di rilevare, tracciare e classificare bersagli caratterizzati da una ridotta *Radar Cross Section*, da profili di volo irregolari e da manovrabilità elevata. La Tabella 3.1 riassume i principali sistemi C-UAS

attualmente adottati a livello internazionale, permettendo di evidenziare differenze e punti di forza delle diverse architetture.

Nel complesso, emerge una chiara distinzione tra radar concepiti per la protezione di infrastrutture statiche e piattaforme pensate per operazioni mobili o tattiche. Lo Spexer 2000, basato su tecnologia (*Active Electronically Scanned Array*) AESA in banda X, rappresenta un riferimento per la sorveglianza perimetrale: l'elevata risoluzione angolare e la capacità di individuare simultaneamente UAV e personale lo rendono particolarmente adatto alla difesa di basi militari e siti sensibili. A questo approccio si affianca quello dell'Oerlikon Radshield, che adotta una configurazione multistatica cooperativa in banda W. Questa scelta consente una copertura a 360° e una robusta integrazione multisensore, caratteristica essenziale negli scenari urbanizzati dove il clutter e le riflessioni multiple possono compromettere la qualità del segnale.

Una direzione tecnologica differente è rappresentata dal RADA MHR, radar MIMO cognitivo in banda S. L'ampia apertura virtuale generata dalla combinazione dei canali trasmittenti e riceventi, unita a tecniche adattative di controllo del fascio, consente il tracciamento simultaneo di molteplici micro-UAV, inclusi gli sciami. Rispetto ai sistemi monostatici, la configurazione MIMO offre un significativo incremento nella risoluzione angolare e nella robustezza alle interferenze, risultando particolarmente efficace in scenari dinamici ad alta densità elettromagnetica.

Sul fronte delle piattaforme portatili, il Thales Squire mostra come sensori FMCW compatti possano garantire prestazioni adeguate anche in operazioni tattiche. Pur offrendo una portata inferiore rispetto ai sistemi AESA o MIMO, il vantaggio principale risiede nella mobilità, nella rapidità di dispiegamento e nella capacità di operare in ambienti complessi senza richiedere infrastrutture dedicate.

L'M-LIDS, sviluppato dall'esercito statunitense, rappresenta il livello più avanzato di integrazione operativa. A differenza dei sistemi radar standalone, l'M-LIDS combina moduli radar, sensori elettro-ottici, infrarossi e ricevitori RF all'interno di una rete cooperativa capace di gestire automaticamente l'intero ciclo operativo del contrasto ai droni: *detection, tracking, identification e response*. Questa architettura risponde alla necessità, sempre più evidente, di disporre di strumenti che integrino capacità di rilevamento e neutralizzazione in un unico sistema coordinato.

Dal confronto emerge come la scelta dell'architettura radar influenzi profondamente le prestazioni del sistema C-UAS. I radar AESA offrono risoluzione eccellente e affidabilità in condizioni controllate; i sistemi multistatici cooperativi garantiscono coperture estese e resilienza al clutter; le soluzioni MIMO cognitive coniugano risoluzione, flessibilità geometrica e capacità adattativa; le piattaforme FMCW portatili introducono un compromesso efficace tra prestazioni e mobilità. La crescente integrazione multisensore, come mostrato dai sistemi più avanzati, rappresenta la direzione evolutiva più promettente: solo la fusione coordinata di dati radar, ottici e RF consente infatti di discriminare con precisione i micro-UAV e reagire tempestivamente alla minaccia.

In sintesi, i moderni sistemi militari C-UAS evidenziano un panorama tecnologico in rapida evoluzione, orientato verso reti radar intelligenti, distribuite e cooperanti. Le differenze presenti nella Tabella 3.2 non rappresentano semplicemente alternative progettuali, ma risposte specifiche a scenari operativi differenti: dalla sorveglianza statica di infrastrutture alla protezione mobile, dalla difesa perimetrale alla neutralizzazione attiva. Le architetture del futuro saranno sempre più modulari, cognitive e integrate, riflettendo la complessità crescente delle minacce aeree contemporanee [16], [20].

3.6 Sintesi comparative e prospettive

L'analisi condotta nei capitoli precedenti evidenzia una chiara direzione evolutiva nel campo della rilevazione radar dei droni: l'abbandono progressivo di architetture monostatiche isolate a favore di sistemi cooperativi, cognitivi e multimodali, in cui il radar diventa il cuore di un ecosistema sensoriale più ampio.

Negli ultimi dieci anni la ricerca ha mostrato un passaggio netto: dai radar FMCW e a impulsi, utilizzati per applicazioni civili o di corto raggio, verso soluzioni più complesse come i radar MIMO, multistatici e passivi, capaci di garantire copertura tridimensionale e maggiore resilienza al rumore [1], [2].

Parallelamente, la combinazione con sensori acustici, ottici e RF ha dato origine a sistemi C-UAS di nuova generazione, in grado di riconoscere e classificare in modo automatico i droni, distinguendoli da altri oggetti in movimento [10], [20].

Un ruolo centrale in questa evoluzione è stato assunto dall'intelligenza artificiale, che consente di estrarre caratteristiche salienti dai segnali radar e di ottimizzare i parametri operativi in tempo reale.

I radar cognitivi descritti da Feng et al. [8] e Zhang et al. [16] rappresentano esempi concreti di questa nuova filosofia: sistemi che apprendono dal contesto modificano la forma d'onda in base all'ambiente e condividono informazioni con altri sensori tramite reti distribuite. In ambito militare, questa capacità adattiva è già alla base dei sistemi cooperativi C-UAS utilizzati per la protezione di infrastrutture e basi operative [21].

In prospettiva, lo sviluppo dei sistemi C-UAS seguirà tre direzioni principali: l'aumento della cooperazione tra sensori, la crescente autonomia decisionale dei radar cognitivi e l'adozione di tecniche di elaborazione distribuita per ridurre i tempi di risposta. Queste innovazioni porteranno alla realizzazione di sistemi realmente intelligenti e adattivi, capaci non solo di rilevare la presenza di un drone, ma di comprenderne il comportamento, anticiparne le manovre e reagire in modo automatico.

L'unione tra radaristica avanzata, intelligenza artificiale e architetture di rete segna dunque il passaggio verso una nuova generazione di tecnologie Counter-UAV, destinate a svolgere un ruolo centrale nella difesa e nella sicurezza aerea del futuro.

4. SISTEMI RADAR C-UAS ATTUALMENTE IN USO

Negli ultimi anni, l'incremento dell'utilizzo di droni in ambito civile e militare ha spinto la ricerca verso lo sviluppo di sistemi radar dedicati alla rilevazione, identificazione e neutralizzazione di UAV.

Queste tecnologie, analizzate nei capitoli precedenti dal punto di vista teorico e sperimentale, hanno oggi raggiunto una maturità tale da essere impiegate operativamente in diversi contesti, dalla sorveglianza di infrastrutture critiche alla protezione di basi militari e spazi aerei sensibili [2], [9].

La progressiva miniaturizzazione dei sensori, l'introduzione di reti cooperative e l'integrazione con algoritmi di intelligenza artificiale hanno reso possibile la realizzazione di piattaforme radar multiruolo, in grado di rilevare bersagli a bassa sezione radar equivalente ($RCS < 0,01 \text{ m}^2$) anche in ambienti complessi o fortemente disturbati.

Sistemi come lo Spexer 2000 di Hensoldt, il RADA MHR, il Thales Squire e l'Oerlikon Radshield rappresentano oggi i riferimenti principali nel settore dei radar C-UAS, ciascuno con un diverso compromesso tra portata, risoluzione e mobilità [20], [21].

4.1 Introduzione generale

L'impiego di droni in scenari militari e di sicurezza ha profondamente modificato il concetto stesso di sorveglianza. Le minacce aeree non provengono più esclusivamente da velivoli tradizionali o missili, ma anche da UAV di piccole dimensioni, spesso costruiti con materiali plastici o compositi, difficili da rilevare con i radar convenzionali.

Questo ha richiesto la progettazione di sistemi ad alta sensibilità e risoluzione, capaci di distinguere i micro-UAV anche in presenza di clutter o disturbi atmosferici [1], [15].

I moderni radar C-UAS si basano su principi e tecnologie analizzati nei capitoli precedenti:

- Radar FMCW per misurazioni simultanee di distanza e velocità a corto raggio;
- Radar MIMO per elevata risoluzione angolare e capacità multi-target;
- Radar multistatici e passivi per sorveglianza discreta e copertura estesa;
- Radar cognitivi e cooperativi per adattamento dinamico e condivisione dati in rete [8], [17].

Il diagramma in Figura 4.1 illustra le principali fasi di elaborazione di un sistema C-UAS basato su radar: acquisizione del segnale, preelaborazione, processamento e identificazione del bersaglio.

Molti sistemi, come Spexer o Radshield, integrano sensori elettro-ottici, acustici o RF per ridurre i falsi allarmi e supportare la classificazione. Questa scelta deriva dal fatto che il solo radar, soprattutto in scenari complessi, può non essere sufficiente. Infatti, i sistemi di comando e controllo (C2), permettono la gestione centralizzata dei dati di rilevazione e l'interfacciamento con unità di risposta attiva, come *jammer* o armi a energia diretta [10].

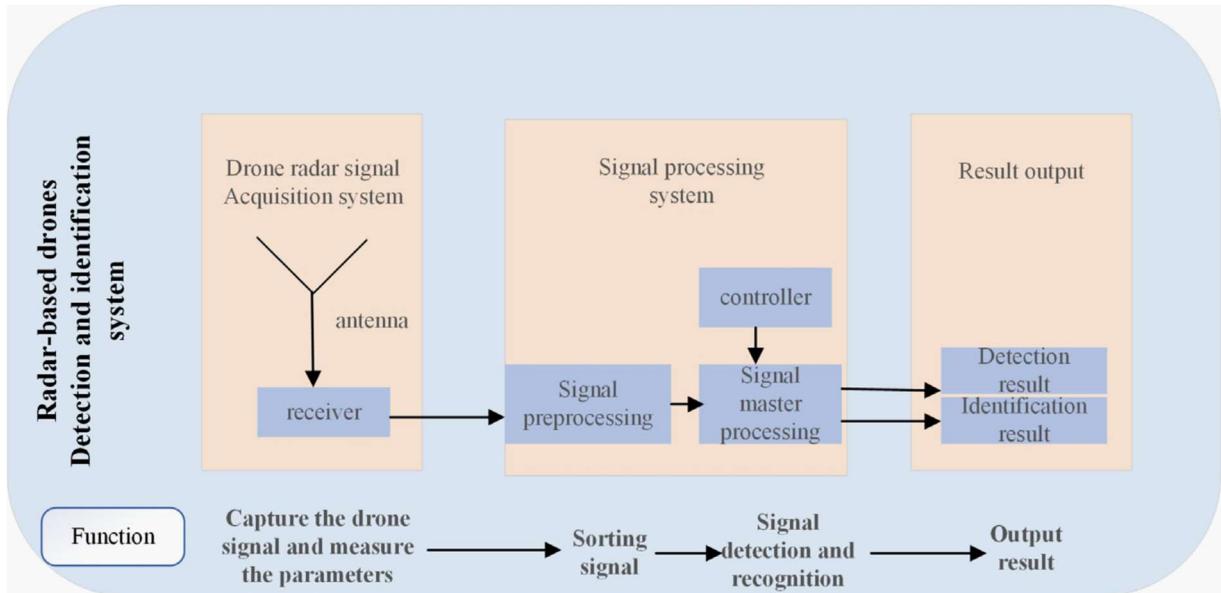


Figura 4.1: Schema funzionale di un sistema radar per la rilevazione e identificazione di droni [20].

