



Ricerca Tecnologica e Innovazione 2024

MINISTERO DELLA DIFESA
SEGRETARIATO GENERALE DELLA DIFESA
E DIREZIONE NAZIONALE DEGLI ARMAMENTI



Ricerca Tecnologica e Innovazione 2024

**MINISTERO DELLA DIFESA
SEGRETARIATO GENERALE DELLA DIFESA
E DIREZIONE NAZIONALE DEGLI ARMAMENTI**



Presentazione del Segretario Generale della Difesa/ DNA	Pag. 4
Prefazione del Direttore V Reparto	Pag. 6
Uno sguardo all'organizzazione	Pag. 9
La Ricerca in ambito Nazionale	Pag. 19
La Ricerca in ambito Internazionale	Pag. 137
Riassunto statistico - finanziario	Pag. 155
Sigle e acronimi	Pag. 159

PRESENTAZIONE

DEL SEGRETARIO GENERALE DELLA DIFESA E DIRETTORE NAZIONALE DEGLI ARMAMENTI

Con il **“Rapporto sulla Ricerca Tecnologica e Innovazione”**, il Segretariato Generale della Difesa/DNA presenta i principali risultati ottenuti nel **2023** dai progetti di ricerca tecnico-scientifica supportati dalla Difesa. Si tratta di attività fondamentali che, coinvolgendo e stimolando le migliori realtà nazionali in ambito accademico, scientifico e produttivo, concorrono a perseguire l’obiettivo di mantenere e incrementare il **vantaggio tecnologico nazionale**. Un **obiettivo strategico** che, alla luce delle attuali **dinamiche geopolitiche** e delle **traiettorie di sviluppo tecnologico**, ha assunto ancora più centralità.

Infatti, la natura dei conflitti moderni ha evidenziato come la tecnologia giochi un ruolo più complesso e stratificato, rispetto al secolo scorso, tanto da rappresentare la **frontiera della competizione**. Allo stesso tempo tutto questo accade mentre ci avviamo verso una **nuova rivoluzione industriale**, trainata dall’Intelligenza Artificiale. Un contesto, quello attuale, che rinforza la grande **attenzione della Difesa alla ricerca scientifica**, riconosciuta quale vettore essenziale per contribuire allo sviluppo tecnologico, non solo delle nostre Forze Armate, ma dell’intero Paese.

La **tecnologia genera crescita** e produce **effetti trasversali in tutti i settori**, a prescindere dall’ambito di applicazione. Basti pensare come storicamente la ricerca e lo sviluppo tecnologico in campo militare abbiano positivamente influenzato il progresso della nostra società (da internet, al sistema GPS, ai droni) per comprendere come la tecnologia rappresenti un **settore ad alta valenza strategica per l’intero Paese**, capace di influenzare il progresso e il benessere della società in tempo di pace e di dominare il campo di battaglia in caso di guerra. In sostanza, il raggiungimento di un elevato grado di **sovranità tecnologica** rappresenta contemporaneamente un’opportunità



di crescita economica e sociale in campo civile e, in quello militare, una preconditione essenziale per garantire l’operatività e l’autonomia strategica delle nostre Forze Armate, affinché siano in grado di assolvere le proprie missioni e salvaguardare gli interessi nazionali.

Esiste, quindi, una relazione intrinseca che lega la **salvaguardia degli interessi nazionali** con l’**operatività dello strumento militare** e quest’ultimo con la **sovranità tecnologica** e con la capacità di muoversi in maniera proattiva nel campo dell’innovazione.

Per questo motivo, il Ministero della Difesa, attraverso il Segretariato Generale della Difesa/DNA, pone in essere ogni sforzo possibile per operare in sinergia con tutte le realtà nazionali, pubbliche e private, interessate all’innovazione tecnologica e, allo stesso tempo, promuove e partecipa attivamente alle principali iniziative di ricerca in campo internazionale, nell’ambito delle alleanze strategiche di riferimento e con Paesi *like-minded*.

Parallelamente, nel corso dell'ultimo anno, in coerenza con le linee programmatiche del Signor Ministro della Difesa, è stata condotta un'analisi critica dell'attuale modello organizzativo dell'innovazione e della ricerca tecnologica in ambito Dicastero, al fine di individuare le soluzioni più idonee per:

- “rafforzare le sinergie con il mondo accademico, i centri di ricerca e il comparto industriale, non trascurando le PMI, le *start-up* e i gruppi informali di esperti”;
- ridurre i tempi del ciclo di innovazione nell'ambito del PNRM, garantendo maggiore flessibilità organizzativa e operativa delle strutture deputate a gestire i processi di innovazione tecnologica;
- assicurare una maggiore convergenza fra gli obiettivi di innovazione tecnologica e di raffor-

zamento della base industriale del Paese con le esigenze capacitive dello strumento militare.

Le sfide da affrontare in questo campo non sono semplici, perché si inquadrano in uno scenario geopolitico e tecnologico altamente dinamico e competitivo. Per questo motivo, sarà necessario continuare nel percorso intrapreso, mettendo a sistema tutte le eccellenze del Paese e aspirando a *performance* sempre migliori, che riconoscano all'Italia, e al suo Sistema Difesa, il posto che le spetta di diritto nel panorama internazionale, per lo *standing* del suo mondo accademico, della sua industria e delle sue Forze Armate.

Il Segretario Generale della Difesa/DNA
Generale di Corpo d'Armata
Luciano PORTOLANO

PREFAZIONE

A CURA DEL DIRETTORE DEL V REPARTO - INNOVAZIONE TECNOLOGICA

Viviamo ormai in un mondo in costante e repentino cambiamento, nel quale esistono sempre meno certezze. Nel campo della Difesa, dove la tecnologia è un fondamentale fattore di efficienza e competitività, l'esigenza di guardare al futuro per individuare nuovi percorsi e anticipare le scelte è ancora più essenziale che altrove, anzi è vitale per gli interessi del Paese. Di qui l'importanza della ricerca militare, che tradizionalmente funge da traino per tutto il settore industriale in termini di idee innovative e spunti programmatici.

Nella piena consapevolezza di questa realtà e della necessità di una continua e virtuosa interazione e cooperazione della Difesa con il contesto civile, a iniziare da quello universitario, si svilupperanno quindi convintamente le attività del Reparto illustrate nel presente documento, con un occhio particolare ai giovani e al loro naturale entusiasmo, perché innovazione ed entusiasmo sono due facce irrinunciabili della stessa medaglia.

Dirigente Generale
Dott.ssa Giovanna ROMEO

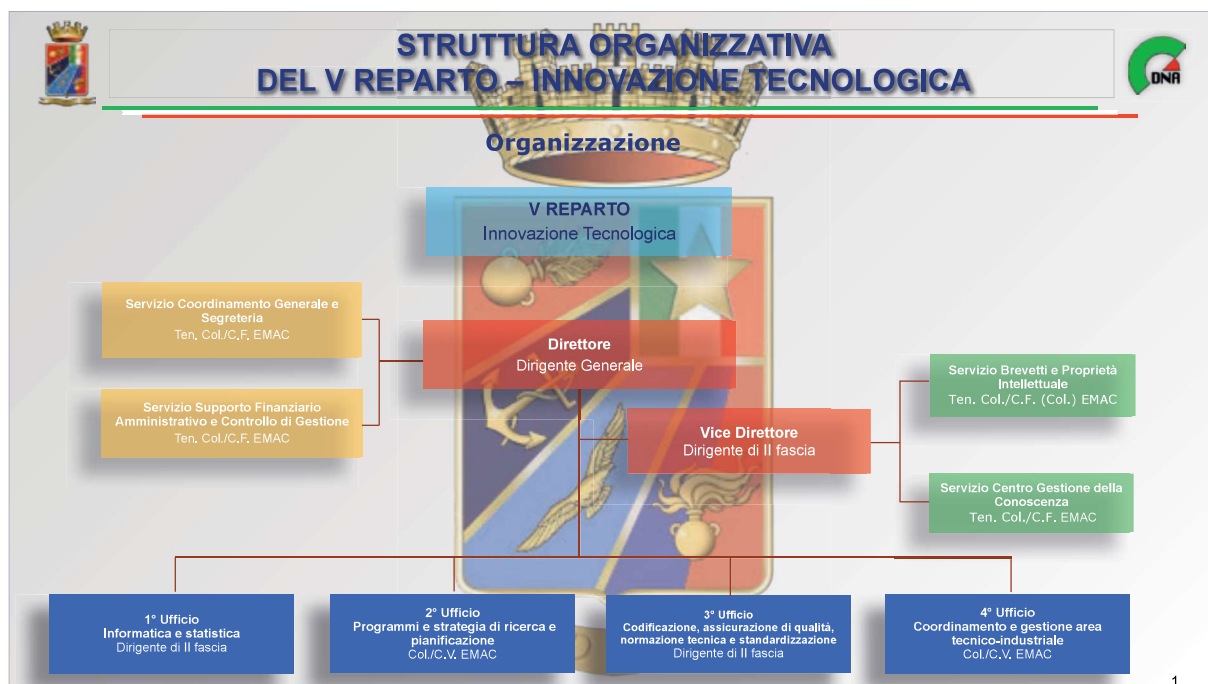




UNO SGUARDO ALL'ORGANIZZAZIONE



STRUTTURA ORGANIZZATIVA



Il Segretariato Generale della Difesa/DNA, attraverso l'azione del V Reparto "Innovazione Tecnologica", individua, promuove e avvia, nell'ambito nazionale e della cooperazione internazionale, progetti e programmi di ricerca tecnologica (R/T) per la Difesa, la c.d. "ricerca militare".

Questo avviene grazie alle attività e competenze delle unità organizzative che compongono il suddetto Reparto, schematicamente rappresentato nella soprastante figura, tra le quali - in particolare - il 2° Ufficio, che, a vario titolo, si occupa di ricerca, sperimentazione e test e delle relative strategie di pianificazione.

Tale attività di ricerca comprende una serie di iniziative, prioritariamente allineate con i criteri e le indicazioni dello Stato Maggiore della Difesa (SMD), che identifica le aree di primario interesse tecnico-capacitivo (i cosiddetti *cluster*) verso cui orientare la stessa. Tra queste iniziative troviamo:

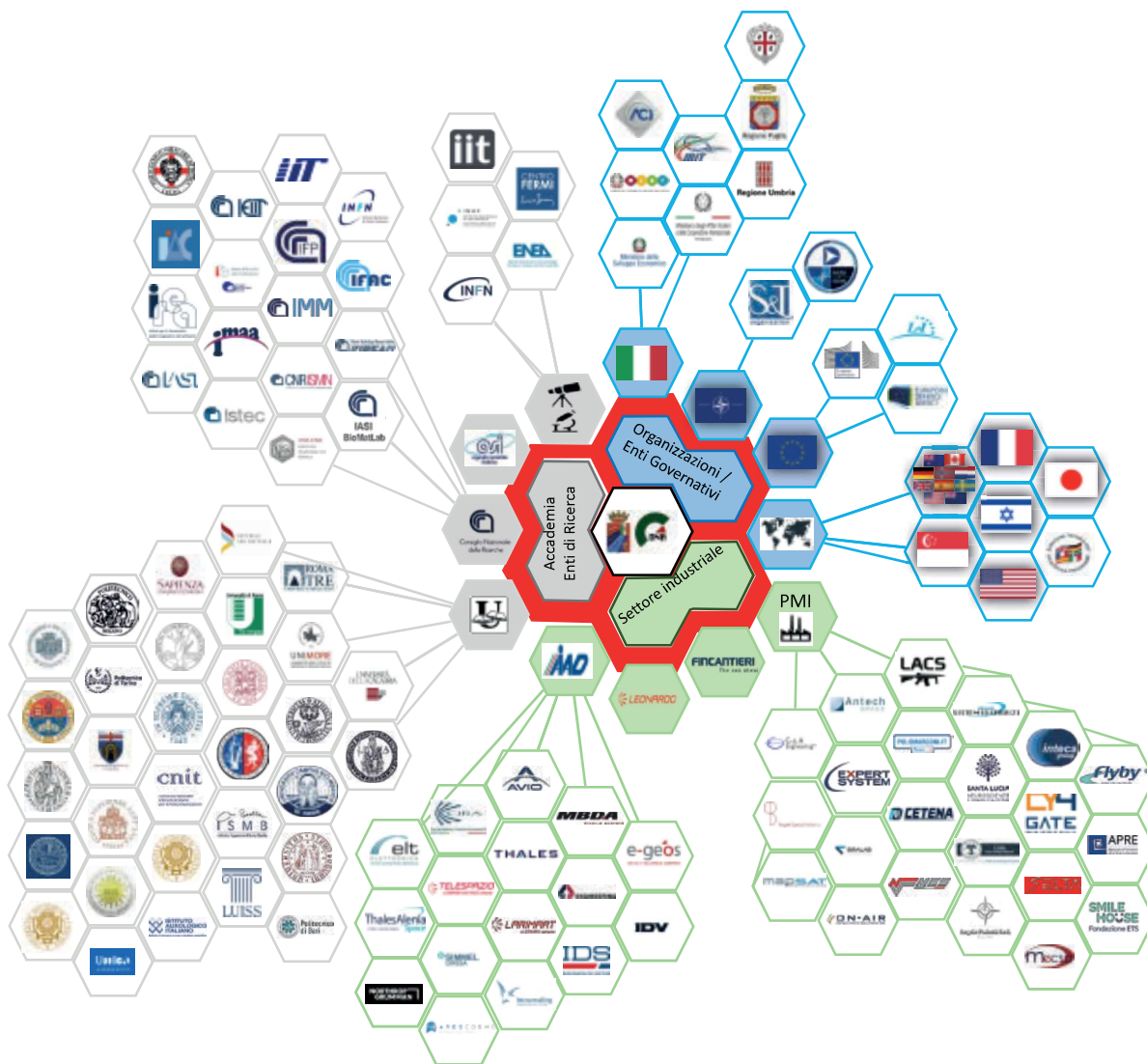
- il **Piano Nazionale della Ricerca Militare (PNRM)**, rivolto a industrie, piccole e medie imprese, *startup*, università ed enti di ricerca nazionali, pubblici e privati, con l'obiettivo di mantenere e potenziare i livelli di eccellenza nazionale in specifici settori tecnologici di interesse per la Difesa.
- i **Progetti di ricerca tecnologica svolti presso i Centri di test della Difesa**, che mirano a orientare e rafforzare le capacità della Difesa nel settore del *Test and Evaluation* (T&E).
- gli **Accordi Quadro con Università ed Enti di ricerca**, finalizzati a incrementare il patrimonio di conoscenze scientifiche e tecnologiche della Difesa.
- i **Programmi internazionali**, sviluppati prevalentemente in ambito UE (EDA - *European Defence Agency* ed EDF - *European Defence Fund*), NATO (STO - *Science & Technology Organization*, DIANA - *Defence Innovation Accelerator for The North Atlantic*, NIF - *Nato Innovation Fund*) e bi-/multilaterali.

LA “RETE” PER LA RICERCA TECNOLOGICA

L'ORGANIZZAZIONE ESTERNA

L'efficacia della strategia di innovazione e ricerca tecnologica messa in atto dal Segretariato Generale della Difesa/DNA si basa sulla realizzazione e sul costante aggiornamento di una rete di relazioni esterne con elementi/organizzazioni altamente specializzati, eterogenei ed aventi diversificati obiettivi,

che concorrono in maniera sinergica al conseguimento delle linee di indirizzo della Difesa nel campo dell'innovazione e della ricerca. Tale rete di relazioni tenute dal Segretariato Generale della Difesa / DNA si articola su tre capisaldi, ovvero le organizzazioni governative, scientifiche (università/enti accademici e di ricerca) e il comparto industriale.



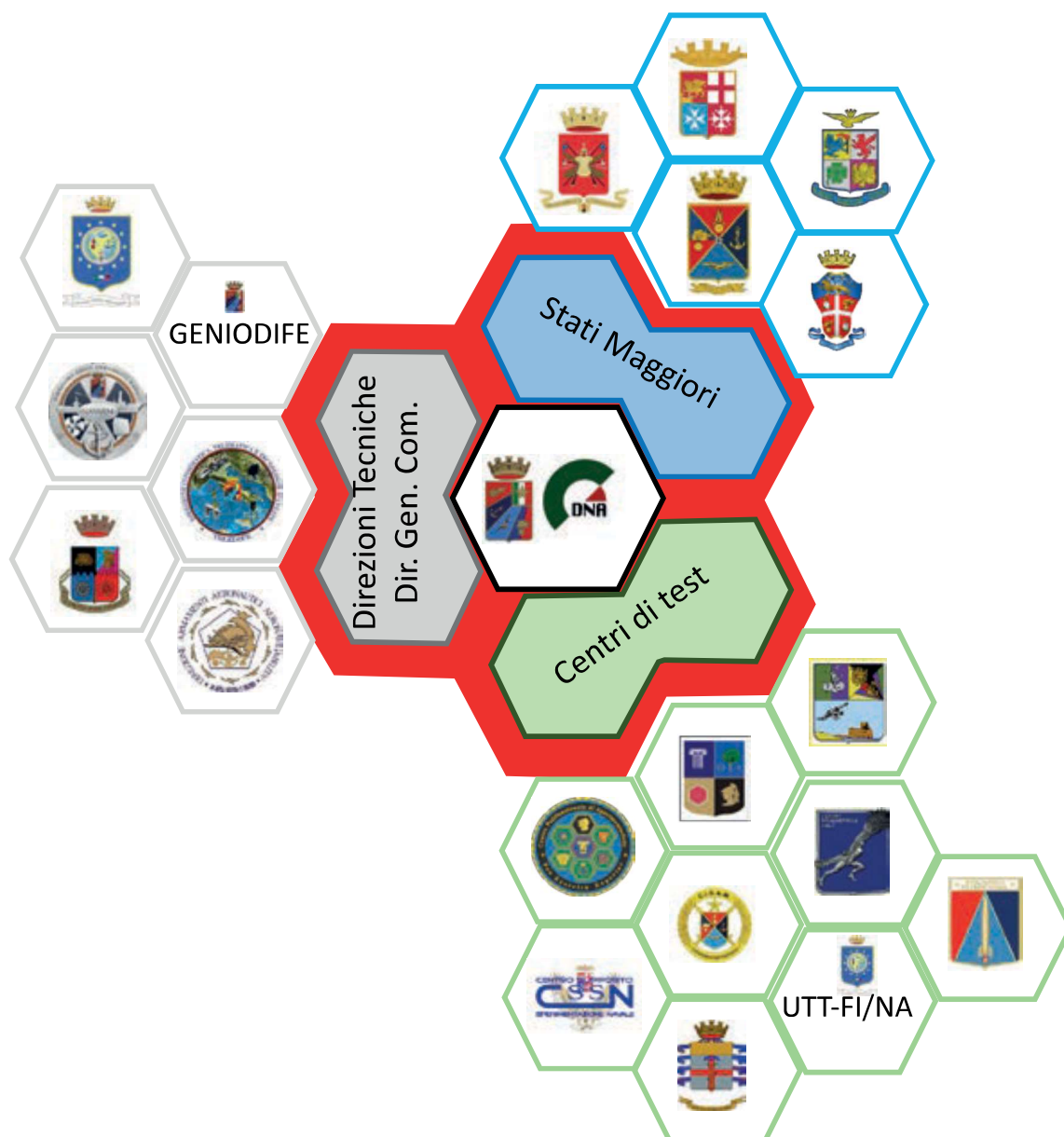
L'ORGANIZZAZIONE INTERNA

Strumento altrettanto imprescindibile per l'individuazione degli obiettivi, la gestione e lo sfruttamento della conoscenza è l'organizzazione interna della Difesa afferente alla ricerca tecnologica, che può anch'essa essere schematizzata secondo tre cardini organizzativi:

- lo Stato Maggiore della Difesa e quelli delle Forze Armate (FF.AA.), orientati a individuare gli obiettivi della ricerca tecnologica e a sfrut-

tare i risultati, nell'ottica delle prospettive di sviluppo capacitivo;

- le Direzioni Tecniche e Generali (DD.TT. e DD.GG.) del Segretariato Generale della Difesa/DNA, indispensabili per la competenza tecnica e gestione dei progetti;
- i Centri di Test delle FF.AA., banco di prova ideale per la validazione e valorizzazione sperimentale degli esiti finali dell'attività di ricerca, spesso consistenti in dimostratori tecnologici.



OBIETTIVI STRATEGICI

Secondo l'Atto di indirizzo del Ministro della Difesa, l'ammodernamento dello strumento militare richiede il sostegno e l'armonizzazione della ricerca tecnologica che dovrebbe essere orientata al conseguimento degli obiettivi di sviluppo capacitativo delle Forze Armate, coinvolgendo in modo sinergico tutti gli Enti della Difesa che si occupano di ricerca, sperimentazione e test, sia in ambito di sviluppo che operativo.

I discendenti obiettivi strategici dei programmi di ricerca scientifica e tecnologica per la Difesa sono incentrati su diverse aree di intervento, volte a individuare e tutelare le tecnologie considerate di "valenza strategica" al fine di garantire la sovranità tecnologica nazionale e garantire il sostegno ai progetti nazionali o di interesse nazionale all'interno dei programmi di cooperazione dell'Unione Europea. Ciò viene realizzato in collaborazione con il settore industriale della difesa, al fine di mantenere e sviluppare il "know-how" tecnologico specifico del settore e implica la collaborazione con partner nazionali e internazionali nel settore industriale e la ricerca di sinergie con centri di ricerca e università.

Per raggiungere tali obiettivi, la strategia del Segretariato Generale della Difesa/DNA, tramite il V Reparto "Innovazione Tecnologica", si basa su approcci *capability-pull* e *technology-push* e prevede azioni di coordinamento e collaborazione tra diverse organizzazioni, come Ministeri, centri di ricerca, industria e enti scientifici, mirando a creare una rete di relazioni sinergiche per la ricerca tecnologica, in collaborazione con organizzazioni governative, scientifiche e industriali.

Le conseguenti attività di ricerca tecnologica per la Difesa comprendono diversi ambiti, come il Piano Nazionale della Ricerca Militare (PNRM), i progetti di ricerca e sviluppo tecnologico con-

dotti presso i Centri di test della Difesa, gli Accordi Quadro con università e enti di ricerca, nonché i programmi internazionali sviluppati in ambito UE, NATO e bilaterale.

I settori di interesse prioritario per la ricerca tecnologica militare, in piena coerenza con le esigenze capacitive della Difesa, perseguono l'obiettivo di adeguare lo Strumento militare alle sfide future cercando di intercettare l'elevatissima dinamicità evolutiva delle principali tecnologie emergenti di interesse.

In particolare sono definiti tre macro obiettivi da cui discendono gli indirizzi e le priorità:

- (1) disporre di Forze Armate efficienti ed efficaci, realmente integrate e multidominio:

C2 e Multi-Domain Situational Awareness: soluzioni in grado di ricevere, combinare e rappresentare in modo integrato dati provenienti da sensori e sistemi militari e civili appartenenti ai cinque domini operativi (terrestre, marittimo, aereo, cibernetico e spaziale), inclusi gli ambienti informativo ed elettromagnetico ed assicurare la capacità di pianificare e condurre le operazioni multidominio¹. Le soluzioni individuate dovranno essere in grado di assicurare la piena interoperabilità dei sistemi, delle funzioni e degli elementi del Comando e Controllo (*Advanced Interoperability*), la flessibilità tecnologica intesa come la capacità di integrare rapidamente le nuove tecnologie nei sistemi già in uso (*Continuous Technology Integration*), la centralità dell'informazione (*Data centrality*), oltre alla agilità, portabilità e scalabilità in termini di classifica e grandezza secondo il modello del MOSA (*Modular Open Systems Approach*)

- (2) potenziare la capacità di operare nei domini Spazio e Cyber e negli ambienti urban e

¹ Attività militari condotte anche in più domini per percepire, comprendere e, successivamente, orchestrare effetti convergenti finalizzati a generare dilemmi multipli ad una velocità tale da superare la capacità decisionale avversaria. La condotta di tali attività avviene attraverso la sincronizzazione delle azioni militari con gli altri strumenti del Potere nazionale e/o con alleati e partner, sotto una struttura di comando e controllo sincronizzata.

underwater e di generare effetti anche nella dimensione cognitiva:

- **Tecnologie spaziali:** sviluppo sensori/assetti per la *Detection, Mitigation e Protection* da nuove minacce nello specifico dominio (Ipersonico, Sistemi Anti-Satellite - ASAT, *Space based Early Warning Missile*); *Military Satellite Communications* – MIL-SATCOM (incluso lo sviluppo di forme d'onda di comunicazione a banda stretta innovative per operazioni in scenari EM complessi), Osservazione della Terra, Accesso allo Spazio, *Responsive Space Capabilities, Space Domain Awareness (SDA), In-Orbit Servicing*, Sorveglianza spettro elettromagnetico, piattaforme stratosferiche;
- **Tecnologie cyber:** soluzioni per il conseguimento della consapevolezza situazionale nel *cyberspace*, per il monitoraggio e per la difesa dei sistemi *Information Technology (IT)* e *Operational Technology (OT)* nel campo di battaglia / infrastrutture critiche sul territorio nazionale, nonché di attacco nel dominio cibernetico. Soluzioni tecnologiche per il contrasto alle attività di *influence* e di disinformazione nel *cyberspace*. Soluzioni tecnologiche che consentano, attraverso lo sfruttamento dello spettro elettromagnetico, di generare effetti nel *cyberspace (Cyber Electro-Magnetic Activities - CEMA)*;
- **Underwater:** tecnologie per il controllo della dimensione subacquea, per la sorveglianza e la protezione delle infrastrutture critiche (settori energetico e comunicazioni), e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi che vi operano;
- **Urban warfare:** tecnologie per la mappatura, il controllo e lo sfruttamento delle caratteristiche del territorio urbano e del relativo sottosuolo e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi militari che vi operano (inclusi Sistemi *Unmanned*).

- **Cognitive warfare:** tecnologie e metodologie per la mitigazione e lo sfruttamento di strumenti inerenti l'influenza, l'interferenza o l'alterazione atti a incrementare o degradare le capacità della mente umana.

(3) proseguire nelle attività di studio, ricerca, applicazione e valorizzazione delle *Emerging and Disruptive Technologies (EDTs)*:

- **Intelligenza Artificiale:** soluzioni supportate dall'utilizzo di modelli di Intelligenza Artificiale in tutte le sue forme (statistiche, logiche e semantiche), anche *multi-agent*, per l'efficientamento di casi d'uso tipicamente militari (sia operativi che gestionali), almeno in una fase di sviluppo (semplificazione e standardizzazione, digitalizzazione, automatizzazione, *analytics* avanzate e implementazione di tecnologie cognitive) e in aree come:

- a. Comando e Controllo;
- b. ISTAR;
- c. Sicurezza;
- d. *Combat Support*;
- e. Sistemi Autonomi;
- f. Efficientamento dei processi di staff;
- g. *Data Management* (inclusa la *Data Centric Security*);
- h. Logistica;
- i. Formazione adattiva;
- j. Amministrativa;
- k. Addestramento;
- l. Assistenza sanitaria,
- m. *Image and Video Analytics*;
- n. Manutenzione predittiva degli *asset*;
- o. Miglioramento dei sistemi d'arma e di allarme;
- p. Sicurezza energetica.

concentrandosi sia sulle tecnologie di base che sulle aree di applicazione tecnologica e sulle caratteristiche di prestazione.

- **Tecnologie quantistiche:** soluzioni basate sul *Quantum Sensing* (contemplando in esso anche il *Quantum Position, Naviga-*

tion and Timing - PNT), Quantum Communication e Quantum Computing (Information Science);

- **Sistemi Autonomi:** tecnologie per lo sviluppo e il contrasto dei *Robotic Autonomous Systems* (RAS), *Unmanned Systems* (UxV) in tutti i Domini Operativi, tecnologie abilitanti per l'iteroperabilità multi dominio e per l'implementazione di:
 - a. Capacità di *Swarming*;
 - b. Tecniche/capacità di *Hardenizzazione*²;
 - c. Tecnologie di *Manned-Unmanned Teaming* (MUMT).
- **Sviluppo sistemi complessi di nuova generazione:** sviluppo di armi ad energia diretta (*Laser ed ElectroMagnetic Pulse - EMP*) e di sistemi di difesa dalle stesse; sviluppo di capacità in grado di penetrare i sistemi di difesa aerei avversari³ e di soluzioni volte a incrementare l'efficacia dei propri; sviluppo di droni armati e *loitering munitions* e di sistemi di difesa dagli stessi;
- **Potenziamento capacità operative del soldato:** incremento capacità di difesa e offesa (armamento individuale caratterizzato da maggiore letalità e capacità di ingaggio, esoscheletri equipaggiamento protettivo innovativo e sempre più performante), incremento autonomia energetica per alimentazione equipaggiamento e dotazioni C2, *human enhancement*, soluzioni avanzate di *awareness*, prevenzione, rilevazione e contrasto della minaccia CBRN, sviluppo Biosensori e applicazioni di Bioelettronica per la monitoraggio dei parametri vitali e delle condizioni di stress dei combattenti, riduzione degli effetti negativi delle infermità;
- **Nano tecnologie, Novel materials and manufacturing:** sviluppo di materiali

altamente performanti, resistenti ad altissime temperature e stress elevati, con peculiari proprietà e caratteristiche meccanico - strutturali e/o elettriche/elettroniche/elettro-ottiche, *stealth*, superconduttori, mimetizzazione adattiva, utilizzando anche tecnologie di stampa 3D.

- **Tecnologie Ipersoniche:** sviluppo di soluzioni relative a materiali, sistemi di propulsione, sistemi di guida, teste in guerra, simulazione profili di volo delle minacce (al fine di individuarne i limiti), sensoristica (spaziale/aerospaziale, terrestre e navale) e attuatori innovativi (o implementazione di soluzioni innovative atte a incrementare le *performance* degli attuatori esistenti).
- **Adattamento agli effetti del Climate Change – Sostenibilità ambientale, sicurezza e resilienza energetica, efficientamento del parco infrastrutturale, adeguamento mezzi, sistemi ed equipaggiamenti:** soluzioni per la riduzione del *footprint* logistico, ambientale, sicurezza ed efficientamento energetico delle infrastrutture e dei mezzi militari (*smart building*, *Nearzero Energy Building*, strutture campali, biocarburanti e propulsioni ibride/Fuel Cells, fonti energetiche rinnovabili in ambito militare, *Energy Management System* e diversificazione sistemi di approvvigionamento), tecnologie per l'adattamento/mantenimento a standard ottimali di prestazione delle piattaforme, dei sistemi d'arma e dell'equipaggiamento del personale agli effetti generati dai cambiamenti climatici.
- **Reti di comunicazione di nuova generazione:** soluzioni supportate dall'utilizzo delle tecnologie 5G (inclusa la loro in-

2 Processo di "indurimento"/schermatura che consente di proteggere i circuiti elettronici dagli effetti nocivi di impulsi elettromagnetici ad alta potenza (*ElectroMagnetic Pulse - EMP*).

3 Includere "bolle" di tipo *Anti-Access/Area Denial* (A2/AD).

tegrazione con le NTN - *Non Terrestrial Network*) e 6G. Ricerca sull'architettura e l'identificazione dei parametri delle reti di prossima generazione. Sviluppo di antenne 4D e di trasmettitori a bassa frequenza per operazioni sotterranee/subacquee. Sviluppo di apparati di comunicazione caratterizzati da maggiore resilienza alla guerra elettronica e con requisiti ridotti in termini di dimensioni, peso, potenza e larghezza di banda.

Questi macro obiettivi con i relativi indirizzi e priorità, che rappresentano le aree di interesse strategico per la ricerca tecnologica militare e l'ammodernamento delle capacità della difesa, si allineano con gli aggregati capacitivo-tecnologi-

ci prioritari identificati annualmente con lo Stato Maggiore della Difesa. L'individuazione di tali indirizzi e le priorità consente una programmazione e gestione più efficace ed efficiente delle risorse finanziarie, riducendo la frammentazione delle attività di ricerca tecnologica e la dispersione delle risorse su molteplici e diverse iniziative.

Detto approccio, che rappresenta per il Segretariato Generale della Difesa/DNA un indirizzo strategico e organizzativo da perseguire costantemente, sarà d'ausilio alla costruzione di un nuovo condiviso *mindset* dell'A.D. per l'Innovazione, volto alla continua promozione di un'organizzazione militare e civile integrata, efficiente incubatrice di nuove idee e concetti tecnici per la Difesa.





