

## Sistemi integrati C-UAS: OLTRE IL “PORCOSPINO” VERSO LA CHIRURGIA

### ELETTROMAGNETICA

Ing. Francesco Zaccarini

L'incremento esponenziale delle minacce rappresentate dai sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (UAS) ha ridefinito i paradigmi della sicurezza globale, spostando l'attenzione dalla protezione di siti fissi alla necessità di difendere obiettivi dinamici e aree in movimento.

Quali sono le sfide tecniche e le innovazioni metodologiche necessarie per lo sviluppo di sistemi Counter-UAS (C-UAS) di nuova generazione?

Partendo dall'analisi del recente incidente presso l'aeroporto di Cuneo-Levaldigi come caso studio sulla vulnerabilità perimetrale, ecco alcune considerazioni sull'importanza di un approccio multidisciplinare che integri ingegneria a radiofrequenza (RF), meccanica avanzata, scienza dei materiali e automazione.

Stiamo infatti assistendo ad una transizione dal concetto di "jamming selvaggio" a quello di "neutralizzazione chirurgica", ottenuta attraverso l'ottimizzazione della catena RF possibile grazie ad un approccio integrato. I jammer con antenne "a porcospino" sono evoluti in dispositivi che utilizzano antenne conformali sulle piattaforme mobili, mutuando le metodologie di progettazione "topside" tipiche dell'ambito navale militare per ridurre l'impatto visivo e migliorare le prestazioni elettromagnetiche.

È un nuovo approccio alla progettazione, che tiene conto della necessità di definire architetture di sistema aperte e olistiche, capaci di evolvere di pari passo con l'evoluzione tecnologica della minaccia drone.



## 1. La nuova frontiera della sicurezza aerea.

### 1.1. Un problema sempre più attuale.

La democratizzazione della tecnologia dei droni ha trasformato quello che un tempo era uno strumento esclusivamente militare in una risorsa accessibile a chiunque, portando con sé benefici incalcolabili per l'agricoltura, la logistica e la cinematografia, ma aprendo al contempo falle critiche nella sicurezza dello spazio aereo.

La necessità di sistemi C-UAS (*Counter-Unmanned Aircraft Systems*) non è più confinata ai teatri di guerra, ma è diventata una priorità per la protezione di infrastrutture civili, siti sensibili e, in misura sempre maggiore, di eventi dinamici e convogli in movimento.

Un esempio lampante della gravità di queste violazioni si è verificato recentemente presso lo scalo aeroportuale di Cuneo-Levaldigi: il 16 aprile 2026, la torre di controllo ha segnalato la presenza di un drone di dimensioni eccezionali che operava a ridosso del perimetro dello scalo. L'intervento della Polizia di Frontiera ha portato al sequestro di un quadricottero professionale impiegato per attività agricole di diserbo.

Le specifiche tecniche del mezzo catturato evidenziano la magnitudo del rischio: un peso di circa 32 chilogrammi con batteria installata e un diametro in volo compreso tra i 2,50 e i 2,70 metri: un velivolo di tali proporzioni avrebbe potuto causare danni catastrofici in caso di impatto. In questa circostanza il traffico aereo è rimasto bloccato per oltre un'ora, causando rilevanti disagi economici e operativi. Il pilota, privo di licenza, assicurazione e autorizzazione ENAC, operava con un radiocomando capace di allontanarsi fino a 7 chilometri, dimostrando come anche un impiego non malevolo, ma irresponsabile, possa mettere in crisi sistemi di sicurezza aeroportuale non adeguatamente equipaggiati con sensori di rilevamento proattivo.

### 1.2. Sistemi C-UAS mobili e protezione di aree in movimento

Mentre la protezione di un aeroporto come quello di Cuneo si basa su un perimetro statico e ben definito, le complicazioni aumentano esponenzialmente quando l'esigenza di sicurezza si applica a regioni di spazio "in movimento", come cortei diplomatici, sfilate o manifestazioni pubbliche. In questi contesti, il sistema C-UAS deve operare a bordo di mezzi mobili (auto, furgoni o veicoli tattici), affrontando vincoli tecnici molto più restrittivi rispetto alle installazioni fisse.