4.2 Sistemi radar per applicazioni civili e dual-use

Lo sviluppo di radar dedicati alla rilevazione dei droni non riguarda esclusivamente l'ambito militare, ma anche una crescente varietà di applicazioni civili e a uso duale, come la sicurezza di aeroporti, centrali elettriche, infrastrutture critiche o eventi pubblici.

In questi contesti, l'obiettivo principale non è la neutralizzazione del bersaglio, bensì la rilevazione tempestiva, la classificazione e la tracciatura del drone in volo, così da consentire l'attivazione di misure di sicurezza non cinetiche o l'intervento delle autorità competenti [20], [23].

L'evoluzione delle tecnologie radar descritta nei capitoli precedenti ha permesso la realizzazione di sistemi compatti, economici e facilmente integrabili in reti multisensore. Molti di questi dispositivi operano in banda X o Ku, garantendo una buona risoluzione spaziale con consumi ridotti, mentre altri sfruttano tecniche FMCW o MIMO per migliorare la precisione angolare e la capacità di discriminazione dei bersagli [2], [15].

4.2.1 Radar commerciali per la sicurezza civile

Tra i radar C-UAS attualmente disponibili sul mercato civile, alcuni sistemi si distinguono per la loro efficacia e diffusione operativa:

- Blighter A400/A800 (*Blighter Surveillance Systems, UK*)

Utilizza tecnologia FMCW in banda Ku, con un raggio di rilevamento fino a 10 km e capacità di tracciamento simultaneo di più bersagli.

È impiegato in numerosi aeroporti europei e in aree urbane ad alta densità per la sorveglianza continua. Grazie al *beamforming* digitale, consente un monitoraggio costante a 360° anche in presenza di ostacoli o condizioni meteo avverse [24].

- Echodyne EchoGuard (USA)

Basato su architettura MIMO AESA compatta, è uno dei radar civili più avanzati per l'identificazione di micro-UAV.

Opera in banda X (10 GHz) e può rilevare piccoli droni fino a 2,5 km, fornendo informazioni su distanza, direzione e velocità. È integrabile con piattaforme software come DedroneTracker o sistemi EO/IR, costituendo una soluzione tipica di sensor fusion commerciale [25], [26].

- Robin Radar ELVIRA e IRIS (Paesi Bassi)

Sistemi *dual-use* che sfruttano radar Doppler ad alta risoluzione per distinguere droni da uccelli o altre sorgenti di disturbo. Sono utilizzati da enti di aviazione civile, basi NATO e servizi di protezione infrastrutturale. L'algoritmo di classificazione integrato si basa sull'analisi delle micro-firme Doppler, analogamente ai modelli di Fioranelli et al. [27].

4.2.2 Integrazione multi-sensore e piattaforme modulari

La tendenza più recente nei sistemi radar civili è la modularità e integrazione sensoriale. Molte piattaforme, come DedroneTracker, SkyRadar o DroneShield RfOne, combinano il radar con sensori ottici, acustici e RF per migliorare la robustezza e ridurre i falsi allarmi [25].

In questi sistemi, il radar svolge la funzione di sensore primario di rilevazione, mentre le altre componenti forniscono supporto nella fase di identificazione visiva o acustica.

Queste architetture, spesso definite *dual-use*, vengono impiegate sia in scenari civili (per la sicurezza aeroportuale o la protezione di eventi) sia in contesti di difesa leggera, fungendo da ponte tra la tecnologia commerciale e quella militare [22], [23].

Un esempio emblematico è il sistema AARTOS (*Advanced Automatic RF and Radar Tracking and Observation System*), che integra un radar FMCW con un ricevitore RF e una telecamera a lungo raggio, gestiti da un centro di comando e controllo unico. Questa combinazione consente di rilevare, identificare e localizzare il drone in meno di due secondi, con copertura fino a 15 km in condizioni ottimali [23].

Nella Figura 4.2 un esempio di architettura di sistema basata su generatori di segnali d'opportunità (FM, TV o 5G) e antenne di sorveglianza multiple.

I segnali ricevuti vengono elaborati attraverso fasi di soppressione del *clutter*, analisi Range–Doppler e tracciamento del bersaglio.

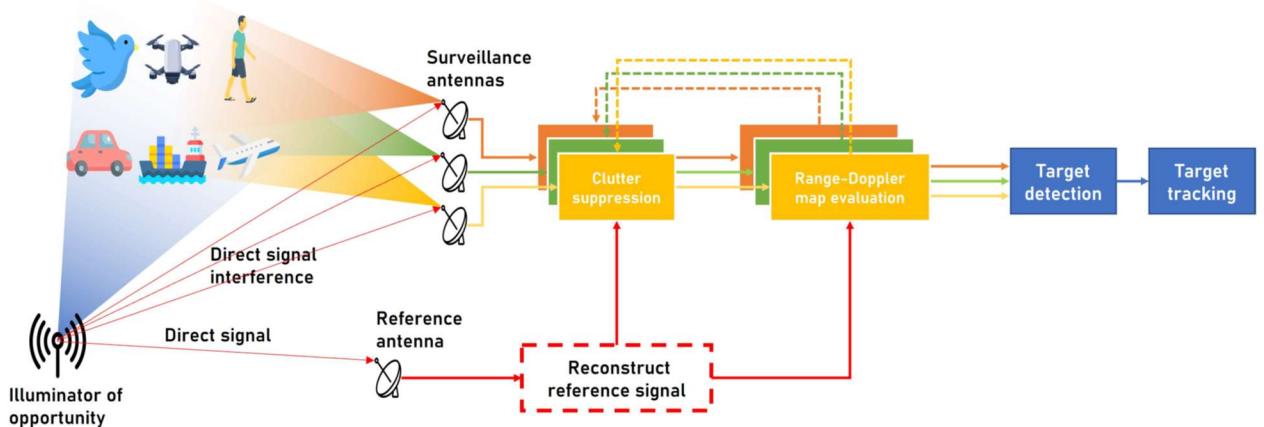


Figura 4.2: Schema funzionale di un radar passivo per applicazioni C-UAS [23].

4.2.3 Tendenze tecnologiche nel settore civile

Le innovazioni più significative nel panorama radar civile riguardano:

- la miniaturizzazione dei moduli AESA e l'adozione di antenne planari in silicio-germanio (SiGe);
- l'impiego di intelligenza artificiale a bordo sensore per la classificazione diretta in tempo reale;
- l'uso di tecniche di data fusion basate su reti Transformer, che permettono di correlare automaticamente le tracce provenienti da radar e sensori ottici [8], [10].

Secondo le analisi di Li et al. [20] e Ganganath et al. [10], la tendenza più rilevante nel breve periodo sarà l'adozione di architetture *edge computing*, che consentono ai sistemi C-UAS di operare in modo autonomo anche senza connessione costante a un centro di controllo. Ciò permetterà un monitoraggio continuo e decentralizzato, con costi ridotti e maggiore adattabilità rispetto ai sistemi esclusivamente militari.

In sintesi, i radar per applicazioni civili e *dual-use* rappresentano oggi la prima linea di difesa tecnologica contro i droni non autorizzati.

Pur avendo portate tipiche dell'ordine di qualche centinaio di metri fino a 1–2 km (valori nettamente inferiori rispetto ai sistemi radar di classe militare, che possono superare decine di chilometri) queste soluzioni garantiscono un eccellente compromesso tra costo, precisione e integrazione multisensore. Ciò le rende adatte a una diffusione capillare dei sistemi C-UAS in contesti urbani e civili, dove le distanze di intercettazione richieste sono più contenute e la priorità è una risposta rapida, poco invasiva e a basso costo.

La sezione successiva analizzerà i radar di fascia militare, nei quali le stesse tecnologie vengono potenziate e adattate per soddisfare requisiti più stringenti in termini di portata operativa, robustezza ai disturbi e autonomia di funzionamento.

4.3 Sistemi radar C-UAS per la difesa e applicazioni militari

Le tecnologie radar impiegate negli attuali sistemi Counter-UAS militari derivano in gran parte da soluzioni sviluppate per il monitoraggio civile e *dual-use*, ma adattate a esigenze operative più stringenti: portate superiori (5–20 km a seconda del modello e della sezione radar del bersaglio), robustezza elettromagnetica, resistenza al *jamming* (disturbo intenzionale) e capacità di tracciamento multi-target (fino a centinaia di tracce simultanee). Questi sistemi rappresentano la componente primaria delle difese a corto e medio raggio, integrando sensori radar, moduli ottici e apparati RF in reti distribuite capaci di rilevare, classificare e, se necessario, neutralizzare la minaccia [20], [21].

La loro architettura si basa sul paradigma *Detect - Track - Identify - Defeat*, in cui il radar costituisce il sensore principale di scoperta e localizzazione, mentre le altre componenti cooperano per affinare la classificazione del bersaglio e coordinare la risposta del sistema d'arma.

Tra i modelli oggi più rappresentativi figurano il Spexer 2000 (Hensoldt), l'Oerlikon Radshield (Rheinmetall), il RADA MHR (Multi-Mission Hemispheric Radar) e il Thales Squire, descritti di seguito.

4.3.1 Spexer 2000 (Hensoldt)

Il radar Spexer 2000 è un sistema AESA in banda X (Figura 4.3), concepito per la sorveglianza a corto-medio raggio e la protezione perimetrale.

La sua architettura digitale a fascio multiplo permette di generare simultaneamente diverse direzioni di scansione, migliorando la risoluzione angolare e riducendo i tempi di aggiornamento.

Il sensore è in grado di rilevare micro-UAV con RCS di $0,01 \text{ m}^2$ fino a circa 4 km, mantenendo la capacità di tracciare veicoli terrestri e bersagli a bassa quota [9].

Grazie all'elaborazione micro-Doppler integrata e all'impiego di algoritmi di *machine learning*, il sistema è capace di distinguere droni da uccelli e ridurre i falsi allarmi.

È attualmente impiegato nei sistemi GUARDION e Spexer Guard, utilizzati da forze NATO e autorità di sicurezza europea per la protezione di aeroporti e installazioni militari.



Figura 4.3: Radar AESA Spexer 2000 (Hensoldt). Sistema C-UAS in banda X utilizzato per la sorveglianza terrestre e aerea a corto e medio raggio, impiegato in ambito NATO [28].

4.3.2 Oerlikon Radshield (Rheinmetall)

L'Oerlikon Radshield è un radar multistatico modulare operante in banda W, sviluppato per la sorveglianza di grandi aree e la difesa a corto raggio. Il sistema combina diversi moduli radar collegati in rete, offrendo una copertura a 360° e una precisione di localizzazione sub-metrica. Può monitorare simultaneamente oltre 250 bersagli, integrando le informazioni tramite un centro di data fusion che coordina i sensori in tempo reale [29].

La struttura in banda millimetrica consente un'elevata risoluzione e un riconoscimento efficace di micro-UAV in ambienti complessi o fortemente disturbati. È installato come componente del sistema di difesa aerea Skyguard 3 C-UAS, dove lavora in sinergia con radar a più lungo raggio e moduli ottici IR.