LA RICERCA IN AMBITO NAZIONALE



INTRODUZIONE

Nell'alveo dei programmi di ricerca condotti dal Segretariato Generale della Difesa/DNA nel corso del 2023, sono di seguito presentati i risultati di alcuni progetti, in quanto ritenuti

esemplificativi delle attività tecnico - scientifiche, in corso di esecuzione o terminati, di rilevanza tecnologica per il comparto Difesa e sicurezza:

- Sistema avanzato di elaborazione del segnale sonar - *Advanced Sonar Signal Processing System* (**ASSPS**)
- Prototipo di comunicazione quantistica subacquea (**QuSUB**)
- Studio del sistema di comunicazione Satcom Antenna Bi Banda X-Ka con radome multiuso (**SABB-XKa**)
- Seeker AESA Multi-missione a basso costo in banda X (**SAMBA.X**)
- Sicurezza crittografica nei sistemi di automazione (**CRYPTOBOX**)
- Motore termico V6 aggiornato per veicolo blindato medio (**V6-HPOWER**)
- Creazione di metodi predittivi per la progettazione e ottimizzazione di elmetti balistici (**CRANOS**)
- *Miniaturized Redundant FOG-INS* (**MRFOGINS**)
- Sistema proattivo anti-UAV per protezione carri armati e pattuglie nelle aeree urbane (**PROACTIVE**)
- Innovativo veicolo *tout terrain* 4-2 posti, *full hybrid* (**FHYW44**)
- Sistema innovativo per navigazione e posizione sicura in assenza di segnale GNSS (**SINAPSIS**)
- Spazio-piano suborbitale ipersonico in grado di supportare il carico utile nell'inserimento in orbita (**HYPERION**)
- Stazione di controllo interoperabile a terra senza equipaggio - *Manned unManned Ground Interoperable Control Station* (**MAGICS**)
- Applicazione di metodologie HUMS e *Vulnerability/Survivability* a piattaforme RPAS (**ZENIT**)
- Electronic Warfare Quantum (**EQW**)
- Tecnologie sviluppate nel settore delle telecomunicazioni su fibra ottica - *Gigabps InfraRed Laser* (**GIRL**)
- Sviluppo di un modem 5G per UAV per comunicazione LOS e BLOS (**M5G**)
- Super-risoluzione spaziale per immagini iperspettrali satellitari (**SR4IS**)
- Studio di sistema e del segmento spaziale con Adattività d'Antenna, su larga banda, per funzioni di *beam steering* e anti-interferente (**ADAPTIVE**)
- Cattura Caratterizzazione e Controllo di artropodi vettori e relativi patogeni (**C3Lab**)
- Un pacchetto composto da sci, attacchi e sensoristica dedicata (**SCIARE CON DISABILITÀ**)

Il Progetto ha come scopo l'applicazione di algoritmi di *sonar signal processing* affiancati dall'utilizzo di reti neurali specificatamente addestrate che consentano la scoperta passiva e la stima del DoA (*Direction of Arrival*) di *target* in ambienti *deep* e *shallow water*, ponendosi inoltre l'obiettivo di realizzare un sistema completamente integrabile nei sistemi di comando e controllo. Nella fase 1 del Progetto sono stati definiti, con il supporto di esperti del settore messi a disposizione dall'Amministrazione Difesa, i requisiti necessari per implementare l'innovazione nel sistema, sia per la parte di analisi classica del segnale sonar che per l'introduzione delle reti neurali. Il risultato è stato l'orientamento verso una soluzione ibrida che mira a sfruttare i vantaggi di entrambe le tecnologie. Nella seconda fase del Progetto verrà condotta la realizzazione dei moduli *software* e del *dataset* sintetico per l'addestramento delle reti neurali e il *testing*. La fase finale avrà l'obiettivo di testare e validare l'output del Progetto. L'interfaccia uomo macchina prodotta è risultata ottima durante le fasi di collaudo e gli elementi aggiuntivi, la cui integrazione è già pianificata, promettono di incrementare le prestazioni e fornire un supporto alla decisione per l'operatore Sonar superiore agli standard attuali.

INTRODUZIONE

Il Progetto esplora lo stato dell'arte degli algoritmi di *sonar signal processing* con il miglior rapporto fra la performance, in termini di detezione rispetto alla potenza computazionale impiegata e di sensibilità a rumore di fondo e *multipath*, tipici di ambienti *shallow water*. Il set di algoritmi selezionati sarà confrontato in termini di *key performance index* e ottimizzato con l'applicazione di reti neurali specificatamente addestrate. Questo permetterà al sistema di eseguire la scoperta passiva e la stima del DoA di *target*. L'obiettivo del Progetto, oltre alla parte *real time* di analisi e detezione, è anche quello di realizzare un sistema che favorisca una maggiore integrazione del sonar con il sistema di comando e controllo rispetto ai sistemi tradizionali, attraverso uno scambio bidirezionale di informazioni sui *target*. Il vantaggio dell'utilizzo delle reti neurali è quello di poter riaddestrare successivamente la rete, sia sulla stessa tipologia di *target* migliorandone le *performance* grazie all'utilizzo di un *dataset* più vasto, sia su

tipologie di *target* differenti, tramite un semplice riaddestramento del classificatore ovvero senza la necessità di modificare sostanzialmente la struttura della rete neurale.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Al giorno d'oggi il panorama di *signal processing* di flussi dati sonar si concentra su algoritmi classici di natura statistica e su sistemi *stand alone*, non integrati nei sistemi di comando e controllo. Le caratteristiche acustiche degli ambienti *shallow-water* variano sia nello spazio che nel tempo, con un alto livello di rumore di fondo e gli algoritmi convenzionali utilizzati di tipo a soglia sono spesso soggetti ad un alto numero di falsi di allarmi. Un sistema sonar di tipo *stand alone* si limita dunque ad uno scambio di dati minimale con il sistema di controllo, ricevendo i dati della nave e trasmettendo le tracce sonar. Come problema attuale, le informazioni sui *target* vengono infatti scambiate tra il sistema sonar e quello di comando

e controllo in maniera unidirezionale a favore di quest'ultimo ed i dati *raw* del sonar non vengono messi a disposizione ai sistemi esterni alla piattaforma che ospita il sonar.

Il Progetto riflette le indicazioni contenute nel “Documento Programmatico Pluriennale (DPP) della Difesa per il triennio 2021-2023”, con particolare *focus* sulla Componente Interforze, Consultazione, Comando e Controllo (C3) e l'interoperabilità ed integrazione in senso multi-dominio dello Strumento militare nazionale. Oltre alla chiara connotazione nazionale, il Progetto è volto allo sviluppo di capacità e sistemi interconnessi e in grado di inter-operare tra di loro ed in un ambiente sempre più digitalizzato, ove le capacità di sorveglianza, raccolta di informazioni e comando e controllo, anche in posizioni avanzate, si rivelano determinanti per una migliore capacità decisionale e rapidità di risposta al mutare delle situazioni.

METODOLOGIA

L'integrazione di tecniche di intelligenza artificiale nella detezione e classificazione sonar ha definito una soluzione che consiste in un ibrido tra il *processing* classico [1][2][3] e l'utilizzo di reti neurali [4], per combinare la scoperta e la stima del DoA (*Direction of Arrival*) di sorgenti di ru-

more acustico in banda larga in situazioni di SNR (*signal-to-noise ratio*) variabile. La creazione del necessario *dataset* per realizzare sia un buon addestramento che la validazione della rete, consiste nella raccolta di un set di dati sintetici, con caratteristiche estrapolate da segnali reali, generati in quantità adeguata. Come nei sonar attuali, i dati acquisiti vengono prima processati da un *beamformer* convenzionale, in modo da ottenere in *output* un segnale per ogni DoA con una risoluzione in angolo prefissata che dipende dalla dimensione dell'*array* e dal numero di sensori. In fase di *training* viene utilizzato un *subset* di questi dati per realizzare un classificatore, il quale utilizza i recenti progressi delle reti neurali per distinguere tre rumore di fondo ed oggetti di interesse allo scopo di predire il DoA del *target*. Il sistema sarà anche in grado di utilizzare informazioni provenienti da altri sistemi di bordo per migliorare le sue performance di scoperta e stima del DoA dei *target*. In ingresso alla rete neurale vengono utilizzate rappresentazioni tempo-frequenza in 2D dei segnali ottenute dai dati originali e poi inviate in ingresso alla rete neurale. Le soluzioni in uscita alla rete neurale ed i rispettivi dati *raw* verranno raccolti e messi a disposizione del sistema di comando e controllo (Figure 1, 2, 3 e 4).

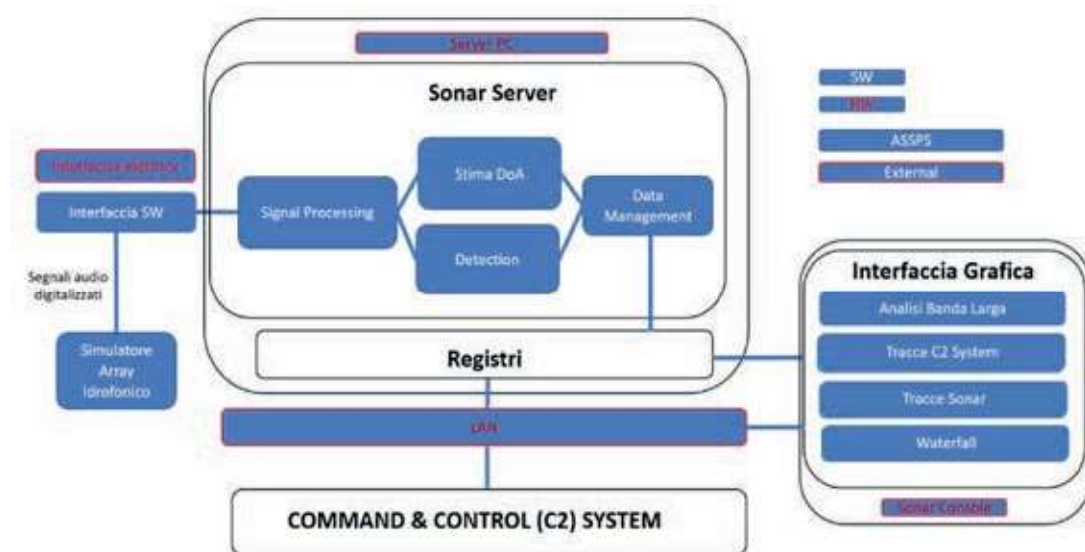


Figura 1 - Schema dell'architettura di sistema.

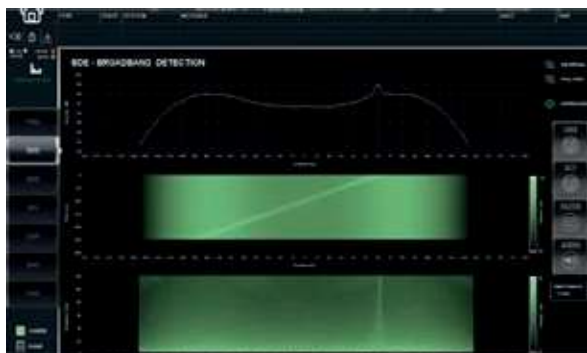


Figura 2 - Esempio di interfaccia utente per l'analisi del segnale sonar passivo.

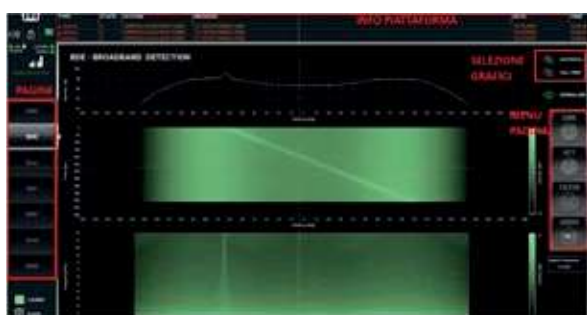


Figura 3 - Interfaccia utente con significato delle barre laterali e di stato.



Figura 4 - Interfaccia utente per l'analisi del segnale sonar passivo su console DRASS.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La principale innovazione proposta nel Progetto è l'introduzione nei sistemi sonar passivi delle innovazioni portate dall'utilizzo di reti neurali nella scoperta di *target* e stima dei rispettivi DoA a banda larga con impiego di algoritmi di scoperta e stima che si dimostrano essere meno sensibili al rumore di fondo alle interferenze ed agli effetti di *multipath* rispetto alle tecniche convenzionali. Inoltre l'evoluzione tecnologica nell'*hardware* di supporto per la computazione garantisce la possibilità di espandere la richiesta di potenza di calcolo da applicare senza intaccare la dimensione e la potenza elettrica necessaria o addirittura ottimizzandole. Risulta dunque possibile effettuare una completa integrazione del sistema di *processing* sonar con quello del sistema di combattimento della piattaforma ospitante, facendo coesistere i dati su un'unica rete di bordo per un'efficace e rapida consultazione e valutazione tattica. L'utilizzo di reti neurali per questo tipo di sistemi può essere adattato in altri campi di valenza militare che utilizzino sia un monitoraggio passivo che attivo di segnali acustici come *surveillance*, *mine detection* ed in tutte le applicazioni in cui è vantaggiosa una classificazione del segnale acustico.

CONCLUSIONI

Nell'ambito delle traiettorie tecnologiche da perseguire nella dimensione subacquea del dominio marittimo uno dei principali obiettivi è quello di supportare la pregiata capacità dell'industria nazionale di costruire autonomamente sottomarini, includendo sempre più i principali sistemi di bordo modo perseguire lo sviluppo di capacità produttive industriali che permettano di attenuare o annullare la dipendenza dell'Italia da forniture strategiche internazionali. Tra i sistemi di bordo spicca sicuramente il sonar, tecnologicamente il più complesso in quanto richiede sia un'elevata capacità a livello di *signal processing* che una tecnologia dedicata per la realizzazione di elementi sensori piezoelet-

trici e per la loro installazione in *array*. L'aggiornamento delle tecniche classiche utilizzate nel *signal processing* e l'applicazione delle reti neurali come strumento di supporto aprono la strada alla realizzazione di nuovi sistemi sonar di ultima generazione, in una dimensione ove i segnali da processare saranno sempre in numero maggiore ed in cui la "trasparenza" delle profondità del mare sta sempre più aumentando. Saranno comunque ne-

cessari operatori sonar esperti in grado di applicare le loro conoscenze all'interpretazione dei risultati forniti dai *software*, pur essendo supportati dall'intelligenza artificiale, ma la potenza di elaborazione del sonar e l'integrazione totale delle informazioni a disposizione nei sistemi di comando e controllo permetterà di aumentare la quantità di dati trattabili, conseguendo una maggiore accuratezza e capacità di classifica dei *target*.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

ASSPS	<i>Advanced Sonar Signal Processing System</i>
C2	<i>Command and Control</i>
DoA	<i>Direction of Arrival</i>
HW	<i>hardware</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
SNR	<i>signal-to-noise ratio</i>
SW	<i>software</i>
PNRM	<i>Piano Nazionale di Ricerca Militare</i>

PAROLE CHIAVE

Comando e Controllo, *Intelligence, Surveillance, Reconnaissance* (ISR), Intelligenza artificiale, sistemi sonar, sonar passivo, analisi segnale sonar.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2021.191
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali - NAVARM
Ente responsabile del progetto:	NAVARM – 1 [^] Rep. – Ufficio di Programma Sommergebili
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	CV (GM-GN) Decio TRINCA
Recapiti del responsabile del progetto:	NAVARM – 1 [^] Rep. – Ufficio di Programma Sommergebili, Via di Centocelle 301, Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	06 469132741
E-mail del responsabile del progetto:	decio.trinca@marina.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

1. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, pag. 108, 3rd ed., Peninsula Publishing, 1983
2. Li, J., Lin, Q.-H., Wang, K., & Kang, C.-Y. (2018). Performance analysis for focused beamformers in passive underwater acoustic localization. IEEE Access, 18200--18208
3. Ma, S. Y. (2004). High-resolution broadband beamforming and detection methods with real data
4. Piczak, K. J. (2015). Environmental sound classification with convolutional neural networks. 2015 IEEE 25th International Workshop on Machine Learning for Signal Processing (MLSP), (pp. 1-6). Boston, MA, USA. doi: 10.1109/MLSP.2015.7324337

La necessità di comunicare tra veicoli sommersi è di fondamentale importanza. Con l'avvento di computer quantistici (CQ) i metodi classici di comunicazione non saranno più sufficienti a garantire segretezza ed integrità della comunicazione. Per rispondere a questo pericolo, il progetto ha l'obiettivo di realizzare un sistema di distribuzione di chiave quantistica (QKD), installato tra veicoli sommersi. Per studiare la fattibilità della QKD, si sono sviluppati dei modelli teorici sulla comunicazione ottica classica e quantistica tra due veicoli sommersi in varie condizioni ambientali. Si è proceduto alla verifica in laboratorio di questi modelli e all'ingegnerizzazione di un dispositivo in grado di poter dimostrare tecnologie di QKD in ambiente sottomarino. In questa fase del progetto si è appurato che, in condizioni ottimali, è possibile stabilire una comunicazione ottica classica di oltre 400 m ed eseguire lo scambio di chiavi via QKD fino a 300 m. Si è altresì progettato un sistema QKD compatibile con contenitori pressoresistenti in grado di essere montati su un veicolo subacqueo *unmanned* (UUV) ed una piattaforma subacquea (*mothership*). L'analisi di fattibilità dimostra che un sistema QKD per lo scambio di chiavi crittografiche tra veicoli sommersi è possibile e rappresenta il metodo più sicuro ed immune all'avvento di CQ.

INTRODUZIONE

Nel contesto delle comunicazioni militari si evidenziano due esigenze fondamentali: velocità e sicurezza. La capacità trasmissiva necessaria per comunicare dati tra postazioni fisse o mobili diventando un requisito sempre più stringente, al contempo l'importanza di tali informazioni spesso richiede *standard* molto elevati di disponibilità, confidenzialità ed integrità del dato.

La QKD permette la creazione di chiavi crittografiche simmetriche garantendo, per le leggi fondamentali della fisica quantistica, la scoperta di ogni eventuale intercettatore. Attualmente, alcuni prototipi hanno dimostrato l'uso di QKD in ambiente sottomarino, raggiungendo la distanza massima di 50 m [1].

In questo progetto realizzeremo una coppia di dispositivi in grado di scambiare chiave crittografiche quantistiche tra un UUV ed una *mothership*. Questi dispositivi saranno in grado di allinearsi automaticamente e rimanere allineati durante il movimento relativo dei due dispositivi (*Tracking*).

Le tecnologie sviluppate in questo progetto, non solo saranno in grado di proteggere la trasmissione di dati tra veicoli militari, ma anche proteggere le comunicazioni necessarie tra il centro operativo ed i sensori e attuatori di infrastrutture subacquee.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Ad oggi, per le comunicazioni subacquee, sono utilizzate tre diverse tecnologie: acustica, a radiofrequenza ed ottica. Tra queste, l'oggetto del progetto QuSUB comprende le comunicazioni di tipo ottico che, negli ultimi anni, hanno riscosso grande successo. Le onde ottiche presentano una elevata velocità di trasmissione (diversi Gbps), ed hanno elevata direzionalità. Questa tecnologia permette di trasmettere dati fino a centinaia di km in fibra ottica ma sono limitate a pochi km in *free space* in aria ed a poche centinaia di metri in acqua. La possibilità di intercettazione, inoltre, non è trascurabile; per questo motivo, negli ultimi anni, si sta intensificando l'esplorazione delle tec-

nologie di comunicazione quantistiche sottomarine per implementare sistemi di QKD che distribuiscono chiavi sicure fra due o più utenti.

La sicurezza della QKD può essere garantita anche nelle ipotesi in cui un intercettatore utilizzi potenza di calcolo e memoria di archiviazione illimitate e qualsiasi dispositivo immaginabile (purché ammesso dalle leggi della fisica). Quindi, la trasmissione delle chiavi crittografiche attraverso un canale aperto, interamente sotto il controllo di un intercettatore, può essere considerata perfettamente sicura (figura 1).

Gli elementi di base di un sistema di QKD (figura 2) sono un trasmettitore (Alice) e un ricevitore (Bob). Le chiavi vengono condivise tramite il collegamento QKD, che solitamente consiste in un canale quantistico e un canale classico autenticato. Il primo è riservato alla trasmissione dei segnali quantistici, come stati di luce attenuata a livello di singolo fotone, per trasmettere stringhe di bit casuali. Il secondo è riservato alla sincronizzazione e allo scambio dati tra i moduli QKD. Ad oggi, diverse dimostrazioni sono state presentate nell'utilizzo della QKD in acqua [2-4], ma sono limitate a test di laboratorio tra dispositivi fissi. Nel progetto, si punta non solo a montare questi dispositivi su veicoli mobili ma anche a realizzare un sistema di comunicazione ottico subacqueo completo.

METODOLOGIA

Il progetto è stato suddiviso in 3 fasi:

- 1) Studio preliminare
- 2) Progettazione e realizzazione prototipo
- 3) Installazione del prototipo e test sul campo

Di queste, la prima fase si è appena conclusa con esito positivo. Nello specifico, nella prima fase si è:

- 1) sviluppato un simulatore *software* per stimare le performance di efficienza di un sistema QKD in ambiente subacqueo;
- 2) validato il simulatore con prove di laboratorio e produzione di un design per trasmettitore e ricevitore del sistema QKD compreso del sistema di *point & tracking*;

- 3) definito del *layout* meccanico dei componenti ottici ed elettronici che compongono il sistema QKD, e progettazione di contenitori stagni e pressoresistenti.

Nel simulatore, sono stati analizzati i fattori ambientali sottomarini che influiscono sulle prestazioni del sistema di comunicazione (classica e quantistica) in diverse aree geografiche e diversi periodi dell'anno.

Durante la validazione, si è caratterizzato il canale sulla base del modello teorico, attraverso prove di laboratorio. È stata studiata l'attenuazione deterministica e l'effetto della turbolenza indotta da variazioni di temperatura, movimento delle masse d'acqua e presenza di bolle d'aria nel mezzo.

Infine, sono stati eseguiti test di trasmissione a singolo fotone per varie condizioni dell'acqua e con i risultati raccolti è stata analizzato il *bit error rate* (classico e quantistico) relativo.

Nella validazione del layout è stata dapprima eseguita una analisi congiunta tra CABI CATTANEO e QTI per:

- 1) determinare la suddivisione ideale dei blocchi funzionali costituenti i sistemi "Alice" e "Bob";
- 2) ottimizzare la disposizione dei componenti all'interno dei contenitori pressoresistenti.

In esito a tale analisi, si è deciso di progettare un unico contenitore per la submarinizzazione del sistema Alice.

Durante la successiva fase del progetto, per quanto riguarda il sistema Bob, è prevista la submarinizzazione della sola sezione di telescopio, necessariamente immersa, mentre elettronica ed ottica potranno essere installate in aria all'interno dello scafo resistente del sottomarino *mothership*. Questa soluzione consentirà di affrontare in maniera agevolata problematiche legate alla dissipazione del calore generato dai rivelatori a singolo fotone. Per Alice, che verrà installata invece a bordo del mezzo *unmanned*, è prevista la totale submarinizzazione, ma non sussistono problematiche analoghe a quelle di Bob.

Durante la Fase 2, inoltre, sono previsti:

- la realizzazione del sistema di *pointing&tracking* necessario all'allineamento fra Alice e Bob;
- il progetto preliminare dell'UUV che ospiterà Alice.

no anche sviluppate tecniche per la trasmissione di dati in ambiente sottomarino utilizzando luce visibile, incrementando la velocità di trasmissione di dati di diversi ordini di grandezza rispetto alle velocità possibili con comunicazioni

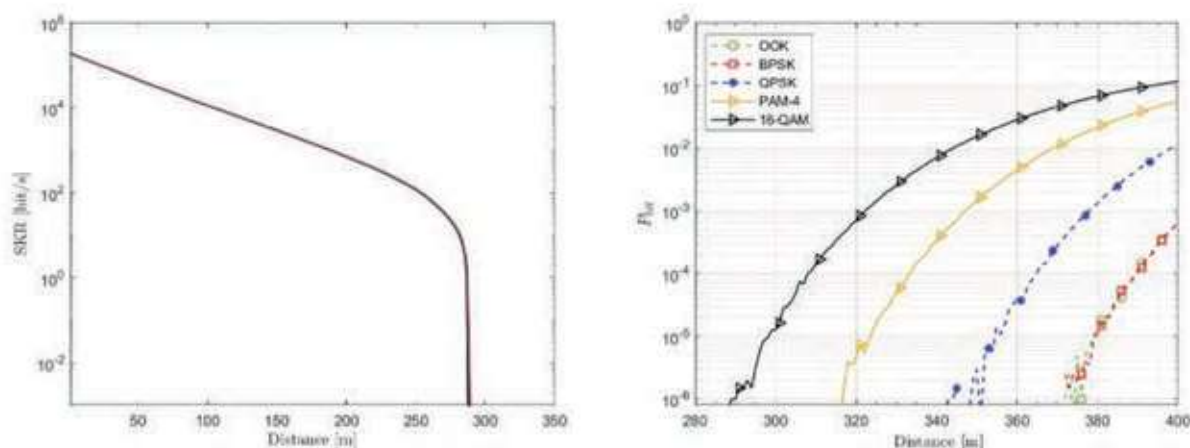


Figura 1 - Risultati ottenuti dal simulatore software. A sinistra, è riportato la frequenza di produzione di chiave (SKR) verso la distanza tra Alice e Bob di un sistema QKD in ambiente subacqueo. A destra, sono riportate le probabilità di ricevere un bit errato (BER) nel sistema di comunicazione classica simulato in funzione della distanza di trasmissione / Results obtained from the software simulator. On the left, you can see the Secret Key Rate (SKR) as a function of the distance between Alice and Bob of a QKD system in an underwater environment. On the right, the Bit Error Rate (BER) in the simulated classical communication system as a function of transmission distance.



Figura 2 - Rendering del trasmettitore del sistema QKD progettato durante questa fase del progetto / Rendering of the QKD system transmitter designed during this phase of the project.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le tecnologie sviluppate in questo progetto permetteranno di individuare qualsiasi tentativo di intercettazione di scambio di chiavi crittografiche tra veicoli sommersi. Questo permetterà di poter stabilire una comunicazione sicura tra questi veicoli. Inoltre, in questo progetto verranno

acustiche anche se con una portata di sole poche centinaia di metri.

Queste tecnologie possono essere utilizzate, ad esempio, per la trasmissione di dati tra sottomarini, sottomarini e UUV, o con veicoli di superficie. Questo progetto apre la strada anche all'utilizzo di QKD e trasmissione ottica subacquee per il recupero di dati da sensori sommersi attraverso l'uso di UUVs.

CONCLUSIONI

In conclusione, questo progetto realizzerà un prototipo di comunicazione quantistica subacquea immune a qualunque tentativo di intercettazione presente e futuro. In questa prima fase si è calcolato che un sistema di comunicazione ottico può trasmettere dati fino ad una portata di 400 m e chiavi crittografiche possono essere scambiate fino ad una distanza di 300 m in condizioni di ac-

qua ideali. Si è altresì validato il modello utilizzato in questi calcoli con prove di laboratorio e sono stati identificati i componenti necessari alla realizzazione del dispositivo. Inoltre, la progettazione iniziale del sistema e dei contenitori che lo terranno è stata portata a termine.

Ad ora, tutti gli obiettivi prefissati sono stati portati a termine, dando confidenza sulla buona riuscita del progetto nel suo complesso.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

CQ	<i>Computer Quantistico</i>
QKD	<i>Quantum Key Distribution</i>
UUV	<i>Unmanned Underwater Vehicle</i>

PAROLE CHIAVE

Crittografia, Subacquea, QKD, Quantum, Comunicazione Ottica.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2020.214
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	QTI s.r.l.
Città, Regione:	Firenze, Toscana
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dr. Tommaso Occhipinti
Recapiti del responsabile del progetto:	Largo Enrico Fermi 6, Firenze (FI) 50125, Italia
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	(+39) 055 907341
E-mail del responsabile del progetto:	tommaso.occhipinti@qticompany.com

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ling Ji, Jun Gao, Ai-Lin Yang, Zhen Feng, Xiao-Feng Lin, Zhong-Gen Li, and Xian-Min Jin, "Towards quantum communications in free-space seawater," *Opt. Express* 25, 19795-19806 (2017)
- [2] S. Zhao, W. Li, Y. Shen, Y. Yu, X. Han, H. Zeng, M. Cai, T. Qian, S. Wang, Z. Wang, Y. Xiao, and Y. Gu, "Experimental investigation of quantum key distribution over a water channel," *Appl. Opt.* 58(14), 3902-3907 (2019)
- [3] Z. Feng, S. Li, and Z. Xu, "Experimental underwater quantum key distribution," *Opt. Express* 29(6), 8725-8736 (2021)
- [4] C.-Q. Hu, Z.-Q. Yan, J. Gao, Z.-M. Li, H. Zhou, J.-P. Dou, and X.-M. Jin, "Decoy-state quantum key distribution over a long-distance high-loss air-water channel," *Phys. Rev. Appl.* 15(2), 024060 (2021)

La continua evoluzione sull'impiego dei sistemi di comunicazione satellitare, in campo militare, comporta sempre più la necessità di scambiare rapidamente elevati flussi di dati ed allo stesso tempo, di avere ingombri ridotti. Il progetto "SABB-XKa - *Studio Sistema Comunicazione Satcom Antenna Bi Banda X-Ka con radomes multiuso*" ha come obiettivo la progettazione e la realizzazione di un prototipo completo SATCOM, con ingombri contenuti, versatile e in grado di funzionare simultaneamente nelle bande di frequenza K-Ka e C-X. Nella fase 1 del progetto sono state identificate tutte le caratteristiche necessarie del sistema, sono state simulate diverse soluzioni fino al raggiungimento di ottimi risultati in termini di prestazioni dell'intero sistema. Nella fase 2 del progetto verrà eseguita la realizzazione e l'ottimizzazione del sistema prototipale, con lo scopo di verificarne le reali prestazioni. Grazie all'ingombro ridotto e alla versatilità, il sistema potrà essere utilizzato in molteplici impieghi, ad esempio, per il flusso di dati con mezzi sottomarini, terrestri, navali ed aerei o per il controllo da remoto degli UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

INTRODUZIONE

Nuovi scenari operativi stanno portando a un rapido cambiamento delle esigenze di impiego dei sistemi di comunicazione satellitare installati a bordo degli assetti militari, in particolare dei sottomarini e dei droni. Infatti, sempre più spesso, vengono impiegati questi mezzi in operazioni di *Intelligence Survey Recognition* (ISR), con lo scopo di fornire documentazione e riprese video, da trasmettere in modo occulto e in *real time*. Nasce pertanto l'esigenza di sviluppare sistemi in grado di garantire elevati flussi di dati da e verso i vettori satellitari installati a bordo degli assetti militari, necessità operativa recepita anche in ambito Difesa italiana con il lancio, in collaborazione con la Francia, del nuovo sistema satellitare *Athena-Fidus*. L'impiego di nuove frequenze per la trasmissione e ricezione dati, congiuntamente a una forte richiesta di minimizzazione degli ingombri, ha reso necessario sviluppare un sistema compatto, costituito da un'unica antenna trasmettente/ricevente, in grado di funzionare simultaneamente in diverse bande di frequenza, aggiungendo ai canali nelle bande C-X i nuovi canali in banda K-Ka. Il

nuovo sistema consentirà di utilizzare al meglio le potenzialità di ciascuna banda, in particolare, la maggiore velocità di trasmissione dei dati in banda K-Ka e le minori perdite derivanti dalle condizioni meteo in banda C-X.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

La soluzione tecnologica individuata dall'ATS (Associazione Temporanea di Scopo), composta da Dallara Compositi, Navisystem Marine Electronics e il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Pisa, consiste nella progettazione di un sistema SATCOM multi-banda compatto, ad alte prestazioni (in particolare alta efficienza di radiazione) e operante su 4 bande frequenziali distinte: la ricezione avviene nelle bande C (7.25-7.75 GHz) e K (20.2-21.2 GHz), mentre la trasmissione avviene nelle bande X (7.9-8.4 GHz) e Ka (30-31 GHz). Per permettere un collegamento affidabile con i satelliti geostazionari, l'antenna è stata progettata per trasmettere e ricevere segnali in polarizzazione circolare, in particolare *Left-Hand Circular Pola-*

ization (LHCP) per i collegamenti in *downlink* e *Right-Hand Circular Polarization* (RHCP) per i collegamenti in *uplink*. L'antenna è stata progettata per poter soddisfare i seguenti prerequisiti all'interno delle bande di funzionamento: efficienza di apertura (ϵ_{ap}) superiori al 50%; rapporto d'onda stazionaria (VSWR) minore di 2; conformità alle normative di riferimento sul livello dei lobi laterali dei diagrammi di irradiazione.

La progettazione dell'intero sistema ha permesso di trovare la giusta collocazione, all'interno del radome con un diametro massimo di 600 mm, di tutti i componenti necessari al funzionamento (*feeder*, OMT, filtri, LNB, BUC, cavi, meccanica, ecc.). Inoltre, per garantire un'adeguata protezione della nuova antenna, si è reso necessario progettare diverse tipologie di radome in materiali compositi, aventi le medesime caratteristiche di trasparenza in una larga banda di frequenze, ma realizzati con caratteristiche fisiche e strutturali tali da poter sopravvivere in ambienti operativi molto differenti:

- Radome Sottomarino: resistente a elevate pressioni esterne presenti durante le fasi di immersione;
- Radome *Light*: per uso su droni e velivoli in cui il *payload* viene privilegiato rispetto alle prestazioni meccaniche e/o ambientali;
- Radome Balistico: resistente a elevate sollecitazioni cinetiche nelle applicazioni navali e terrestri.

METODOLOGIA

Per rendere la struttura compatta è stata scelta una configurazione di tipo *self-supported* [1], consentendo di posizionare il ricevitore/trasmittitore sul lato posteriore del riflettore (Fig. 1). La configurazione a doppio riflettore è di tipo *Ring Focus* [2], con il vantaggio di limitare l'effetto di bloccaggio del sub-riflettore, massimizzando così l'efficienza di antenna (Fig. 2-3) (Tab. 1). Per garantire il funzionamento su più bande è stato progettato un *feeder* con struttura coassiale [3] in cui i segnali nelle bande K-Ka si propagano nella guida d'onda circolare interna, mentre i segnali nelle bande C-X si propagano nella guida coassiale esterna. Questa

soluzione innovativa aumenta l'isolamento tra le diverse bande operative, garantendo il funzionamento simultaneo dei vari sistemi di ricezione/trasmmissione. Per collegare il *feeder* al ricevitore/trasmittitore nelle bande C-X sono stati progettati appositamente

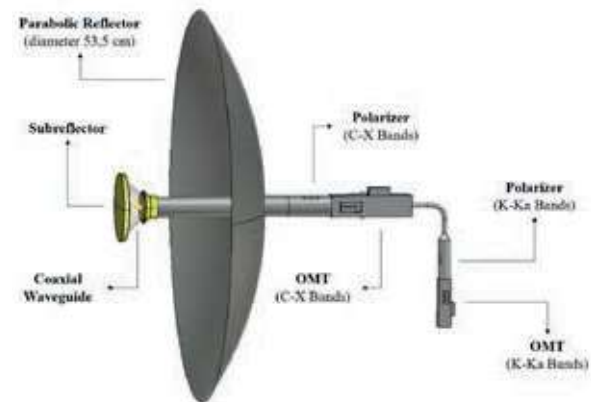


Figura 1 - Architettura del sistema radiante per il progetto SABB-XKa.