In elettromagnetismo, operare in una regione di spazio non definita e variabile trasforma radicalmente il problema del rilevamento e della neutralizzazione. Un esempio tipico di questa complessità è riscontrabile nella tecnologia RF-ID, dove il movimento relativo tra lettore e tag, unito alle riflessioni ambientali imprevedibili, può degradare drasticamente le prestazioni se non gestito con algoritmi dinamici.

Per un sistema C-UAS mobile, il terreno circostante o lo scenario urbano cambia costantemente, introducendo ad esempio disturbi dovuti a fenomeni fisici come il *multipath*, zone d'ombra e interferenze da altre reti wireless. La necessità di mantenere una "bolla di protezione" a 360 gradi mentre il veicolo si sposta a velocità variabili richiede approcci concettuali ed ingegneristici differenti.

### 1.3. Dal "jamming selvaggio" alla neutralizzazione chirurgica della minaccia.

Lo stato dell'arte tecnologico si sta allontanando rapidamente dal concetto di "jamming selvaggio", ovvero l'emissione indiscriminata di rumore a radiofrequenza su ampie bande per accecare qualsiasi segnale, in favore di un approccio più mirato. Infatti se pensiamo ad un contesto urbano, come un convoglio che attraversa il centro di una capitale, il disturbo massivo di ampie porzioni dello spettro elettromagnetico provocherebbe il blackout di tutte le comunicazioni civili, dai telefoni cellulari ai servizi di emergenza, creando panico e rischi collaterali inaccettabili.

L'esigenza attuale è quindi quella di proteggere lo spazio aereo senza disturbare le comunicazioni wireless legittime presenti nell'area. Questo implica una duplice capacità del sistema C-UAS, ovvero sia quella di identificare specificamente il segnale del drone intruso, sia di intervenire solo sulle frequenze utilizzate dal target (ad esempio tramite "comb jamming" o attacchi cyber-RF sui protocolli di comando).

Queste nuove esigenze rendono sempre più necessario ed attuale un approccio più strutturato allo sviluppo dei sistemi antidrone.

## 2. L'approccio multidisciplinare e la visione olistica del progetto.

### 2.1. Introduzione.

La complessità dei moderni UAS, non solo dei modelli militari ma anche di prodotti civili od addirittura consumer, richiede che lo sviluppo di un sistema di difesa non sia limitato alla sola componente RF, ma scaturisca da una sinergia multidisciplinare.

Un sistema C-UAS integrato non può più essere visto come una collezione di "black box" (logica di controllo, amplificatori, reti RF, antenne), ma come un sistema integrato in cui la complessità di ogni blocco viene definita e pesata in funzione della sua integrazione con gli altri sub-assiemi facenti parte del dispositivo. In quest'ottica non è più sufficiente assemblare prodotti OTS già esistenti e farli funzionare, bensì suddividere la complessità del sistema tra i suoi componenti in modo efficiente e dinamico.

### 2.2. Sinergia tra tecnologie differenti.

Un prodotto dinamico deve in primo luogo essere progettato per evolvere parallelamente ai progressi tecnologici dei droni: non è infatti pensabile che possa diventare rapidamente obsoleto prima di aver concluso la sua vita operativa prestabilita. Questo richiede l'integrazione di:

- **Ambito RF ed Elettromagnetico:** Per la progettazione di catene di trasmissione ad alta efficienza e antenne capaci di coprire bande estese (da HF a onde millimetriche).
- **Meccanica e Termodinamica:** La dissipazione del calore in amplificatori di alta potenza alloggiati in spazi ristretti (veicoli) è una sfida critica che richiede materiali conduttivi e soluzioni di raffreddamento attive/passive integrate.
- **Software Defined Radio (SDR) e DSR:** Per la gestione flessibile del segnale, permettendo aggiornamenti software che introducano nuovi protocolli di disturbo senza dover sostituire l'hardware.
- **Automazione e AI:** Per il tracking automatico e la decisione assistita, riducendo la latenza umana nel ciclo OODA (Observe-Orient-Decide-Act).