In Figura 4.4 Sistema Oerlikon Radshield (Rheinmetall). Vista del sistema C-UAS modulare in configurazione Skyguard 3, composto da radar di sorveglianza in banda W e moduli d'intercettazione automatizzati per la difesa a corto raggio.



Figura 4.4: Sistema Oerlikon Radshield (Rheinmetall) [29].

4.3.3 RADA MHR e Thales Squire

Il radar MHR (*Multi-Mission Hemispheric Radar*) prodotto da *RADA Electronic Industries* è progettato per la difesa mobile e per applicazioni *vehicle-mounted*. Opera in banda S, offre una copertura emisferica di 360° e rileva droni fino a 10 km, con possibilità di tracciamento di più bersagli in volo. La configurazione MIMO e il beamforming digitale assicurano stabilità anche in presenza di clutter o interferenze elettromagnetiche [30].

Il Thales Squire, invece, è un radar FMCW portatile in banda X, concepito per missioni di ricognizione tattica e protezione di convogli o basi temporanee. Può essere trasportato da un singolo operatore e rileva piccoli UAV fino a 2 km di distanza, fornendo informazioni di distanza e velocità con un'elevata precisione angolare. Entrambi i sistemi rappresentano la transizione verso radar compatti e modulari, adatti a operare in scenari mobili o urbani, dove la rapidità di dispiegamento è essenziale [31].

4.3.4 Tendenze e prospettive operative

L'analisi dei sistemi militari mostra una convergenza verso architetture cognitive e cooperative, in grado di condividere informazioni tra più unità radar e di adattare i parametri di trasmissione in funzione dello scenario operativo.

La direzione più promettente è quella delle cognitive MIMO networks, in cui ogni sensore elabora localmente i dati e li invia al centro di comando solo dopo la classificazione preliminare. Questa filosofia, già sperimentata da Feng et al. [8] e Zhang et al. [16], consente di ridurre il traffico dati, migliorare la resilienza ai disturbi e aumentare la velocità di risposta.

Parallelamente, i radar di nuova generazione integrano modelli di intelligenza artificiale a bordo con sensori preposti al riconoscimento di pattern di movimento sospetti e prevedere le manovre dei droni ostili. Tali innovazioni rappresentano il passo finale verso sistemi C-UAS completamente autonomi e interconnessi, in grado di operare come nodi intelligenti di una rete difensiva distribuita.

4.4 Confronto e tendenze dei sistemi radar C-UAS

Dall’analisi dei sistemi radar trattati nei paragrafi precedenti emerge con chiarezza come il settore della rilevazione e classificazione dei droni si trovi oggi in una fase di piena maturazione tecnologica, ma anche di profonda trasformazione.

Le soluzioni esistenti si dividono in due grandi categorie: i sistemi civili e *dual-use*, destinati alla protezione di infrastrutture e spazi pubblici, e i sistemi militari, progettati per operare in scenari tattici complessi e per integrarsi in reti di difesa più ampie.

Pur basandosi sugli stessi principi fisici, queste due famiglie si distinguono per filosofia costruttiva, potenza di trasmissione, grado di cooperazione tra sensori e livello di automazione [20], [23].

Nei contesti civili, la priorità è garantire una rilevazione rapida e precisa, con dispositivi compatti e a basso consumo. I radar descritti da Li et al. [20] e D’Amico et al. [23] (spesso basati su architetture FMCW o MIMO in banda X/Ku) raggiungono portate di pochi chilometri, ma offrono una buona risoluzione e una notevole affidabilità, soprattutto quando integrati in sistemi di sensor fusion che uniscono radar, sensori ottici e moduli RF.

La combinazione dei dati consente di ridurre drasticamente i necessari e di migliorare la capacità di classificazione dei micro-UAV anche in ambienti urbani o affollati.

Nel campo militare, i radar analizzati da Wellig et al. [9] e dal rapporto CRS [21] si distinguono per una portata superiore, per l’impiego di array AESA multibeam e per la resistenza alle interferenze elettromagnetiche.

Questi sistemi (come le piattaforme descritte nei programmi europei e statunitensi di difesa anti-drone) sono in grado di tracciare simultaneamente decine di bersagli, distinguendo in tempo reale le traiettorie sospette grazie all’elaborazione micro-Doppler e all’integrazione con reti di comando e controllo (C2).

Rispetto ai radar civili, la maggiore potenza di trasmissione e la sofisticata gestione del fascio elettronico consentono prestazioni superiori in termini di portata e accuratezza, ma a fronte di costi e complessità significativamente più elevati.

4.4.1 Confronto finale

Il confronto tra radar civili e militari evidenzia alcune differenze fondamentali:

- **Banda operativa:** i sistemi civili utilizzano prevalentemente le bande X e Ku per ridurre dimensioni e consumo, mentre quelli militari impiegano anche le bande S e W per aumentare la risoluzione angolare e la capacità di tracciamento.
- **Architettura:** i radar civili si basano su strutture FMCW o phased array semplificate; i modelli militari adottano configurazioni MIMO/AESA cognitive con elaborazione distribuita.
- **Prestazioni:** la portata tipica varia da 2 a 10 km nei sistemi civili, fino a oltre 20 km nei modelli militari; la sensibilità è più elevata grazie a un miglior rapporto SNR e a filtri avanzati.

- **Integrazione:** entrambi tendono a operare in logiche multisensore, ma nei sistemi di difesa il coordinamento avviene tramite reti C2 centralizzate e protocolli di comunicazione dedicati.
- **Costo e modularità:** i radar civili risultano meno costosi e più flessibili, ma offrono prestazioni inferiori in termini di resistenza al jamming e continuità operativa.

Queste differenze rispecchiano la diversa finalità dei due settori: affidabilità e scalabilità per il civile, robustezza e prontezza operativa per il militare.

4.4.2 Tendenze evolutive

Gli studi più recenti mostrano una progressiva convergenza tra le due categorie. Da un lato, i radar civili stanno adottando soluzioni tipiche dell'ambito militare (come l'elaborazione cognitiva del segnale e la capacità di apprendere dallo scenario operativo) mentre i sistemi di difesa cercano di ridurre ingombri e consumi per ottenere maggiore mobilità e rapidità di dispiegamento.

La direzione più promettente è rappresentata dai radar cognitivi e cooperativi, capaci di modificare autonomamente i parametri di trasmissione in base all'ambiente e di condividere informazioni con altri sensori attraverso reti distribuite.

Come evidenziato da Feng et al. [8] e Zhang et al. [16], l'introduzione di algoritmi di reinforcement learning e di deep learning a bordo del sensore consente di ottimizzare dinamicamente la forma d'onda e migliorare la classificazione dei bersagli anche in presenza di disturbi complessi.

Parallelamente, l'integrazione con tecniche di *sensor fusion* e *edge computing* sta portando alla nascita di piattaforme autonome e scalabili, capaci di elaborare i dati localmente e di trasmettere al centro di controllo solo le informazioni essenziali.

La tendenza, già anticipata da D'Amico et al. [23] e Ganganath et al. [10], punta verso sistemi C-UAS distribuiti, resilienti e basati sulla cooperazione tra nodi intelligenti.

4.4.3 Conclusioni

L'evoluzione dei radar C-UAS mostra una chiara convergenza tecnologica tra il mondo civile e quello militare.

I primi stanno acquisendo funzioni di intelligenza e autonomia un tempo riservate ai sistemi di difesa, mentre i secondi stanno incorporando criteri di modularità, efficienza energetica e interoperabilità tipici dei dispositivi commerciali. Questa ibridazione tecnologica rappresenta il passo decisivo verso i futuri radar cognitivi cooperativi, nodi centrali di reti di sorveglianza capaci non solo di rilevare, ma di comprendere e anticipare il comportamento di un drone.

La direzione delineata da Li (2025) e Wellig (2018) conferma che il radar del futuro sarà un sensore adattivo, connesso e intelligente, integrato in un ecosistema di difesa multi-dominio e al tempo stesso applicabile anche a contesti civili di sicurezza avanzata.

5. INTELLIGENZA ARTIFICIALE E TECNICHE DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO NEI SISTEMI RADAR C-UAS

Lo sviluppo dell’Intelligenza Artificiale (IA) ha rivoluzionato anche il campo della radaristica, portando a un profondo cambiamento nei metodi di elaborazione, classificazione e interpretazione dei segnali.

Nei sistemi di *Counter-UAS* (C-UAS), l’integrazione dell’IA consente di migliorare in modo significativo la capacità di rilevare e riconoscere droni di piccole dimensioni, riducendo al tempo stesso i falsi allarmi dovuti a volatili, disturbi ambientali o condizioni atmosferiche variabili.

Come evidenziato da Li et al. [20] e D’Amico et al. [23], la crescente complessità dello scenario operativo (caratterizzato da una molteplicità di sorgenti di eco radar e da un continuo aumento dei droni commerciali) ha reso indispensabile l’adozione di algoritmi in grado di estrarre automaticamente le caratteristiche discriminanti dal segnale radar grezzo, superando i limiti dei metodi tradizionali basati su soglie o correlazioni.

5.1 L’evoluzione dall’elaborazione classica ai metodi di apprendimento automatico

La radaristica tradizionale si è sempre basata su un’elaborazione deterministica del segnale, fondata su modelli matematici e filtri lineari in grado di stimare distanza, velocità e potenza riflessa del bersaglio. Questi approcci, pur essendo estremamente efficaci per oggetti di grandi dimensioni o traiettorie regolari, mostrano limiti evidenti quando vengono applicati a micro-UAV, caratterizzati da *Radar Cross Section* (RCS) ridotta, manovre irregolari e riflessioni altamente variabili nel tempo.

I metodi tradizionali si basano su soglie e modelli deterministicamente pensati per bersagli più grandi e stabili. Quando si lavora con micro-UAV, questi approcci mostrano limiti evidenti. Da qui l’interesse crescente verso tecniche di machine learning, che permettono di estrarre automaticamente le caratteristiche più utili dai dati radar. Invece di costruire un modello fisico esplicito del fenomeno, si addestra un algoritmo a riconoscere autonomamente i pattern significativi nei dati radar.

Questo metodo non è in grado di cogliere le sottili differenze che distinguono un drone da un disturbo ambientale o da un volatile in movimento. Come sottolineato da Li et al. [20], la complessità crescente degli scenari operativi e la varietà di piattaforme UAV hanno reso necessario un salto di paradigma: dall’elaborazione basata su regole alla modellazione basata sui dati.

Gli algoritmi supervisionati come *Support Vector Machine* (SVM), Random Forest o k-Nearest Neighbors (k-NN) hanno mostrato prestazioni molto superiori nel riconoscere le firme radar di piccoli UAV, soprattutto in presenza di clutter o rumore termico [23].

Parallelamente, lo sviluppo di hardware di calcolo dedicato (*Graphics Processing unit* (GPU) e *Field-Programmable Gate Array* (FPGA)) ha reso possibile l’impiego di reti neurali artificiali direttamente in fase di elaborazione radar.

Queste reti apprendono le caratteristiche rilevanti del segnale durante la fase di addestramento e riescono poi a generalizzare a situazioni nuove, adattandosi a contesti diversi senza necessità di riprogrammazione. Come mostrato da Fioranelli et al. [15], un classificatore neurale ben addestrato può distinguere con successo i droni da altre sorgenti di eco radar anche in condizioni ambientali complesse, migliorando sensibilmente il rapporto tra veri positivi e falsi allarmi.