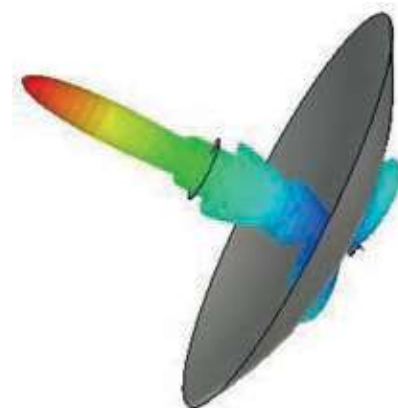


Figura 2 - Solido di irradiazione dell'antenna SABB-XKa nella banda X.

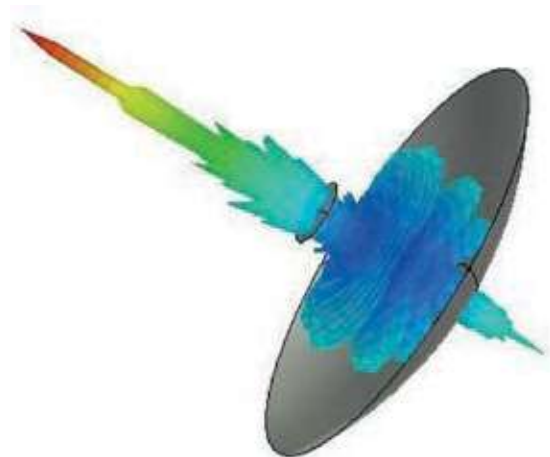


Figura 3 - Solido di irradiazione dell'antenna SABB-XKa nella banda Ka.

Banda	Range Frequenziale [GHz]	Polarizzazione	Guadagno [dBi]	Efficienza di apertura (ϵ_{ap})	VSWR in banda
C	7.25 – 7.75	LHCP	30,2	59%	< 1,4
X	7.9 – 8.4	RHCP	31	60%	< 1,4
K	20.2 – 21.2	LHCP	37,4	44%	< 2
Ka	30 – 31	RHCP	42	56%	< 1,3

Tabella 1 - Prestazioni dell'antenna SABB-XKa ottenute mediante simulazione numerica.

un filtro depolarizzatore e un OMT (*Ortho-Mode Transducer*). La progettazione di questi due componenti rappresenta uno dei contributi più innovativi del progetto, poiché i filtri e gli OMT per guide coassiali con le suddette specifiche non sono disponibili sul mercato. Per le bande K-Ka, invece, sono stati utilizzati dispositivi commerciali.

Durante la progettazione di ciascuna tipologia di radome, è stata effettuata una fitta e meticolosa campagna di *test* di caratterizzazione dei materiali (elettromagnetica e meccanica), con lo scopo di individuare quelli più idonei all'impiego. Tramite simulazioni di calcolo IL (*Insertion Loss*) sono state definite le stratificazioni di materiale composito



Figura 4 - Radome Sottomarino.

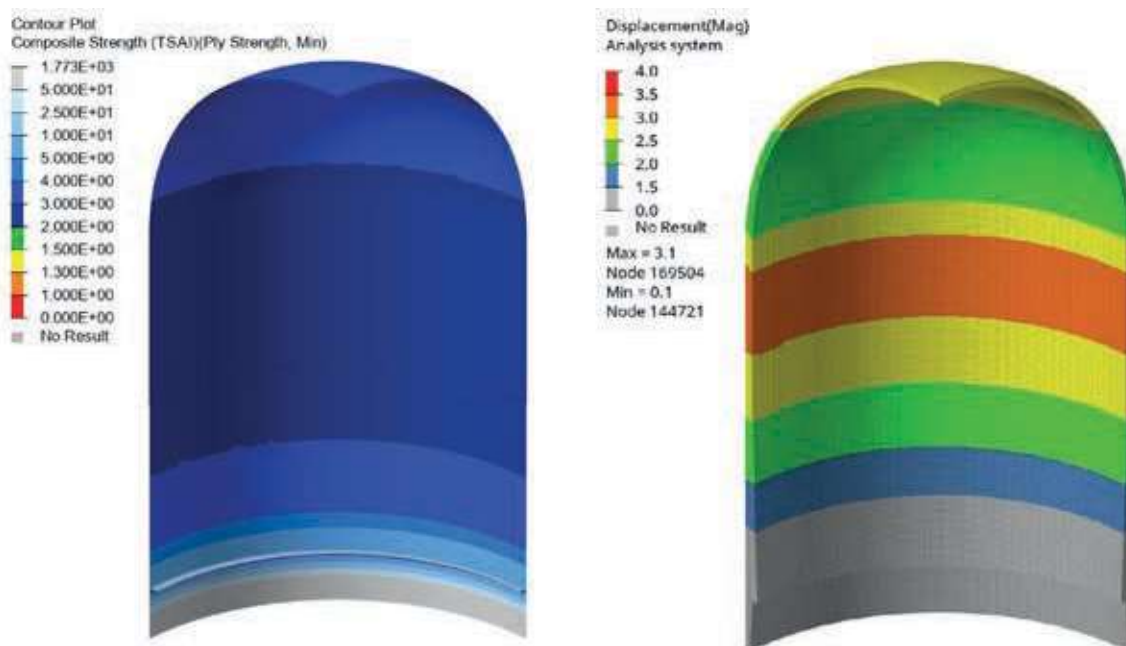


Figura 5 - Radome Sottomarino: risultati FEM sulla parte in composito.

per ciascun radome, in modo da limitare le perdite nelle bande di interesse. Nel caso del *radome sottomarino* (Fig. 4) è stato necessario fare numerose iterazioni tra analisi strutturali FEM (*Finite Element Method*) [4][5] (Fig. 5-6) e analisi IL, al fine di trovare il giusto compromesso tra radio trasparenza e resistenza strutturale. L'analisi strutturale è stata validata tramite test di fatica su un campione e verrà ulteriormente verificata, tramite un test di tenuta a pressione, sul primo prototipo. Inoltre, tutte le simulazioni IL sono state validate mediante *test* su campioni effettuati in camera anecoica (Tab. 2) e verranno verificate ulteriormente sui prototipi.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Gli obiettivi conseguiti nella prima fase del progetto sono stati tali da consentire l'attiva-

zione della fase successiva finalizzata a continuare lo studio e la progettazione di un sistema prototipale allo scopo di verificarne le reali prestazioni.

Lo sviluppo del sistema è stato incentrato principalmente per le applicazioni *underwater*, dove, l'incremento della velocità nella trasmissione dati, congiuntamente alla riduzione degli ingombri, permetterà di ottenere elevati vantaggi in termini di *coefficiente di indiscrezione (1)* dovuti all'esposizione dell'antenna.

Visto l'ingombro ridotto del sistema e la versatilità, dovuta in parte alla presenza dello studio di radome per utilizzi alternativi, con gli opportuni adattamenti, il sistema potrà essere utilizzato anche per altri impieghi, come ad esempio, per il controllo da remoto degli UAV o per il flusso di dati con mezzi terrestri, navali e aerei.

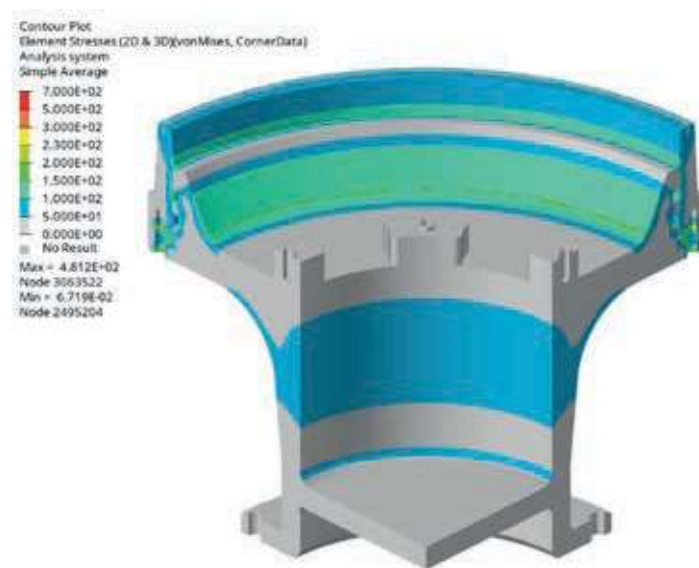


Figura 6 - Radome Sottomarino: risultati FEM sulle flange metalliche.

Radome	IL banda C [dB]	IL banda X [dB]	IL banda K [dB]	IL banda Ka [dB]
Sottomarino	-0,7	-1,2	-1,27	-1,8
Light	-0,35	-0,37	-0,54	-0,3
Balistico	-0,59	-0,44	-0,47	-0,77

Tabella 2 - Risultati "Insertion Loss" delle 3 tipologie di radome, ottenuti nei test effettuati sui campioni in camera anecoica.

CONCLUSIONI

La progettazione del sistema SABB-XKa ha dato degli ottimi risultati in termini di prestazioni ottenute durante la fase di simulazione. Lo sviluppo successivo, che sta portando alla realizzazione del primo prototipo funzionante, ha evidenziato un alto livello di maturazione tecnologica del progetto. Nel prossimo futuro l'impiego di sistemi SATCOM, per la trasmissione di dati sensibili di *intelligence* e il pilotaggio da re-

moto degli UAV, ricoprirà sempre di più un ruolo strategico a livello mondiale e avere un sistema a larga banda, con un flusso di dati ad alta velocità consentirà di operare in maniera più efficace, nelle varie aree e condizioni meteo. Nel caso venisse rilasciato un satellite che operi nelle stesse bande, il sistema sarebbe in grado di scambiare dati su entrambi i canali contemporaneamente. Queste caratteristiche rendono il sistema innovativo, versatile e unico nel suo genere.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

SATCOM	<i>Satellite Communications</i>
ISR	<i>Intelligence Survey Recognition</i>
ATS	<i>Associazione Temporanea di Scopo</i>
LHCP	<i>Left-Hand Circular Polarization</i>
RHCP	<i>Right-Hand Circular Polarization</i>
OMT	<i>Ortho-Mode Transducer</i>
LNB	<i>Low Noise Block converter</i>
BUC	<i>Block Up Converter</i>
IL	<i>Insertion Loss</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

PAROLE CHIAVE

SATCOM, Bi-Banda, Antenna, Radome, Sottomarino, Aereo, Navale, Terrestre, Balistico, Droni, UAV.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.211
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali - NAVARM
Ente responsabile del progetto:	NAVARM – 3 ^a Divisione
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	CV (GM-GN) Christian PERRONE
Recapiti del responsabile del progetto:	NAVARM – 3 ^a Divisione, Via di Centocelle 301, Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	06 469132567
E-mail del responsabile del progetto:	christian.perrone@marina.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

- [1] Per-Simon Kildal. Reflector antenna with a self supported feed, October 24 2000. US Patent 6,137,449.
- [2] Zhao, Yi-Jun, et al. "Design of a hat feed for ring focus reflector antenna." 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). IEEE, 2019.
- [3] Galuscak, Rastislav, et al. "A dual-band reflector feed in coaxial configuration for satellite communication [antenna applications corner]." IEEE Antennas and Propagation Magazine 60.5 (2018): 89-94.
- [4] ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials
- [5] S.W. Tsai and E.M. Wu, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials". J. Composite Materials, Vol. 5, pp. 58-80, 1971.

NOTE

- (1) Con il termine "Coefficiente di Indiscrezione" si intende la percentuale di tempo durante il quale il sottomarino deve esporre un'appendice esterna (nel caso di specie l'antenna), risultando quindi rilevato mediante radar o dispositivi elettro/ottici.

Il progetto SAMBa.X, ha permesso di sviluppare un'architettura innovativa per *seeker* missilistici basata su tecnologia AESA ad elevate prestazioni ed alta affidabilità. Inoltre, le scelte architetture adottate hanno permesso una notevole riduzione dei costi ricorrenti, permettendone la sostenibilità economica anche per produzioni di serie. Le innovazioni hanno interessato anche la componente di elaborazione del segnale ed in questo ambito, sono stati introdotti degli algoritmi in grado di ottenere delle prestazioni superiori alle soluzioni *legacy*, unitamente ad una maggiore robustezza nei confronti delle interferenze intenzionali (ECM) e una migliorata capacità di selezione del punto di impatto, anche grazie agli algoritmi SAR/ISAR (1). L'impresa è suddivisa in tre fasi ben definite, che sono il progetto del sistema, la realizzazione delle componenti critiche ed infine la costruzione ed integrazione del dimostratore tecnologico. Quest'ultima fase, ancora in corso, ambisce a provare la piena maturità delle tecnologie implementate e l'efficacia delle soluzioni proposte.

Nel complesso, in sintesi, SAMBa.X evidenzierà la possibilità di sviluppare in ambito nazionale, in tempi relativamente rapidi ed a costi contenuti, l'intera tecnologia ed il *know-how* necessari per realizzare un'antenna AESA compatta e scalabile adatta all'impiego in ambito missilistico.

INTRODUZIONE

Questo progetto si propone di raggiungere diversi obiettivi cruciali. In primo luogo, mira a dimostrare che è possibile realizzare *seeker* antinave altamente performanti ed affidabili, abbattendo notevolmente i costi di produzione. In secondo luogo si concentra nello sviluppo di tecnologie microelettroniche critiche, con particolare riferimento ai *chip* ed ai moduli elettronici critici che sono interamente progettati in Italia e *ITAR free*. Infine, ambisce a potenziare la base industriale nazionale, con riferimento alla PMI ed ai centri di ricerca, consentendo loro di operare con successo nel settore della missilistica avanzata sostenendo, pertanto, la crescita e la competitività dell'*expertise* nazionale nel campo strategico della missilistica. Inoltre, sono state affrontate e risolte numerose sfide tecnologiche fra cui: l'implementazione efficace della sintesi digitale dei fasci di antenna con innovative tecniche di DBF; l'impiego di algoritmi SAR/ISAR per ottimizzare il punto di impatto;

il potenziamento delle capacità di EP impiegando avanzate tecniche di *array processing* e *moderni ricevitori multicanale*; l'incremento del MTBF mediante scelte architetture basate sui migliori materiali per semiconduttori (GaN-on-SiC).

Brevemente, l'obiettivo finale è stato quello di potenziare le prestazioni dei *seeker* antinave adottando un approccio innovativo alle tecnologie AESA affrontando le sfide attuali e proponendo soluzioni più adatte ai contesti operativi moderni.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Nel contesto operativo odierno [1], le architetture AESA multicanale emergono come l'unica soluzione tecnologica in grado di superare i limiti delle soluzioni *legacy*. Tuttavia, l'impiego di tecnologie AESA presenta sfide significative, tra cui la necessità di implementare un sistema efficace e compatto di raffreddamento, oltre all'adozione di metodologie volte a ridurre drasticamente il costo

complessivo. Un'analisi più approfondita, tuttavia, ci porta a identificare una ragione comune a tali problemi la quale risiede nelle scelte architetture adottate dai principali produttori odierni che utilizzano soluzioni tipo *plank*. Questa scelta tecnologica, unita all'elevato numero di *chip* richiesti per configurare un'antenna dalle prestazioni adeguate, causa un aumento considerevole del peso, delle dimensioni, oltre che della produzione di calore durante il funzionamento.

Il progetto SAMBA.X, viceversa, propone un'antenna AESA con TRM su *tile* parallele al piano radiante che impiegano *chip* multicanale progettati specificamente. Questa soluzione riduce drasticamente il numero di componenti complessivi necessari ad allestire un *front-end* efficace e di conseguenza si traduce in benefici quali la riduzione dei costi complessivi e degli ingombri, oltre a un migliore bilanciamento termico, contribuendo così a una maggiore affidabilità e disponibilità operativa. Oltre alle innovazioni architetture, nel progetto sono stati affrontati anche i limiti delle soluzioni *legacy* dal punto di vista dell'elaborazione del segnale e sono state introdotte diverse innovazioni. In particolare, per migliorare la scoperta e la discriminazione dei bersagli sia in *blue water* che in ambiente *littoral*, vengono impiegate tecniche SAR e ISAR combinate, nonché tecniche avanzate di stima angolare *monopulse* specifiche per l'architettura in esame [2] a cui sono

state affiancate delle tecniche moderne come il MUSIC. Le prestazioni EP, allo stesso modo, vengono potenziate con l'impiego di ricevitori multicanale e con l'uso di tecniche di filtraggio spaziale per contrastare *jamming* provenienti da più sorgenti contemporaneamente.

METODOLOGIA

Il progetto SAMBA.X si articola su tre fasi distinte ciascuna dedicata a un obiettivo specifico:

1. studio di fattibilità di un *seeker* antinave AESA a basso costo e definizione di soluzioni di *processing* innovative per adattarne le prestazioni ai moderni scenari operativi;
2. progetto e realizzazione dell'antenna AESA e dei relativi componenti elettronici critici, in particolare il TRM e il relativo *chipset*;
3. realizzazione di un dimostratore tecnologico del *seeker* in grado di provare l'efficacia dell'architettura di antenna proposta e dei nuovi algoritmi di *processing*.

Nella fase 1 del progetto sono stati proposti algoritmi di discriminazione dei bersagli basati su tecniche di *Radar Imaging SAR/ISAR* (risultati in figura 1) e algoritmi di DBF per realizzare filtri SAP (*Spatial Array Processing*) in grado di migliorare le capacità EP. A livello di sistema sono invece stati definiti requisiti e architettura del *seeker* ed è stato realizzato il *flow-down* dei requisiti verso l'antenna AESA.

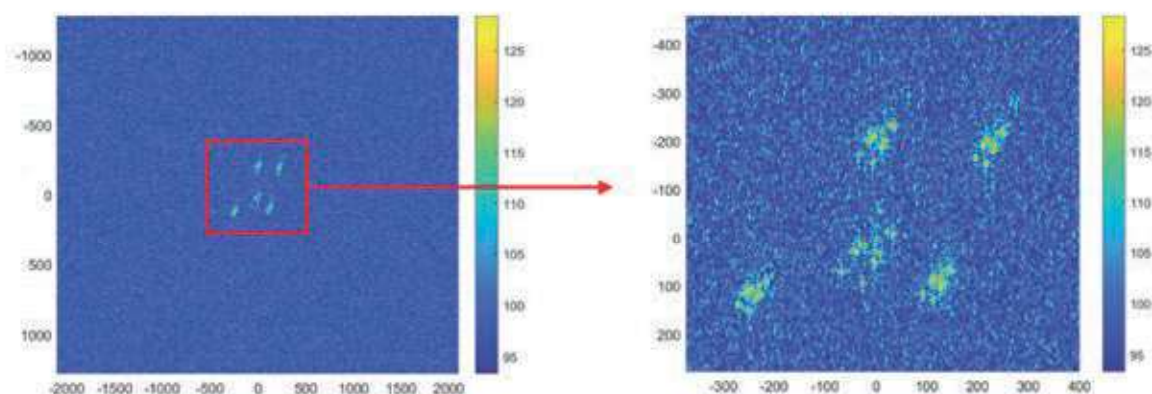


Figura 1 - Esempio dei risultati ottenibili in termini di discriminazione applicando una tecnica SAR su una formazione navale serrata composta da 5 unità (il sistema di riferimento è centrato sulla formazione).

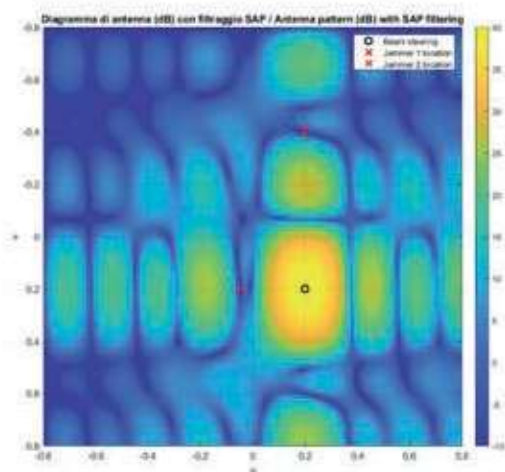


Figura 2 - Esempio dei risultati ottenibili in termini di cancellazione delle interferenze con filtraggi SAP in presenza di due jammer.

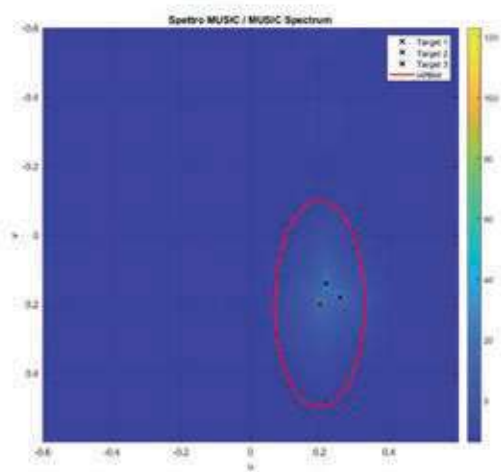


Figura 3 - Esempio dei risultati ottenibili con algoritmi MUSIC con tre bersagli posti nel *main beam* al medesimo *range gate*.

Nella fase 2 del progetto è stato realizzato un *digital twin* dell'antenna AESA con lo scopo di realizzare un modello adatto alle analisi delle prestazioni ma anche all'implementazione operativa (risultati in figura 2 per SAP e figura 3 per MUSIC). Sempre nell'ambito di tale fase sono stati inoltre realizzati i prototipi del modulo planare 4x4 XTRM (*X-band TRM* in figura 4 con un *breakdown* del modulo). A livello di *chipset*, il modulo XTRM impiega un *chip* TR (*Transmit-Receive*)

custom in tecnologica GaN-SiC da 15 μm che integra tutto il *front-end* del *seeker* (in figura 5 un focus sul processo di sviluppo del *chip*).

La fase 3 del progetto, attualmente in corso, prevede la realizzazione di un dimostratore tecnologico del *seeker* AESA con un'antenna di dimensioni ridotte e *processing offline* con lo scopo di dimostrare l'efficacia e la maturità delle tecnologie proposte (in figura 6 è mostrato l'attuale allestimento dell'antenna).

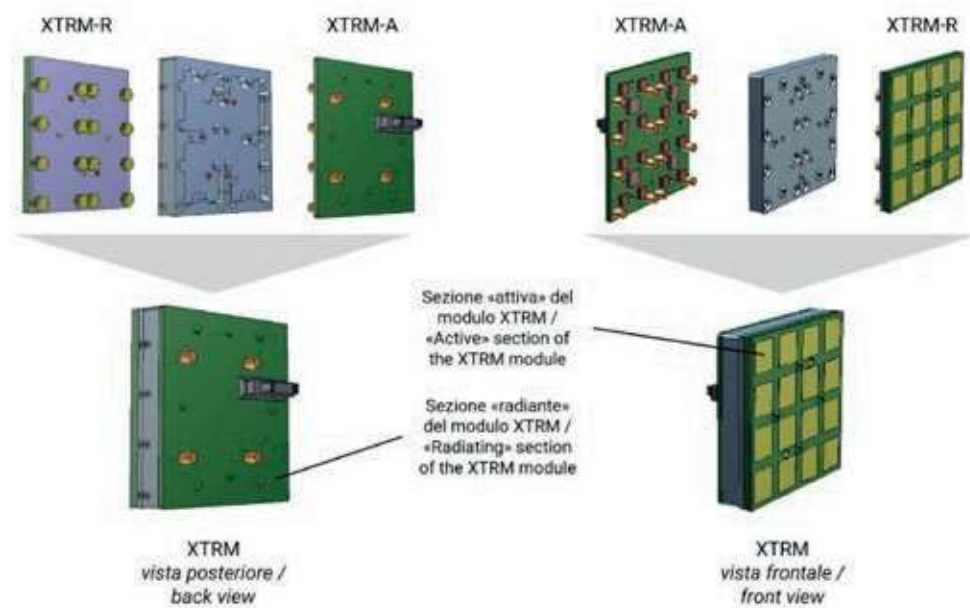


Figura 4 - Breakdown dell'architettura della *tile* XTRM con indicazione e delle principali componenti: XTRM-A (XTRM Active Section ovvero la scheda di *beamforming*) e XTRM-R (XTRM Radiating Section ovvero la scheda con gli elementi radianti).

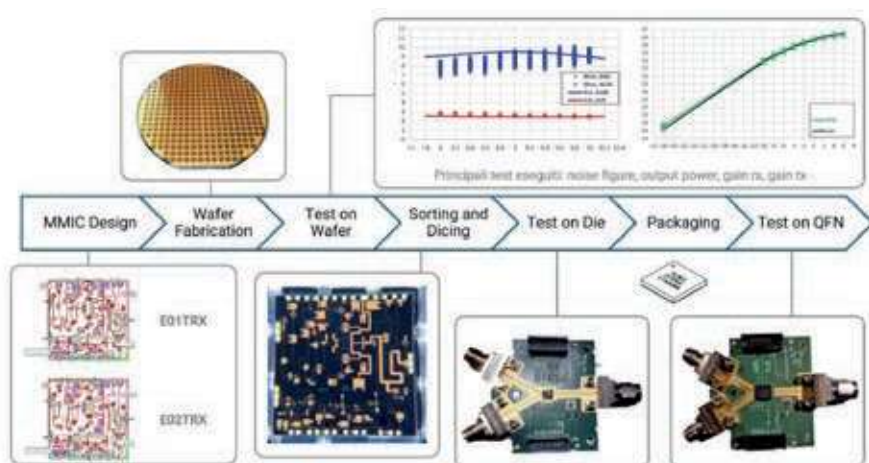


Figura 5 - Fasi principali del processo di sviluppo e qualifica del *chip* TR.

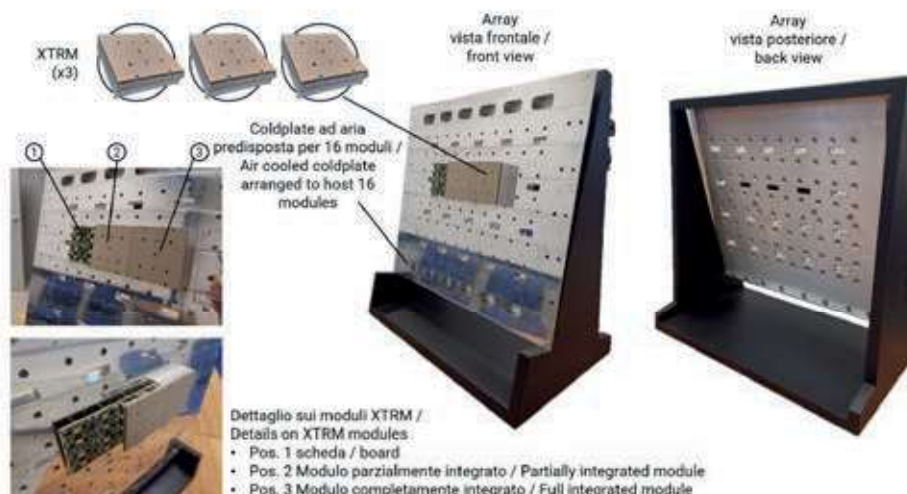


Figura 6 - Allestimento dell'antenna per il dimostratore tecnologico del seeker AESA con tre moduli XTRM disposti su una singola riga.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La tecnologia sviluppata nell'ambito del progetto SAMBa.X può essere impiegata, oltre che in ambito missilistico per il quale è stata progettata, anche in altri contesti operativi. Un caso di specie è quello dei radar tattici impiegati per supportare la *close protection* (rispetto a minacce UXV, ivi incluse le *loitering munition*) di assetti navali e terrestri, con particolare riferimento ad unità navali minori equipaggiate con piccoli calibri, fino a 40 mm e veicoli corazzati da combattimento *on-the-move* (ad es. AICS).

Inoltre, fornisce l'opportunità di impiegare questa tecnologia anche in contesti civili ed è stato deci-

so di sviluppare il modulo XTRM in due diverse versioni. Una prima versione definita XTRM *High power*, specifica per impieghi in ambito Difesa, che impiega un *chip custom* di progettazione ELDES ad alte prestazioni. Una seconda versione definita XTRM *Low power* fa uso, invece, di *chip* COTS con prestazioni ridotte ma con costi contenuti. Quest'ultima versione risulta più idonea ad un mercato civile (ad es. DAA per droni commerciali di alta fascia). In entrambi i casi non sussistono vincoli di esportazione visto che la tecnologia impiegata è interamente progettata in Italia, realizzata con una *supply chain* interamente europea, *ITAR-free* e *boycott free*.

CONCLUSIONI

Il progetto SAMBA.X sta dimostrando che è possibile realizzare in ambito nazionale, in tempi rapidi ed a costi contenuti, tutta la tecnologia, i componenti e gli algoritmi abilitanti per applicazioni missilistiche. In particolare, sono stati realizzati e provati i moduli planari dell'antenna AESA e i relativi *chip* TR (*interamente progettati da ELDES*) basati su tecnologia GaN-SiC, migliorando notevolmente la disponibilità operativa in ragione di un notevole aumento delle prestazioni logistiche (MTBF). Inoltre, grazie alla proficua collaborazione fra industria ed università, è stato possibile definire un nuovo schema di elaborazione dei se-

gnali il quale fa ricorso alle più moderne tecniche di *array processing*, migliorando notevolmente le prestazioni radar complessive. Oltre a ciò, sono state sviluppate delle tecniche *monopulse* e ottimizzate per sistemi radar multi-missione [2].

In termini di potenziali ricadute di breve termine del progetto si intravedono sia l'impiego come *seeker* nella versione *export* di missili, sia la realizzazione di *kit di retrofit* per radar di *tracking*. Inoltre, ricorrendo ad autofinanziamento interno la ELDES ha avviato dei progetti sia per ammodernare la linea di prodotti Poseidon in chiave AESA sia per realizzare un innovativo radar tattico per applicazioni *Land & Naval*.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

AESA	<i>Active Electronically Scanned Array</i>
AICS	<i>Armored Infantry Combat System</i>
COTS	<i>Commercial Off-The Shelf</i>
DAA	<i>Detect and Avoid</i>
DBF	<i>Digital BeamForming</i>
EA	<i>Electronic Attack (ex ECM)</i>
EP	<i>Electronic Protection (ex ECCM)</i>
GaN	<i>Nitruro di Gallio</i>
ISAR	<i>Inverse Synthetic Aperture Radar</i>
JSR	<i>Jammer to Signal Ratio</i>
MMI	<i>Marina Militare Italiana</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
MUSIC	<i>MUltiple Signal Classification</i>
SAP	<i>Spatial Array Processing</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SiC	<i>Carburo di Silicio</i>
TR	<i>Transmit-Receive</i>
TRM	<i>Transmit-Receive Module</i>
TWT	<i>Travelling Wave Tube</i>
UXV	<i>Unmanned X Vehicle</i>
VSHORAD	<i>Very SHort-Range Air Defence</i>
XTRM	<i>X-band Transmit-Receive Module</i>

PAROLE CHIAVE

AESA, *Digital Beamforming*, *Digital Twin*, GaN, ISAR, *Phased Array*, Radar, SAR, *Seeker*, TRM.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	A2018.029
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	ELDES srl (www.eldesradar.com)
Città, Regione:	Scandicci, Toscana
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Giulio GIOVANNETTI
Recapiti del responsabile del progetto:	Via di Porto 2/B, 50018 Scandicci (FI)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3335264788
E-mail del responsabile del progetto:	g.giovannetti@eldes.it

BIBLIOGRAFIA

- [1] MBDA Italia SpA, “L’evoluzione dei sistemi missilistici antinave”, Convegno sulla segnatura radar ed elettrotecnica delle moderne unità navali: valenza, metodi per il controllo e sviluppi tecnologici, San Piero a Grado, Italia, 2017, URL: http://www.conferenzecisam.it/convegni/c-i-s-a-m-2017-1/documenti/1_1-evoluzione-dei-sistemi-missilistici-anti-ship-v7
- [2] G. Giovannetti, “Monopulse Channels Beamforming with Overlapped Subarrays for Low-Cost Multi-Mission Radars”, 20th European Radar Conference (EuRAD), Berlin, Germany, 2023, pp. 379-382, doi: 10.23919/EuRAD58043.2023.10289369..

NOTE

- (1) Il progetto SAMBa.X è condotto dalla ELDES srl in collaborazione con il Laboratorio Nazionale di Radar e Sistemi di Sorveglianza (RaSS) facente parte del Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni (CNIT).
- (2) La banda X è tradizionalmente impiegata anche dai *seeker legacy* [1] della Marina Militare Italiana (MMI) pertanto rimanere su questa banda consente alla MMI anche di avvalersi dei medesimi *asset* per la manutenzione nonché di poter sfruttare il patrimonio di esperienza maturata in questa banda dai propri reparti sperimentali.
- (3) Un’elevata potenza di picco è considerata una delle più efficaci e semplici tecniche EP che si possano implementare. Questa tecnica si basa sul principio della massimizzazione del SNR (*Signal to Noise Ratio*) in modo da avere un rapporto JSR (*Jammer to Signal Ratio*) negativo rendendo sostanzialmente inefficace qualsiasi tecnica di EA (*Electronic Attack*).

La fase 1 del progetto ha visto la realizzazione di un prototipo di micro-cifrante in grado di stabilire un perimetro di sicurezza crittografica per dispositivi di controllo OT o IIoT (e.g. PLC), garantendo latenze massime sulla rete di controllo compatibili con i più comuni protocolli di comunicazione, sia per l'applicazione su nuove installazioni sia per applicazione all'interno di soluzioni *legacy* da ammodernare (*retrofit*).

Il progetto CryptoBox, oltre a garantire la confidenzialità dei dati, mira a fornire una soluzione per assicurare l'autenticità delle informazioni scambiate tra i PLC e i restanti dispositivi che costituiscono le reti DCS e SCADA, rispettando i vincoli di prestazione in termini di latenza e *throughput*.

INTRODUZIONE

Il progetto CryptoBox mira a realizzare una soluzione crittografica in grado di garantire la sicurezza delle comunicazioni fra dispositivi *Industrial Internet of Things* o IIoT, introducendo un *layer* di sicurezza al di sopra delle attuali infrastrutture di rete presenti nei sistemi di automazione industriale. L'uso di micro cifranti in ambito industriale dovrebbe garantire un adeguato livello di sicurezza dei sistemi controllati e superare le difficoltà tecniche legate all'impiego dei protocolli di sicurezza su dispositivi impiegati in condizioni ambientali difficili, garantendo prestazioni in tempo reale.