### 2.3. Suddivisione della complessità del sistema nei relativi sub-assiemi.

La definizione del sistema parte ovviamente da delle specifiche di partenza, che mirano a garantire un certo livello di efficacia nella individuazione e neutralizzazione di un bersaglio all'interno di una determinata area di rispetto. Il medesimo risultato tuttavia può essere perseguito in vari modi, attribuendo livelli di complessità differenti ai vari blocchi o sub-assiemi che costituiscono il sistema.

I criteri su cui ragionare possono essere i seguenti che, si noti, sono interdipendenti:

- Suddivisione dello spettro operativo del sistema in varie sottobande;
- Definizione delle caratteristiche di radiazione del sistema: omnidirezionale o direttivo/settoriale;
- Modalità di scansione e implementazione della stessa sia a livello software che hardware;
- Topologia delle reti di ripartizione e relativi componenti;
- Scelta degli amplificatori;
- Bilancio energetico e termico dell'intero sistema;
- Upgradabilità del sistema, sia a livello software che hardware, durante tutta la sua vita operativa.

Tutto questo deve ovviamente tener conto dei vincoli operativi e meccanici a cui il sistema deve sottostare. Ad esempio, nel caso di un'installazione "covert", occultata, su di un veicolo quale un'auto o un fuoristrada, il vincolo sulla disposizione delle antenne (*conformal antennas*) diventa prioritario rispetto a molti dei criteri sopra elencati.

Una visione olistica ed interdisciplinare del progetto è quindi indispensabile per giungere ad un prodotto efficiente ed affidabile.

### 3. Ottimizzazione della catena RF e del sistema radiante.

#### 3.1. Introduzione.

Una delle criticità maggiori per i sistemi C-UAS installati su mezzi mobili è rappresentata dal bilancio energetico e dalle dimensioni complessive.

Aumentare l'efficienza della catena RF diventa quindi una necessità operativa per ridurre le dimensioni della power supply (batterie, generatori) che deve essere alloggiata nel veicolo insieme agli operatori e alle altre apparecchiature.



Figura 3.1

Esempi di configurazione "a porcospino".

#### 3.2. Le configurazioni omnidirezionali "a porcospino".

Molti jammer di prima generazione, spesso prodotti utilizzati per applicazioni meno stringenti, si presentano come scatole metalliche con una moltitudine di antenne a stilo avvitate sopra in modo disordinato, ricordando la disposizione degli aculei di un porcospino.

Seppur dettata da esigenze di costo e/o di semplicità di integrazione, dal momento che sfrutta componenti ed antenne OTS, questa configurazione è estremamente inefficiente per diversi motivi:

**Isolamento:** le antenne vicine interagiscono tra loro, distorcendo i diagrammi di radiazione e dando luogo a diagrammi di radiazione casuali, molto variabili in banda, con caratteristiche che si discostano molto dal pattern omnidirezionale di progetto.

**Perdite di disadattamento:** la prossimità delle antenne causa un disadattamento, di solito compensato con l'introduzione di circolatori/isolatori all'uscita degli amplificatori con un conseguente calo del guadagno, inteso ovviamente come *realized gain*.

**Perdite di Distribuzione:** in alcune architetture, una selva di antenne può richiedere una rete di cablaggio complessa, con switch e sdoppiatori che introducono perdite di inserzione significative.

**Inefficienza Spettrale:** nella migliore delle ipotesi la radiazione è di tipo omnidirezionale, disperdendo energia in direzioni dove non è presente alcuna minaccia e aumentando il rischio di interferenze.

### 3.3. Sistemi integrati con elementi radianti omnidirezionali.

In sistemi che fanno uso di antenne omnidirezionali, è possibile effettuare una integrazione di tutta la parte radiante all'interno di un singolo radome o di una struttura a basso profilo.

Questo permette di progettare l'intero sistema in modo da svincolarsi dall'installazione side-to-side delle singole antenne, mantenendo quindi elevate caratteristiche di radiazione, adattamento ed isolamento dei vari elementi radianti che compongono il sistema.

Il concetto di simmetria elettrica e meccanica, fondamentale per poter ottenere diagrammi di radiazione perfettamente omnidirezionali, può essere implementato in configurazioni *stacked* che comunque mantengono dimensioni compatte anche rispetto ad antenne COTS operanti su singole bande di frequenza.