Questa transizione dall'elaborazione classica al *machine learning* segna l'inizio di una nuova fase della radaristica: un sistema non più "programmato per riconoscere", ma addestrato a imparare dal comportamento reale dei segnali riflessi. Da qui nasce il concetto di radar intelligente, capace di evolvere nel tempo attraverso i propri dati operativi.

5.2 Analisi micro-Doppler e classificazione basata su Deep Learning

Una delle applicazioni più rilevanti dell'intelligenza artificiale nella radaristica moderna è l'analisi delle firme micro-Doppler, segnali secondari generati dai movimenti meccanici del bersaglio, come la rotazione delle eliche di un drone.

Queste modulazioni, sovrapposte al Doppler principale dovuto al moto traslatorio, forniscono informazioni uniche sulla struttura e sulla dinamica dell'oggetto osservato [20].

I lavori di Fioranelli et al. [15] e Mahmoud et al. [14] hanno dimostrato come l'analisi tempo-frequenza delle firme micro-Doppler consenta di distinguere un UAV da un uccello, da un elicottero o da un disturbo meteorologico.

L'approccio tradizionale, basato su trasformate di Fourier a breve termine (STFT) o su rappresentazioni di tipo spettrogramma, è stato oggi superato dall'impiego di reti neurali convoluzionali (CNN) che trattano la mappa Range–Doppler come una vera e propria immagine bidimensionale.

Nel modello proposto da Fioranelli et al. [15], le firme micro-Doppler vengono estratte da sequenze radar reali e sintetiche e convertite in spettri tempo-frequenza che alimentano una rete CNN a più strati.

Il sistema apprende automaticamente le caratteristiche rilevanti (periodicità, armoniche delle eliche, ampiezza e distribuzione di energia) senza necessità di progettare manualmente le feature.

L'accuratezza di classificazione raggiunge valori superiori al 95 % nella distinzione fra UAV e altri bersagli, con una drastica riduzione dei falsi allarmi.

Mahmoud et al. [14] hanno poi esteso l'approccio utilizzando un *dataset* più ampio di micro-Doppler generati da droni commerciali di diversa tipologia.

Il modello di rete, addestrato con strategie di *data augmentation*, mantiene prestazioni elevate anche in presenza di rumore, dimostrando la robustezza del *deep learning* nel trattamento dei segnali radar reali.

Li et al. [20] sottolineano inoltre che tali tecniche possono essere implementate in tempo reale grazie all'uso di GPU dedicate o moduli FPGA integrati a bordo radar, aprendo la strada a sistemi *on-board intelligent radar* capaci di elaborare autonomamente i dati ricevuti.

L'analisi micro-Doppler rappresenta quindi il punto di incontro fra radaristica e intelligenza artificiale: da un lato offre un set di dati altamente informativi, dall'altro sfrutta la capacità delle reti profonde di riconoscere pattern complessi.

Questa sinergia costituisce oggi la base della classificazione automatica dei droni.

Il flusso generale delle operazioni di estrazione delle firme micro-Doppler e della successiva classificazione automatica tramite reti neurali convoluzionali è sintetizzato in Figura 5.1, che illustra le principali fasi dell'elaborazione radar in un sistema C-UAS intelligente.

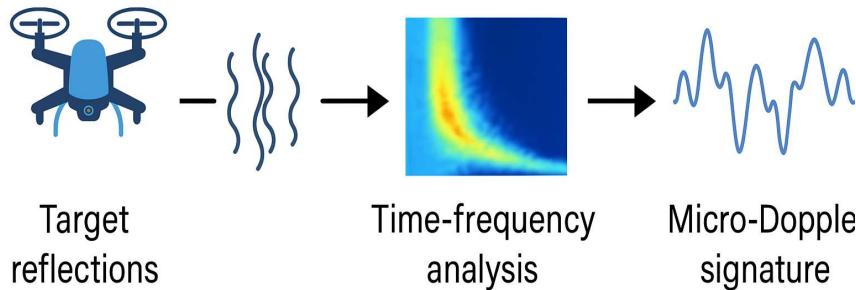


Figura 5.1: Flusso di elaborazione dati radar basato su rete neurale convoluzionale [15],[20].

5.3 Reti neurali e modelli di Neural Deep Learning

L'introduzione del *Deep Learning* nella radaristica ha segnato una svolta profonda nel modo di interpretare i segnali elettromagneticici.

A differenza degli approcci tradizionali, in cui l'ingegnere definisce manualmente le caratteristiche da estrarre, le reti *Neural Deep Learning* apprendono in modo autonomo le rappresentazioni ottimali direttamente dai dati radar grezzi.

Questa capacità è particolarmente utile nei sistemi Counter-UAV, dove la variabilità delle firme radar e le condizioni ambientali rendono impossibile definire regole fisse di classificazione [20], [23].

Il funzionamento di una rete di *Neural Deep Learning* si basa su una serie di strati interconnessi che trasformano progressivamente il segnale in informazioni sempre più astratte: dalle riflessioni radar di base, ai pattern Doppler, fino all'identificazione della classe del bersaglio. Nei lavori di Fioranelli et al. [14] e Li et al. [20], i dati radar vengono rappresentati come mappe bidimensionali Range–Doppler o immagini tempo–frequenza, trattate come veri e propri input visivi. In questo modo il radar “vede” il bersaglio, e la rete neurale agisce come un classificatore visivo capace di riconoscere automaticamente le differenze tra un UAV e un'altra sorgente di eco.

L'architettura più diffusa per questi compiti è la rete neurale convoluzionale (CNN), che eccelle nell'analisi di immagini e pattern spaziali.

Accanto a essa si sono affermate anche le reti ricorrenti (RNN) e, più recentemente, le architetture *Transformer*, nate in ambito linguistico ma oggi adattate all'elaborazione radar multimodale.

5.3.1 Reti neurali convoluzionali (CNN) per mappe Range–Doppler

Le CNN rappresentano l'architettura più efficace per la classificazione dei bersagli radar basata su mappe bidimensionali.

Il principio è semplice: ciascun *layer* convoluzionale estrae automaticamente dai dati radar le caratteristiche spaziali e frequenziali più rilevanti, analogamente a quanto avviene nel riconoscimento di immagini ottiche.

Nel lavoro di Fioranelli et al. [14], la CNN è stata applicata alle mappe Range–Doppler ottenute da un radar in banda X per distinguere droni dagli uccelli.

Le mappe, normalizzate in intensità e ridotte a dimensioni 256×256 pixel, sono state utilizzate come input di una rete a cinque strati convoluzionali.

Dopo una fase di addestramento su un dataset misto reale e sintetico, il sistema ha raggiunto una precisione superiore al 95% nella classificazione.

Un approccio simile è stato descritto da D’Amico et al. [23] in un contesto di radar passivo: in questo caso le CNN sono state impiegate per identificare i droni utilizzando segnali d’opportunità FM o DVB-T.

La rete è stata addestrata a riconoscere differenze di pattern energetico tra eco dirette, riflettenti e diffuse, dimostrando che anche radar a bassa potenza possono beneficiare delle tecniche di apprendimento profondo.

Li et al. [20] sottolineano che l’uso delle CNN consente non solo di migliorare la classificazione, ma anche di ottimizzare il tempo di elaborazione, poiché l’estrazione automatica dei features riduce la necessità di *pre-processing* complesso. Questo aspetto è particolarmente importante nei sistemi on-board C-UAS, in cui la velocità di risposta è un parametro critico.

5.3.2 Reti ricorrenti e Transformer per dati sequenziali e multimodali

Le Reti Neurali Ricorrenti (RNN) sono progettate per elaborare dati che evolvono nel tempo, come sequenze Doppler o traiettorie radar.

A differenza delle CNN, che operano su strutture statiche, le RNN memorizzano lo stato temporale del segnale, permettendo di catturare le variazioni dinamiche.

Le loro varianti più avanzate, come le *Long Short-Term Memory* (LSTM), riescono a modellare fenomeni periodici e irregolari come i cambi di rotazione delle eliche o le variazioni di quota di un drone [15].

Tuttavia, le RNN presentano limiti nella gestione di segnali complessi e multi-sorgente. Per superare tali restrizioni, la ricerca recente ha introdotto i *Transformer Encoder*, architetture originariamente sviluppate per l’elaborazione del linguaggio naturale e oggi adattate ai dati radar multimodali.

Come dimostrato da Ganganath et al. [10], i Transformer integrano informazioni provenienti da radar, sensori acustici e ottici, sfruttando meccanismi di attenzione (*attention layers*) per pesare dinamicamente l’importanza di ciascun canale sensoriale.

In questo modo, il sistema di rilevazione può operare anche in condizioni di dati parziali o degradati, decidendo in tempo reale quale fonte di informazione privilegiare. Li et al. [20] e D’Amico et al. [23] confermano che tale approccio rappresenta una delle direzioni più promettenti per la creazione di piattaforme radar intelligenti, capaci di integrare e correlare automaticamente dati di natura eterogenea.

5.4 Apprendimento per rinforzo e radar cognitivi

L’evoluzione naturale dei sistemi radar basati su intelligenza artificiale conduce al concetto di radar cognitivo, ovvero un sistema in grado non solo di elaborare e classificare i segnali, ma anche di modificare autonomamente il proprio comportamento operativo in risposta

all’ambiente.

A differenza dei radar convenzionali, che applicano configurazioni fisse di trasmissione e ricezione, un radar cognitivo impara dall’esperienza e adatta dinamicamente i parametri di funzionamento (forma d’onda, frequenza, potenza e direzione del fascio) per massimizzare l’efficacia della rilevazione.

Secondo la definizione introdotta da Feng et al. [8], un radar cognitivo può essere interpretato come un ciclo chiuso di percezione, apprendimento e azione:

1. Percezione: il radar osserva l’ambiente e raccoglie dati sul segnale di ritorno;
2. Apprendimento: un modello neurale o un agente di *reinforcement learning* analizza i dati e valuta le prestazioni ottenute;
3. Azione: il sistema modifica i parametri operativi per migliorare la qualità della misura nelle scansioni successive.

Questo paradigma, ispirato ai meccanismi dell’intelligenza biologica, consente di affrontare scenari complessi in cui i bersagli presentano bassa RCS, manovre irregolari o interferenze multiple, come avviene nel caso dei piccoli UAV.

Nei paragrafi successivi vengono illustrate due tra le implementazioni più promettenti di questo approccio: l’ottimizzazione cognitiva nei radar MIMO e le strategie multi-target basate su apprendimento per rinforzo profondo (*Deep Q-Learning*).

5.4.1 Ottimizzazione cognitiva dei radar MIMO

Uno dei campi di applicazione più interessanti dell’apprendimento per rinforzo riguarda i radar MIMO.

In questi sistemi, il segnale trasmesso da ciascuna antenna può essere modulato in modo indipendente, generando una vasta combinazione di configurazioni possibili. Trovare quella ottimale (capace di garantire la massima separazione tra bersagli e il miglior rapporto segnale/rumore “SNR”) rappresenta un problema di ottimizzazione non lineare che ben si presta a essere risolto mediante *Reinforcement Learning* (RL) [8].

Nel modello proposto da Feng et al. [8], l’agente cognitivo osserva lo scenario radar e, in base al segnale di ritorno ricevuto, assegna una ricompensa (*reward*) proporzionale alla qualità della rilevazione.