Il contesto delle applicazioni di tipo *Operational Technology* (OT) e *Industrial Internet of Things* (IIoT) vede il frequente uso di protocolli di comunicazione in chiaro e l'uso di dispositivi a basso consumo/bassa dissipazione termica (basse prestazioni) che mal si prestano all'implementazione di robusti schemi di sicurezza crittografica già implementati nel contesto *Information Technology* (IT). La scelta è spesso obbligata dalle condizioni ambientali di lavoro dei dispositivi e alle dinamiche di controllo degli impianti di automazione. In questi contesti applicativi la disponibilità dei sistemi, ovvero la capacità di operare con continuità e senza ritardo, risulta prioritaria rispetto agli aspetti correlati alla confidenzialità dei dati o all'autenticazione delle comunicazioni.

PROBLEMA INDIVIDUATO

E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Nelle reti di automazione, ed in particolare per i sistemi di tipo *Distributed Control Systems* (DCS) e *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA) la minaccia principale consiste generalmente nell'attacco diretto ai sistemi di controllo (e.g. *Programmable Logic Control* o PLC e *Remote Terminal Unit* o RTU) o alle unità remote collegate direttamente a strumenti di misura e attuatori. L'attacco può avvenire mediante la creazione o la manipolazione di pacchetti di informazioni costruiti sfruttando le debolezze intrinseche/vulnerabilità dei protocolli di comunicazione industriale utilizzati. Alcuni dei più diffusi protocolli, concepiti per garantire una specifica prestazione/*performance* in termini di velocità di trasferimento dei dati, non permettono infatti l'autenticazione o un controllo di integrità o correttezza formale (semantica) delle informazioni trasmesse e non sono stati pertanto sviluppati per resistere nativamente ad azioni di sabotaggio diretti all'impianto collegato.

La semplicità con la quale è possibile condurre un attacco potenzialmente disastroso nei confronti di questi sistemi, se non adeguatamente protetti, rendono le reti di controllo particolarmente appetibili per dei potenziali attaccanti. Inoltre, l'alta valenza strategica dei sistemi interni alle infrastrutture critiche, costituisce un elemento di forte interesse per attori statuali e *Advanced Persistent Threats* (A.P.T.), capaci di sviluppare micidiali attacchi mirati a queste infrastrutture.

METODOLOGIA

La fase 1 del progetto ha portato alla realizzazione di un prototipo di soluzione crittografica composta da micro-cifranti (appunto i CryptoBox) basate sulla tecnologia *Field Programmable Gate Array* (FPGA), con l'obiettivo di soddisfare il requisito di bassa latenza sulle comunicazioni scambiate dai dispositivi IIoT collegati.

Le cifranti CryptoBox permettono infatti di realizzare un *layer* crittografico (figura 1) ad elevata sicurezza per garantire che, all'uscita dai quadri di automazione, tutto il traffico da e per i PLC e le RTU sia protetto da eventuali attacchi veicolati attraverso la rete di controllo. La sicurezza del *layer* crittografico è garantita dall'implementazione in *hardware* del protocollo *TelsyGuard* (figura 2), basato sullo standard VPN (1) *WireGuard* già implementato su varie piattaforme, tra cui il *kernel* Linux. Wi-

reGuard è un *network tunnel* sicuro operante a livello 3 dello *stack* ISO/OSI.

Lo sviluppo del protocollo crittografico e l'implementazione sull'hardware prescelto sono stati improntati a garantire la flessibilità e semplicità di installazione della soluzione sugli impianti, prevedendo al contempo, fin dalle prime fasi di progettazione, adeguate contromisure ad attacchi diretti alle cifranti stesse, coerentemente con i migliori standard di progettazione sicura (approccio *secure by design*).

Il prototipo realizzato ha permesso di verificare la validità del progetto, garantendo nella sua implementazione sperimentale le prestazioni minime fissate per il progetto, ovvero latenza massima ammissibile inferiore ai 4 ms in tutte le condizioni di prova (Ethernet 10/100/1000 Mbit/s), e nel caso delle moderne *Gigabit Ethernet*, latenze misurate inferiori a 1 ms (~0.3 ms).



Figura 1 - Layer crittografico e compatibilità con i protocolli industriali / Cryptographic layer and compatibility with industrial protocols.

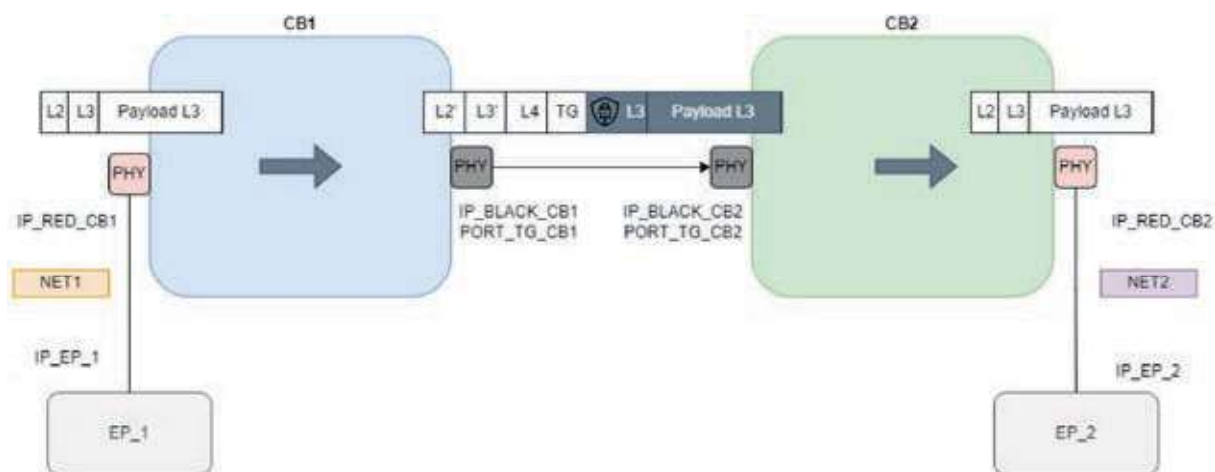


Figura 2 - VPN - TELSUGUARD - implementazione su layer 3 / VPN - TELSUGUARD - Implementation on Layer 3.

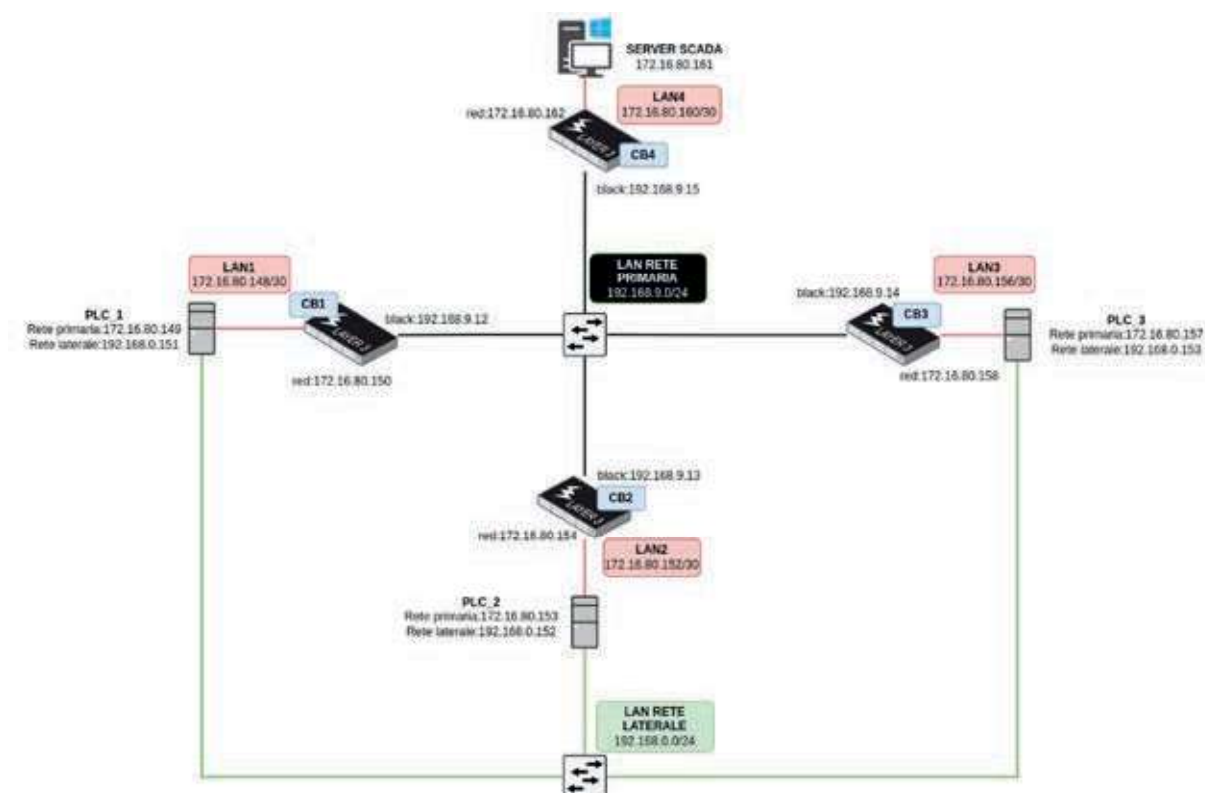


Figura 3 - Ambiente di test in laboratorio (TRL 4).

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

I test sono stati eseguiti presso i laboratori della società Telsy simulando la comunicazione fra quadri PLC e un Server SCADA, riproducendo di fatto una possibile configurazione a bordo delle Unità Navali della Marina Militare. Questo tipo di scenario applicativo differisce di poco da molti altri scenari applicativi sia marittimi che terrestri. Di fatto il *target* di questa soluzione tecnologica è fortemente *dual use*, essendo destinato ad impianti di automazione industriale basati su dispositivi COTS (*commercial off the shelf*). L'impiego potrebbe essere esteso ragionevolmente anche nell'ambito dei sistemi di controllo delle infrastrutture critiche e dei sistemi a disposizione delle organizzazioni pubbliche e private all'interno del Perimetro di Sicurezza Cibernetico.

CONCLUSIONI

I dispositivi prototipali realizzati per il progetto sono perfettamente funzionanti e hanno dimostrato di poter garantire prestazioni ben al di sopra delle aspettative.

Con la fase 2 del progetto saranno realizzate nuove funzionalità interne ai dispositivi, in grado di renderli direttamente impiegabili anche nelle architetture ad alta disponibilità tipiche delle Unità Navali e delle infrastrutture industriali di tipo critico. Sarà altresì ricercata una ottimizzazione del *hardware* rispetto al rapporto *costo/performance*, rendendo quindi sostenibile l'implementazione di questo tipo di dispositivi ad ampissimo spettro (*retrofit* sulle Unità in Servizio, installazione all'interno di impianti industriali preesistenti ecc.).

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

IoT	<i>Internet of Things</i>
IT	<i>Information Technologies</i>
OT	<i>Operational Technologies</i>
DCS	<i>Distributed Control System</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
COTS	<i>Commercial off-the-shelf</i>
VPN	<i>Virtual private network</i>

PAROLE CHIAVE

Cyber Security, IOT, OT, Cifranti, SCADA, Supply chain, Infrastrutture critiche, FPGA, encryption, authentication.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.168
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	Telsy S.p.A.
Città, Regione:	Torino, Piemonte
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dott. Antonello Tartamo
Recapiti del responsabile del progetto:	Corso Svizzera 185, Torino (TO) 10149
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 011 7714343
E-mail del responsabile del progetto:	guglielmo.morgari@telsy.it

NOTE

(1) VPN – Virtual Private Network

Il progetto del PNRM denominato 6V-HPower ha come scopo lo studio volto ad aggiornare il motore della piattaforma Freccia, nota come VBM Legacy, il quale ha un sistema d'iniezione tradizionale realizzato tramite pompa in linea rendendolo idoneo ad essere ibridizzato al fine di creare un futuro power-pack per veicolo AIFV ibrido.

La linea guida generale perseguita per raggiungere l'obiettivo di aggiornamento del motore del VBM Legacy è stata quella di massimizzare l'utilizzo di componenti "carry-over" già impiegati in altre applicazioni in uso alla Forza Armata e/o presenti in programmi di sviluppo in essere con la Forza Armata. I principali risultati ottenuti a seguito dell'aggiornamento del sopracitato motore sono: incremento della cilindrata motore, adozione di un sistema di alimentazione di tipo Common Rail, adozione di un turbocompressore adeguato alle prestazioni desiderate e predisposizione dello stesso all'ibridizzazione.

Tali ammodernamenti, se le premesse troveranno conferma durante la fase 3 del progetto in oggetto (quella che prevede l'effettuazione delle prove al banco sul prototipo-dimostratore realizzato in fase 2), permetteranno un significativo incremento del rapporto potenza/peso del VBM Legacy portandolo ad un valore prossimo ai 23hp/t, in linea dunque con un requisito medio di buona mobilità per piattaforme della stessa classe.

INTRODUZIONE

Il VBM Legacy in uso attualmente alla Forza Armata ha un rapporto potenza/peso pari a circa 19hp/t, dunque non in linea con i valori che si riscontrano sui veicoli concorrenti appartenenti alla medesima classe. Per incrementare la mobilità del veicolo corazzato in esame, una possibile strada, quella che si ritiene tecnicamente più percorribile, è rappresentata dall'aumento della potenza di picco potenziando l'unità propulsiva V6 Legacy.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Il problema individuato sul VBM Legacy attualmente in essere alla Forza Armata è quello di una limitata potenza di picco dell'unità termica rispetto al peso del veicolo. Ciò comporta conseguentemente una mobilità veicolare non in linea con quelle proprie delle piattaforme concorrenti.

La soluzione tecnologica individuata per ovviare a tale gap è stata quella di potenziare l'unità pro-

pulsiva aumentandone la potenza di picco e, attraverso lo studio delle modifiche da apportare al lay-out, predisporla anche ad un futuro intervento di ibridizzazione.

L'ibridizzazione risulta essere un obiettivo fondamentale in ambito militare per la sua natura innovativa, dal momento che la tecnica dell'ibridizzazione è perlopiù diffusa solo in ambito civile, e tattica, poiché garantisce l'allungamento intrinseco della missione veicolare rendendo altresì disponibile la fruizione di una maggiore potenza elettrica.

L'ibridizzazione viene, però, affrontata puramente a livello di studio volto all'identificazione della più conveniente modalità di predisposizione del motore termico ad essere ibridizzato, limitandosi allo studio di una macchina elettrica specifica per un'architettura ibrida parallela che rispetti i vincoli di ingombro della parte posteriore del motore termico. Essendo l'attività di design di un powerpack ibrido estremamente onerosa dal punto di vista tecnico, l'applicazione dello studio ad una specifica piattafor-

ma veicolare potrà essere perseguita solo nell'ambito di futuri progetti di ricerca tecnologica dedicati.

METODOLOGIA

Lo studio finalizzato all'aggiornamento dell'unità propulsiva è stato articolato a partire dall'analisi dei componenti "carry-over" in essere su diverse applicazioni motoristiche, studiandone conseguentemente funzionalità, compatibilità ed eventuali limitazioni.

A valle di tale selezione per la scelta di quali componenti sviluppare a partire da quelli già esistenti o disegnare ad hoc per l'applicazione in esame, anche con il supporto di tecniche basate sul DMU, si è proceduto stilando una EBOM, la quale è stata progressivamente aggiornata in itinere con l'avanzamento del progetto. Conseguentemente sono stati emessi i disegni costruttivi della distinta base. Si sono fin da subito identificati e selezionati i cosiddetti componenti caratterizzati da un lungo "lead time" e per essi si è data la priorità alla progettazione così da poterli ordinare ai differenti fornitori con una tempistica cronologicamente sequenziata con l'obiettivo di renderli disponibili nella data prevista per la realizzazione fisica del DTA.

In parallelo si è proceduto all'effettuazione di una serie di attività che di prassi vengono effettuate

nella progettazione di un motopropulsore: FEA dei componenti motore maggiormente sollecitati (basamento e albero motore), studio CFD del processo di combustione con annessa valutazione dei rendimenti e simulazione delle prestazioni motore unitamente ad un'attività di verifica del profilo di apertura/chiusura delle valvole di aspirazione e scarico con relativo calcolo delle pressioni hertziane che agiscono sui profili delle stesse ed infine verifica del comportamento dinamico del comando valvole in regime di fuori giri motore.

In parallelo all'attività svolta sull'unità termica si è effettuata una valutazione dei pro/contro di differenti architetture ibride per un veicolo corazzato della stessa categoria del VBM Legacy con conseguente dimensionamento preliminare di una macchina elettrica da inserire nell'architettura ibrida ritenuta maggiormente idonea al rispetto dei desiderata (architettura ibrido parallelo).

In seguito, si è realizzato il DMU complessivo finale dell'unità termica (Figura 1) e lo studio definitivo per valutare l'integrazione del motore elettrico nella struttura ibrida, inserendolo conseguentemente nel DMU.

L'attività prevista in Fase 2 si è conclusa in data 14/11/2023 con la realizzazione del prototipo del DTA pronto per il testing (Figura 2).



Figura 1 - DMU preliminare del complessivo macchina elettrica in presa diretta con il motore termico.



Figura 2 - Motore completo (DTA).

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Lo studio del potenziamento del motore termico V6 impiegato sul veicolo VBM Legacy e la sua predisposizione ad essere ibridizzato risulta strategico in ambito militare sia per la sua natura intrinsecamente innovativa che per la creazione dei presupposti, in un contesto tattico operativo, di ampliare le possibilità in termini di mobilità e di operare in contesti che richiedono elevati livelli di stealthiness.

In particolare, tale predisposizione garantisce al veicolo di perseguire una missione veicolare più lunga e una fruizione di maggiore potenza elettrica. Le sopracitate note esigenze operative, tecnicamente si declinano come diminuzione di consumi (in merito all'incremento di durata della mission) e come disponibilità di una APU elettrica, molto più silenziosa e con una minima manutenzione rispetto a quelle tradizionali. Entrambe le capacità

hanno una ricaduta benefica sul supporto logistico con lo scopo finale di diminuirne il TCO.

CONCLUSIONI

L'aggiornamento con conseguente realizzazione fisica del motore V6 del VBM Legacy ha permesso di costruire un prototipo che dovrebbe garantire al veicolo di raggiungere un rapporto potenza/peso in linea con quelli degli altri OEM attivi sul mercato. Le considerazioni fatte dovranno infatti essere confermate nella fase n°3 del PNRM in oggetto, ossia la fase che prevede l'effettuazione delle prove al banco dell'unità termica, denominata DTA.

Si rende dunque necessario verificare su un banco prova se gli studi fatti per aggiornare l'unità propulsiva riescono effettivamente a garantire il rapporto potenza/peso obiettivo. In caso contrario, i risultati delle prove forniranno ad IDV un dettaglio tangibile delle limitazioni del motore prototipale e degli spunti utili per ulteriori aggiornamenti e modifiche.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

AD	<i>Amministrazione Difesa</i>
APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
AIFV	<i>Armoured Infantry Fighting Vehicle</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DMU	<i>Digital Mock Up</i>
DTA	<i>Dimostratore Tecnico Avanzato</i>
EBOM	<i>Engineering Bill Of Materials</i>
FEA	<i>Finite Elements Analysis</i>
IDV	<i>Iveco Defence Vehicles</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PNRM	<i>Piano Nazionale della Ricerca Militare</i>
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
VBM	<i>Veicolo Blindato Medio</i>

PAROLE CHIAVE

Motore, Aggiornamento, Assemblaggio, Ibridizzazione, Mobilità.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.174
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri(22)
Ente responsabile del progetto:	Innovazione Tecnologica S.p.A.
Città, Regione:	Bolzano, Trentino-AltoAdige
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Luca RIGO
Recapiti del responsabile del progetto:	IDV via Alessandro Volta 6 39100 Bolzano
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3346833245
E-mail del responsabile del progetto:	luca.rigo@ivecogroup.com

BIBLIOGRAFIA**Libri e altre monografie**

Giancarlo Ferrari. Motori a combustione interna. 2nd ed. 2016

Altro materiale pubblicato

SAE J 617. Engine Flywheel Housing and Mating Transmission Housing Flanges. C ed. 1992

DIN 40050-9. Road vehicles; degrees of protection (IP-code); protection against foreign objects; water and contact; electrical equipment. 1993

CEI EN 60529. Gradi di protezione degli involucri (Codice IP). 2019

Il progetto CRANOS si inquadra nel contesto della protezione della testa di un soldato da ferite e traumi. In particolare, la ricerca si è concentrata sulla definizione di metodi predittivi, basati su approcci avanzati di modellazione, capaci di poter essere utilizzati per future applicazioni mirate alla progettazione e ottimizzazione di elmetti balistici. Tali metodi, una volta validati con dati sperimentali, rappresentano modelli ad alta fedeltà affidabili ed efficaci, che permettono una comparazione tra diverse soluzioni progettuali in funzione di diverse minacce prima ancora di produrre il dispositivo stesso. Il progetto ha quindi sviluppato un approccio di modellazione di elmetti protettivi di ambito militare che permette di costruire un prototipo virtuale capace di replicare prove sperimentali di qualifica e, più in generale, eventi impattivi in forma di “virtual test”. L’approccio, che è stato costruito partendo dalle migliori conoscenze allo stato dell’arte e dalla esperienza pregressa di modellazione avanzata del gruppo di lavoro, ed è stato poi applicato ad un caso reale mostrando ottima capacità di replicare i fenomeni in oggetto. Gli obiettivi sono infatti stati raggiunti e validati attraverso l’utilizzo del metodo numerico per costruire un modello virtuale di un elmetto attualmente in dotazione alle Forze Armate Italiane.

INTRODUZIONE

Tradizionalmente gli elmetti da combattimento sono progettati per fornire protezione da minacce legate agli impatti. Diverse generazioni di elmetti si sono susseguiti, soprattutto nelle ultime decadi, alla ricerca di soluzioni ottimali. Tali soluzioni mirano a trovare una sintesi tra diversi requisiti, ad esempio la combinazione di nuove minacce e la ricerca di un compromesso tra leggerezza e capacità protettiva dell’elmetto. Recenti studi hanno mostrato come ci sia la possibilità di ottimizzare sempre di più gli elmetti sia attraverso aspetti tecnologici-progettuali, quali ad esempio l’utilizzo di materiali compositi innovativi e ad alte prestazioni, sia tramite nuove conoscenze che permettono di meglio definire l’effetto di eventi impattivi sulla testa. A ciò si aggiungono ulteriori requisiti “non balistici” che stanno acquistando sempre più importanza al fine di garantire una protezione in un contesto più ampio. Il raggiungimento di una soluzione ottimale è quindi un processo complesso che

porta alla necessità di definire metodi predittivi di progettazione avanzati, che sappiano basarsi non solo su esperienza pregressa e prove sperimentali, ma anche su modelli virtuali. CRANOS si è inserito nella definizione di tali metodi.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Il progetto CRANOS ha permesso di sviluppare un approccio di modellazione di elmetti protettivi in ambito militare. Nella progettazione preliminare di tali dispositivi, spesso si ricorre a numerosi test per validare la bontà della soluzione proposta con conseguente aumento di tempi di realizzazione e costi associati. La possibilità di avere a disposizione un prototipo virtuale di elmetto, che può essere utilizzato per la verifica delle prestazioni delle soluzioni attuali e innovative verso un numero esteso di minacce e condizioni operative, rappresenta una soluzione tecnologica all’avanguardia per migliorare lo sviluppo di tali dispositivi. Tra i vari scenari sono inclusi

anche quelli derivanti da requisiti non balistici come i casi di tipo “*blunt*” ovvero impatti o cadute. La soluzione tecnologica proposta permette di avere a disposizione una piattaforma virtuale che possa favorire la progettazione e lo sviluppo di nuove soluzioni riducendo tempi ed incertezze ed aumentando la rispondenza operativa. La soluzione proposta ha messo quindi a disposizione uno strumento razionale ed efficace per affrontare la problematica dei traumi riguardanti la parte superiore del corpo (testa), questione che sta diventando sempre più importante nei recenti conflitti. Gli obiettivi sono stati raggiunti e validati attraverso l'utilizzo del metodo per costruire un modello virtuale di un elmetto attualmente in dotazione alle Forze Armate Italiane. Tale modello è costruito partendo da un importante contributo dell'azienda produttrice dell'elmetto, VM Safety, che ha messo a disposizione modelli geometrici, descrizione dei materiali e gli elmetti stessi che sono stati utilizzati per attività di validazione sperimentale. Tali elmetti sono stati sottoposti a test balistici in accordo con gli attuali requisiti e standard; ulteriori test sono stati svolti in situazioni non standard. Tutte le prove sono state riprodotte dal modello che ha mostrato una ottima capacità di replicare il comportamento dell'elmetto in tutte le condizioni sperimentali.

METODOLOGIA

Il progetto è stato articolato in diversi step, che hanno permesso di costruire una metodologia aggiornata e validata. Una estesa attività di ricerca bibliografica ha permesso di definire uno stato dell'arte specifico fornendo informazioni aggiornate e multidisciplinari delle problematiche riguardanti gli elmetti militari, i criteri di progettazione e verifica e più nello specifico i metodi di modellazione inerenti con approfondimento specifico sui materiali utilizzati. Si sono inoltre approfonditi i fenomeni di lesione cerebrale traumatica. Sono quindi stati definiti metodi di modellazione di elmetti balistici sempre attraverso

approcci a complessità crescente. Tali metodi sono stati applicati a diversi casi riferiti a due elmetti di concezione moderna, il PASGT e l'ACH utilizzando dati presenti in letteratura scientifica (sia per la costruzione che per la validazione). Tale metodologia è stata quindi applicata ad un elmetto in dotazione alle Forze Armate Italiane. Tale elmetto, che è stato fornito dalla ditta VM Safety, è stato ricostruito in ambiente virtuale FEM (Finite Element Model) (Figura 1). Prove sperimentali di impatto sono state eseguite in ambiente reale e replicate in ambiente virtuale. Le prove sperimentali sono state eseguite utilizzando specifiche di norme attuali, nello specifico la NATO STANAG 2920 e la NIJ 0106.01; tali prove sono state eseguite sia in forma standard che attraverso variazioni non convenzionali in modo da verificare il comportamento dei modelli anche in casi più sfidanti ed “estremi” rispetto all'involuppo di utilizzo. Le prove sono state eseguite presso il laboratorio balistico del Banco Nazionale di Prova (BNP). I risultati ottenuti (sperimentali e virtuali) sono stati confrontati (Figura 2) mostrando un'ottima concordanza in un ampio spettro di casistiche. Inoltre, il modello validato è stato utilizzato per approfondimenti, solo virtuali, nell'ambito di prove d'impatto non balistiche quale gli impatti contundenti. Infine, la metodologia è stata consolidata in modo da fornire linee guida per future progettazioni.

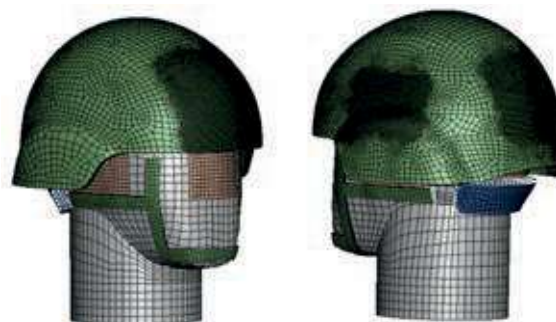


Figura 1 - Modello completo per simulazioni FEM di penetrazione da impatto balistico. Il modello comprende anche la “falsa testa” con plastilina per la misura del trauma.



Figura 2 - Comparazione numerico sperimentale di un impatto occipitale, Cal 9x19 FMJ (7.45g) - 390 m/s; la misura del trauma sperimentale (16 mm) e numerico (15 mm) mostrano un'ottima concordanza.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Lo sviluppo di elmetti e caschi protettivi è attualmente una prerogativa importante anche in ambito civile, come evidenziato dai recenti aggiornamenti delle norme, quale ad esempio la ECE 22-06. Gli studi affrontati in questo progetto hanno una forte valenza nella direzione di progettare caschi ed elmetti sempre più protettivi in tutti i contesti. I risultati raggiunti dal progetto hanno inoltre mostrato una robustezza dell'approccio di modellazione in un range di casi molto variegato: ovvero la definizione di un unico modello di partenza per effettuare prove differenti senza necessità di specifici aggiustamenti. Il modello si è infatti dimostrato capace di replicare una varietà di casi che vanno dalla completa penetrazione all'assorbimento di energia attraverso estese deformazioni, questo con diversi impattatori ed energie di impatto. Il metodo ha quindi permesso di costruire un modello numerico robusto capace di investigare una moltitudine di requisiti. In questo contesto la possibilità di disporre di modelli virtuali può essere utilizzata per un processo di ottimizzazione di elmetti verso i diversi requisiti, anche e soprattutto innovativi (e quindi diversi da quanto fatto fino ad ora) al fine di ottenere prodotti sempre più prestanti e rispondenti alle nuove sfide.

CONCLUSIONI

Il progetto ha pienamente raggiunto il suo scopo mostrando la capacità di definire e produrre di essere un valido strumento predittivo capace di eseguire test virtuali con ottima capacità replicativa delle principali grandezze fisiche coinvolte. Nello specifico ha permesso di identificare un approccio di modellazione efficace (capace di riprodurre i fenomeni in oggetto) ed efficiente (capace di produrre risultati con analisi di durata limitata). Tale approccio è stato applicato ad un caso di studio reale, ovvero un elmetto in materiale composito attualmente in dotazione alle Forze Armate Italiane, attraverso la replicazione di prove sperimentali secondo le norme vigenti ed oltre. Tali prove sono state simulate dal modello e il confronto ha permesso di validare l'approccio di modellazione anche in condizioni più gravose di quelle richieste. Questo ha permesso di estendere la validità dell'approccio di modellazione così che possa, in futuro, essere applicato a casi nuovi e non ancora contemplati. Infine, l'approccio validato è stato applicato alla simulazione di casi di impatto non balistici (impatti contundenti) mostrando le capacità del modello anche in questo contesto. Gli ottimi risultati aprono ampie possibilità ad un futuro utilizzo di tale approccio per ulteriori fasi di evoluzione degli elmetti balistici.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

FEM	<i>Finite Element Model</i>
BNP	<i>Banco Nazionale di Prova</i>

PAROLE CHIAVE

Elmetti balistici, modelli virtuali, FEM, impatto balistico, impatto contundente, progettazione.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero contratto:	n. 133 stipulato in data 23.12.2022
Amministrazione appaltante:	TERRARM
Ente responsabile del progetto:	Politecnico di Milano
Città, Regione:	Milano, Lombardia
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Andrea Manes
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Giuseppe La Masa, 1 - 20156 Milano, Italia
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 02 2399 8630
E-mail del responsabile del progetto:	andrea.manes@polimi.it

Nell'ambito delle applicazioni di sistema di difesa, è sempre più crescente il problema di avere strumenti di navigazione che siano affidabili, performanti, a basso ingombro, che siano adattabili e quindi utilizzabili trasversalmente su più piattaforme al fine di ridurre i costi di integrazione anche rispetto alle peculiarità d'utilizzo e che, inoltre, siano basati su una tecnologia completamente *ITAR FREE* che garantisca reperibilità immediata e completa indipendenza nazionale.

Il progetto “MRFOGINS: *Miniaturized Redundant FOGINS*” è focalizzato sullo studio e sviluppo di un sistema di navigazione e di misura inerziale, autonomo a bordo missile o a livello di sistema d'arma, basato su avanzamenti e opportuni configurazioni, anche in ridondanza intrinseca, della tecnologia inerziale giroscopica in fibra ottica e sull'integrazione ottimale di sensoristica quartz e MEMS che risponda ai bisogni sopra descritti. Inoltre, tali sistemi devono essere facilmente adattabili con le unità di controllo a bordo missile (WCU, *Weapon Control Unit*) di diverse piattaforme (*Anti-Ship/Deep strike, Air Defence, ...*).

INTRODUZIONE

I sensori inerziali per la determinazione della posizione, del nord geografico e dell'assetto utilizzati nelle piattaforme avioniche, terrestri e navali sono basati su giroscopi meccanici o micromeccanici, su giroscopi in fibra ottica o su giroscopi *ring laser* o anche su *Hemispherical Resonator Gyroscope*. Queste tecnologie, estremamente mature, possono fornire soluzioni molto accurate e con buona affidabilità, ma con ingombri, pesi, consumo elettrico elevati. Inoltre, tali sistemi non hanno un IHM (*Integrated Health Management*) ed una ridondanza intrinseca, la ridondanza infatti, nella maggior parte delle applicazioni, viene implementata con la replica degli apparati di stabilizzazione e/o di navigazione. Lo sviluppo di tecniche di miniaturizzazione ottica e di un algoritmo di fusione di sensori permette di migliorare l'affidabilità del sistema di navigazione e stabilizzazione riducendo la ridondanza di sistema, attualmente implementata tramite replica di apparati inerziali. La miniaturizzazione permette anche una drastica riduzione dell'ingombro, rendendo il sistema compatto, pur mantenendo alte prestazioni, accu-

ratezza e affidabilità, elementi fondamentali per tutte le piattaforme avioniche, terrestri, e navali allo scopo di orientamento, posizionamento in assenza di GNSS e stabilizzazione.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Nei sensori inerziali per la determinazione della posizione, del nord geografico e dell'assetto utilizzati nelle piattaforme avioniche, terrestri e navali, la gestione IHM fornirebbe la capacità di rilevare e diagnosticare i guasti e intraprendere le azioni adeguate in risposta ad un guasto o di un “*early warning*”. Da qui l'esigenza di sviluppare una tecnologia che permetta di ridurre la ridondanza di sistema fatta mediante replica di apparato inerziale, fornendo una ridondanza intrinseca all'interno dell'apparato. Contributo importante viene dato dall'integrazione ottica (Figura 2), che contrariamente allo stato dell'arte, non utilizza componenti ottici discreti in fibra permettendo di rendere il sistema più compatto. Il prototipo finale è stato realizzato integrando quattro sensori di velocità angolare giroscopici in fibra ottica e quattro sen-

sori accelerometrici al quarzo, ibridati con quattro IMU a 6-DoF (3 accelerometri e 3 giroscopi) basati su tecnologia MEMS, il tutto in configurazione skewed e geometria a tetraedro. I sensori FOG, realizzati in *house*, hanno apportato ulteriori miglioramenti in termini di prestazioni ma senza compromettere le dimensioni ed il peso del sistema, dimostrando l'alta scalabilità della tecnologia FOG. Specificatamente alle applicazioni missilistiche le piattaforme inerziali rappresentano uno dei principali sottosistemi dei sistemi missilistici. I requisiti allocati alla IMU sono funzionali alle prestazioni ed alla missione del missile. Fissati i requisiti della piattaforma inerziale è possibile commissionare la realizzazione di piattaforme inerziali ad hoc con costi spesso elevati o cercare sul mercato una piattaforma inerziale già commercializzata. In entrambi i casi, le piattaforme inerziali rappresentano un sistema “*black box*” non pilotabile dalla WCU del missile e non adattabile/scalabile in funzione alle esigenze. La configurazione “*white box*” sviluppata permette invece di personalizzare l'IMU a livello funzionale. Il sistema MRFOGINS rispetto agli attuali sistemi è in grado di superare le limitazioni in termini di ingombro, consumo, affidabilità, adattabilità e di componentistica ITAR.