Inoltre, al crescere della frequenza, risulta sempre più complesso reperire antenne omnidirezionali COTS con una capacità di gestione della potenza (*power handling*) compatibile con le specifiche del jamming, applicazione che richiede l'impiego di livelli di potenza estremamente elevati, che spesso eccedono i limiti termici e di isolamento dei materiali utilizzati nei componenti commerciali standard.

Già questo primo step permette quindi di aumentare l'efficienza di un sistema C-UAS omnidirezionale con notevoli miglioramenti di efficienza rispetto alla configurazione "a porcospino":



Figura 3.2

Elemento radiante a larga banda progettato per sopportare potenze elevate nonché per essere integrato con altre antenne in un sistema C-UAS omnidirezionale.

### 3.4. Sistemi C-UAS direttivi: sistemi settoriali, con beamforming elettrico, con beamforming elettromeccanico.

L'adozione di sistemi C-UAS direttivi, comunque sempre in grado di controllare una regione di spazio a 360 gradi, permette di aumentarne l'efficienza rispetto agli analoghi dispositivi omnidirezionali. A tal proposito è possibile indicare tre configurazioni principali, tutte facenti ovviamente parte di un unico sistema integrato.

- **Sistemi multisetoriali fissi.** In questa configurazione gli elementi radianti sono montati su di una struttura poligonale, tipicamente ad 8 o a 16 settori, che copre l'intero piano azimutale. La selezione della direzione avviene mediante una rete di ripartizione comprendente linee e switch comandati da una logica di controllo. Questa configurazione è spesso implementata utilizzando antenne di commercio montate su di una struttura "ad albero di Natale", con tutti i cablaggi esposti. Progettare un sistema di questo tipo integrato permette di minimizzare l'influenza reciproca tra antenne appartenenti a settori adiacenti, ottimizzando sia la parte elettrica che quella meccanica.
- **Sistemi multisetoriali con array e beamforming elettrico.** In questi sistemi la copertura emisferica dello spazio aereo viene raggiunta utilizzando degli array di elementi radianti semplici, alimentati mediante delle reti BFN (Beam Forming Network). Variando i coefficienti di eccitazione di ogni elemento dell'array è possibile effettuare una scansione elettrica del fascio entro un dato intervallo angolare, ad esempio  $\pm 60^\circ$ . In questo caso tre sistemi di questo tipo, mutuamente orientati a  $120^\circ$ , permettono di coprire l'intero angolo giro. Questi sistemi presentano le limitazioni proprie di un array in applicazioni a larga banda.
- **Sistemi multisetoriali elettromeccanici.** Con questo termine indichiamo tutti i restanti sistemi direttivi in cui la composizione e l'orientamento del fascio viene ottenuto mediante l'utilizzo di attuatori elettromeccanici che permettono di variare sia la configurazione delle reti di ripartizione che la configurazione degli elementi radianti. Questa soluzione, qui riassunta a grandi linee, permette di semplificare notevolmente le reti di alimentazione e ripartizione del sistema, introducendo dei dispositivi di controllo che non agiscono sui parametri di alimentazione delle antenne bensì sulle loro proprietà meccaniche.

Le tabelle che seguono riportano una classificazione generale delle principali architetture di sistemi C-UAS, includendo anche i sistemi che fanno uso di antenne omnidirezionali (per i quali è comunque possibile implementare un'integrazione), nonché i criteri di discriminazione della direzione di provenienza del bersaglio.



Figura 3.3

In un sistema direttivo multibanda/multisetoriale la rete di alimentazione e ripartizione assume complessità notevoli.