Attraverso un processo iterativo di esplorazione e sfruttamento (*exploration-exploitation*), il radar apprende quali forme d’onda o configurazioni di fase massimizzano il *reward* medio, adattando progressivamente la propria strategia di trasmissione.

I risultati sperimentali mostrano che l’adozione di un algoritmo *Deep Q-Network* (DQN) consente un incremento dell’SNR medio del 15–20% rispetto ai radar MIMO statici, migliorando anche la capacità di tracciamento di bersagli multipli in scenari dinamici. Inoltre, grazie alla natura distribuita dei moduli MIMO, tale ottimizzazione può essere implementata localmente in ciascun nodo, senza la necessità di un controllo centralizzato, riducendo la latenza del sistema complessivo.

5.4.2 Strategie di decisione multi-target basate su Deep Q-Learning

Quando più UAV sono presenti simultaneamente, il radar deve affrontare un ulteriore problema: decidere in tempo reale quale bersaglio seguire e quale configurazione adottare per ognuno di essi.

Questo tipo di scenario richiede un sistema in grado di apprendere strategie di priorità e di allocazione delle risorse, mantenendo prestazioni stabili anche in presenza di disturbi o manovre evasive.

Zhang et al. [16] hanno proposto un'architettura di radar cognitivo multi-target basata su *Deep Q-Learning*, nella quale più agenti cooperano condividendo le informazioni di *reward* e aggiornando congiuntamente la politica di decisione.

Ogni agente radar valuta l'ambiente locale, predice la traiettoria dei droni circostanti e adatta i propri parametri di trasmissione, mentre un supervisore centrale sincronizza le decisioni di rete.

Questa architettura consente di ottenere un tracciamento più stabile, riducendo del 30% gli errori di localizzazione rispetto a sistemi non cognitivi [16].

Inoltre, la capacità del radar di apprendere dal contesto consente di gestire dinamicamente situazioni di interferenza reciproca tra nodi, migliorando la cooperazione *inter-radar* e la resilienza dell'intero sistema.

6. SFIDE INGEGNERISTICHE E PROSPETTIVE DI SVILUPPI

Lo sviluppo dei sistemi radar C-UAS ha compiuto passi significativi negli ultimi anni, grazie all’evoluzione delle architetture hardware, alle tecniche di elaborazione dei segnali e all’adozione crescente dell’intelligenza artificiale.

Tuttavia, le prestazioni ottenute nei contesti sperimentali o controllati non sempre si traducono in risultati altrettanto affidabili quando questi sistemi vengono impiegati in scenari operativi reali, che presentano complessità difficilmente riproducibili in laboratorio.

Studi, come quelli di Li et al. (2025) [20] e D’Amico et al. (2025) [23], mostrano che l’implementazione effettiva delle tecnologie analizzate nei capitoli precedenti richiede di affrontare sfide che riguardano non solo il radar in sé, ma l’intero ecosistema tecnologico entro cui il radar si trova ad operare: ambiente elettromagnetico congestionato, reti di comunicazione eterogenee, sincronizzazione tra sensori distribuiti, sicurezza dei dati, limiti energetici e vincoli di latenza nella *sensor fusion*.

Il presente capitolo analizza tali criticità adottando un taglio ingegneristico e sistematico, senza ripercorrere aspetti già discussi ma mettendo in luce i veri fattori limitanti per la piena maturazione dei sistemi C-UAS.

6.1 Criticità tecniche e operative

L’analisi condotta nel capitolo precedente mostra come i moderni sistemi radar per applicazioni C-UAS abbiano raggiunto livelli prestazionali molto elevati in condizioni controllate. Tuttavia, quando tali soluzioni vengono impiegate in scenari reali, emergono una serie di criticità che non dipendono dal principio di funzionamento del radar, ma dal contesto operativo in cui esso si trova ad agire.

I principali ostacoli non riguardano soltanto la rilevazione del singolo bersaglio, ma l’interazione complessiva tra ambiente elettromagnetico, infrastruttura di comunicazione, limiti energetici e requisiti di sincronizzazione dei sistemi distribuiti. La letteratura recente mette in evidenza come i radar C-UAS moderni debbano adattarsi a scenari estremamente variabili, caratterizzati da interferenze non prevedibili, da reti di sensori eterogenee e da piattaforme operative spesso soggette a vincoli energetici o strutturali.

Per questo motivo, la progettazione di un sistema C-UAS efficace richiede un approccio sistematico, in cui la prestazione del singolo sensore va interpretata alla luce di vincoli esterni che possono comprometterne o potenziarne l’efficacia. Nei paragrafi seguenti vengono analizzate le criticità più rilevanti, supportate dai risultati sperimentali e dalle osservazioni riportate nella letteratura caricata, con particolare attenzione agli studi più recenti che evidenziano le limitazioni operative dei sistemi radar di nuova generazione.

6.1.1 Interferenze e variabilità dello scenario elettromagnetico

Le infrastrutture wireless moderne (in particolare 5G e reti a microcelle) hanno reso il dominio spettrale estremamente dinamico.

Li et al. (2025) [20] riportano che, in scenari urbani reali, il livello di interferenza può oscillare di oltre 20 dB in intervalli molto brevi, rendendo imprevedibile il rapporto segnale/rumore.

Questa non-stazionarietà pone problemi ai metodi tradizionali basati su soglie e filtri statici, che diventano rapidamente inefficienti.

Di conseguenza, la capacità del radar C-UAS di operare in tali contesti dipende dalla presenza di modelli di stima predittiva e di tecniche di adattamento spettrale in tempo reale, oggi ancora oggetto di ricerca.

6.1.2 Coerenza nei sistemi MIMO e architetture multistatiche

Nei capitoli precedenti è stato mostrato il potenziale dei sistemi MIMO per migliorare la risoluzione angolare.

Nella pratica, però, la loro efficacia è fortemente dipendente dalla sincronizzazione di fase e tempo tra i diversi moduli.

Gli studi di Zhang et al. (2024) [16] evidenziano come uno sfasamento anche minimo, dell'ordine di decimi di grado, possa deteriorare la stima della direzione di arrivo, compromettendo il processo di tracciamento.

Nei sistemi multistatici distribuiti, la coerenza è ulteriormente complicata da:

- variazioni termiche locali,
- micro-vibrazioni strutturali,
- oscillatori non perfettamente allineati,
- ritardi introdotti dalle reti di comunicazione tra nodi.

Il risultato è che la calibrazione continua diventa un requisito strutturale, non un semplice accorgimento tecnico.

6.1.3 Limiti energetici e problemi termici nelle piattaforme compatte

L'impiego di radar C-UAS su piattaforme mobili, o in contesti dove l'alimentazione è limitata, introduce un vincolo che non può essere trascurato: la gestione energetica e termica. Li et al. (2025) [20] mostrano come, anche adottando dispositivi in Nitruro di Gallio (GaN) e Silicio-Germanio (SiGe), le potenze richieste da array attivi (AESA) o da elaborazioni complesse possano mettere sotto stress la piattaforma ospite.

Le architetture basate su algoritmi di *deep learning*, fondamentali per la classificazione automatica, possono incrementare significativamente il consumo energetico, rendendo difficile il funzionamento continuo del sistema senza abbassare le prestazioni o ridurre la finestra operativa.

6.1.4 Sicurezza informatica e integrità dei dati

Il report del *Congressional Research Service* (2025) [21] richiama l'attenzione su un punto spesso sottovalutato:

“Nei sistemi C-UAS moderni, il radar non è più un sensore isolato ma un nodo collegato a una rete di comando e controllo.”

Questo introduce vulnerabilità di tipo informatico.

Negli scenari analizzati nel report, attacchi alla rete C2 (non necessariamente al radar stesso) hanno prodotto:

- falsi bersagli,
- instabilità nella correlazione delle tracce,
- perdita temporanea dei dati di *tracking*.

La protezione del radar passa quindi anche attraverso:

- autenticazione crittografica,
- controllo dell'integrità dei pacchetti,
- modelli IA di rilevamento anomalie.

6.1.5 Sensor fusion e problemi di latenza

L'integrazione di radar con sensori ottici, acustici e RF offre un notevole potenziale, ma comporta una sfida fondamentale: la latenza eterogenea dei diversi flussi dati. Ganganath et al. (2025) [10] mostrano come le architetture basate su *Transformer Encoder* permettano di dare priorità dinamica alle informazioni più affidabili, compensando ritardi e variazioni di qualità tra sensori diversi.

Rimane tuttavia il problema della sincronizzazione, che richiede:

- *hardware* più potente,
- protocolli di comunicazione dedicati,
- *time-stamping* accurato a livello di microsecondo.

6.2 Tendenze evolutive e innovazione tecnologica

L'analisi dei lavori più recenti mostra una chiara convergenza verso sistemi radar sempre più intelligenti, cooperativi e capaci di adattarsi in tempo reale alle condizioni operative. A differenza delle soluzioni descritte nei capitoli precedenti, in cui il focus era sulle architetture o sugli algoritmi di classificazione, le tendenze attuali riguardano la struttura stessa dei sistemi C-UAS, che stanno evolvendo in senso distribuito, cognitivo e modulare.

Una prima direzione riguarda la realizzazione di reti radar cooperative. Nel rapporto del *Congressional Research Service* (2025) [21] viene evidenziato come la difesa moderna faccia sempre più affidamento su sensori collegati tra loro tramite protocolli a bassa latenza: non più "radar isolati", ma veri e propri nodi di una rete dinamica. In questo tipo di architetture, la copertura non dipende dal singolo dispositivo, ma dall'interazione tra sensori che condividono tracce, livelli di incertezza e priorità operative.

Un secondo filone di sviluppo riguarda i radar cognitivi, già introdotti nel Capitolo 5, ma qui considerati dal punto di vista dell'innovazione sistematica.

Nel lavoro di Feng et al. (2024) [8], ad esempio, il radar non si limita a processare il dato ricevuto, ma seleziona attivamente le impostazioni di trasmissione in funzione dell'ambiente. Questo approccio, basato su politiche di apprendimento per rinforzo, consente una gestione più razionale delle risorse energetiche e un miglioramento progressivo delle prestazioni su target manovranti a bassa quota.

Un ruolo altrettanto importante lo riveste *l'elaborazione edge*, descritta da D'Amico et al. (2025) [23] nei sistemi radar passivi. Gli autori mostrano come una parte del processamento possa essere spostata direttamente sul sensore, riducendo la quantità di dati da inviare al centro di controllo e migliorando la resilienza in condizioni di rete limitata.

Questa strategia permette anche l'integrazione più efficace di modelli di *machine learning*, mantenendo bassa la latenza e senza dipendere costantemente da infrastrutture *cloud*.

Sul fronte dell'integrazione multisensore, Ganganath et al. (2025) [10] introducono l'uso dei modelli Transformer nella *sensor fusion* radar-acustica-ottica. A differenza dei metodi tradizionali, il Transformer assegna un peso dinamico a ciascun sensore in base alla qualità istantanea dell'informazione, garantendo una classificazione più robusta in scenari in cui uno o più sensori risultano degradati. Si tratta di un passo avanti importante in direzione di piattaforme “*situationalmente aware*”, capaci di adattarsi anche a condizioni operative degradate.

Un ulteriore vettore di innovazione riguarda i materiali e i componenti elettronici.