METODOLOGIA

Il prototipo MRFOGINS è in configurazione HSRIMU (*Hybrid Skewed Redundant IMU*) che comprende un'unità di misura inerziale ridondata *skewed* (SRIMU) e un'unità di misura inerziale ridondante ibrida (HRIMU). Sono stati integrati 4 giroscopi e 4 accelerometri di tipo “*navigation grade*”, ed è stata realizzata la “*sensor fusion*” con quattro IMUMEMS 6-DOF (in terna ortogonale di tre accelerometri e tre giroscopi) “*lower-tactical grade*”. Al fine di realizzare la ridondanza intrinseca del sistema, sono state sviluppate delle tecniche di miniaturizzazione ottica utilizzando una piattaforma innovativa ovvero *Lithium Niobate On Insulator* (LNOI). La realizzazione di *Multi-functional-Integrated-Optical-Circuit* e delle strutture ottiche di accoppiamento tra chip e Polarization Maintaining Fiber (PMF), hanno permesso di ridurre gli effetti di *bending* nell'integrazione, di realizzare la ridondanza intrinseca, e allo stesso tempo di ottenere una riduzione dell'ingombro del sistema. Lo sviluppo di un algoritmo di IHM (*Integrated Health Management*) ha fornito la capacità di rilevare e diagnosticare i guasti e intraprendere adeguate azioni correttive in risposta ad un guasto o di un “*early warning*”.

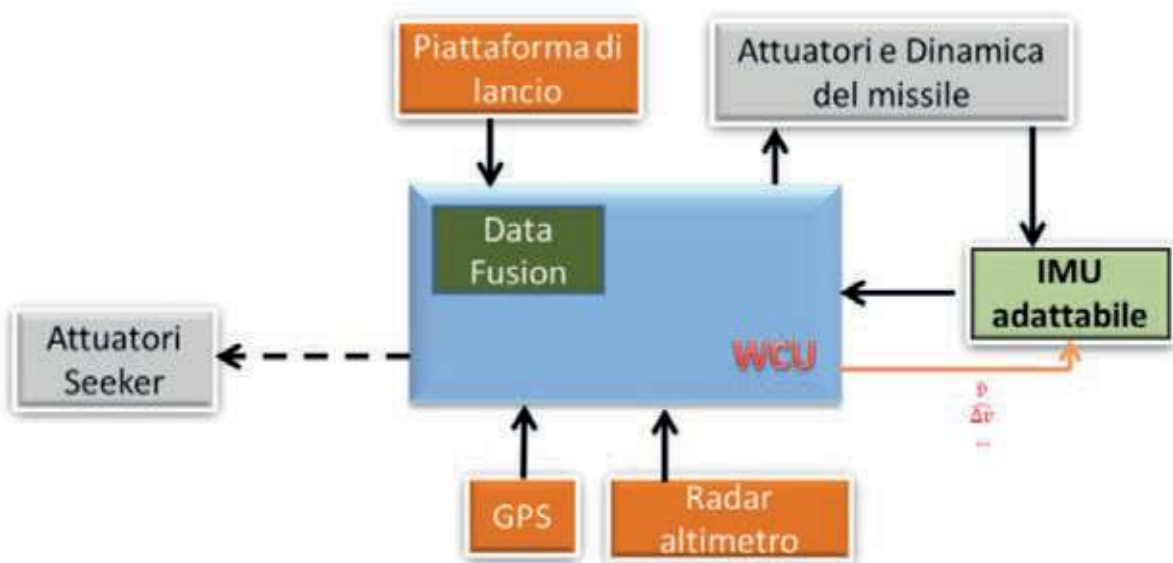


Figura 1 - Architettura di Navigazione White Box.

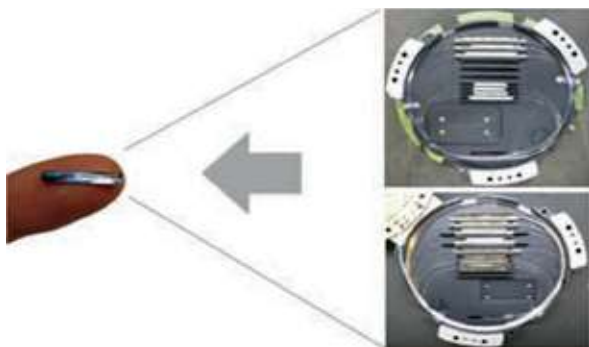


Figura 2 - Miniaturizzazione: integrazione e ibridazione di componenti optoelettronici in chip fotonici.

Ciò ha consentito di aumentare l'affidabilità complessiva del «sistema» MRFOGINS, arricchendone la capacità di “fail-safe” e “fault-tolerant” ovvero di rilevamento, identificazione ed esclusione dei fault (FD/FDI/FDE) e, quindi, di ottenere una condizione di continuità operatività anche a fron-

do la calibrazione ed incrementando le prestazioni complessive dell'algoritmo di Navigazione, tutto a parità di interfacce di controllo (ICD).

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

In campo militare, il dispositivo inerziale MRFOGINS risulta compatto (Figura 3), con alte prestazioni e accuratezza (Tabella 1 e Tabella 2), affidabile, ridondato, elemento fondamentale per tutte le piattaforme avioniche, terrestri, e navali allo scopo di orientamento, posizionamento in assenza di GNSS e stabilizzazione. Per applicazione avioniche (specialmente UAV), subacquee (specialmente AUV) e quelle relative alle forze speciali (incursori e RRAO) per targeting/designazione portatili, i requisiti di peso, volume, consumo, affidabilità e



Figura 3 - Modello 3D-CAD e prototipo reale MRFOGINS.

te di guasto, a costo di un ridotto degrado delle prestazioni del sistema MRFOGINS. Il sistema è stato integrato e testato sulla WCU dimostrando l'efficacia dell'architettura di navigazione e di comunicazione tra WCU e sottosistemi missilistici, con approccio IMU “white box” (Figura 1) personalizzando l'IMU a livello funzionale tramite la configurabilità dei coefficienti del filtro di Coning e Sculling, del filtro IIR, della frequenza del dato di uscita, inoltre la stima dei bias viene reindirizzata in retroazione alla IMU, miglioran-

ridondanza di sistemi di navigazione inerziale sono sempre più stringenti. Il cluster di sensori ridondato realizzato trova anche applicazioni in nuova generazione di avionica per fighter in cui i sensori sono distribuiti e la capacità di navigazione può essere affidata ad un elaboratore centrale, in modo da diminuire il numero totale di ISA (*Inertial Sensor Assembly*), mantenendo prestazioni e affidabilità. La caratteristica del pilotaggio tramite WCU (ovvero “white box”) permette di ottimizzare le performances della IMU e quindi dell'intero sistema missile.

Parametri	MRFOGINS (IMU)
Accuratezza di Bias stability (1 sigma)	$<0,007^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$
Accuratezza di rumore (1 sigma)	$<0,006^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$
Accuratezza di fattore di scala (1 sigma)	$<50\text{ppm}$
Massimo range dinamico	$<2000^{\circ}/\text{sec}$
Consumo di potenza elettrica	$<14\text{W}$
Dimensioni	Diametro esterno 117mm (base 133mm), altezza 200mm
Classe di ridondanza	II
Sensori attivi (Giroscopi)	4

Tabella 1 - Prestazioni ottenute con MRFOGINS (IMU)\Performance achieved with MRFOGINS (IMU).

Parametri	MRFOGINS (INS)
Accuratezza di Heading (RMS)	$0,393^{\circ}\text{secante latitudine}$
Accuratezza di assetto Roll/Pitch (RMS)	$0,006^{\circ}/0,005^{\circ}$
Accuratezza di posizione (CEP 50)	4.13Nm/hr
Tempo di allineamento (dato disponibile)	$<2\text{min}$
Tempo di allineamento	$<15\text{min}$
Consumo di potenza elettrica	$<14\text{W}$
Temperatura operativa	$-40^{\circ}\text{C} < T < +70^{\circ}\text{C}$

Tabella 2 - Prestazioni ottenute con MRFOGINS (INS)\Performance achieved with MRFOGINS (INS).

Inoltre, essere ITAR free significa reperibilità immediata, costi inferiori e completa indipendenza nazionale su una tecnologia fondamentale non solo specificatamente a livello missile o a livello sistema d'arma ma anche più in generale a livello di qualsiasi altro sistema di difesa.

CONCLUSIONI

Completato lo sviluppo e la realizzazione del prototipo, è stata fatta l'Integrazione e connessione funzionale dei vari componenti Hardware e Software: IMU, GNSS e WCU in modo da verificare i componenti integrati. La validazione in campo in condizioni operative limitate del prototipo è stata eseguita tramite test di ATP su tavola rotante in range termico esteso, ed a temperatura ambiente non controllata in condizioni dinamiche

del prototipo MRFOGINS integrato con il GNSS, in modo da effettuare l'assessment delle prestazioni ottenute confrontandole con le prestazioni richieste per le diverse applicazioni d'uso (Long Range, *Anti-Ship*, *Surface attack*, *Anti Air*) precedentemente valutate. I test eseguiti hanno evidenziato un incremento sia della continuità del sistema che delle prestazioni. La tecnologia FOG è inoltre altamente scalabile, è dunque possibile migliorarne ulteriormente le prestazioni IMU e di navigazione. Grazie all'ulteriore sviluppo delle tecniche di miniaturizzazione sarebbe inoltre possibile aumentare la continuità del sistema rispetto alla soluzione a 4 assi realizzando una HSRIMU ad n-assi che consentirebbero le funzionalità di *Fail Op/Fail Safe* senza troppi impatti sull'ingombro finale di sistema.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

ATP	<i>Acceptance Test Procedure</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
DOF	<i>Degree of Freedom</i>
FDIR	<i>Fault Detection, Isolation, and Recovery</i>
FDI	<i>Fault Detection and Isolation</i>
FDE	<i>Fault Detection Exclusion</i>
FD	<i>Fault Detection</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
HRIMU	<i>Hybrid Redundant IMU</i>
HSRIMU	<i>Hybrid Skewed Redundant IMU</i>
IHM	<i>Integrated Health Management</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
ISA	<i>Inertial Sensor Assembly</i>
ITAR	<i>International Traffic in Arms Regulations</i>
LNOI	<i>Lithium Niobate on Insulator</i>
MEMS	<i>Micro Electromechanical Systems</i>
MRFOGINS	<i>Miniaturized Redundant FOGINS</i>
PMF	<i>Polarization Maintaining Fiber</i>
SRIMU	<i>skew-redundant inertial measurement unit</i>
WCU	<i>Weapon Control Unit</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

PAROLE CHIAVE

IMU, INS, fail safe, FOG, IHM, Ridondanza intrinseca, ITAR FREE, WCU.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2017.041
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri(22)
Ente responsabile del progetto:	Civitanavi Systems S.p.A.
Città, Regione:	Pedaso, Marche
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dott.ssa Angela Moretti
Recapiti del responsabile del progetto:	Via del Progresso, 5, 638027 Pedaso (FM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0733 773648
E-mail del responsabile del progetto:	info@civitanavi.com

Il progetto PROACTIVE ha sviluppato un sistema per la protezione di mezzi militari da attacchi aerei portati per mezzo di sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) o a guida autonoma (UAV) quando si trovano in movimento in aree urbane non protette. Il sistema di monitoraggio in tempo reale dell'area di interesse e di eventuale contro-misura si basa sull'impiego di UAV dotati di sensori ottico-acustici, cooperanti tra loro attraverso un sistema intelligente di controllo e riconfigurazione dinamica con scambio continuo di informazioni mirato all'individuazione, al tracciamento e all'identificazione in tempo reale di UAV ostili in aree di possibile intervento delle Forze Armate. I principali risultati scientifici raggiunti dal progetto PROACTIVE riguardano lo studio e sviluppo di algoritmi per la (a) localizzazione e il *tracking* di UAV ostili con sensori audio/video montati su UAV cooperanti, (2) il controllo e la riconfigurazione di un cluster di UAV e (c) l'attuazione di strategie di contrasto. Inoltre, il progetto PROACTIVE ha sviluppato e realizzato un nuovo sensore acustico a geometria circolare e sferica che può essere montato su UAV ed è in grado di localizzare UAV ostili in volo nell'area di interesse.

INTRODUZIONE

Il programma di lavoro e gli obiettivi della Fase 2 del progetto PROACTIVE prevedevano di affrontare aspetti di gestione della rete di sensori ottico-acustici posizionati sui diversi UAV del cluster, di elaborazione in tempo reale dei dati audio e video trasmessi dai sensori e dei dati di controllo del volo degli UAV del cluster, secondo specifiche linee di ricerca: (a) analisi distribuita, riconoscimento e la re-identificazione audio/video di UAV ostili in volo; (b) localizzazione e *tracking* di UAV classificati ostili; (c) strategie di contrasto con *jammer* o mediante ostruzione del movimento degli UAV ostili. L'attività di ricerca ha riguardato in particolare gli ulteriori sviluppi in termini di algoritmi per la localizzazione e la classificazione di possibili minacce e per l'attuazione delle strategie di intervento mediante il coordinamento di più unità a fronte dell'individuazione di una minaccia. Sono stati considerati dunque gli esperimenti di localizzazione e *tracking* del movimento di droni ostili, lo sviluppo di algoritmi per l'analisi congiunta dei flussi audio e video provenienti dai sensori a bordo

dei dispositivi aerei e lo studio delle tecniche per il controllo dei dispositivi mobili, incluse le fasi di studio di algoritmi per l'avvicinamento al drone ostile e il coordinamento del cluster di intervento per l'attuazione di contromisure.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Lo sviluppo della piattaforma HW e SW del progetto PROACTIVE ha tenuto in considerazione l'implementazione e la realizzazione di un sistema integrato che possa implementare le funzionalità richieste dalla proposta tecnica. Il primo obiettivo raggiunto è stato quello di definire l'architettura hardware (HW) del sistema comprendente le unità mobili (quadricotteri classificabili come UAV o MAV) con i dispositivi di controllo e comunicazione, i sensori per la raccolta dati audio e video (array microfonici lineari, circolari e sferici, e videocamere di piccole dimensioni), la stazione di terra ed il sistema di trasmissione dei flussi audio e video (A/V) e di comunicazione dei dati di controllo per un *multistream* centralizzato

di flussi A/V da unità mobili. Il secondo obiettivo raggiunto è stata la definizione dell'architettura software (SW) del sotto-sistema per il coordinamento dei diversi dispositivi fisici e lo sviluppo delle componenti algoritmiche di analisi dati e controllo funzionale. Particolare attenzione è stata data allo sviluppo e alla realizzazione dell'interfaccia utente interattiva attraverso la quale si possono attivare ed utilizzare in tempo reale le varie funzionalità SW (incluse il controllo dei singoli droni e del cluster, controllo dei flussi dati e relativa visualizzazione) sulla stazione di terra. Per il controllo movimento è stato utilizzato il protocollo MAVLink che definisce una serie di messaggi e comandi per la comunicazione con l'autopilota.

del monitoraggio dell'area protetta e due UAV a terra pronti a decollare non appena un drone ostile viene rilevato nella zona monitorata. La struttura è centralizzata con una stazione di terra (GCS) come nodo principale.

I sensori audio realizzati con array a geometria circolare, sferica e tetraedica sono quelli che contengono i principali aspetti di innovazione scientifica del progetto PROACTIVE rispetto allo stato dell'arte (Figura 2). In particolare, oltre ad aver utilizzato sensori disponibili in commercio con diverse configurazioni, dimensioni e peso, sono stati progettati e realizzati nuovi modelli e configurazioni di microfoni più efficaci per gli scopi del progetto. Sia l'array circolare trasportato dal

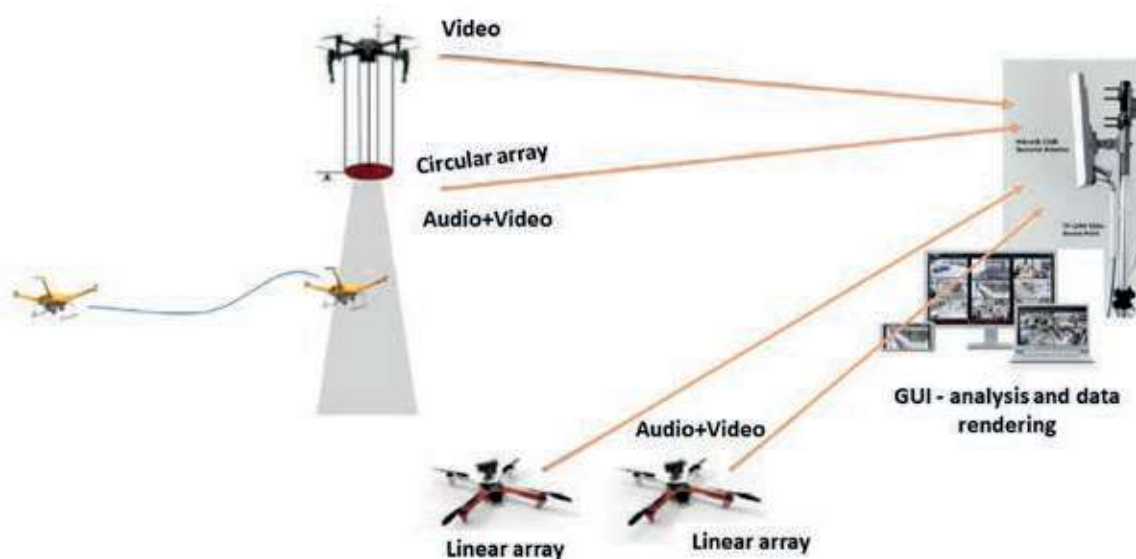


Figura 1 - Schema dell'architettura logica del sistema PROACTIVE per il monitoraggio e protezione di mezzi militari da UAV ostili.

Come dispositivo di controllo degli UAV è stato scelto il Pixhawk-6c per le sue caratteristiche di affidabilità. L'architettura multi-drone per proteggere l'area da UAV ostili è illustrata in Figura 1. Tale architettura si basa sull'acquisizione di dati A/V e sulle comunicazioni Wi-Fi tra gli UAV in volo e tra gli UAV e la stazione di terra (GCS). Lo scenario prevede un UAV in volo responsabile

Matrice 100 (parte sinistra di Figura 2) che l'*Ambisonic* (parte destra di Figura 2) sono stati progettati e costruiti in laboratorio. In particolare, il sensore *Ambisonic* è il più recente ed è talmente compatto da poter essere montato senza problemi sugli UAV di tipo F450. Il sensore Zylia invece è stato utilizzato sul nodo locale della stazione di terra (parte centrale di Figura 2).



Figura 2 - Sensori audio: array circolare (sinistra), array sferico Zylia (centro), array tetraedrico Ambisonic (destra).

METODOLOGIA

L'architettura HW e SW del sistema PROACTIVE è stata sottoposta nella fase iniziale del progetto a specifiche sessioni di acquisizione e registrazione dati (flussi audio/video da tutti i sensori e dati di telemetria da ogni singolo UAV) per la realizzazione di specifici *dataset* da utilizzare sia ai fini della ricerca che per testare le funzionalità del sistema. Successivamente sono state effettuate numerose sessioni di test e sperimentazione sul campo. Al fine di illustrare l'architettura del sistema PROACTIVE e le sue funzionalità vengono qui di seguito descritti i diversi dimostratori che sono stati sviluppati. Per ogni singolo dimostratore sono stati registrati specifici video combinando le registrazioni effettuate tramite una telecamera esterna in grado di riprendere l'intera area di sperimentazione con le registrazioni effettuate con un software di cattura schermo che ha permesso di acquisire i flussi video dallo schermo della *ground station* (GCS). Tali flussi video hanno riguardato gli output delle differenti componenti SW del sistema che gestiscono sia l'unità di controllo movimento e coordinamento degli UAV intercettori sia le comunicazioni con l'autopilota di bordo sia i flussi audio e video. Di seguito sono brevemente illustrati 4 sotto dimostratori realizzati.

- 1) Un drone Aurelia (target) vola sotto il sensore acustico con array circolare, mantenuto in volo da un UAV di guardia (drone DJI Matrice

100), entrando in un'area all'interno del campo visivo della sua *raspi-cam* dove viene rilevato (Figure 3 e 4). La direzione di avvicinamento del drone Aurelia è opposta rispetto a quella frontale del drone intercettore F450. Dopo la fase di *detection* video, la *ground station* invia il segnale di *detection* e la direzione di provenienza del drone ostile Aurelia al drone intercettore F450 che si alza in volo e allinea il suo asse principale nella direzione del *target*.

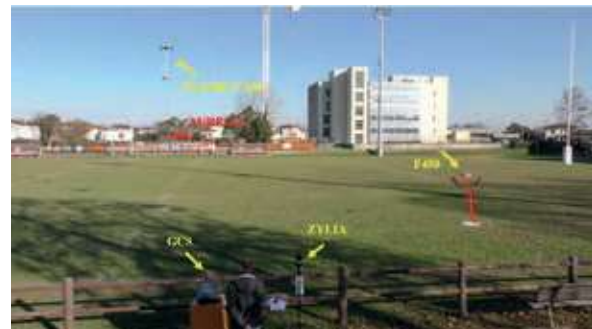


Figura 3 - Detection video da flusso raspi-cam montato su drone Matrice 100.



Figura 4 - Visualizzazione dei flussi video e del controllo sullo schermo della stazione di terra dopo la rivelazione video.

- 2) Un drone Aurelia (target) si muove in un'area posta al di fuori dal campo visuale del nodo locale di *detection* e in direzione opposta rispetto a quella dell'asse principale del drone intercettore F450 (Figure 5 e 6). Dopo la fase di *detection* audio, la *ground station* invia il segnale di *detection* e la direzione di provenienza del drone target Aurelia al drone intercettore F450 che si solleva in volo e si allinea nella direzione di provenienza del target.



Figura 5 - Detection audio (con sensore Zylia) con soglia di energia acustica e misura di angolo.



Figura 6 - Visualizzazione dei flussi A/V e del controllo sullo schermo della stazione di terra dopo la rivelazione audio.

- 3) Un drone target Aurelia entra nel campo visivo della videocamera locale in direzione frontale rispetto al drone intercettore F450 (Figure 7 e 8). Dopo la fase di *detection* video, la *ground station* invia il segnale di *detection* e la direzione di provenienza del drone target Aurelia al drone intercettore F450 che si solleva in volo e si sposta rapidamente verso la posizione del target. È importante notare che in questo dimostratore il drone intercettore F450 non è vincolato al cordino e può compiere uno spostamento non vincolato

in direzione del drone target (il pilota del drone target ha dovuto spostarlo rapidamente per evitare la collisione).



Figura 7 - Detection video dalla videocamera locale tramite rete neurale Yolo.



Figura 8 - Visualizzazione dei flussi video e del controllo sullo schermo della stazione di terra dopo la rivelazione video.

- 4) Un drone target (Aurelia) si muove all'interno del campo visivo della videocamera locale e nella direzione opposta rispetto a quella dei due droni intercettori F450 (Figure 9 e 10). Dopo la fase di *detection* video, la *ground station* invia il segnale di *detection* e la direzione di provenienza del drone target Aurelia ai droni intercettori F450 che si sollevano e allineano il loro asse principale nella direzione del target.



Figura 9 - Detection video dalla videocamera locale tramite rete neurale Yolo.



Figura 10 - Visualizzazione dei flussi video e del controllo sullo schermo della stazione di terra dopo la rivelazione video.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Una possibile applicazione del sistema multi-drone è l'*Intelligence, Surveillance and Reconnaissance* (ISR). Un sistema ISR multi-drone consiste in un certo numero di UAV dotati di sensori A/V per monitorare una particolare area di interesse e proteggerla da UAV ostili. In questi sistemi, il controllo ed il coordinamento dei droni sono resi possibili dalle comunicazioni wireless tra le varie unità. La comunicazione tra gli UAV e una stazione di controllo di terra, dove vengono ricevuti i flussi multimediali, è necessaria per un sistema di tipo decisionale centralizzato e potenzialmente autonomo. Il controllo e la comunicazione automatica possono condurre ad un'architettura che non richiede l'intervento di un operatore a terra, in cui gli UAV sono completamente autonomi. Quando il sistema di acquisizione multimediale rileva un UAV ostile in avvicinamento, il sistema ISR è in grado di rilevarlo in tempo reale e contrastarlo autonomamente per eliminare la minaccia. Tuttavia, più in generale, i sistemi basati su più UAV possono essere impiegati per il monitoraggio militare, l'intercettazione, lo spionaggio, il pattugliamento e il contrasto di entità non autorizzate in avvicinamento in scenari operativi. Solo di recente sta emergendo il nuovo paradigma denominato *Internet of Military Things* (IoMT), una classe di Internet delle cose per operazioni di combattimento e guerra. Questi sistemi possono comunque trovare applicazione anche in ambiti civili.

CONCLUSIONI

L'attività svolta durante il progetto ha riguardato i seguenti aspetti principali:

- Sviluppo software di un dimostratore tecnologico per il dispiegamento di un cluster di UAV, l'identificazione di potenziali minacce mediante sensori audio/video innovativi posizionati sugli UAV e la messa in atto di opportune contromisure;
- Implementazione, integrazione ed utilizzazione dei diversi sensori e delle difese componenti SW studiati e progettati durante il lavoro di ricerca;
- Test sperimentali dell'architettura logica con validazione dei singoli moduli software implementati;
- Implementazione e miglioramento (*refinement*) delle strategie di intervento mediante il coordinamento di più unità di droni intercettori a fronte dell'individuazione di una minaccia. In particolare, sono stati messi a punto gli algoritmi di localizzazione e *tracking* del movimento di droni ostili partendo dall'analisi di dati acustici e di dati video con sensori posizionati sulle unità in volo e di terra;
- Implementazione e miglioramento (*refinement*) degli algoritmi per l'analisi congiunta dei flussi audio e video provenienti dai sensori a bordo dei dispositivi UAV;
- Studio ed implementazione delle tecniche per il controllo di un cluster di UAV in movimento nell'area di interesse.

La ricerca svolta nell'ambito del progetto "*proactive counter-UAV*" ha mostrato quindi lo studio e la successiva realizzazione di un sistema complesso con unità robotiche aeree sensorizzate, multiple, distribuite e coordinate. Sono state condotte anche analisi sia sulla sincronizzazione dei nodi che sugli aspetti di cyber-sicurezza, due componenti fondamentali per questo tipo di sistemi, in particolar modo se operanti in uno scenario militare.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

A/V	<i>Audio e Video</i>
GCS	<i>Ground Control Station</i>
HW	<i>Hardware</i>
IoMT	<i>Internet of Military Things</i>
ISR	<i>Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
MAV	<i>Micro Air Vehicle</i>
SAPR	<i>Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto</i>
SW	<i>Software</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

PAROLE CHIAVE

Proactive counter-UAV, multi-drone, acquisizione audio e video, monitoraggio anti-drone, sensori microfonici, MAVLink, sistema a nodi distribuiti, *Internet of Military Things*.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.145
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Università degli Studi di Udine
Città, Regione:	Udine, Friuli-Venezia Giulia
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Gian Luca Foresti
Recapiti del responsabile del progetto:	Dipartimento di Scienze Matematiche, Informatiche e Fisiche, Viale delle Scienze, 208, 33100 Udine (UD)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0432 558418
E-mail del responsabile del progetto:	gianluca.foresti@uniud.it

Lo scenario dei veicoli militari tattici leggeri e pesanti è sempre più soggetto a significativi cambiamenti, dovuti all'esigenza di ridurre la tracciabilità termica ed acustica dei mezzi e non ultima la riduzione delle emissioni nocive. Il tipo di veicolo che si è sviluppato, oggetto del presente Piano Nazionale di Ricerca Militare è un veicolo *Full Hybrid*: ossia un "*Utility Terrain Vehicle*" con trazione puramente elettrica.

L'obiettivo che ha guidato la progettazione del veicolo è stato quello di utilizzare una tecnologia innovativa in uso nei più avanzati veicoli elettrici, individuando i componenti idonei a soddisfare tutte le richieste operative.

L'esigenza di aumentare l'autonomia e ridurre i tempi di fermo veicolo per la ricarica ha suggerito l'installazione di un modulo *range extender*. Le varie logiche di controllo del veicolo permettono di ottimizzare i consumi di energia nella modalità ibrida, mentre in modalità "solo elettrica" rendono il veicolo silenzioso con bassa tracciabilità termica negli scenari richiesti.

Durante i *test* i Dimostratori Tecnologici Avanzati hanno ottenuto risultati prestazionali eccellenti, mostrando in alcuni casi *performance* migliori rispetto alle specifiche iniziali di progetto. I presenti veicoli permetteranno di sperimentare ulteriori future ottimizzazioni, sia dal punto di vista energetico che funzionale, in base a differenti requisiti operativi.

INTRODUZIONE

Gli attuali mezzi terrestri da ricognizione, in uso alle forze armate italiane, inclusi i corpi speciali, utilizzano veicoli movimentati da motori CI. La soluzione del PNRM presentato è quello di realizzare un veicolo di peso ridotto, a quattro o due posti, con vano di carico posteriore, *full hybrid* a trazione integrale, che può fornire alle forze armate una elevata capacità operativa incentrata su una mobilità silenziosa, a bassa tracciabilità termica e rapidità d'impiego.

Il veicolo è progettato con caratteristiche di rigidità e funzionalità tali da soddisfare l'impiego militare anche in condizioni estreme, ma grazie alla sua modularità potrà avere ampio utilizzo anche in settori civili quali, ad esempio, vigili del fuoco, guardie forestali, vigilanza urbana, ecc.

L'impianto di illuminazione, progettato in ottica di futura omologazione civile, prevede anche una modalità *stealth*.

La struttura perimetrale in alluminio del telaio presenta un'apertura nella parte superiore del tet-

to, in modo da rendere possibile all'operatore di praticare le sue attività affacciandosi nella parte alta del veicolo. Il telaio è stato predisposto per allestire il veicolo con supporti d'arma a pantografo per ambo i lati e punti di fissaggio d'arma sulla parte alta del tetto.

Le dimensioni e la struttura del veicolo consentono di aviotrasportare sul C13 ed elitrasportare sul CH47 il veicolo UTV, ed aviolanciarlo.



PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

I mezzi terrestri attualmente impiegati dalle Forze Armate per le attività di ricognizione sono mossi da motori a combustione interna. Questo tipo di propulsori consente di ottenere elevate potenze specifiche, ma presenta gli svantaggi legati ad elevate tracce termiche e acustiche.

La soluzione proposta nel PNRM consiste nello sviluppo di un veicolo UTV con *powertrain* “full-hybrid” ed architettura di tipo *range extender*, ossia ibrido in serie con propulsione elettrica e *range extender* per la ricarica della batteria.

In ambito militare, tale soluzione consente una risposta efficace al problema individuato, garantendo la massima silenziosità di marcia in modalità completamente elettrica, ed una grande versatilità di utilizzo grazie al modulo *range extender* per la ricarica della batteria, abbinata a logiche di controllo di motori e batteria che possono massimizzare la prestazione, l'autonomia o l'efficienza complessiva del veicolo a seconda della necessità.

Per minimizzare il peso del veicolo e renderlo quindi idoneo all'avioimbarco ed elitransporto è stato progettato un telaio in lega di alluminio dalle elevate caratteristiche meccaniche, curando il processo di produzione ed il trattamento termico. Per ridurre ulteriormente la tracciabilità del veicolo, l'impianto di illuminazione prevede la possibilità di utilizzare, in caso di necessità, luci



di guerra IR per realizzare una modalità *stealth*. Tramite l'implementazione di logiche di controllo specifiche, è inoltre possibile utilizzare il modulo *range extender* per mantenere la batteria carica nelle fasi di avvicinamento all'obiettivo, garantendo un'autonomia sufficiente allo sfruttamento della modalità *full-electric* in prossimità dell'obiettivo.

Per le ruote dentate della trasmissione sono stati adottati accorgimenti specifici, come la scelta del profilo dei denti e della ripartizione dei rapporti di trasmissione, al fine di garantirne la massima silenziosità di funzionamento tipiche per motori elettrici.

METODOLOGIA

Il metodo che ha portato alla definizione finale dei vari gruppi funzionali del veicolo UTV si compone di diverse fasi, di seguito riportate:

- 1) Analisi delle necessità operative e definizione dei requisiti
- 2) Analisi delle tecnologie, dei processi e dei materiali; scelta delle soluzioni più adatte alla specifica applicazione
- 3) Calcoli propedeutici alla definizione del *layout* finale
- 4) Progettazione dei componenti e dei diversi sistemi
- 5) Costruzione/assemblaggio dei particolari
- 6) Test in sala prova, strada, *offroad*
- 7) Eventuale revisione/miglioramento

Nello specifico, la definizione del *powertrain* ha avuto come *input* i requisiti del PNRM in termini di autonomia e prestazioni in modalità elettrica. La necessità di avere un veicolo all'occorrenza silenzioso, leggero ma allo stesso tempo in grado di garantire un'autonomia complessiva sufficiente al completamento di una missione ha indirizzato la scelta verso un *layout* di tipo ibrido in serie.