	Descrizione	Caratteristiche principali
<b>Sistemi omnidirezionali discreti</b>	Antenne omnidirezionali COTS montate in prossimità una dell'altra con una configurazione "a porcospino".	<ul style="list-style-type: none"> <li>- basso costo di produzione ed installazione;</li> <li>- impossibilità di discriminare la provenienza del bersaglio se non con Localizzazione Cooperativa (vedi Tab.3.2);</li> <li>- degrado delle caratteristiche elettriche di ogni antenna a causa dell'"effetto prossimità".</li> </ul>
<b>Sistemi omnidirezionali integrati</b>	Le varie bande operative vengono coperte da antenne omnidirezionali dedicate, integrate in una singola struttura di protezione e supporto meccanico (radome) studiata ad hoc per minimizzare l'interazione tra le singole antenne.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- impossibilità di discriminare la provenienza del segnale radio in modo diretto;</li> <li>- riduzione del numero di antenne installate sul veicolo e dell'ingombro totale;</li> <li>- specifiche elettriche garantite per ogni antenna e banda operativa;</li> </ul>
<b>Sistemi multisetoriali con antenne e cablaggi esterni</b>	Antenne direttive COTS, tipicamente pannelli, montati in configurazione multisetoriale. I cablaggi sono esterni in configurazione "ad albero di Natale".	<ul style="list-style-type: none"> <li>- basso costo per un sistema direttivo;</li> <li>- possibilità di determinare in modo diretto la direzione di provenienza (DOA) del bersaglio (vedi Tab. 3.2);</li> <li>- degrado delle caratteristiche elettriche di ogni antenna a causa dell'"effetto prossimità".</li> </ul>
<b>Sistemi multisetoriali integrati commutabili</b>	Antenne direttive sviluppate ad hoc ed integrate in una struttura multisetoriale che ne ottimizza le prestazioni elettriche, minimizzando le interazioni tra le singole antenne. La medesima struttura integra anche alcuni sottosistemi, quali ad esempio le reti di commutazione e ripartizione e le logiche di controllo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- struttura compatta che può integrare altri sub-assiemi oltre quello radiante;</li> <li>- possibilità di determinare in modo diretto la direzione di provenienza (DOA) del bersaglio (vedi Tab. 3.2);</li> <li>- specifiche elettriche garantite per ogni antenna e banda operativa.</li> </ul>
<b>Sistemi multisetoriali integrati con phased array e BFN</b>	Le antenne sono delle schiere bidimensionali di elementi radianti elementari, integrate in una struttura multisetoriale. La scansione di un settore viene implementata mediante delle reti BFN che modificano i coefficienti di eccitazione delle singole sorgenti.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ottimo per determinare il DOA e molto versatile, potendo upgradare gli algoritmi di beam-forming via software. Più difficile l'utilizzo come jammer.</li> <li>- difficoltà di implementazione a larga banda a causa della variazione significativa dell'<i>array factor</i>.</li> <li>- elevata discriminazione della direzione del bersaglio, a patto di realizzare l'array sufficientemente grande rispetto a <math>\lambda</math>.</li> </ul>
<b>Sistemi integrati che utilizzano conformal antennas</b>	L'integrazione avviene direttamente sul veicolo nel quale il sistema viene predisposto. Si utilizzano antenne sviluppate ad hoc in modo da essere indistinguibili da componenti di serie della carrozzeria del veicolo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- impatto visivo nullo, ideale per cortei e applicazioni mobili.</li> <li>- integrazione limitata ad un modello specifico di veicolo.</li> <li>- possibilità di ottimizzare la disposizione dei singoli sub-assiemi all'interno del veicolo.</li> </ul>
<b>Sistemi direttivi elettromeccanici</b>	La configurazione del sub-assieme radiante viene semplificata da un punto di vista elettrico, introducendo degli attuatori elettromeccanici che ne permettono il puntamento e/o la scansione.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- possibilità di determinare la DOA in modo diretto senza la "quantizzazione" di un sistema a settori fissi;</li> <li>- ridotta complessità di elementi radianti e cablaggi;</li> <li>- presenza di parti meccaniche in movimento e necessità di gestione delle stesse.</li> </ul>

**Tabella 3.1**

Principali architetture di sistemi C-UAS

Metodo	Denominazione Tecnica	Principio di Funzionamento	Punto di Forza	Limite Principale
Diretto	AoA (Angle of Arrival)	Misura le proprietà fisiche dell'onda (fase o ampiezza) su un <b>singolo sensore</b> o array.	Funziona in autonomia su una singola postazione (anche mobile). Ideale per postazioni singole o mobili.	La precisione diminuisce drasticamente all'aumentare della distanza.
Indiretto	TDOA (Time Difference of Arrival)	Calcola la posizione tramite una <b>rete di sensori</b> misurando il ritardo temporale del segnale tra di essi.	Estremamente preciso e costante all'interno dell'area coperta. Ideale per la protezione di grandi aree fisse (aeroporti).	Richiede più sensori e una sincronizzazione temporale perfetta tra loro.
Cooperativo	Remote ID Telemetria	Legge le <b>coordinate GPS</b> che il drone stesso trasmette all'interno del pacchetto dati.	Fornisce la posizione esatta del drone e del pilota.	Inefficace contro droni ostili o illegali che volano in modalità "silenziosa".