Nel lavoro di Li et al. (2025) [20] è evidenziato come l'adozione di semiconduttori GaN e SiGe consenta l'ampliamento delle bande operative verso le frequenze millimetriche, con benefici in termini di risoluzione e miniaturizzazione, anche se permangono sfide aperte legate alla dissipazione termica e alla gestione del consumo.

Infine, le tendenze più avanzate puntano verso l'integrazione tra radar e sistemi di comunicazione di nuova generazione, in particolare le infrastrutture 6G e l'Internet of *Battlefield Things* (IoBT).

Come osservato nel report *Congressional Research Service* [21], la convergenza tra *sensing* e comunicazione consentirà di utilizzare la stessa rete per scambiare segnali radar, informazioni tattiche e comandi, riducendo la necessità di infrastrutture dedicate. Questa fusione tra funzioni, un tempo nettamente distinte, rappresenta uno dei cambiamenti più profondi in corso nel settore.

Nel loro insieme, queste tendenze delineano una traiettoria chiara: i radar del futuro saranno sensori interconnessi, auto-adattativi e distribuiti, progettati per operare non più come dispositivi isolati, ma come parti di un ecosistema dinamico che integra algoritmi, *hardware* e comunicazioni.

6.3 Visione sistemica e direzioni future

L'evoluzione dei sistemi C-UAS non può essere analizzata solo attraverso i singoli elementi tecnologici – che siano radar FMCW, architetture MIMO, modelli di *deep learning* o radar cognitivi. Ciò che emerge chiaramente dagli studi più recenti è che la prossima generazione di sensori dovrà essere progettata come un insieme coerente, dove *hardware*, algoritmi, rete e sicurezza convergono in un'unica architettura funzionale.

Una visione di questo tipo è già delineata nel rapporto del *Congressional Research Service* (2025) [21], che sottolinea come la difesa moderna richieda reti distribuite di sensori in grado di operare in modo cooperativo, integrando informazioni provenienti da radar attivi, sistemi passivi, dati ottici e acustici. In questo contesto, il radar non è più un dispositivo autonomo: diventa un nodo di una rete più ampia, responsabile di condividere dati, adattare il proprio comportamento e reagire agli stimoli ambientali in tempo quasi reale.

Questa transizione introduce, però, alcuni elementi critici. Il primo riguarda la scalabilità. L'aggiunta di nuovi nodi a una rete radar distribuita richiede protocolli di sincronizzazione stabili e resistenti alle perturbazioni. Gli sfasamenti che Zhang et al. [34] evidenziano nei

sistemi MIMO [16] diventano ancora più difficili da compensare quando i sensori non si trovano sullo stesso supporto fisico, ma sono distribuiti in un'area più ampia e collegati tramite reti a latenza non costante.

Il secondo elemento riguarda l'autonomia cognitiva. I radar descritti da Feng et al. [8] rappresentano un punto di partenza molto interessante: sistemi capaci di analizzare il contesto, apprendere dal comportamento del target e modificare la forma d'onda in funzione dello scenario. Tuttavia, affinché un sistema C-UAS possa definirsi davvero cognitivo, non basta che il singolo radar adatti la trasmissione; è necessario che l'intera rete condivida un modello comune di apprendimento, aggiornando il comportamento collettivo man mano che nuove informazioni vengono introdotte.

Il terzo punto riguarda la fusione intelligente dei dati. Il modello *Transformer* proposto da Ganganath et al. [32] dimostra che è possibile assegnare pesi dinamici alle sorgenti informative in base alla loro affidabilità istantanea, ma l'integrazione di queste tecniche in reti operative richiede una potenza computazionale significativa e una gestione molto precisa della latenza. La sfida non è solo combinare le misure: è farlo in modo che il risultato sia stabile, interpretabile e utilizzabile per decisioni in tempo reale.

Infine, un aspetto spesso trascurato ma cruciale è la continuità operativa. Li et al. [20] mostrano come i limiti energetici possano compromettere l'autonomia dei moduli radar più avanzati, specialmente quando integrano modelli IA complessi. Senza una gestione intelligente dell'energia e un'adeguata dissipazione termica, anche il miglior sistema cognitivo rischia di diventare inutilizzabile in missioni prolungate.

Mettendo insieme tutti questi elementi, emerge un quadro chiaro: la direzione futura non consiste nel potenziare un singolo componente, ma nel creare ecosistemi radar intelligenti, modulari e auto-adattativi. In questi sistemi, ogni sensore non solo rileva, ma apprende; non solo misura, ma interpreta; non solo trasmette, ma collabora. La visione che ne deriva è quella di una rete radar distribuita, capace di evolversi nel tempo grazie all'apprendimento continuo e alla cooperazione tra nodi eterogenei, mantenendo al contempo robustezza, efficienza e resilienza anche in scenari complessi.

7. CONCLUSIONI

L’evoluzione dei sistemi radar per applicazioni C-UAS rappresenta un tema complesso e multidisciplinare, che richiede la convergenza di competenze di ingegneria elettronica, telecomunicazioni, trattamento del segnale e intelligenza artificiale. I capitoli precedenti hanno analizzato tali tecnologie da prospettive complementari (concettuali, operative e sistemiche) evidenziando come il contrasto ai droni rappresenti una frontiera tecnologica in continuo movimento.

La letteratura esaminata mostra chiaramente che le prestazioni dei sistemi radar moderni non dipendono più solo dalla potenza trasmessa o dalla sofisticazione della singola architettura hardware, ma dall’interazione tra elementi eterogenei: ambiente elettromagnetico, reti di comunicazione, *sensor fusion*, sincronizzazione distribuita, capacità di adattamento e robustezza ai disturbi.

In questo capitolo conclusivo, vengono sintetizzati i risultati principali del lavoro, discussi i punti di forza e i limiti delle tecnologie analizzate, evidenziate le implicazioni applicative e delineate le prospettive più credibili per la prossima generazione di sistemi radar dedicati alla difesa contro UAV.

7.1 Sintesi dei risultati principali

L’analisi condotta in questo elaborato mette in evidenza come la capacità di individuare, tracciare e classificare piccoli UAV dipenda da un insieme integrato di tecnologie, ognuna delle quali contribuisce a risolvere una parte del problema.

Dalla letteratura emerge chiaramente che nessuna architettura radar, considerata isolatamente, può garantire prestazioni ottimali in tutti gli scenari. I radar FMCW offrono un buon compromesso tra risoluzione e ingombro, mentre i radar impulsivi risultano più adatti a lunghe distanze ma richiedono potenze maggiori e *front-end* più complessi. Le architetture MIMO, analizzate anche da Zhang et al.[16], permettono di migliorare sensibilmente la risoluzione angolare attraverso la creazione di aperture virtuali, introducendo però vincoli severi sulla coerenza di fase.

Lo studio dei sistemi multistatici e passivi rafforza questa idea.

Gli esperimenti presentati da Li et al. [20] dimostrano che la separazione fisica tra trasmettitore e ricevitori consente di osservare il bersaglio da angolazioni differenti, riducendo le zone d’ombra e incrementando la robustezza alle occlusioni. Tuttavia, tale paradigma introduce sfide operative legate alla sincronizzazione, alla ricostruzione del segnale di riferimento e alla gestione dell’interferenza diretta, che in contesti urbani possono risultare particolarmente critiche.

Un risultato di particolare rilevanza è rappresentato dal ruolo delle tecniche micro-Doppler e dell’apprendimento automatico.

Gli studi più recenti, tra cui quello di Ganganath et al. [10], mostrano come l’estrazione di caratteristiche tempo-frequenza consenta di distinguere in modo efficace i droni da uccelli o da altri bersagli biologici, riducendo significativamente i falsi allarmi. L’introduzione di reti neurali profonde e modelli Transformer permette inoltre di automatizzare la classificazione del segnale, garantendo prestazioni difficilmente raggiungibili con metodi tradizionali.

Dalle analisi effettuate emerge anche che la *sensor fusion* costituisce un elemento essenziale per gestire la complessità degli scenari reali.

L'integrazione tra radar, sensori acustici e telecamere, proposta da diversi lavori sperimentali, permette di compensare i limiti di ciascun sottosistema e rendere l'intera architettura più resiliente. In tali condizioni, però, la fusione efficace dei dati richiede hardware adeguato, sincronizzazione temporale accurata e protocolli di comunicazione dedicati.

Infine, i contributi dedicati ai radar cognitivi delineano la tendenza più avanzata nel settore. Il lavoro di Feng et al. [8] evidenzia come algoritmi di apprendimento per rinforzo possano guidare la selezione dinamica della forma d'onda, consentendo al radar di adattare il comportamento operativo in funzione dello scenario.

Queste architetture superano il paradigma classico “hardware + algoritmo”, avvicinandosi a sistemi capaci di apprendere, ottimizzare e cooperare all'interno di reti distribuite.

Nel loro insieme, i risultati ottenuti mostrano che l'efficacia di un sistema radar C-UAS non deriva da una singola tecnologia, ma dalla capacità di combinare architetture complementari, algoritmi adattivi e strategie di rete in un ecosistema coerente e flessibile.

7.2 Valutazione critica delle tecnologie analizzate

L'analisi delle soluzioni radar proposte nella letteratura recente evidenzia un panorama tecnologico estremamente variegato, nel quale ogni approccio offre contributi importanti ma porta con sé anche limitazioni strutturali. La valutazione complessiva mostra come il tema dell'individuazione dei droni sia più complesso di quanto suggeriscano le singole performance riportate nei lavori sperimentali. In particolare, il confronto critico tra le diverse tecniche rivela tre aspetti centrali: la fragilità delle prestazioni in scenari reali, la forte dipendenza dalla qualità dell'ambiente elettromagnetico e l'importanza crescente dell'intelligenza artificiale come vera infrastruttura abilitante.

Un primo punto riguarda i radar tradizionali FMCW e impulsivi, che continuano a rappresentare soluzioni solide ed economicamente sostenibili. Tuttavia, i risultati presenti nella letteratura mostrano che entrambi sono sensibili alle interferenze urbane e ai fenomeni di *clutter*, soprattutto a bassa quota. Se da un lato gli FMCW forniscono ottima risoluzione in distanza e una buona compattezza, dall'altro soffrono di prestazioni instabili in presenza di traffico radio congestionato. I radar impulsivi, analizzati anche da Li et al. [20], risultano più adatti a scenari estesi, ma richiedono elevata potenza di picco e *front-end* complessi, limitando la loro integrazione su piattaforme mobili o distribuite.

Le architetture MIMO e i sistemi multistatici rappresentano un passo in avanti significativo in termini di risoluzione angolare e copertura spaziale. Il lavoro di Zhang et al. [16] dimostra come l'utilizzo di aperture virtuali permetta di distinguere con precisione bersagli vicini o parzialmente occultati. Tuttavia, questa evoluzione introduce una fragilità intrinseca: la dipendenza dalla coerenza di fase. Nei test riportati da Zhang, uno sfasamento di pochi decimi di grado è sufficiente a compromettere la stima della direzione di arrivo. Nei radar multistatici, i benefici dovuti alla diversità geometrica devono essere bilanciati con la complessità di sincronizzare nodi distribuiti, spesso collegati tramite reti soggette a latenza variabile. Ne deriva che, pur essendo sistemi dalle potenzialità straordinarie, sono anche tra i più esigenti dal punto di vista ingegneristico.