Dai requisiti del PNRM, tramite un calcolo predittivo, sono state stimate potenza necessaria a garantire le prestazioni e capacità della batteria

necessaria a garantire l'autonomia richiesta, indirizzando così la scelta dei motori elettrici e della batteria.

Il calcolo è stato poi affinato mediante simulazioni di scenari operativi diversi con *software* specifico 1-D sviluppato in *Oral Engineering*.

Sono quindi state definite le caratteristiche dei motori elettrici in termini di coppia e correnti, le mappe di controllo dei motori da implementare negli *inverter* e la capacità della batteria, la quale è stata progettata internamente.

Sono stati costruiti secondo specifica i motori elettrici, i riduttori e tutti i componenti che compongono il *powertrain*.

La prima caratterizzazione del *powertrain* è avvenuta in sala prova, una volta validato il funzionamento di tutte le parti il sistema è stato installato sul veicolo ed ha avuto inizio la fase di *test* su strada e fuori-strada.

Durante i *test*, il DTA si è dimostrato affidabile, silenzioso, con bassa traccia termica. Autonomie e prestazioni si sono dimostrate allineate ai calcoli predittivi.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La modalità 4WD permette di superare fondi stradali a bassa aderenza, con pendenze fino al 60% garantendo le massime *performance* su tutte le tipologie di terreno: strada o fuoristrada.

Il *range extender*, a veicolo fermo potrà svolgere anche la funzione di generatore elettrico (APU), per fornire energia elettrica ad un campo base fino a 10kW.

Il veicolo, provvisto di impianto di illuminazione è stato progettato anche in ottica di un'omologazione civile; al momento adotta un sistema di illuminazione militare che consente l'accensione delle luci da guerra nella modalità *stealth*.

La struttura del telaio presenta un'apertura nella parte superiore del tetto, in modo da rendere possibile all'operatore di praticare le sue attività affacciandosi nella parte alta del veicolo. Il

telaio è stato predisposto per allestire il veicolo con supporti d'arma a pantografo per ambo i lati e punti di fissaggio arma sul tetto.

Le dimensioni del veicolo consentono di imbarcare due UTV in tandem sull'elicottero CH47, di essere aviotrasportabile sul C130 e di avio-lanciare il veicolo ancorandolo tramite i golfari sulle piattaforme di lancio. Inoltre il veicolo può essere sollevato da un elicottero tramite gli opportuni golfari posizionati sulla parte superiore del *rollbar*.

CONCLUSIONI

I risultati delle attività completate nel PNRM, hanno dimostrato l'elevato livello di maturità raggiunto dal progetto, conferendo al DTA un TRL7. La completa definizione delle parti che compongono il veicolo e l'assemblaggio dei DTA ha permesso lo svolgimento di *test* funzionali e prestazionali al fine di validarne le caratteristiche.

Durante detti *test* i DTA hanno ottenuto risultati prestazionali eccellenti, mostrando in alcuni casi *performance* migliori rispetto alle specifiche iniziali di progetto.

I presenti veicoli permetteranno di sperimentare ulteriori future ottimizzazioni, sia dal punto di vista energetico che funzionale, in base a differenti requisiti operativi.



SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

APU	<i>Auxiliary Power Unit</i>
CI	<i>Combustione Interna</i>
DTA	<i>Dimostratore Tecnologico Avanzato</i>
kW	<i>kiloWatt</i>
PNRM	<i>Piano Nazionale di Ricerca Militare</i>
TRL	<i>Technology Readyness Level</i>
UTV	<i>Utility Terrain Vehicle</i>
WD	<i>Wheel Drive</i>

PAROLE CHIAVE

Full, Hybrid, Vehicle, range estender, APU.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.152
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Oral Engineering S.r.L.
Città, Regione:	Modena, Emilia-Romagna
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Roberto BRIGANTE
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Decorati al Valor Militare, 40, 41126 Modena (MO)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 059 512121
E-mail del responsabile del progetto:	r.brigante@oralengineering.com

Negli scenari operativi contemporanei è cruciale avere una informazione continua, accurata e affidabile di Posizione, Navigazione e Tempo (PNT). Attualmente i dati di PNT sono forniti da sistemi di navigazione satellitari (GNSS) che sono, in ambiente *contested*, sempre più soggetti ad attacchi ed alterazioni mirati a impedire la ricezione o alterazione del segnale satellitare. Il programma SINAPSIS Repertorio N. 8734 del 09/12/2020 ha lo scopo di garantire il successo di una missione in scenari di *Navigation Warfare* (NAVWAR) assicurando dati di posizione, navigazione e tempo in assenza o alterazione malevola del segnale GNSS, rispondendo ai principi di Accuratezza, Integrità, Sicurezza, Continuità e Resilienza.

Le attività sono state organizzate all'interno di 3 fasi con durata temporale di un anno ciascuna. Nel corso del primo anno è stato studiato e definito lo stato dell'arte, le specifiche, il *design* del giroscopio innovativo. Le ricerche su algoritmi di *Data Fusion* e tecnologie sensoriali hanno permesso di progettare il *design*. La seconda fase, nel secondo anno, si è focalizzata sulle attività di sviluppo dei componenti di SINAPSIS e sulla *data fusion* e la realizzazione dei prototipi. La terza e ultima fase del progetto prevede lo sviluppo di un *test bed* al fine di verificare il dimostratore tecnologico.

INTRODUZIONE

Nei vari contesti operativi e attraverso le piattaforme, aeree, terrestri, navali, sia *manned* che *unmanned* il successo della missione può dipendere dal livello di accuratezza e integrità dei dati di Posizione, Navigazione e Tempo (PNT) che ad oggi si basa sui dati forniti da sistemi di navigazione satellitari (GNSS) che permettono di avere una navigazione con una precisione costante nel tempo, ed un riferimento temporale univoco.

Il progetto di ricerca definisce un sistema che possa assicurare il successo della missione anche in assenza o manomissione del segnale GNSS, sfruttando l'innovazione tecnologica per rispondere a scenari tattici di guerra convenzionale fino alle attuali missioni di *peacekeeping* e *peacebuilding* e *cyberwar*. Il cuore di SINAPSIS è una piattaforma *software-defined* che permette l'integrazione di dati provenienti da dispositivi indipendenti, complementari ed eterogenei attraverso lo studio, l'implementazione e l'integrazione di 3 tecnologie fondamentali: sensori inerziali, ricevitori GNSS

e oscillatori di precisione. Questo sistema risulta importante anche in numerose applicazioni civili in quanto l'evoluzione tecnologica ha portato alla possibilità di realizzare disturbatori del segnale GNSS in maniera semplice ed economica, aumentando drasticamente i rischi di attacchi malevoli anche in ambito di *homeland security*.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Attualmente le piattaforme si basano su sistemi PNT che utilizzano dati forniti da sistemi GNSS. Essi sono però soggetti ad attacchi del segnale satellitare (*Jamming*) o alterazioni (*spoofing*). In questo scenario di *Navigation Warfare* il livello di accuratezza e di integrità del dato di PNT diventa insufficiente per la prosecuzione e il successo della missione.

Un attacco di *spoofing* può fornire informazioni errate alle piattaforme ISR, come i droni, portandoli lontano dalle aree di interesse, o impedire attacchi tramite armi a guida di precisione che fanno uso di segnale GNSS. In generale un attacco alle

informazioni vitali PNT può portare alla paralisi di una missione, sia essa aerea, terrestre o marina. SINAPSIS è un sistema *hardware* e *software* ITAR FREE basato su tecnologia innovativa che garantisce navigazione, determinazione di posizione e di tempo in scenari operativi in assenza, carenza o manomissione del segnale GNSS. SINAPSIS sarà in grado di garantirne l'accuratezza, requisito fondamentale per completare missioni quali ISTAR e *Strike*. Il sistema sarà ampiamente flessibile grazie alla sua struttura *SW-defined* e garantirà l'integrazione di future segnali PNT. Il sistema, grazie alla sua elevata capacità di mantenere un riferimento temporale stabile e accurato potrà essere il riferimento di sincronizzazione per reti e apparati militari.

I sensori inerziali, giroscopi e accelerometri, rappresentano la principale fonte di supporto alla navigazione e i dati ad alta frequenza da loro forniti permettono di supportare una navigazione *dead-reckoning* che garantisce una disponibilità continua del dato. I dati forniti da questi sensori sono però soggetti a una deriva nel tempo che viene normalmente corretta dal segnale GNSS. Nel progetto si sta sviluppando un innovativo dimostratore basato sulla tecnologia *Hemispheric Resonator Gyro*, che garantirà un sensore con accuratezza di classe inerziale in dimensioni e consumo inferiore rispetto alle tecnologie *Ring Laser Gyro* e *Fiber Optic Gyro*.



Figura 1 - SINAPSIS vista di sistema.

METODOLOGIA

Il programma SINAPSIS sta permettendo di sviluppare un sistema di navigazione INS/GNSS (Figura 1) basato sull'integrazione di tre tecnologie fondamentali:

- un sensore inerziale HRG (*Hemispherical Resonator Gyro*) (Figura 2);
- un ricevitore GNSS SDR (*Software Defined Radio*);
- oscillatori di precisione CSAC (*Chip Scale Atomic Clock*).

Lo sviluppo di un innovativo sensore basato su tecnologia HRG è l'elemento cardine alla base del programma SINAPSIS. Tale sensore garantirà accuratezze di classe inerziale con dimensioni e consumi inferiori se paragonati alle più consolidate tecnologie *Ring Laser Gyro* e *Fiber Optic Gyro* (Figura 3).

Il ricevitore GNSS basato su un'architettura SDR permetterà funzionalità avanzate nell'ambito della geolocalizzazione satellitare, garantendo capacità anti-*jamming*, anti-*spoofing* e la flessibilità di poter integrare nuove sorgenti di informazione. L'utilizzo di oscillatori di precisione garantirà un riferimento temporale indipendente, stabile e sicuro, di fondamentale importanza per molte applicazioni quali la sincronizzazione tra gli apparati (Figura 4).

In unione a questi tre elementi di importante innovazione tecnologica, l'implementazione di un algo-



Figura 2 - Giroscopio HRG.

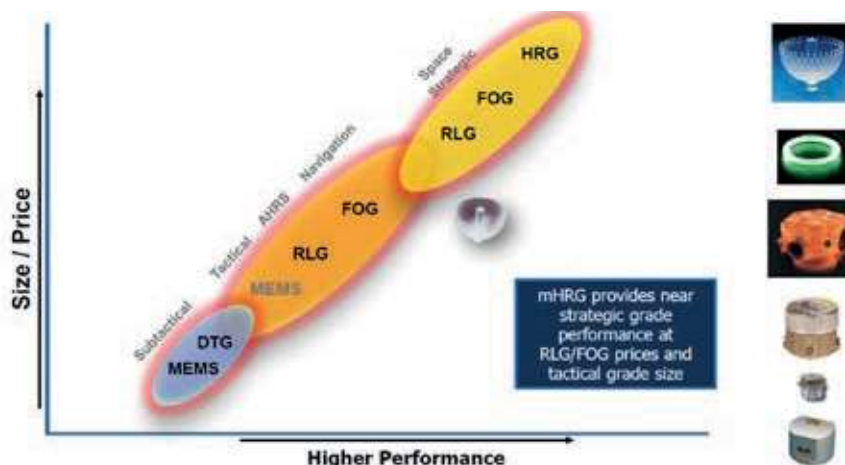


Figura 3 - Comparazione tecnologie gyro.

ritmo di *data fusion* modulare e scalabile garantisce l'utilizzo di sensori esterocezionali alternativi al GNSS, consentendo di poter facilmente integrare informazioni di assetto, di posizione e di velocità. La modularità dell'algoritmo di *data fusion* avrà inoltre come obiettivo la capacità di essere facilmente aggiornabile ed estendibile all'utilizzo di sensori e tecnologie innovative, quali ad esempio la localizzazione basata su immagini o su *radar* (Figura 5). Attraverso la fase uno del progetto SINAPSIS sono state condotte attività di ricerca sullo stato dell'arte, sulle tecniche di *Positioning Navigation and Timing* in uno scenario di NAVWAR, esaminando le tecniche di *data fusion* e la tipologia di sensori che siano in grado di rispondere agli scenari identificati. Sono state quindi definite le spe-

cifiche del sistema SINAPSIS, del sensore HRG di cui è stata realizzata la progettazione. La fase due, attualmente in corso, vede ad oggi completata la progettazione del sistema.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La strategia di Northrop Grumman Italia nei prossimi 3 anni prevede lo Sviluppo di Tecnologie Interamente Nazionali e ITAR FREE oggi non presenti in Italia creando un valore in Italia ("Made in Italy" dallo sviluppo al servizio).

Il futuro sistema sarà uno dei nuovi prodotti che si posizioneranno al centro del *core business* di Northrop Grumman Italia che dal 1961 fornisce sistemi di localizzazione e navigazione alle forze

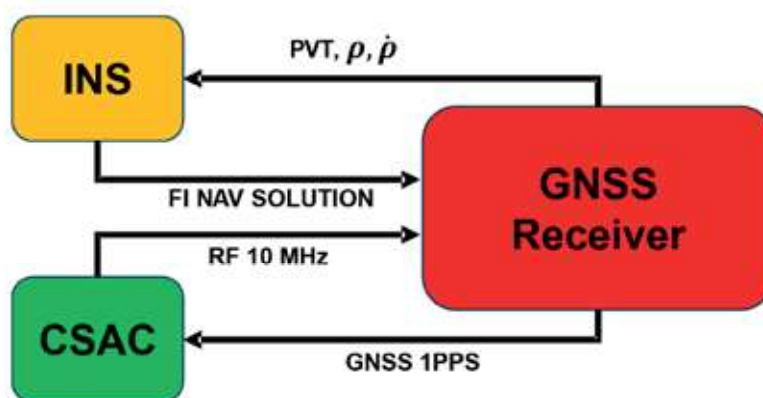


Figura 4 - Interazione GNSS.

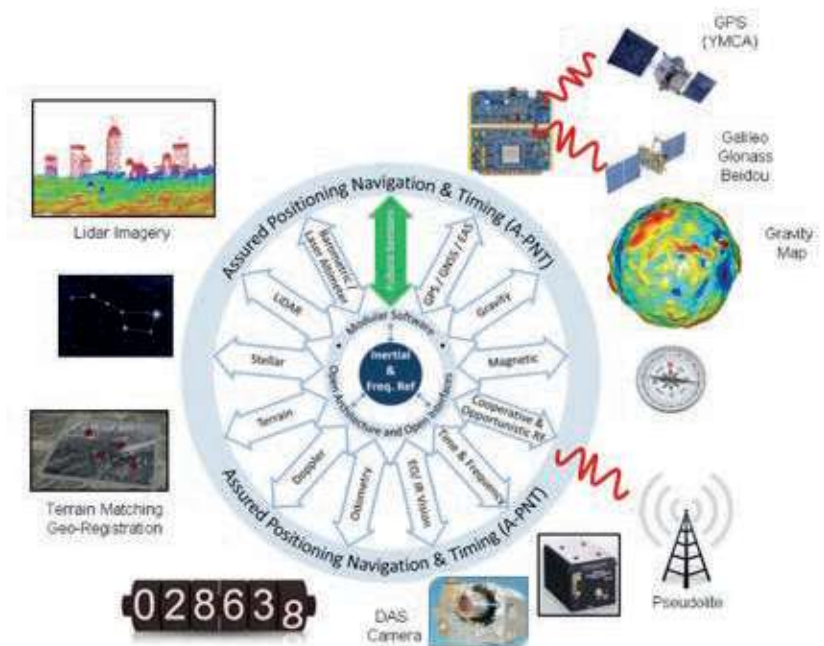


Figura 5 - APNT visione globale.

armate italiane e internazionali. Si sta sviluppando SINAPSIS in accordo ai requisiti di accuratezza e robustezza specifici per le applicazioni militari. Grazie al vasto numero di applicazioni civili e militari il sistema potrà essere quindi commercializzato in un ampio mercato sia a livello nazionale che internazionale. Il sistema di PNT immune da attacchi di *jamming* e *spoofing* sul segnale GNSS è di elevata importanza in numerose applicazioni sia militari che civili. Queste ricadute tecnologiche permetteranno di contrastare efficacemente una tipologia di attacchi che sempre più frequente e facile da realizzare che può determinare situazioni di pericolo su infrastrutture critiche come aeroporti, reti di comunicazione, reti energetiche, sistemi di controllo e monitoraggio infrastrutturali. Il *timing* fornito dal GPS è inoltre ampiamente usato in numerosi sistemi civili, dalle reti di comunicazione (*server* NTP) ai sistemi bancari.

CONCLUSIONI

Nel corso della prima fase del progetto di ricerca SINAPSIS sono state esplicitate le criticità nell'ambito della navigazione in contesti in cui

il segnale GNSS risulta assente o soggetto a disturbi. In questi scenari e in particolare in contesti missilistici in cui la capacità di essere velocemente operativi risulta fondamentale, uno dei problemi legati all'assenza del segnale GNSS è l'allungamento dei tempi di inizializzazione del sistema, che diventa dipendente da un operatore esterno per l'informazione di posizione iniziale.

Dopo la realizzazione dei prototipi dei sensori HRG, denominati Q-HRG (*Quartz-Hemispherical Resonator Gyroscope*), i test ambientali hanno permesso di validarne il *design* elettro-meccanico in ambiente avionico. Nella seconda fase in corso è stato realizzato il *design* del Sistema e del GPS e l'approvvigionamento delle parti che permetteranno di realizzare due prototipi. Nella futura fase 3 i prototipi saranno sottoposti ad una intensa attività di integrazione *hardware* e *software* e verifica delle *performance* in ambiente statico e dinamico simulando anche situazioni di attacco al segnale GPS. Il successo di tutto il programma consentirà di poter disporre in Italia di tecnologie innovative ITAR FREE in grado di soddisfare gli attuali scenari WARFARE a cui le nostre FF.AA. sono chiamate a affrontare.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

CSAC	<i>Chip Scale Atomic Clock</i>
FF.AA	<i>Forze Armate</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
NAVWAR	<i>Navigation Warfare</i>
NTP	<i>Network Type Protocol</i>
PNT	<i>Position Navigation Timing</i>
Q-HRG	<i>Quartz-Hemispherical Resonator Gyroscope</i>
SDR	<i>Software Defined Receiver</i>
SGD	<i>Segretariato Generale della Difesa</i>

PAROLE CHIAVE

Gyroscopio, CSAC, navigazione, GPS, GNSS, *spoofing*, *jamming*.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.216
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri(21)
Ente responsabile del progetto:	Northrop Grumman Italia
Città, Regione:	Pomezia, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Antonio Sestito
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Pontina, Km 27,800 , 00040 Pomezia (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3423353619
E-mail del responsabile del progetto:	antonio.sestito@northropgrumman.it

BIBLIOGRAFIA

NATO, «STANAG 4665 C3B (EDITION 1) - Navigation Warfare Modeling And Simulation,» 2015.
 FAA, Instrument Flying Handbook, FAA-H-8083-15B, 2012.
 L. Kuangmin, «Enhanced distance measuring equipment carrier phase,» PhD thesis, Ohio University, Electrical Engineering , 2014.
 K. Euiho, «Alternative DME/N pulse shape for APNT,» in *Proc. of Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 2013.
 FAA, «Aeronautical Information Manual,» 2017.

- J. Diesel e J. King, «Integration of Navigation Systems for Fault Detection, Exclusion, and Integrity Determination - Without WAAS.,» in *Proc. of ION*, Anaheim, CA , 1995.
- European GNSS Agency, «EGNOS Safety of Life (SoL), EGNOS Safety of Life (SoL),» Issue 3.4, April 2021.
- A. I. Unit, «Does Radio Frequency Interference to Satellite Navigation pose an increasing threat to Network efficiency, cost-effectiveness and ultimately safety?,» Eurocontrol, 2021.
- D. Goward, «Resilient Navigation and Timing Foundation,» 21 aprile 2021. [Online]. Available: <https://rntfnd.org/2021/04/21/russia-ramps-up-gps-jamming-along-with-troops-at-ukraine-border-gps-world/>. [Consultato il giorno 13 maggio 2021].
- G. Gamba, S. Fantinato, O. Pozzobon, M. Anghileri, R. Ioannides e J. A. Ávila-Rodríguez, «The Spoofing Estimating Delay Lock Loop,» in *Proceedings of ESA NAVITEC*, 2014.
- S. Fantinato, S. Montagner, O. Pozzobon e S. Ciccotosto, «Spoofing Monitoring Sensor for Critical Applications,» Helsinki, 2016.
- A. Jafarnia-Jahromi, T. Lin, A. Broumandan, J. Nielsen e G. Lachapelle, «Detection and Mitigation of Spoofing Attacks on a Vector-Based Tracking GPS Receiver,» in *ION ITM*, 2012.
- M. Tran, T. Kim, C. J. Hegarty, J. Devincintis e S. Ericson, «Validation of the Feasibility of Coexistence of the New Civil GPS Signal (L5) with Existing Systems,» The MITRE Corporation, 2001.
- European Union , «European GNSS (Galileo) Open Service Signal-In-Space Interface Control Document,» OS SIS ICD, Issue 2.0, 2021.
- L. Ma, Y. Zheng, T. Liu e S. Shi, «Coupled Integration of CSAC, MIMU, and GNSS for Improved PNT performance,» *Sensors*, vol. 16, May 2016.

HYPERION è uno spaziplano suborbitale ipersonico da Mach 4,5 per: (i) sorveglianza ed intercettazione (cosiddetto scramble) nello spazio aereo nazionale esteso fino a 100 km di quota, contro le minacce da sistemi d'arma ipersonici; (ii) aviolancio da 50-60 km di un payload di 100 kg in orbita bassa. Basato sull'*heritage* di anni di studi concettuali dell'ecosistema del Distretto Aerospaziale della Campania sull'applicazione civile HYPLANE, il progetto è dedicato al consolidamento della fattibilità e alla progettazione preliminare, inclusi 5 dimostratori tecnologici relativi alla configurazione del velivolo e ad alcuni componenti critici. Il dimostratore#1 del velivolo è stato realizzato in Fase 1 e sottoposto a 1000 condizioni di test in galleria del vento presso CIRA e INCAS (Romania).

Quattro sono le missioni di riferimento rispetto alle quali è stata confermata la fattibilità. È stato inoltre studiato un Dimostratore di Volo sperimentale (manned/unmanned) basato su sistemi propulsivi disponibili (due motori EJ200 dell'*Eurofighter* e un razzo Zefiro 9 di VEGA), per una missione suborbitale con velocità massima di Mach 4 e apogeo di 80km, operabile nell'area tirrenica, tra gli aeroporti di Grazzanise e Decimomannu, da tempo proposta come il Poligono di Test Suborbitale.

INTRODUZIONE

La Difesa dello spazio aereo nazionale è oggi limitata alla quota massima di circa 20km. Lo sviluppo di sistemi d'arma iperveloci che volano a quote superiori e la loro diffusione che si prospetta esponenziale, impongono l'identificazione e implementazione di adeguate contromisure. Nasce così l'esigenza di sviluppare sistemi in grado di raggiungere ogni punto dello spazio aereo esteso, ovvero fino a 100km di quota, riducendo il tempo di risposta dalla segnalazione della minaccia a 6 minuti dagli attuali 20.

La disponibilità di uno spaziplano capace di raggiungere velocità e quote elevate, decollare e atterrare orizzontalmente da piste corte senza piattaforme di lancio o aerei madre, risponde all'esigenza. Tale velivolo è inoltre in grado di aviolanciare – tramite razzo spendibile – payload verso LEO a partire da quote superiori a quelle raggiungibili con gli attuali velivoli da caccia; sarà possibile mettere in orbita 100kg, a partire da qualsiasi punto del territorio nazionale.

HYPERION integra le migliori tecnologie aereo-

nautiche e spaziali, con TRL già elevati che garantiscono un time-to-market breve.

Data la stretta similitudine con il velivolo civile HYPLANE da cui discende, HYPERION è intrinsecamente duale per un ampio mercato di applicazioni: difesa, turismo spaziale, sperimentazione in bassa gravità, training di piloti/astronauti, volo per missioni intercontinentali urgenti.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Gli scenari militari dell'imminente futuro vedono un massiccio impiego di sistemi d'arma ipersonici: velivoli plananti e missili da crociera. I nuovi sistemi di difesa dovranno essere caratterizzati da:

- alta velocità,
- manovrabilità,
- rapidità di risposta,
- portata,
- penetrazione,
- potenza distruttiva,
- basso rischio umano,

La soluzione proposta è HYPERION: ricognitore/intercettore ipersonico, con propulsione ibrida turbo-ramjet/razzo (Figura 1), capace di realizzare ripetuti voli suborbitali durante una singola missione, senza limitazioni sul sito di lancio.



Figura 1 - Configurazione HYPERION. La configurazione aerodinamica è caratterizzata da efficienza aerodinamica $L/D > 4,5$ con un angolo di attacco di 6-8 gradi e un basso fattore di carico alare (tra 85 e 130 kg/m²) in grado di garantire condizioni di carico intorno a 1,2 g lungo traiettorie di volo stratosferiche. Lo stesso velivolo sperimenterà accelerazioni massime di circa 4,2 g durante le manovre di pull-up durante il volo suborbitale.

Le caratteristiche principali includono:

- velivolo “single-stage” di dimensioni ridotte;
- decollo/atterraggio orizzontale da piste “corte” <1000m con motori in modalità turbojet;
- salita subsonica fino alla quota di 10km (velocità di 240m/s);
- accelerazione attraverso il transonico e fino a $M < 5$ con salita lungo una traiettoria a pres-

sione dinamica costante e propulsione in modalità ramjet;

- salti suborbitali verso la linea di Karman (quota di 100km), grazie all’ausilio di un razzo-boosters;
- possibilità di aviolancio da quote di 50-60km di un secondo stadio per l’inserimento di payload (<100kg) in LEO;
- discesa planata e atterraggio orizzontale motorizzato turbojet.

Gli studi realizzati negli anni precedenti sullo spaziplano HYPLANE (Figura 2) sono stati basati su requisiti generali focalizzati su applicazioni civili (aviazione di affari) e spaziali: velocità corrispondente a $M 4,5$ in volo stratosferico a quota di 30km su distanze di 7.000km, o in volo suborbitale a quota massima di 100km. Argomenti investigati sono stati:

- studi di configurazione;
- analisi di missione e profili di volo;
- caratteristiche aerodinamiche;
- distribuzione temperature superficiali;
- valutazioni strutturali fusoliera;
- identificazione e trade-off sistemi di propulsione;
- valutazione delle masse;
- lunghezza di pista.

Sistemi più veloci o più grandi richiedono oggi ancora importanti sviluppi tecnologici, investimenti più massicci e non presentano *business case* positivi.



Figura 2 - HYPLANE HYpersonic SpacePLANE. L’ampia superficie alare ha il vantaggio di consentire decolli e atterraggi a bassa velocità (60 m/s) e quindi lo spaziplano può decollare ed atterrare orizzontalmente (HTHL) su piste di breve-media lunghezza (<1.000 m).

METODOLOGIA

La Fase 1 di fattibilità è relativa a quattro missioni:

- Missione suborbitale programmata di ricognizione (PRSM, Figura 3)
- Missione suborbitale di intercettazione a risposta rapida (QISM, Figura 4)

- Missione stratosferica a lungo raggio (LRSM, Figura 5)
- Missione di aviolancio ad alta quota (HALM, Figura 6)

Include vari Dimostratori Tecnologici. L'aerodinamica computazionale (CFD) a $M \in (0.18 \div 6)$ e vari

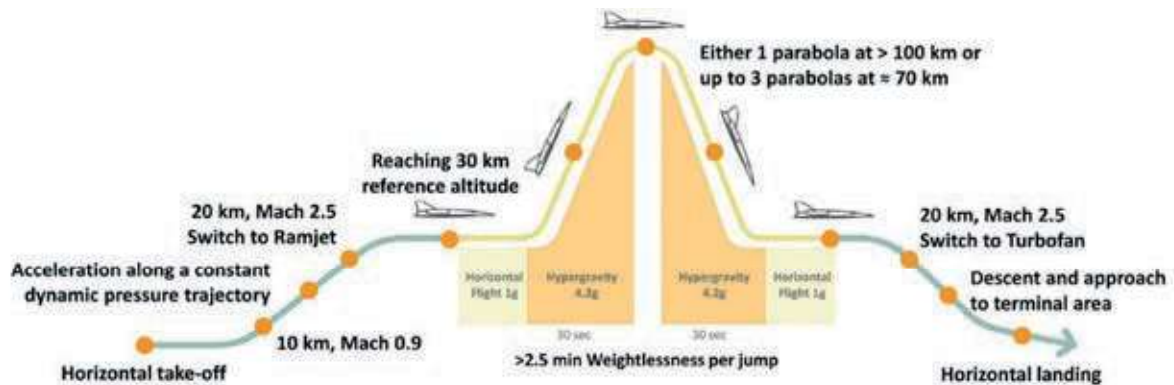


Figura 3 - Missione suborbitale programmata di ricognizione (PRSM). Missione di ricognizione in volo suborbitale a carattere routinario. La caratteristica primaria è la totale compatibilità con il traffico aereo civile sia in volo che in fase di decollo/atterraggio.

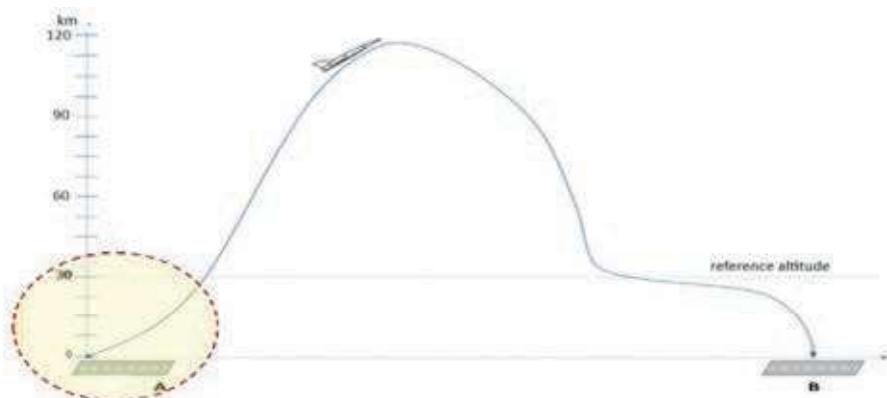


Figura 4 - Missione suborbitale di intercettazione a risposta rapida (QISM). Missione del tutto simile alla PRSM ma è inquadrata in una situazione di emergenza e quindi è basata sulla totale priorità rispetto al traffico aereo sia in volo che in zona aeroportuale.

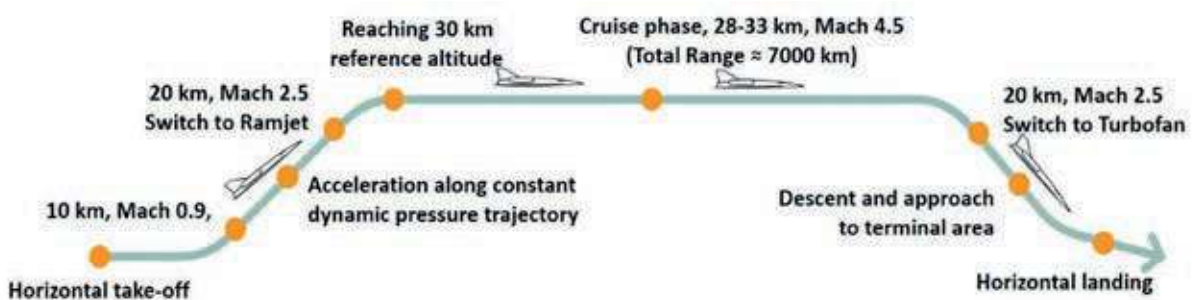


Figura 5 - Missione stratosferica a lungo raggio (Long Range Stratospheric Mission, LRSM). Missione di lungo raggio per il raggiungimento di teatri di partecipazione in operazioni di peace keeping, con obiettivo di ricognizione, supporto operativo e trasporto di unità speciali o materiali.

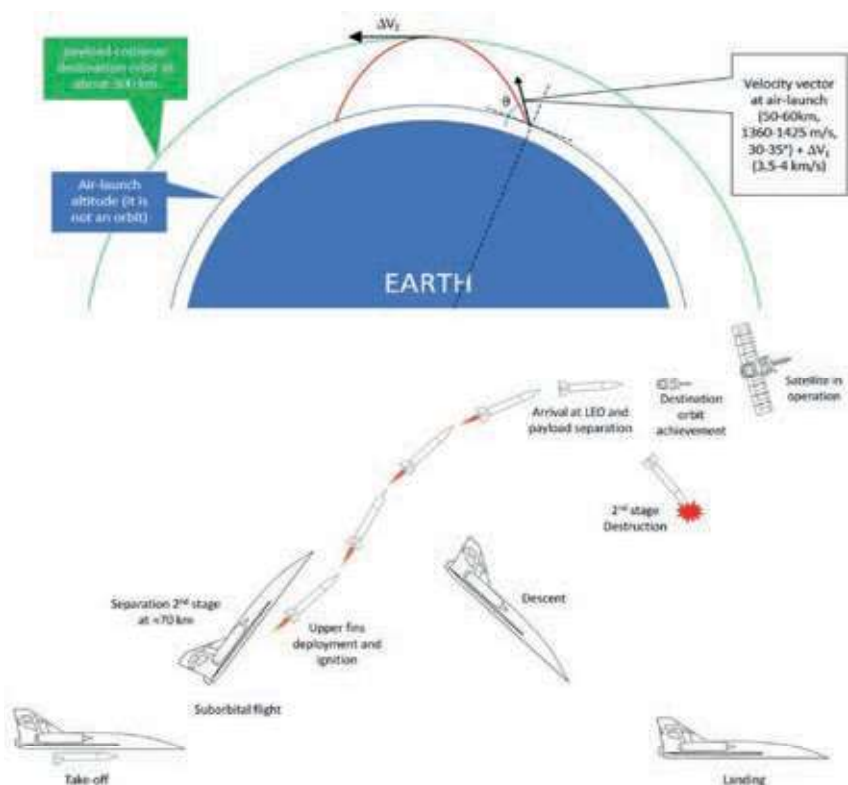


Figura 6 - Missione di aviolancio ad alta quota (High altitude Air-Launch Mission, HALM). Missione per la messa in orbita di payload significativi con aviolancio da quote elevate.

assetto è stata confermata da prove in galleria del vento col Dimostratore #1 (Figure 7, 8, 9), ottenendo i risultati di Figura 10. L'aerodinamica ha

portato alla distribuzione superficiale di temperatura, evidenziando gradienti intensi sui punti di ristagno del *radome* e bordi d'attacco (Figura 11).