Tabella 3.2

Metodi di localizzazione del bersaglio.

## 4. Impatto estetico ed integrazione: Conformal Antennas e Studio Elettromagnetico.

### 4.1. Introduzione.

L'impiego di sistemi C-UAS in contesti civili e di protezione VIP introduce un'ulteriore esigenza: la discrezione. Un veicolo d'ordinanza o di scorta non deve apparire come un mezzo militare stracolmo di antenne evidenti. Questo non solo per una questione estetica, ma soprattutto per motivi di sicurezza: rendere invisibile la capacità di difesa impedisce all'avversario di individuare il "cuore" della protezione elettronica del convoglio.



Figura 4.1

L'installazione di antenne di tipo convenzionale ha un impatto estetico non trascurabile.

#### 4.2. Il concetto di *conformal antenna*.

Le *conformal antennas* sono elementi radianti progettati per essere integrati a filo della sagoma aerodinamica o strutturale del mezzo che le ospita. Invece di essere elementi sporgenti, esse diventano parte integrante della scocca del veicolo, inserite ad esempio nel tetto, nei montanti, nei paraurti o negli specchietti retrovisori.

Nel particolare caso di un veicolo quale ad esempio un'automobile, un fuoristrada od un furgone, la progettazione di antenne nascoste può essere estesa a parti della carrozzeria o a relativi accessori esterni (ruota di scorta, portapacchi, ecc.) che vengono ricostruiti con materiali diversi dall'originale (ad esempio utilizzando strati dielettrici) pur mantenendo un aspetto visivo identico.

L'integrazione di antenne conformali offre quindi interessanti vantaggi, come ad esempio:

**Impatto estetico nullo:** il sistema è occultato sotto strati di materiali dielettrici o vernici speciali che non bloccano il segnale RF (radome integrati).

**Integrità Strutturale:** riduzione della resistenza aerodinamica e assenza di carichi meccanici dovuti all'impatto dell'aria su antenne a stilo lunghe e sottili.

**Prestazioni Superiori:** in alcuni casi, la curvatura della superficie del veicolo può essere sfruttata per ottenere coperture angolari specifiche che le antenne planari non possono raggiungere.

#### 4.3. Il "downsizing" dalla nave al veicolo.

L'integrazione di un sistema C-UAS in un automezzo, quale ad esempio un fuoristrada, impiegando delle *conformal antennas*, implica da un punto di vista elettromagnetico considerare l'insieme "antenna più veicolo" come una singola entità radiante.

Paradossalmente, i criteri di sviluppo di un'antenna di questo tipo risultano simili all'approccio con cui si definisce tipo e posizione delle antenne su di una nave militare, denominato *Integrated Toplevel Design*.

Con un approccio unitario è possibile realizzare modelli elettromagnetici accurati in modo da verificare posizione, disposizione e numero di antenne necessarie alla copertura totale attorno al veicolo, valutandone sia le loro caratteristiche di radiazione che l'impatto sui sistemi elettrici ed elettronici del veicolo stesso.



Figura 4.2

Vari elementi della carrozzeria e degli accessori esterni di un veicolo possono essere sede di antenne conformi.

#### 4.4. Utilizzo di metodi e materiali innovativi.

L'impiego di tecnologie e materiali non convenzionali nella progettazione e ingegnerizzazione di questi sistemi rappresenta un fattore determinante per rispondere alle crescenti esigenze di integrazione, in particolare nello sviluppo delle già menzionate antenne conformi (*conformal antennas*), personalizzate per l'installazione su veicoli.