Una valutazione altrettanto importante riguarda i sistemi radar passivi, particolarmente interessanti dal punto di vista militare e civile per la loro discrezione operativa. D’Amico et al. [23] mostrano che i radar passivi possono ottenere prestazioni sorprendenti grazie all’utilizzo di sorgenti di illuminazione d’opportunità come DVB-T o segnali 5G. Tuttavia, l’assenza di un controllo diretto sulla forma d’onda introduce variabilità che è difficile compensare. Interferenze, *multipath* e variazioni improvvise della sorgente rendono il sistema sensibile al contesto operativo. In altre parole, si tratta di una tecnologia promettente, ma non completamente sotto il controllo dell’operatore.

Un elemento trasversale a tutte queste architetture è il ruolo crescente dell’intelligenza artificiale.

La letteratura analizzata mostra chiaramente che l’IA non è più un semplice “modulo aggiuntivo”, ma una parte fondamentale della pipeline radar. L’impiego del micro-Doppler come firma discriminativa ha rivoluzionato la classificazione dei droni, come evidenziato da Ganganath et al. [10]. Tuttavia, l’adozione di reti neurali profonde introduce nuove criticità: dipendenza dai dataset, necessità di addestramenti complessi, consumo energetico elevato e difficoltà di interpretazione del modello. L’aumento dell’accuratezza comporta quindi un aumento parallelo della complessità operativa.

La valutazione finale non può prescindere dai radar cognitivi, il cui potenziale è notevole ma non ancora pienamente realizzato. Il lavoro di Feng et al. [33] mostra come algoritmi di reinforcement learning possano guidare la selezione dinamica delle forme d’onda, adattandole allo scenario. Tuttavia, questo approccio richiede capacità computazionali non sempre disponibili su piattaforme compatte, oltre a una robusta infrastruttura di comunicazione tra i nodi. L’efficacia del sistema dipende quindi non solo dalla qualità dell’algoritmo, ma dalla possibilità di integrare tali risorse in sistemi distribuiti, energicamente sostenibili e protetti da vulnerabilità cyber.

Nel complesso, il quadro che emerge è quello di tecnologie complementari ma nessuna risolutiva da sola. I sistemi radar C-UAS moderni rappresentano una combinazione delicata tra hardware, elaborazione del segnale, intelligenza artificiale e infrastrutture di rete. La sfida non è perfezionare un singolo componente, ma integrare in modo coerente tecnologie eterogenee per ottenere una soluzione realmente robusta, scalabile e operativa in contesti complessi.

7.3 Implicazioni applicative

L’insieme delle tecnologie analizzate nel corso dell’elaborato presenta ricadute applicative di particolare rilevanza sia in ambito civile sia militare. La crescente diffusione di droni commerciali e professionali, unita alla possibilità che queste piattaforme vengano impiegate in modo improprio o ostile, rende necessario disporre di sistemi di sorveglianza capaci di operare in modo affidabile in contesti molto differenti tra loro.

In ambito civile, i risultati emersi mostrano come i radar FMCW compatti, i sistemi passivi e le architetture multisensore rappresentino soluzioni particolarmente adatte alla protezione di infrastrutture critiche, aeroporti e aree urbane. L’utilizzo di segnali d’opportunità, come evidenziato da D’Amico et al. [23], consente di realizzare sistemi discreti, a basso impatto infrastrutturale e con costi operativi contenuti, mantenendo una buona capacità di individuazione a corto e medio raggio.

Tuttavia, l'applicazione di queste tecnologie in contesti densamente popolati richiede una gestione attenta delle interferenze e un'infrastruttura di comunicazione affidabile, soprattutto quando la sorveglianza deve funzionare in modo continuativo.

Nei contesti aeroporuali, la *sensor fusion* radar–ottico–acustica analizzata da Ganganath et al. [32] offre un miglioramento significativo nella discriminazione tra bersagli legittimi e non autorizzati. L'integrazione di modelli *Transformer* consente infatti di compensare la variabilità delle condizioni meteo e delle geometrie di volo, riducendo il rischio di interruzioni operative o falsi allarmi. Questo rende tali soluzioni particolarmente interessanti per scenari in cui la disponibilità continua del servizio è essenziale.

In ambito militare, le implicazioni applicative sono ancora più evidenti. Il rapporto del *Congressional Research Service* (2025) [21] sottolinea come la minaccia rappresentata dagli UAV stia evolvendo verso scenari più complessi, caratterizzati da sciami coordinati, droni *low-cost* e piattaforme a basso profilo radar. In questo contesto, le architetture MIMO e multistatiche analizzate da Zhang et al. [34] consentono una maggiore resilienza ai tentativi di elusione e una migliore capacità di tracciamento su bersagli multipli o manovranti.

Inoltre, l'uso di forme d'onda adattive e politiche di selezione dinamica, come proposto da Feng et al. [33], permette ai radar di modificare la propria strategia di trasmissione in presenza di *jamming*, *spoofing* o scarsa cooperazione spettrale, riflettendo una reale esigenza operativa dei moderni teatri di conflitto.

Una ricaduta applicativa trasversale riguarda la necessità di piattaforme scalabili e modulari, capaci di adattarsi a scenari operativi molto differenti tra loro: dalla protezione di infrastrutture civili alla sorveglianza tattica in zone ostili. In tutti questi contesti emergono tre fattori critici: l'efficienza energetica, la robustezza alle interferenze e la capacità di integrare rapidamente nuove funzioni attraverso l'aggiornamento del *software* o l'introduzione di algoritmi di *machine learning* più avanzati.

In sintesi, la letteratura analizzata suggerisce che l'applicabilità reale dei sistemi radar C-UAS non dipende unicamente da parametri prestazionali come portata o risoluzione, ma dalla loro capacità di adattarsi al contesto, integrare informazioni eterogenee e operare in modo collaborativo all'interno di reti distribuite. Le architetture più promettenti sono dunque quelle progettate non solo per rilevare un bersaglio, ma per inserirsi in un ecosistema informativo più ampio, caratterizzato da comunicazioni sicure, modelli predittivi e capacità di apprendimento continuo.

7.3.1 Aspetti economici dell'implementazione dei sistemi C-UAS

Un ulteriore elemento che incide in modo sostanziale sull'adozione dei sistemi radar C-UAS riguarda la sostenibilità economica delle soluzioni disponibili. Le prestazioni tecniche costituiscono infatti solo una parte del processo decisionale: per enti civili, operatori aeroporuali e forze armate, la scelta del sistema più adatto dipende anche dal rapporto fra efficacia operativa, costo iniziale, oneri di manutenzione e scalabilità a medio-lungo termine.

I radar basati su antenne AESA, come lo Spexer 2000, rappresentano una delle soluzioni più mature in termini di risoluzione angolare e capacità di sorveglianza continuativa, ma richiedono investimenti significativi sia per l'acquisizione sia per l'integrazione all'interno delle infrastrutture esistenti. Fonti industriali riportano costi dell'ordine di diverse centinaia di migliaia di euro per singola unità, ai quali si sommano spese legate alla calibrazione periodica,

all'alimentazione elettrica e alla formazione del personale tecnico responsabile della gestione del sistema. Proprio per questo tali soluzioni trovano impiego tipicamente in aeroporti primari, basi militari, aree ad accesso controllato e infrastrutture di elevato valore strategico.

Una prospettiva differente è offerta dai sistemi multistatici e passivi, come quelli discussi da Liu et al. [1] e Cheng et al. [6], che sfruttano sorgenti di illuminazione d'opportunità (DVB-T, FM, 5G) e riducono drasticamente i costi di hardware. In assenza del modulo trasmittente, i requisiti energetici e i costi di manutenzione diminuiscono, rendendo queste architetture particolarmente adatte a enti con budget limitati o contesti in cui la copertura debba essere estesa su ampie aree senza gravare su un'unica installazione. L'impiego di ricevitori leggeri e facilmente distribuibili consente inoltre di incrementare la densità della rete di sorveglianza senza interventi infrastrutturali invasivi.

La componente economica si estende anche alla fase di elaborazione dei dati. Gran parte degli approcci più recenti alla classificazione automatica degli UAV - come quelli proposti da Fioranelli et al. [15] o Mahmoud et al. [14] - si basa su *Convolutional Neural Networks* o modelli più complessi, la cui implementazione in tempo reale richiede risorse computazionali non trascurabili. L'integrazione di *Graphics Processing Unit* (GPU) *embedded* o *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) dedicate migliora la latenza e la robustezza dell'elaborazione dei segnali, come evidenziato da Li et al. [20], ma comporta un incremento dei costi iniziali e una maggiore specializzazione del personale tecnico incaricato della manutenzione dei moduli di calcolo.

Un ulteriore fattore economico riguarda la scalabilità. Le minacce moderne, in particolare i potenziali sciami di droni, richiedono sistemi in grado di operare in modo distribuito e cooperativo. In tale contesto, le piattaforme modulari - come l'M-LIDS statunitense, progettato per integrare radar, sensori ottici e moduli RF [20], [21] - risultano più sostenibili nel lungo periodo, poiché permettono di aggiungere nuovi nodi o sensori senza sostituire l'infrastruttura esistente. La possibilità di partire da un nucleo ridotto e ampliarlo progressivamente riduce l'investimento iniziale e consente un adattamento dinamico alle esigenze operative del sito protetto.

Nel complesso, l'analisi economica conferma che i sistemi C-UAS ottimali non sono necessariamente i più performanti dal punto di vista tecnico, ma quelli in cui prestazioni, costi, complessità operativa e scalabilità si bilanciano in modo coerente con lo scenario applicativo previsto. Le soluzioni passive e multistatiche risultano particolarmente competitive per la sorveglianza civile e infrastrutturale, mentre i radar AESA e i sistemi cooperativi ad alta tecnologia mantengono un ruolo centrale nelle applicazioni militari e ad alta criticità.

7.4 Limiti dello studio

Nonostante la vastità della letteratura analizzata e l'ampiezza delle tecnologie considerate, il presente lavoro presenta necessariamente alcuni limiti strutturali che è opportuno evidenziare in modo trasparente. Si tratta di aspetti che non compromettono i risultati ottenuti, ma che definiscono il perimetro metodologico entro cui il lavoro deve essere interpretato.

Un primo limite riguarda la natura esclusivamente bibliografica dello studio.

Questo approccio ha permesso di confrontare un ampio spettro di soluzioni, ma non consente di verificare direttamente, attraverso misure sperimentali autonome, la validità dei risultati riportati.

Molti degli studi più recenti, come quelli di Li et al. [20] e Zhang et al. [16], includono test in scenari reali, ma la possibilità di riprodurre tali condizioni in modo controllato rimane limitata per chi non dispone di infrastrutture specialistiche.

Un secondo limite riguarda la variabilità intrinseca degli scenari operativi, che rende difficile generalizzare pienamente i risultati.

Le prestazioni dei radar passivi dipendono fortemente dal tipo di sorgente d'illuminazione e dalle condizioni ambientali, come evidenziato da D'Amico et al. [23].

Analogamente, l'efficacia delle tecniche di *sensor fusion* basate su *Transformer*, descritte da Ganganath et al. [32], può cambiare sensibilmente in funzione della qualità dei sensori ausiliari.

Un ulteriore limite riguarda la complessità dei modelli di intelligenza artificiale trattati nel capitolo 5.

Le reti neurali profonde, così come i sistemi cognitivi basati su *reinforcement learning*, mostrano prestazioni molto elevate nella letteratura, ma restano soggetti a problemi di interpretabilità, dipendenza dal dataset di addestramento e difficoltà di integrazione operativa su piattaforme compatte. Questi aspetti, pur discussi in vari studi, tra cui quello di Feng et al. [33], non possono essere completamente valutati in assenza di un'implementazione prototipale.