Figura 7 - Dimostratore#1 della configurazione di HYPERION. Modello in scala 1:72 per prove in galleria del vento in regime subsonico, transonico e supersonico.

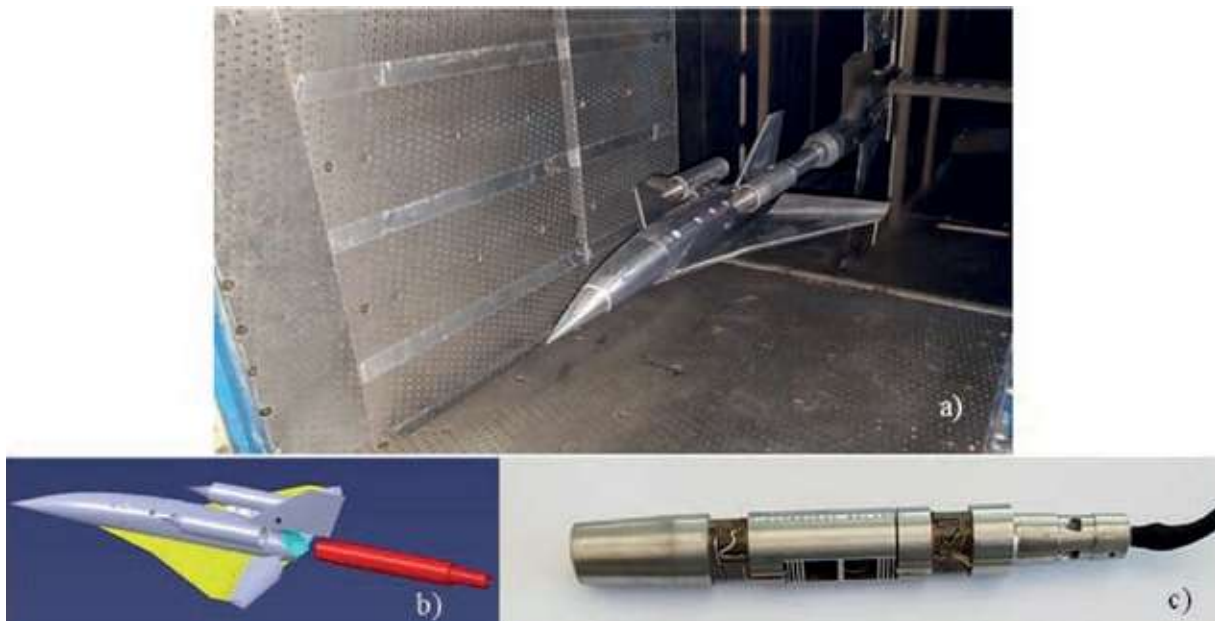


Figura 8 - Dimostratore#1 nella galleria del vento PT-1 del CIRA; a) modello in camera di prova, b) rappresentazione CAD dell'installazione del modello sulla bilancia, c) bilancia per la misura delle forze aerodinamiche risultanti agenti sul modello. Campagna di test con $M=0.18 \div 1.3$ a vari assetti.

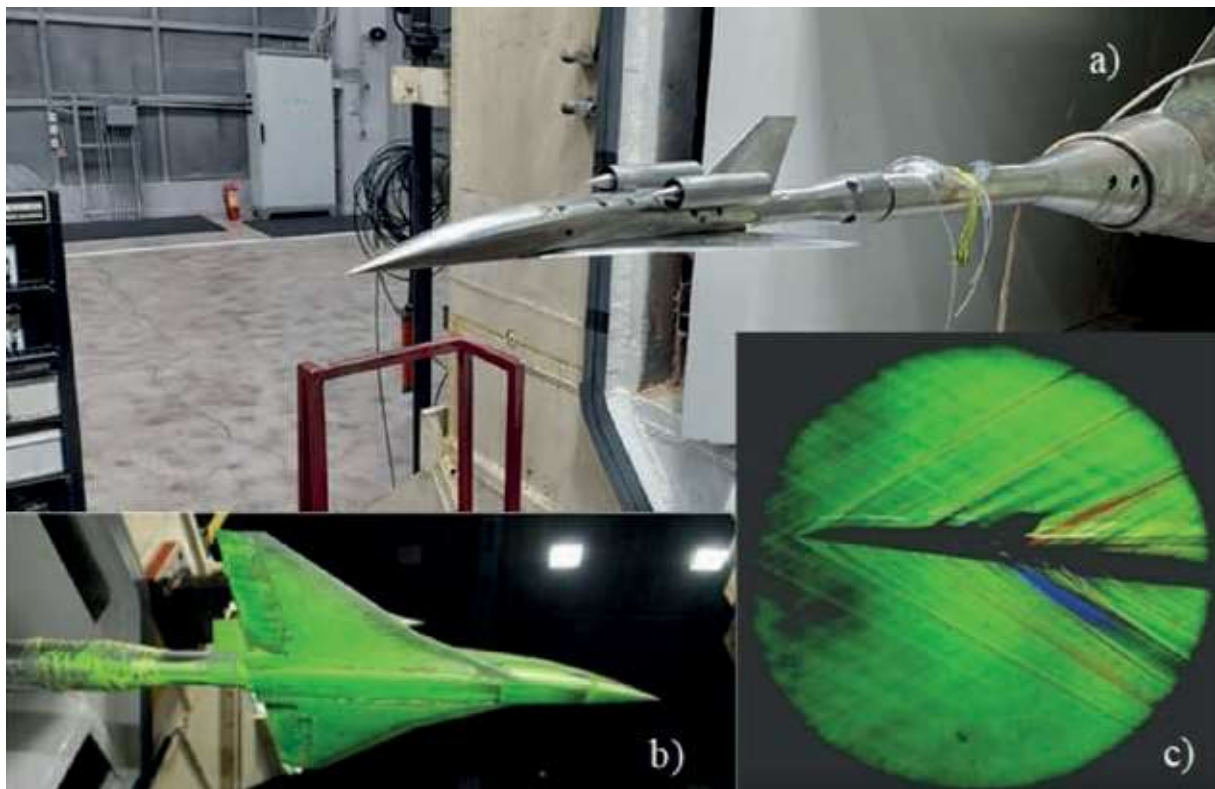


Figura 9 - Dimostratore#1 nella galleria del vento TWT di INCAS (Romania); (a) modello in allestimento in camera di prova, (b) Visualizzazione del flusso con pittura ad olio Mach=1.1, $\alpha=2^\circ$, $\delta_{\text{elevon}}=-20^\circ$, (c) Visualizzazione Schlieren a colori a Mach=2.0, durante la scansione di α . Campagna di test con $M=1.1 \div 3.5$ a vari assetti.

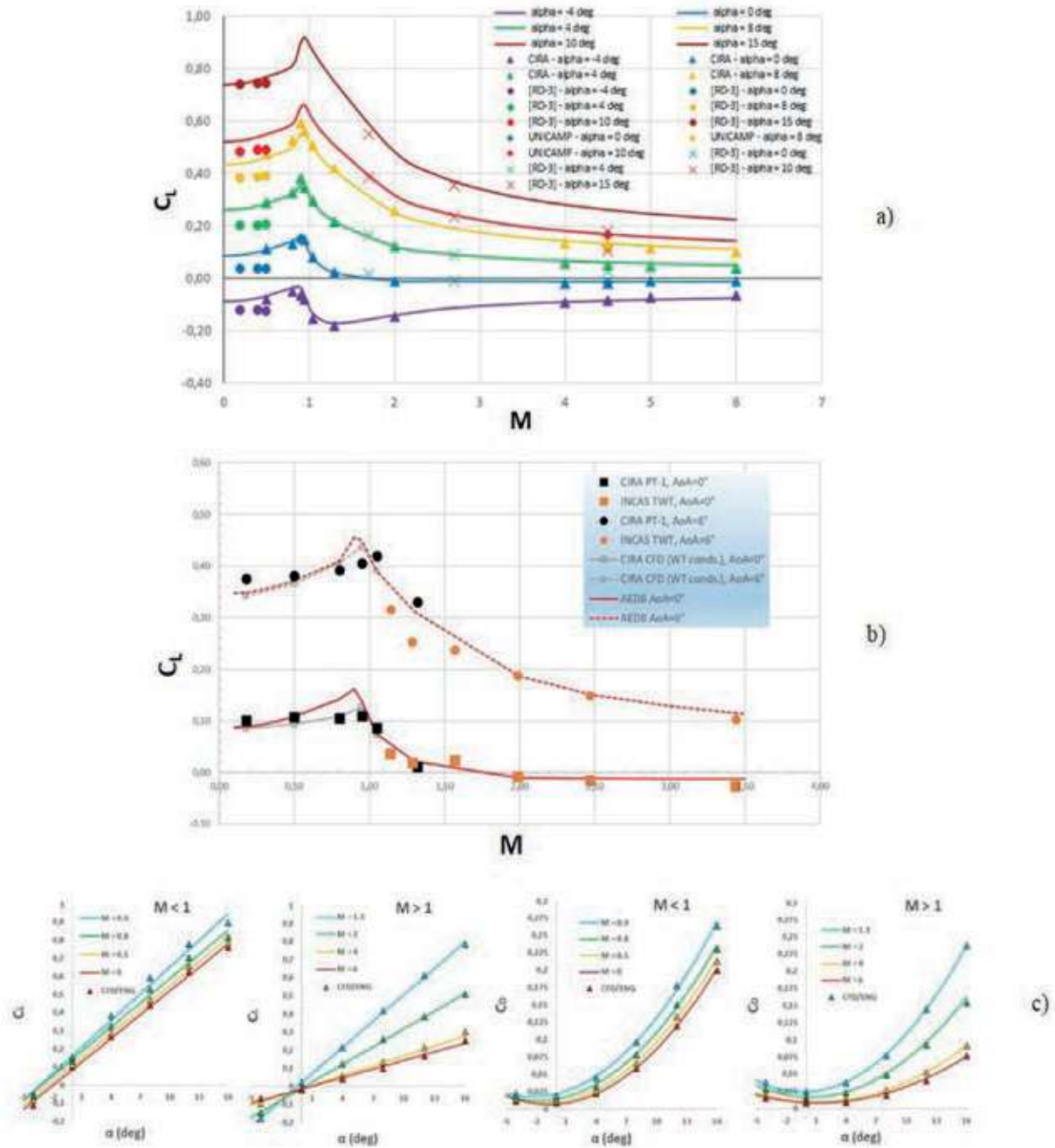


Figura 10 - Aerodinamica. (a) Andamento del coefficiente di portanza C_L in funzione di M e α , ottenuto con simulazione CFD; (b) prove in galleria presso CIRA ($M=0,18-1,3$) e INCAS Romania ($M=1,1-3,5$); (c) database aerodinamico ottenuto partendo dai precedenti dati HYPLANE includendo coefficienti aerodinamici e di momento, derivate di stabilit  e controllo, in funzione dei parametri di volo (α , M , δ , quota) per regimi subsonico, transonico, supersonico e ipersonico.

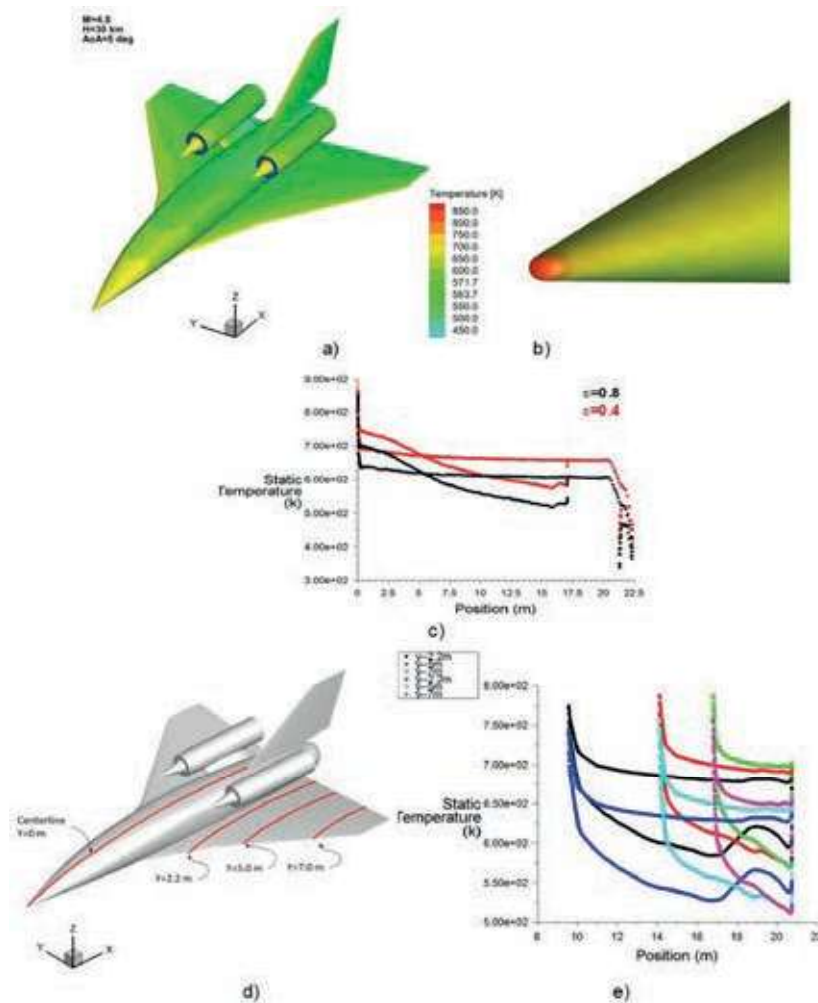


Figura 11 - Temperatura radiativa di equilibrio per volo a $M_\infty=4,5$ quota $H=30$ km e per $\alpha=5^\circ$: (a) distribuzione superficiale sull'intero velivolo con coefficiente di emissività $\epsilon=0,8$; (b) distribuzione superficiale per $\epsilon=0,8$ sui primi 10 cm del radome; (c) confronto della temperatura sul piano di simmetria dell'intera fusoliera per $\epsilon=0,8$ (nero) e $\epsilon=0,4$ (rosso); (d) sezioni di riferimento lungo l'apertura alare; (e) confronto della temperatura sulle tre sezioni di riferimento.

Per la progettazione strutturale (Figure 12, 13, 14) si è assunto l'impiego di leghe di titanio e 360 condizioni di carico. Il sistema propulsivo è composto da due motori multi-ciclo Supercharged Ejector RamJet (SERJ, Figura 15), e un booster ibrido paraffina-ossigeno liquido (Figura 16). L'analisi di trimmabilità, controllabilità e stabilità ha consentito la definizione della traiettoria nominale delle missioni. La riscontrata instabilità dinamica riguarda il moto fugoide con tempi caratteristici lenti, facilmente gestibile con specifici algoritmi di controllo (SAS/CAS). In definitiva, con riferimento alla missione PRSM, HYPERION può raggiungere un apogeo di 92km con velocità massima di M 5 circa e downrange di 2800km (Figura 17).

In Fase 2 saranno realizzati i seguenti Dimostratori Tecnologici:

- Nose-radome (Figure 18, 19)
- Bordo d'attacco alare (Figure 20, 21)
 - Acciaio inox a spessore variabile, con raffreddamento passivo
 - Lega di titanio con raffreddamento semi-passivo con uso di *heat pipes*
- Presa d'aria supersonica (Figure 22, 23)
- Condotto fluidodinamico ramjet (Figure 22, 23)

Step intermedio di sviluppo, il Dimostratore di Volo basato su sottosistemi COTS, come i motori EJ200 dell'Eurofighter e Zefiro 9 del lanciatore Vega, consente di raggiungere M 4,2 e 78km di quota con range di 380-400 (Figura 24).

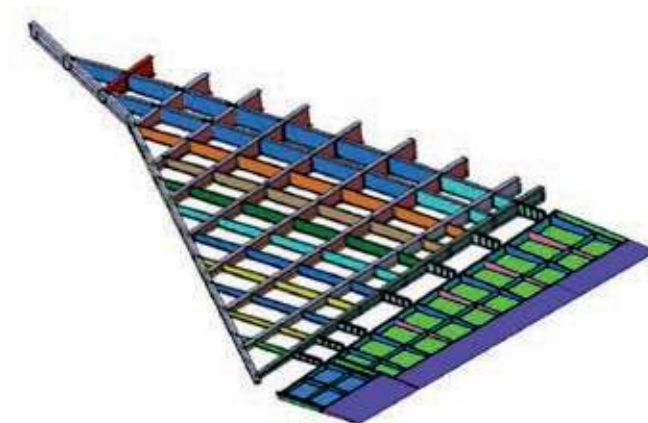


Figura 12 - Configurazione strutturale dell'ala.

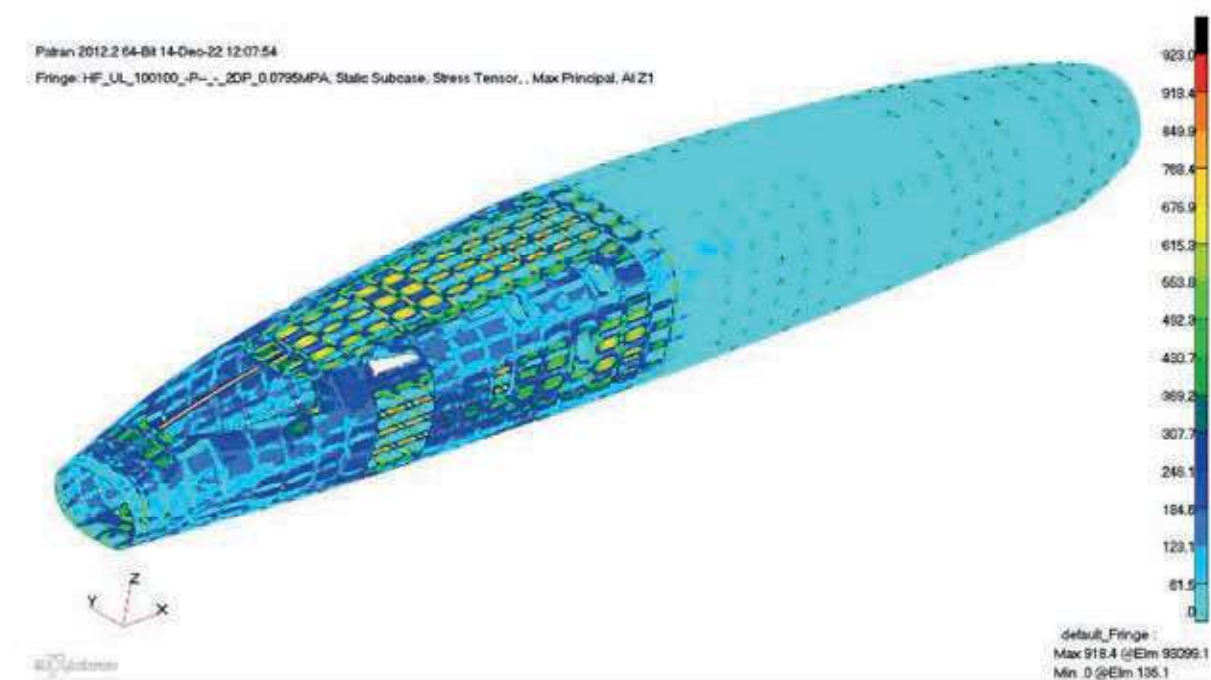


Figura 13 - Analisi FEM della struttura della fusoliera.

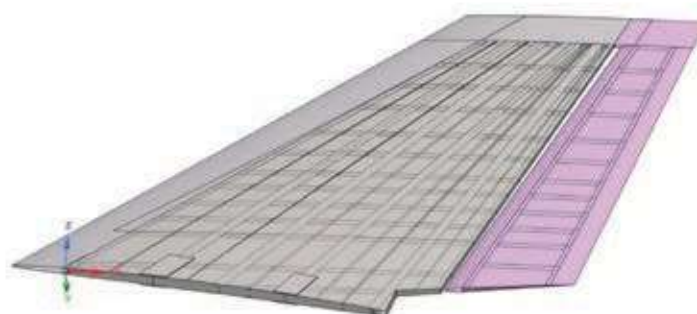


Figura 14 - Configurazione strutturale dell'impennaggio verticale.

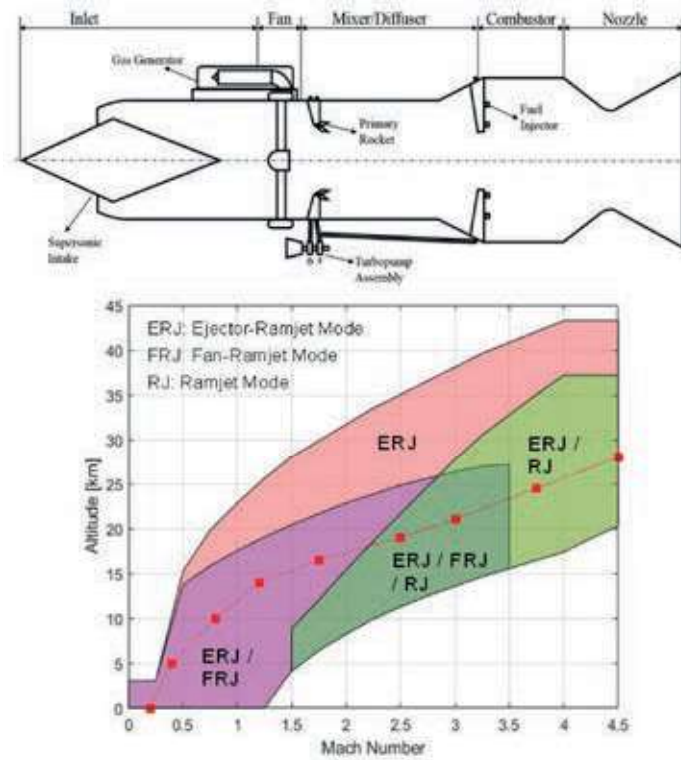


Figura 15 - Il Supercharged Ejector RamJet (SERJ), ideato negli anni sessanta del secolo scorso, è un motore multi-ciclo che può funzionare nelle seguenti modalità: turbofan, ramjet, fan-ramjet, supercharged ejector ramjet ejector-ramjet. Schema concettuale (in alto) e mappa operativa con tipica traiettoria di salita fino alla velocità di crociera a Mach 4,5 (in basso).

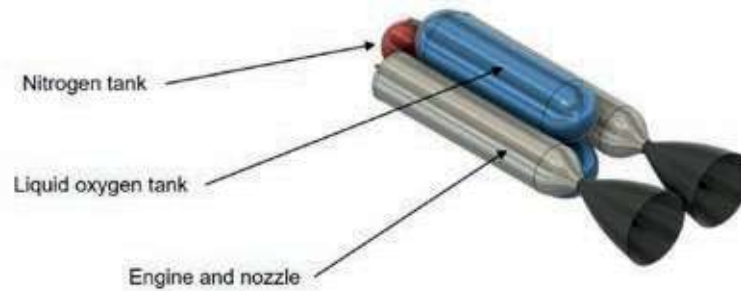


Figura 16 - Layout dell'endoreattore ibrido a paraffina-LOx.

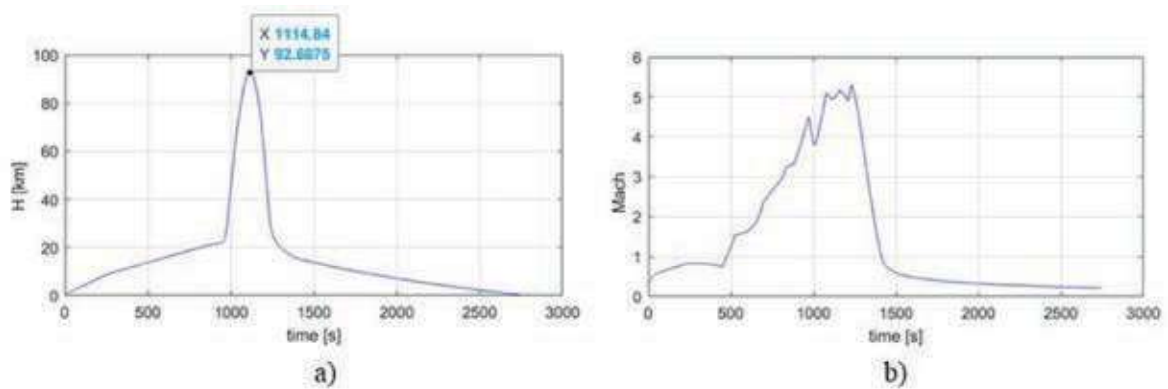


Figura 17 - Andamenti della quota (a) e del Mach (b) durante la traiettoria nominale ottima di tipo PRSM.

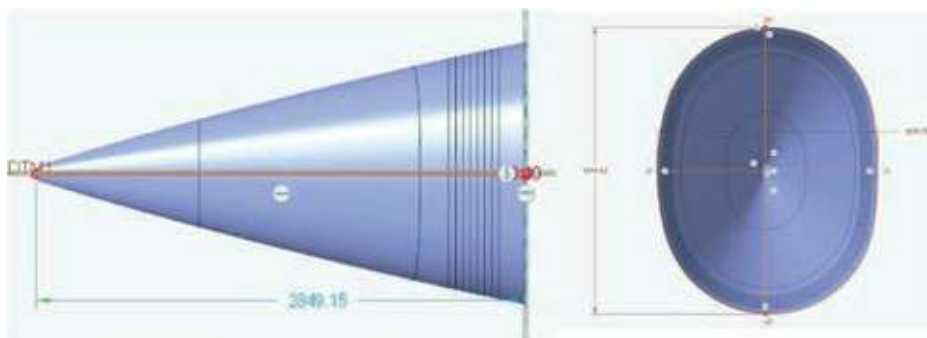


Figura 18 - Configurazione del Dimostratori#2 Nose-Radome.

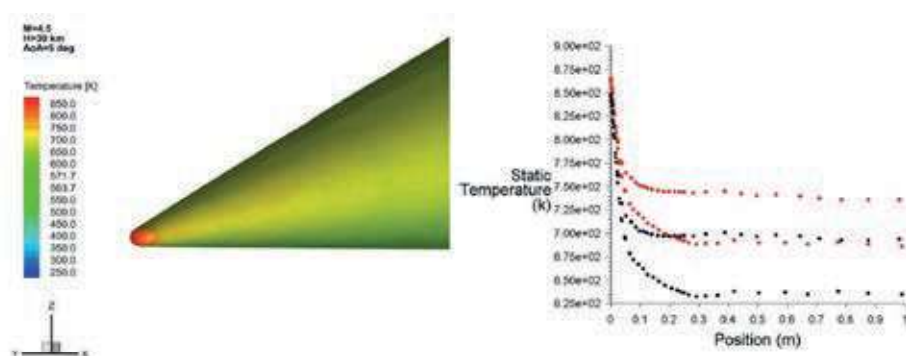


Figura 19 - Temperatura in condizioni di equilibrio radiativo sul radome.

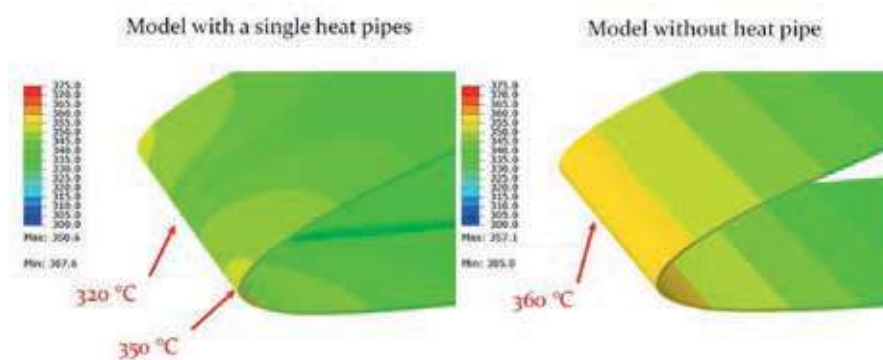


Figura 20 - Simulazione di un segmento del bordo d'attacco alare con e senza un heat pipe.

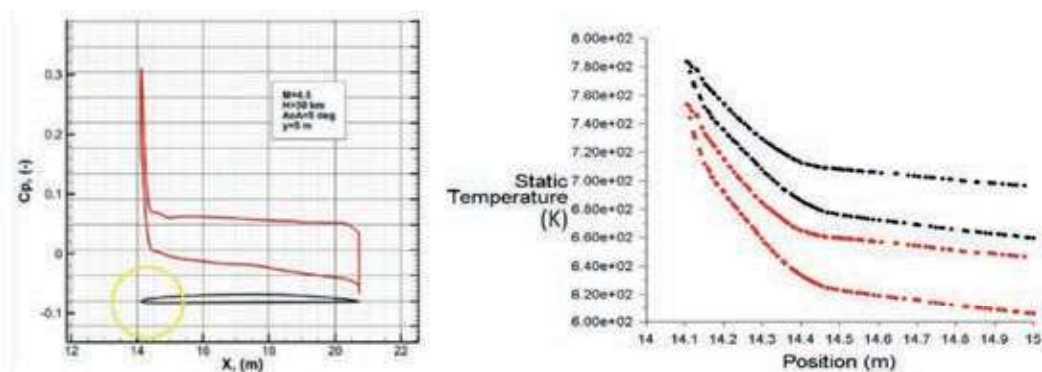


Figura 21 - Condizioni di carico meccanico (CP) e termico (temperatura in condizioni di equilibrio radiativo) sul bordo d'attacco alare.

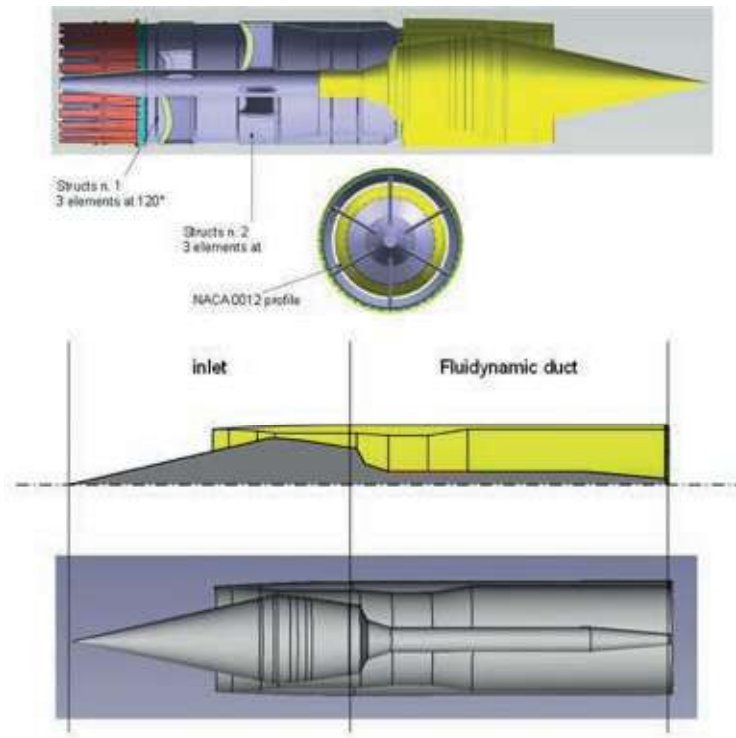


Figura 22 - Motore SERJ, Supercharged Ejector Ramjet. Configurazione nel modo ramjet (in alto); interfaccia tra presa d'aria e condotto (in basso).

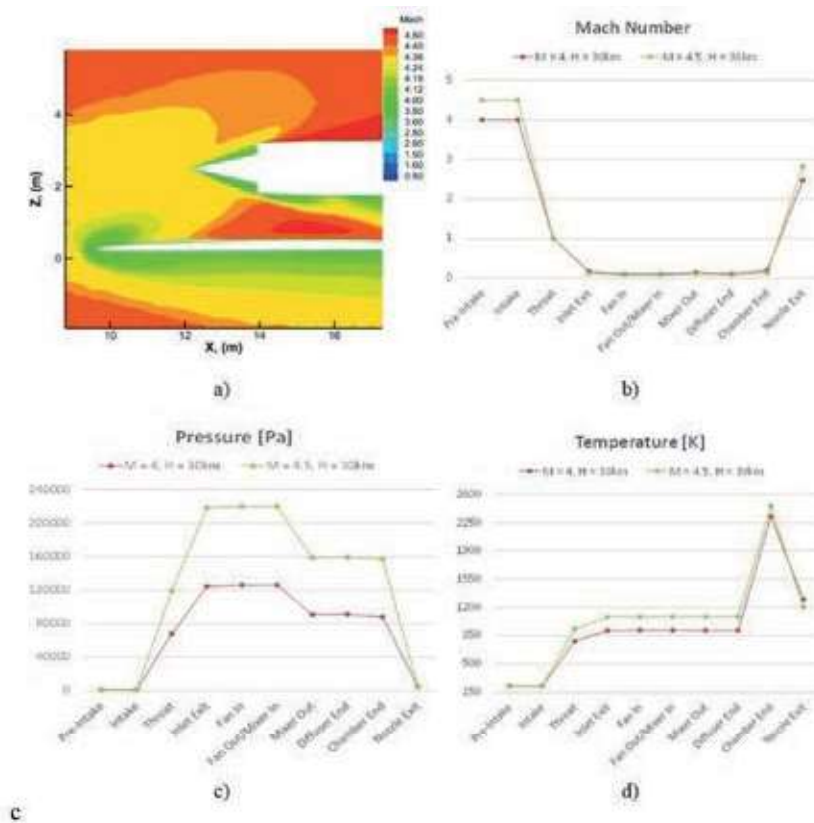


Figura 23 - Motore SERJ. Condizioni operative di riferimento della presa d'aria e del condotto in modalità ramjet: isocurve di Mach (a), evoluzione di M (b), della pressione (c) e della temperatura (d) lungo l'asse del motore.