In questo ambito, la ricerca di soluzioni innovative segue una duplice direzione: da un lato l'utilizzo di tecnologie produttive avanzate, come la manifattura additiva per la realizzazione di supporti dielettrici e radome con geometrie complesse capaci di ottimizzare la propagazione e la protezione degli elementi radianti; dall'altro l'adozione di metodologie di progetto basate sui *metamateriali*, come gli *Artificial Magnetic Conductors (AMC)*.

Questi ultimi risultano fondamentali per superare i limiti fisici intrinseci della scocca metallica del veicolo, poiché permettono di posizionare le antenne a distanze estremamente ridotte dalla superficie senza subire il degrado delle prestazioni tipico dei conduttori elettrici tradizionali.

Grazie a queste proprietà, è possibile realizzare sistemi con profili ultra-sottili che non alterano l'aerodinamica del mezzo e minimizzano l'accoppiamento elettromagnetico tra settori adiacenti, trasformando di fatto la struttura portante del veicolo in un elemento attivo, intelligente e altamente efficiente del sistema C-UAS complessivo.

## 5. Conclusioni.

Questa breve disamina evidenzia come l'evoluzione della minaccia UAS richieda un radicale cambio di paradigma: la transizione dal "jamming selvaggio" a una "neutralizzazione chirurgica".

Il successo di questa evoluzione risiede nella capacità di superare l'approccio tradizionale basato su componenti standard e installazioni posticce, muovendosi verso una **visione globale e olistica del progetto**.

Progettare antenne **ad hoc** non è più una scelta opzionale, ma una necessità tecnica per garantire l'efficacia del sistema C-UAS.

Questa visione integrata permette di:

- **Integrare strutture discrete in sistemi ottimizzati.** Superare la logica dei singoli componenti radianti isolati a favore di un'architettura d'insieme permette di armonizzare ogni elemento con la struttura ospitante, eliminando le inefficienze delle installazioni frammentate e garantendo una distribuzione del campo elettromagnetico coerente e controllata.
- **Trasformare la piattaforma in sistema.** Grazie all'uso di **antenne conformi** e metamateriali come gli **AMC**, l'antenna cessa di essere un accessorio esterno e diventa parte integrante della "pelle" del veicolo, preservandone l'aerodinamica e la segnatura visiva.
- **Massimizzare l'efficienza elettromagnetica.** Una progettazione su specifica permette di gestire le mutue interferenze tra i settori e di superare i limiti fisici imposti dalle superfici metalliche, ottenendo prestazioni superiori rispetto ai dispositivi commerciali (COTS).
- **Adattarsi a scenari dinamici.** Solo un approccio multidisciplinare, che fonda ingegneria RF, scienza dei materiali e meccanica avanzata, consente di sviluppare sistemi capaci di proteggere obiettivi in movimento con la precisione richiesta dai moderni contesti di sicurezza.

In sintesi, il senso profondo dell'articolo è che l'efficacia della difesa elettronica moderna non dipende più dalla sola potenza di emissione, ma dalla **qualità dell'integrazione**.

L'antenna progettata su misura diventa il fulcro di un sistema intelligente dove struttura, materiale e funzione radiante convergono in un'unica entità altamente performante.

Si precisa che le considerazioni riportate hanno finalità esclusivamente tecniche e progettuali. L'impiego operativo di sistemi di neutralizzazione RF è soggetto alle normative vigenti e alle autorizzazioni previste dalle autorità competenti.



*Tutte le informazioni e le esperienze riportate in questo articolo sono frutto dell'attività di **progettazione, sviluppo e realizzazione di antenne custom professionali** svolta da **ElettroMagnetic Services Srl** con il metodo **AntennaSuMisura**.*

*Per **domande, chiarimenti od approfondimenti** in merito a questo o ad altri argomenti riguardanti le antenne professionali scrivi a [bollini@elettromagneticervices.com](mailto:bollini@elettromagneticervices.com)*

*Grazie per il tempo che hai dedicato alla lettura di questo articolo.*

*Trovi l'elenco completo delle nostre pubblicazioni tecniche cliccando qui:*

<https://www.elettromagneticervices.com/news>

**AntennaSuMisura**

by

**ElettroMagnetic Services**  
SRL

**Trasmettiamo la tua eccellenza!**