Infine, un limite importante riguarda la dinamicità del settore.

La ricerca sui sistemi C-UAS è oggetto di innovazione costante: nuovi sensori, nuove bande operative, reti 6G e modelli di IA più efficienti vengono pubblicati con cadenza quasi mensile. Il lavoro, pur aggiornato ai contributi più recenti disponibili, cattura una fotografia precisa del panorama attuale, ma non può riflettere le evoluzioni che emergeranno nei prossimi anni.

Nel complesso, questi limiti non diminuiscono la solidità dell'analisi svolta; piuttosto definiscono il quadro entro il quale interpretare i risultati e suggeriscono direzioni concrete per future attività di ricerca, che verranno affrontate nel paragrafo successivo.

7.5 Sviluppi futuri: Verso l'ecosistema percettivo cognitivo

Le analisi condotte in questo elaborato portano a una conclusione netta: la battaglia tecnologica dei prossimi anni non sarà vinta dal singolo sensore con la potenza più elevata, ma dalla architettura con la migliore intelligenza distribuita. Se oggi i radar MIMO e multistatici rappresentano lo stato dell'arte *hardware*, il vero cambio di paradigma risiederà nella loro completa integrazione all'interno di reti cooperative, segnando il passaggio da sistemi di rilevazione isolati a un vero e proprio ecosistema percettivo cognitivo.

È possibile prevedere che la tecnologia dominante nel medio termine sarà la "*Total Sensor Fusion Cognitiva*". In questo scenario, le distinzioni tra radar, sistemi di comunicazione (6G/IoBT) e calcolo distribuito (*Edge AI*) sfumeranno fino a scomparire. Non si tratterà più di semplici radar che comunicano con un centro di controllo, ma di una infrastruttura di percezione ubiqua, in cui ogni nodo - sia esso un sensore a terra o un altro drone - contribuirà in tempo reale a costruire una mappa dinamica dello spazio aereo. Tale architettura permetterà ai nodi di operare come un'unica entità adattiva, superando i limiti di latenza e sincronizzazione che oggi affliggono i sistemi distribuiti commerciali.

Il cuore pulsante di questa evoluzione sarà l'intelligenza artificiale generativa e decisionale. Come evidenziato dalle prospettive sui radar cognitivi, l'applicazione del *Deep Reinforcement Learning* non servirà solo a classificare i bersagli, ma a permettere al sistema di "ragionare": selezionare autonomamente la forma d'onda ottimale, anticipare le manovre dei droni ostili e

auto-configurearsi per mitigare le interferenze senza intervento umano. Parallelamente, l'uso di architetture *Transformer* evolverà verso modelli gerarchici capaci di pesare dinamicamente l'affidabilità di sorgenti radar, video e acustiche, garantendo resilienza anche in scenari di *data denial* o *jamming*.

Naturalmente, questa transizione impone sfide ingegneristiche severe. L'efficienza energetica e la dissipazione termica diverranno vincoli primari per l'implementazione di algoritmi complessi su piattaforme mobili. Inoltre, la sicurezza non potrà più essere un *add-on*: i futuri sistemi C-UAS dovranno essere "cyber-resilienti by design", proteggendo l'integrità dei dati e dei modelli neurali da attacchi avversari e manipolazioni del segnale.

In sintesi, la prossima generazione di tecnologie Counter-UAS non si limiterà a vedere la minaccia, ma la comprenderà e la anticiperà. Il percorso tracciato in questa tesi conferma che l'ingegneria dei sistemi radar si sta trasformando in una disciplina di convergenza, dove *hardware* avanzato, intelligenza artificiale e reti ad alta velocità si fondono per garantire la sicurezza dello spazio aereo del futuro.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Liu, X. Wan, H. Tang, J. Yi, Y. Cheng, e X. Zhang, «Digital television based passive bistatic radar system for drone detection», in *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, Seattle, WA, USA: IEEE, mag. 2017, pp. 1493–1497. doi: 10.1109/RADAR.2017.7944443.
- [2] F. Yang, K. Qu, M. Hao, Q. Liu, X. Chen, e F. Xu, «Practical Investigation of a MIMO Radar System for Small Drones Detection», in *2019 International Radar Conference (RADAR)*, Toulon, France: IEEE, set. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/RADAR41533.2019.171348.
- [3] K. Stasiak, M. Ciesielski, A. Kurowska, e W. Przybysz, «A study on using different kinds of continuous-wave radars operating in C-band for drone detection», in *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*, Poznan, Poland: IEEE, mag. 2018, pp. 521–526. doi: 10.23919/MIKON.2018.8405275.
- [4] M. Jian, Z. Lu, e V. C. Chen, «Drone detection and tracking based on phase-interferometric Doppler radar», in *2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18)*, Oklahoma City, OK: IEEE, apr. 2018, pp. 1146–1149. doi: 10.1109/RADAR.2018.8378723.
- [5] G. Wei, Yuxiang Zhou, e S. Wu, «Detection and localization of high speed moving targets using a short-range UWB impulse radar», in *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, Italy: IEEE, mag. 2008, pp. 1–4. doi: 10.1109/RADAR.2008.4720766.
- [6] G. Fang, J. Yi, X. Wan, Y. Liu, e H. Ke, «Experimental Research of Multistatic Passive Radar With a Single Antenna for Drone Detection», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33542–33551, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2844556.
- [7] A. A. Mahmoud, S. N. Ramli, M. A. M. Ariff, e M. Danlami, «Radar Spectrum Analysis and Machine Learning-Based Classification for Identity-Based Unmanned Aerial Vehicles Detection and Authentication», *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, fasc. 12, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.0151260.
- [8] X. Feng, P. Sun, L. Zhang, G. Jia, J. Wang, e Z. Zhou, «Cognitive Radar Waveform Selection for Low-Altitude Maneuvering-Target Tracking: A Robust Information-Aided Fusion Method», *Remote Sens.*, vol. 16, fasc. 21, p. 3951, ott. 2024, doi: 10.3390/rs16213951.
- [9] P. Wellig *et al.*, «Radar Systems and Challenges for C-UAV», in *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*, Bonn, Germany: IEEE, giu. 2018, pp. 1–8. doi: 10.23919/IRS.2018.8448071.
- [10] G. Ganganath *et al.*, «Radar and Acoustic Sensor Fusion using a Transformer Encoder for Robust Drone Detection and Classification», 13 ottobre 2025, *arXiv*: arXiv:2507.19785. doi: 10.48550/arXiv.2507.19785.
- [11] M. Chiaberge, «Enhancing Drone Detection and Tracking Using LiDAR Sensor with Adaptive Motion Strategies».
- [12] «Tesi_Recchi».
- [13] S. Engelbertz, C. Krebs, A. Kuter, R. Herschel, R. Geschke, e D. Nußler, «60 GHz Low Phase Noise Radar Front-End Design For The Detection Of Micro Drones».
- [14] S. Björklund e N. Wadströmer, «Target Detection and Classification of Small Drones by Deep Learning on Radar Micro-Doppler», in *2019 International Radar Conference (RADAR)*, Toulon, France: IEEE, set. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/RADAR41533.2019.171294.
- [15] Á. D. De Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo, e A. A. López, «Drone Detection and RCS Measurements with Ubiquitous Radar», in *2018 International Conference on*

- Radar (RADAR)*, Brisbane, QLD, Australia: IEEE, ago. 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/RADAR.2018.8557320.
- [16] Y. Zhang, S. You, Y. Yan, Q. Ou, e X. Zhu, «Finding a New Balance Point: Intelligent Optimization of Multi-Target Cognitive Electronic Reconnaissance Strategy for Unmanned Aerial Vehicles», *IEEE Access*, vol. 12, pp. 183252–183264, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3510333.
 - [17] C. Wang, J. Tian, J. Cao, e X. Wang, «Deep Learning-Based UAV Detection in Pulse-Doppler Radar», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 60, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1109/TGRS.2021.3104907.
 - [18] J. Gong, J. Yan, D. Kong, e D. Li, «Experiments with Cognitive Micro-Doppler Radar: Detection of Aircrafts' Micro-Doppler Signals with Varied CPIs and PRFs», in *2024 International Radar Conference (RADAR)*, Rennes, France: IEEE, ott. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/RADAR58436.2024.10993748.
 - [19] W. Khawaja, M. Ezuma, V. Semkin, F. Erden, O. Ozdemir, e I. Guvenc, «A Survey on Detection, Tracking, and Classification of Aerial Threats using Radars and Communications Systems», 18 novembre 2022, *arXiv*: arXiv:2211.10038. doi: 10.48550/arXiv.2211.10038.
 - [20] L. Xu e Z. Luo, «Anti-UAV detection and identification technology: Fundamentals, methods and challenges», *Phys. Commun.*, vol. 71, p. 102676, ago. 2025, doi: 10.1016/j.phycom.2025.102676.
 - [21] «R48477.2».
 - [22] «Collaborative Defence Research on Counter-UAS and Cognitive Radar Networks», European Defence Fund (EDF) and NATO Science and Technology Organization (STO), Brussels, Belgium, 2024. [Online]. Disponibile su: <https://defence-industry-space.ec.europa.eu/funding/edf>
 - [23] Z. Tang, H. Ma, Y. Qu, e X. Mao, «UAV Detection with Passive Radar: Algorithms, Applications, and Challenges», *Drones*, vol. 9, fasc. 1, p. 76, gen. 2025, doi: 10.3390/drones9010076.
 - [24] «Blighter A400 Series Datasheet». Blighter Surveillance Systems Ltd., 2024. [Online]. Disponibile su: <https://blighter.com/products/a400-radar/>
 - [25] «DedroneTracker.ai Technical Sheet». Dedrone Inc., 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.dedrone.com/resources>
 - [26] «EchoGuard Radar Product Overview». Echodyne Corporation, 2024. [Online]. Disponibile su: <https://echodyne.com/echoguard-radar>
 - [27] Y. Sun, S. Abeywickrama, L. Jayasinghe, C. Yuen, J. Chen, e M. Zhang, «Micro-Doppler Signature-Based Detection, Classification, and Localization of Small UAV With Long Short-Term Memory Neural Network», *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 59, fasc. 8, pp. 6285–6300, ago. 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.3028654.
 - [28] «Hensoldt AG – Spexer 2000». Consultato: 4 novembre 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.hensoldt.net/>
 - [29] «Rheinmetall AG – Oerlikon Radshield», Rheinmetall AG, Oerlikon Radshield Air Defence System. [Online]. Disponibile su: https://www.rheinmetall.com/en/rheinmetall_ag/product_system/air_defence/radar_systems/oerlikon_radshield
 - [30] «MHR (Multi-Mission Hemispheric Radar)», RADA Electronic Industries Ltd, 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.rada.com/product/mhr>
 - [31] «Thales Group, Squire Portable Ground Surveillance Radar», Thales Group, 2025. [Online]. Disponibile su: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/squire>
 - [32] «Ganganath et al. - 2025 - Radar and Acoustic Sensor Fusion using a Transform.pdf».
 - [33] «Feng et al. - 2024 - Cognitive Radar Waveform Selection for Low-Altitud.pdf».

[34] «Zhang et al. - 2024 - Finding a New Balance Point Intelligent Optimizat.pdf».