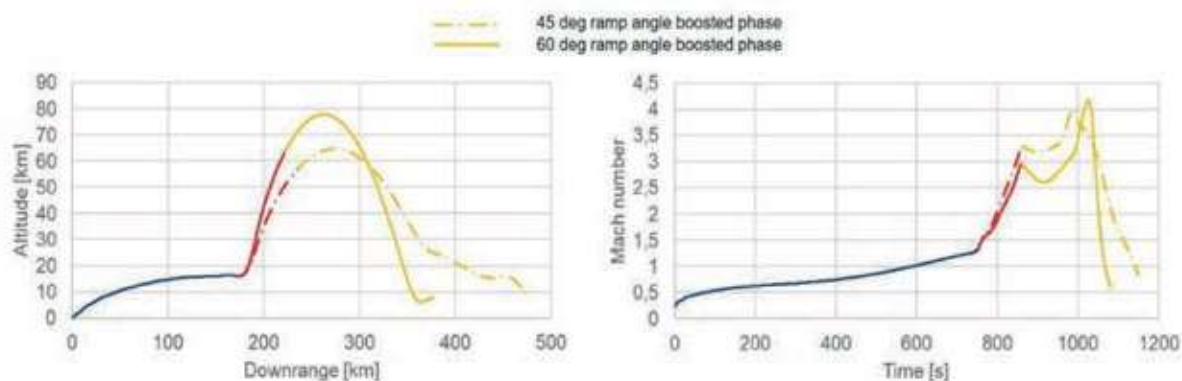


Figura 24 - Dimostratore di Volo – traiettoria di volo. (a) quota in funzione del downrange; (b) profilo di velocità in termini di M nel tempo.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

HYPERION può operare in condizioni di pianificazione ordinaria per fare missioni di ricognizione, trasporto urgente di unità speciali o carichi particolari, addestramento di piloti-astronauti; ma anche in condizioni di emergenza per operazioni di intercettazione *scramble*. Il sistema può essere impiegato per usi duali e civili come il trasporto intercontinentale, urgente e veloce di persone e merci utilizzando molti degli aeroporti medio-piccoli del mondo. La versione civile HYPLANE amplia inoltre le applicazioni al mercato del turismo spaziale con la prospettiva di un prezzo del biglietto molto migliore di quanto oggi disponibile sul mercato, contribuendo ad una più rapida evoluzione innovativa dell'aviazione.

Al di là dei diversi studi in corso relativi a velivoli da trasporto civile supersonici e ipersonici da decine-centinaia di posti, è molto più matura l'opportunità di utilizzare velivoli a basso ipersonico più piccoli per segmenti di mercato come il turismo spaziale suborbitale e la sperimentazione, viaggi d'affari urgenti, aero-taxi, trasporto rapido a grandi distanze di organi umani per trapianti e medicinali. Questi velivoli sono tecnologicamente e economicamente più convenienti e potranno stimolare lo sviluppo dei sistemi più grandi e pesanti, complementandoli.

L'ecosistema aerospaziale campano è pronto a giocare un ruolo importante nello sviluppo di HYPERION o delle tecnologie ad esso associate.

CONCLUSIONI

La Fase 1 del progetto ha confermato validità-fattibilità di uno **spazioplano ipersonico suborbitale**, con propulsione turbo-ramjet multiciclo, per la **sorveglianza/intercettazione nello spazio aereo nazionale esteso a 100km di quota** contro le minacce da sistemi ipersonici, e per l'avio-lancio da 50-60km di payload di 100kg in orbita bassa. Si punta ora alla realizzazione dei dimostratori in Fase 2.

Come HYPLANE da cui deriva, **HYPERION è l'unico progetto di un velivolo per voli suborbitali e voli ipersonici di crociera stratosferica.**

Una comparazione con altri velivoli è mostrata in Figura 25. Il progetto sta contribuendo ad orientare gli sviluppi verso velivoli di analoga taglia e favorirà lo sviluppo di sistemi ancora più performanti.

È stato studiato inoltre un **Dimostratore di Volo equipaggiato con sistemi propulsivi disponibili** (EJ200 di Eurofighter e Zefiro 9 di VEGA) per realizzare voli sperimentali **suborbitali a M 4 e apogeo di 80km**, nell'area tirrenica tra gli aeroporti di Grazzanise e Decimomannu, proposta come il **Poligono di Test Suborbitale (STEP)**.

HYPERION dimostra la competenza del sistema industriale/accademico campano, capace di sviluppare tecnologie e sistemi di avanguardia che consentono all'Italia di partecipare da protagonista a prossimi programmi internazionali. Il progetto ha contribuito alla **"Famiglia HYPLANE"** (Figura 26).

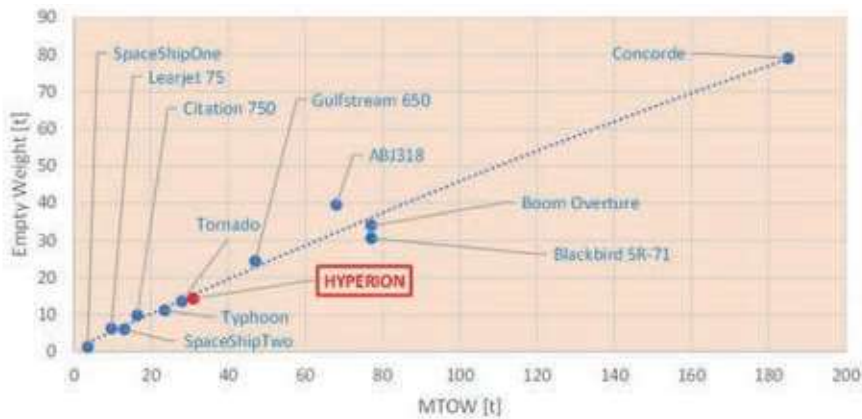


Figura 25 - Comparazione in termini di Peso a Vuoto (Empty Weight) in funzione del Peso Massimo al Decollo (MTOW) di HYPERION con altri velivoli (business jet, caccia, turismo spaziale, Concorde).

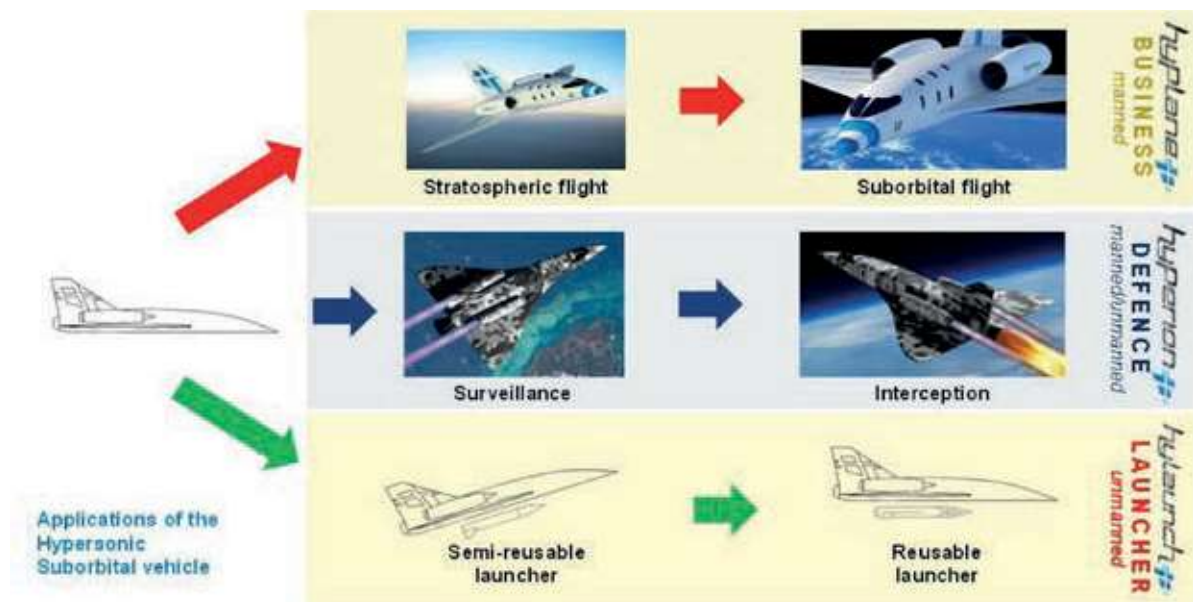


Figura 26 - La famiglia HYPLANE. Grazie alla grande versatilità del concetto di base, lo stesso spaziosplano soddisfa una famiglia di applicazioni che va dai voli suborbitali e di crociera stratosferica di interesse civile (HYPLANE), alle missioni militari di sorveglianza e intercettazione (HYPERION), e alla capacità di lancio spaziale da 50-60 km di altitudine (HYLAUNCH).

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

α , AoA	Angolo di attacco
δ	Angolo di deflessione degli alettoni
ε	Coefficiente di emissività termica
g	gravità terrestre
C_L	Coefficiente di portanza
C_P	Coefficiente di pressione

CAD	<i>Progettazione con aiuto di computer, Computer Aided Design</i>
CAS	<i>Sistema di Aumento del Controllo</i>
CFD	<i>Fluidodinamica Computazionale, Computational Fluid Dynamics</i>
COTS	<i>Commerciale pronto all'uso, Commercial Off The Shelf</i>
ERJ	<i>Ejector-Ramjet</i>
EW	<i>Peso a Vuoto, Empty Weight</i>
FEM	<i>Modello a Elementi Finiti</i>
FRJ	<i>Fan-Ramjet</i>
GTOW	<i>Peso Massimo al Decollo, Gross Take Off Weight</i>
HALM	<i>Missione di Aviolancio ad Alta Quota, High altitude Air-Launch Mission</i>
HTHL	<i>Decollo e Atterraggio Orizzontale, Horizontal Take-off Horizontal Landing</i>
HYLAUNCH	<i>Aviolancio ipersonico, HYpersonic airLAUNCH</i>
L/D	<i>Rapporto portanza/resistenza ovvero efficienza aerodinamica, lift-over-drag ratio</i>
LEO	<i>Orbita Bassa Terrestre, Low Earth Orbit</i>
LOx	<i>Ossigeno Liquido</i>
LRSM	<i>Missione Stratosferica a Lungo Raggio, Long Range Stratospheric Mission</i>
M	<i>Numero di Mach</i>
MTOW	<i>Peso Massimo al Decollo, Maximum Take Off Weight</i>
PRSM	<i>Missione Suborbitale Programmata di Ricognizione, Planned Reconnaissance Suborbital Mission</i>
PT-1	<i>Pilot Tunnel-1, Galleria pilota-1</i>
QISM	<i>Missione Suborbitale di Intercettazione a risposta rapida (scramble), Quick-response Interception Suborbital Mission</i>
RJ	<i>Ramjet</i>
SAS	<i>Sistema di aumento della stabilità</i>
SERJ	<i>Supercharged Ejector Ram-Jet</i>
STEP	<i>Poligono di Test Suborbitale, Suborbital TEst Polygon</i>
TRL	<i>Livello di prontezza tecnologica, Technology Readiness Level</i>
TWT	<i>Galleria del Vento Trisonica, Trisonic Wind Tunnel</i>

PAROLE CHIAVE

Ipersonico, volo suborbitale, spaziplano, dimostratore, ricognizione, intercettazione.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.224
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (ARMAEREO)
Ente responsabile del progetto:	RTI "Hyperion" formato da Distretto Tecnologico Aerospaziale della Campania Scarl (DAC, mandatario), Consorzio CALTEC, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA), MBDA. Contribuiscono i Soci attuatori del DAC Aerosoft, Atm, Lead Tech, Tecnosistem, Trans-Tech, Università della Campania Luigi Vanvitelli, Università di Napoli Federico II.
Città, Regione:	Napoli, Campania
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Gennaro RUSSO
Recapiti del responsabile del progetto:	c/o Distretto Aerospaziale della Campania, Via Coroglio 57, 80124 Napoli (NA)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 329 2535926
E-mail del responsabile del progetto:	g.russo@daccampania.com

BIBLIOGRAFIA

1. HYPERION – Phase 1, Rapporto Tecnico di Sintesi. HYP-PM-RTS-E.1, Distretto Aerospaziale della Campania, Marzo 2023
2. Russo G, HYPERION - Characteristics and Performances. Simposio "Una nuova sfida: lo sviluppo della capacità ipersonica", Accademia Aeronautica, Pozzuoli (Italia), 9-10 Nov 2023
3. Voto C, HYPERION - Technological Demonstrators. Simposio "Una nuova sfida: lo sviluppo della capacità ipersonica", Accademia Aeronautica, Pozzuoli (Italia), 9-10 Nov 2023
4. Russo G, Voto C, Savino R, S4 – A Demonstrator of HYPLANE, a Single Stage Suborbital Spaceplane and a Hypersonic Business Jet. Acta Astronautica 2021 June;183:244–254. DOI 10.1016/j.actaastro.2021.03.025, presented at 71th International Astronautical Congress IAC2020, Cyberspace Edition, 12-14 October 2020
5. Russo G, HyPlane – A Solution for Ultra-Fast Air-Transportation. Advances in Aerospace Science and Technology, 2017 Mar;1(1):60-70. ISBN 978-7-5159-1282-0
6. Savino R, Russo G, Carandente V, D'Oriano V. HYPLANE for Space Tourism and Business Transportation. J British Interplanetary Society 2014;67:82-89. ISSN: 0007-084X
7. Zuppari G, Savino R, Russo G. Aerodynamic Analysis of HyPlane in Supersonic Rarefied flow. Acta Astronautica 2016;123:229–238. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.03.025
8. Russo G, Savino R. HyPlane. The Business Case of a Small Hypersonic Airplane for Point-to-Point and Space Tourism flights. Presentation at the 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Glasgow (UK), 2015
9. Russo G et al., Hypersonic Bizjet: A multi-mission technology demonstrator, Presentation at the 3rd International Symposium on Hypersonic Flight Naples, Italy, 30-31 May 2019

Il progetto “*Manned unManned Ground Interoperable Control Station*” - MAGICS è finalizzato a colmare il gap operativo tra i velivoli di 4^a/5^a generazione con quelli di 6^a generazione. Viene sviluppata e conferita al pilota del velivolo “*Manned*” la capacità di eseguire una missione cooperando con uno o più gregari senza pilota (*Unmanned*), agenti in maniera autonoma ed intelligente. A tal fine è stato sviluppato un sistema di bordo composto da un’interfaccia grafica evoluta (HMI) supportata da algoritmi di intelligenza artificiale (AI), il quale interagisce automaticamente con gli *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) gregari. Si dimostra così la possibilità di estendere le capacità operative dei velivoli legacy di 4^a/5^a generazione con la funzione di *Manned-Unmanned Teaming* (MUMT), senza gravare sul carico di lavoro del pilota in virtù delle elevate potenzialità che l’AI induce sul controllo dei gregari in volo.

INTRODUZIONE

Al fine di colmare il gap con i velivoli *swing-role* di 6^a generazione, i quali disporranno di meccanismi nativi per la cooperazione tra aeromobili pilotati e non, si rende necessario consentire ad UAV gregari, equipaggiati con opportuna sensoristica e/o armamento, di elevare le capacità operative e tattiche dell’attuale squadriglia aerea dotata di velivoli di 4^a/5^a generazione. Verrebbe fornito al pilota uno strumento di supporto alle decisioni estremamente potente (“*Decision Superiority*”), basato sulla combinazione di informazioni provenienti dai centri di comando con quelle acquisite autonomamente dai sistemi UAS (UAV ed i loro *payload*). Questo aumenterebbe la visione strategica dello scenario (“*Strategic awareness*”), di fatto realizzando una sorta di *Aerial Operation Center* – AOC di bordo.

La soluzione proposta si compone di un’AI avanzata basata su algoritmi di *Deep Reinforcement Learning*, distribuita sui veicoli pilotati e sui gregari *Unmanned*, controllabile mediante una HMI semplice ed intuitiva, la quale consente agli UAV di eseguire in totale autonomia complesse sequenze di azioni(task) senza richiedere costantemente input da parte del pilota. Vengono inviati così comandi di alto livello che rappresentano gli

EFFETTI richiesti sullo scenario tattico. Ciò rappresenta un notevole progresso rispetto alle tecnologie esistenti, dove gli UAV vengono gestiti puntualmente da stazioni di controllo dedicate.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Al fine di integrare la capacità MUMT su piattaforme legacy dotate di display di dimensione e risoluzione ridotte (es. MFD 4” x 4” - 600x600 pixel), non concepite per tale scopo, è risultato essenziale ottimizzare e semplificare le operazioni necessarie per comandare gli UAS gregari minimizzando il carico di lavoro del pilota.

Tale finalità è stata ottenuta grazie all’impiego di algoritmi di intelligenza artificiale (*Deep Reinforcement Learning*), in grado di conferire agli UAS gregari un elevato livello di autonomia, consentendogli quindi di eseguire una missione ricevendo un numero ridottissimo di comandi da parte del pilota. Per implementare questa capacità è stato sviluppato un dimostratore tecnologico la cui architettura è basata sulle componenti applicative descritte di seguito e mostrate in Figura 1:

- C1 – *Human Machine Interface* (HMI): simulatore di interfaccia grafica basata sul concetto di *Multi Function Display* - MFD digitale.

- C2 – *Effect Manager*: componente responsabile della decomposizione e assegnazione automatica dei task al velivolo gregario *unmanned*, al fine di realizzare gli scopi previsti dall'EFFETTO richiesto.
- C3 – *Task Manager*: componente responsabile della realizzazione dello specifico compito, la quale utilizza in maniera intelligente i comandi elementari messi a disposizione dall'UAS gregario.
- C4 – *Command Manager*: componente responsabile della gestione dei comandi resi disponibili dalla piattaforma UAS per il controllo del volo, della navigazione e per la gestione del sensore di bordo.
- C5 – *Wingman Simulator*: componente relativa alla simulazione dinamica dei velivoli *unmanned* di classe "CLASS I SMALL" nell'ambito degli scenari operativi selezionati per le fasi dimostrative.
- C6 – *Tactical Scenario Simulator*: componente responsabile della generazione grafica dello scenario tattico operativo.

METODOLOGIA

L'implementazione delle componenti del dimostratore è mostrata in Figura 2. La componente C1

è il simulatore di MFD, sviluppato per consentire al pilota di interagire con il sottosistema mediante i meccanismi classici dei Formati Video Avionici accessibili con "SoftKey". Permette di inserire comandi, monitorare e controllare l'assegnazione degli EFFETTI agli UAV gregari. Questa componente è stata realizzata con un approccio *Model-Based*, generando automaticamente il codice C++, integrato successivamente col resto del sistema.

I simulatori degli UAS sono sviluppati anch'essi con un approccio *Model-Based*, in ambiente MATLAB/Simulink™, sfruttando la funzionalità automatica di generazione del codice C++.

L'UAS gregario è simulato da un modello a 6-DOF di un UAS di classe NATO *CLASS I SMALL*, con performance e caratteristiche geometriche configurabili, contenente le funzionalità del sensore imbarcato per il rilevamento delle entità nello scenario tattico.

La componente software principale è il MAGICS Core, che racchiude sia gli algoritmi di AI (C2-C3-C4) che il simulatore dell'UAS (C5).

L'AI integrata nelle componenti C2 e C3, che permette ai velivoli gregari di eseguire gli EFFETTI richiesti dal pilota, è stata addestrata con la tecnica del *Deep Reinforcement Learning*, usando il framework di *Machine Learning Ray Rllib* e la libreria *Gym* per l'ambiente di addestramento.

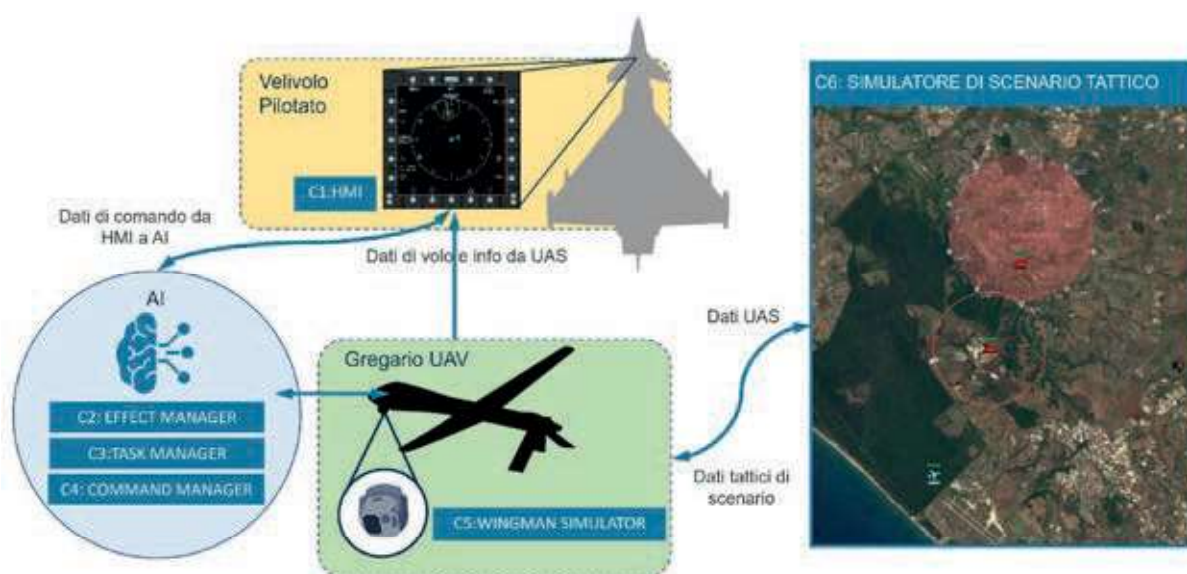


Figura 1 - Schema architetturale del dimostratore MAGICS.

L'architettura della rete neurale usata è un *Multi Layer Perceptron* (MLP) avente in input informazioni relative all'assetto dell'UAV, alla missione e allo scenario tattico disposte in *Framestacking*, al fine di considerare l'evoluzione temporale degli input. L'algoritmo di addestramento è stato il *Proximal Policy Optimization* (PPO), scelto per la sua stabilità e la capacità di gestire dati continui. Per ottimizzare le prestazioni inferenziali e minimizzarne il "footprint", la rete neurale è implementata in C++.

Il simulatore di scenario tattico è stato realizzato utilizzando il software commerciale Command™ PE, integrato con l'applicativo SW MAGICS Core per consentire lo scambio di informazioni.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il progetto MAGICS ha dimostrato le potenzialità MUMT e la reale fattibilità dell'integrazione di tale capacità su piattaforme aeree di 4^a/5^a generazione. A tale scopo sono stati realizzati diversi EFFETTI rappresentativi di un contesto tattico militare:

- “ACQUISIZIONE OBIETTIVO” che consente a UAV autonomi di operare in territori ostili, individuare e designare bersagli in modo intelligente, e navigare attraverso zone di difesa contraerea. Tale capacità ha potenziali impieghi in missioni di sorveglianza avanzate e supporto tattico.
- “FOLLOW ME” che amplia le possibilità di impiego in operazioni tattiche, consentendo agli UAV gregari di seguire in formazione un leader umano. Questa funzionalità trova applicazioni pratiche in missioni di ricognizione coordinata, monitoraggio dinamico di aree critiche e supporto tattico in tempo reale.

Tale risultato apre nuove prospettive per missioni aeree complesse, con sciame di UAS gregari e scenari operativi avanzati.

Le ricadute applicative si estendono oltre il contesto militare, potendo essere adottate in operazioni di sicurezza civile, gestione delle emergenze, monitoraggio ambientale e ricerca e soccorso. L'interfaccia intuitiva e l'AI avanzata rendono il sistema accessibile anche a operatori non specialistici ampliandone le possibilità di utilizzo.

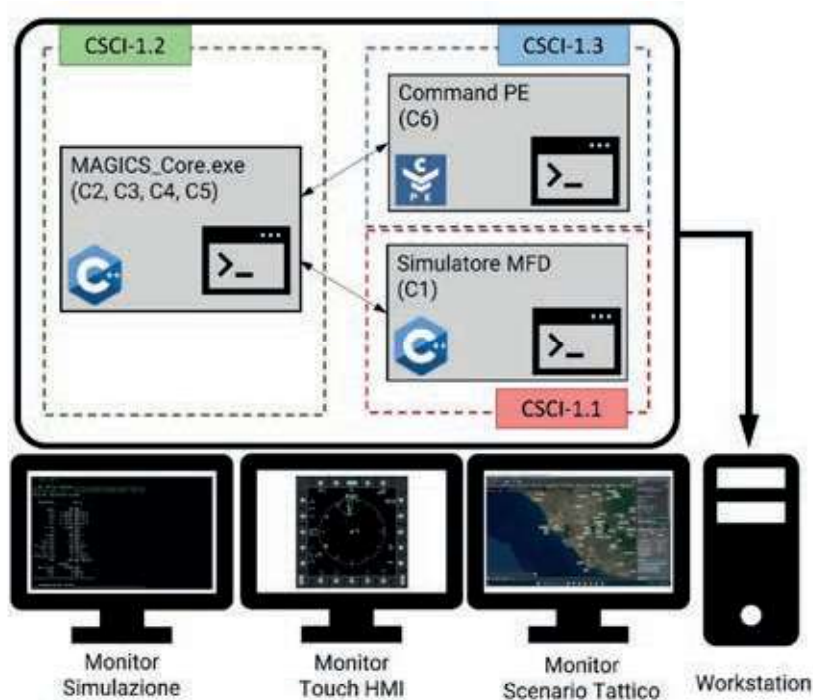


Figura 2 - Componenti software e hardware del Dimostratore MAGICS/ Software and hardware components of the MAGICS demonstrator.

CONCLUSIONI

La Fase1 del progetto ha dimostrato l'applicabilità dell'AI nella gestione cooperativa di squadriglie aeree ibride composte da velivoli con/senza pilota a bordo, consentendo agli UAV gregari di eseguire complesse sequenze di azioni senza l'intervento diretto e continuativo del pilota, segnando un notevole avanzamento rispetto alle tecnologie esistenti. L'utilizzo sperimentale della tecnica di *Deep Reinforcement Learning* nella realizzazione degli EFFETTI di ACQUISIZIONE OBIETTIVO e FOLLOW ME ha dimostrato la bontà dell'approccio in termini funzionali e di performance degli algoritmi. I formati avionici sviluppati e testati mediante il simulatore di MFD, hanno consentito un'interazione automatica e semplificata tra pilota e gregario, comprovando la possibilità di integrare agevolmente e in maniera intuitiva la capacità di MUMT nei sistemi avionici di missione dei velivoli di 4^a/5^a generazione.

L'incremento del carico di lavoro dei piloti è risultato minimale, consentendo al pilota di concentrarsi su compiti decisionali e di supervisione. Il sistema sviluppato è stato considerato foriero di miglioramenti significativi nell'esecuzione delle missioni aeree, potenziando le capacità operative tattiche e strategiche.

Il progetto MAGICS ha evidenziato le capacità della funzionalità MUMT, dimostrandone l'effettivo potenziale utilizzo come *derisk activity* in vista della 6^a Generazione e come effettiva possibilità di retrofit su piattaforme di 4^a/5^a generazione in esercizio.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

AI	<i>Artificial Intelligence</i>
AOC	<i>Aerial Operation Center</i>
COTS	<i>Commercial Of the Shelf</i>
DOF	<i>Degree of Freedom</i>
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
MAGICS	<i>Manned unManned Ground Interoperable Control Station</i>
MFD	<i>Multi Function Display; Multi Function Display</i>
MLP	<i>Multi Layer Perceptron</i>
MUMT	<i>Manned-Unmanned Teaming</i>
PPO	<i>Proximal Policy Optimization</i>
UAS	<i>Unmanned Aircraft System</i>
UAV	<i>Unmanned Air Vehicle</i>

PAROLE CHIAVE

UAV, UAS, Intelligenza Artificiale, Deep Reinforcement Learning, HMI, MUMT, Rete Neurale.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	A2020.208
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (ARMAEREO)
Ente responsabile del progetto:	UTAER
Città, Regione:	Napoli, Campania
Titolo e nome del responsabile del progetto:	RTI Interconsulting Engineering (Rina Consulting SPA) – SkyEyeSystems, Coordinatore: Dott. Pietro Borgh
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Adriano Olivetti, 24 00131 Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 348 2602052
E-mail del responsabile del progetto:	pietro.borgh@rina.org

Il progetto ZENIT ha permesso di definire metodologie applicative HUMS (Health and Usage Monitoring System) e V/S (VULNERABILITY/SURVIVABILITY) applicate a piattaforme del tipo RPAS, con l'obiettivo di ottimizzare la strategia manutentiva della singola macchina e della flotta, nonché di incrementare la sicurezza operativa e l'adeguatezza alle missioni. Il progetto ZENIT è diviso in due Lotti; il Lotto 1 è focalizzato sull'identificazione dei requisiti e sulla definizione di metodi mentre il Lotto 2 è indirizzato alla creazione di un ambiente applicativo che permetta di implementare le attività sviluppate durante l'intero progetto. Si descrivono qui di seguito le principali attività sviluppate nel Lotto 1, che si è concluso. I metodi utilizzati nel progetto sono di tipo modellistico e fanno riferimento alle due macroaree HUMS e V/S. I principali risultati raggiunti sono di carattere metodologico e hanno permesso di ottenere metodi per la definizione di Digital Twin per Health and Usage Monitoring ed un avanzato strumento analitico e statistico per la valutazione della vulnerabilità/sopravvivenza della piattaforma di interesse (parte V/S).

INTRODUZIONE

Il progetto ZENIT si inquadra nella definizione di strategie innovative per attività manutentiva della singola macchina e della flotta, nonché incrementare la sicurezza operativa e la adeguatezza alle missioni. La gestione in tempo reale di un sistema di volo autonomo, destinato alla percorrenza di lunghissime tratte in condizioni ambientali spesso sfavorevoli (grandi altitudini, ampi sbalzi di temperatura, etc.) richiede lo sviluppo di sistemi intelligenti che, sulla base dell'attuale stato di salute dei più importanti sottosistemi e della previsione della loro evoluzione, possano supportare gli operatori a prendere decisioni critiche in modo tempestivo ed affidabile, o, addirittura, che possano autonomamente formulare una strategia decisionale. Nel medesimo contesto si inquadra anche l'analisi della capacità di sopravvivenza che viene condotta con lo scopo principale di evidenziare eventuali criticità che possano rendere il sistema vulnerabile a minacce esterne, siano esse man-made o generiche. In particolare, tali analisi risulterebbero di forte interesse sia qualora fossero integrate fin dalle prime fasi progettuali della macchina, sia nel caso in cui

fossero condotte con lo scopo di fungere da strumento di supporto alla progettazione di superfici protettive, con l'obiettivo comune di diminuire il livello di vulnerabilità della macchina.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Su alcuni aeromobili sono attualmente implementati sistemi HUMS di prima generazione che consentono l'acquisizione, la registrazione e l'elaborazione di dati a supporto della manutenzione del velivolo. Tuttavia, per quanto fondamentali, queste valutazioni non sono sufficienti per un'identificazione accurata e precisa delle anomalie, necessaria per una gestione e un controllo ottimali dei sottosistemi del velivolo autonomo, nonché per una previsione affidabile della loro vita residua. Anche se in letteratura esistono svariate applicazioni di monitoraggio strutturale e di sistema, l'implementazione di tali approcci per una diagnosi e prognosi on-demand a livello industriale è ad oggi molto limitata. Il presente progetto ha quindi permesso lo sviluppo ed utilizzo di un Digital-Twin del sistema velivolo, basato su modelli numerici e analitici, che

permetta l'implementazione di HUMS efficaci ed economicamente vantaggiosi, che non facciano un ricorso estensivo e sistematico a test sperimentali molto costosi, effettuati quindi solo in circostanze specifiche particolarmente critiche e nella fase finale di verifica del sistema

Nel corso della vita operativa, un RPAS è costantemente esposto a minacce esterne, potenzialmente in grado di determinarne il degrado delle capacità operative o l'inoperatività completa. In particolare, l'eventuale esplosione di missili nelle vicinanze del sistema a pilotaggio remoto rappresenta una forte minaccia caratterizzata da due meccanismi di danno: i) l'onda d'urto creata dalla detonazione del materiale esplosivo; ii) la frammentazione del case del missile, che genera frammenti con alto potere di penetrazione. L'analisi di vulnerabilità della macchina risulta dunque di fondamentale importanza per ridurre al minimo i rischi legati alla conduzione di operazioni in ambienti ostili. Il progetto ha quindi permesso lo sviluppo di un ambiente di calcolo integrato e avanzato, in grado di condurre analisi di

vulnerabilità di un sistema di interesse attraverso la modellazione delle minacce e del loro effetto.

METODOLOGIA

La parte di HUMS è focalizzata sullo sviluppo ed utilizzo di metodologie per la definizione di Digital-Twin del sistema velivolo, basato su modelli numerici e analitici, che permettono l'implementazione di HUMS efficaci ed economicamente vantaggiosi, senza il ricorso a test sperimentali molto costosi, effettuati solo nella fase finale di verifica del sistema. La soluzione tecnologica proposta integra l'uso combinato di sensori virtuali e di un modello virtuale (Digital-Twin) dei principali sottosistemi anche in presenza di danneggiamenti, per conoscere il comportamento del velivolo integro e poterlo comparare con quanto osservato dai sensori, per identificare ogni possibile anomalia. L'applicazione HUMS include:

- (i) il Digital-Twin multifisico di un drone (Figura 1), sviluppato in ambiente Matlab, con algoritmi basati su intelligenza artificiale per correla-

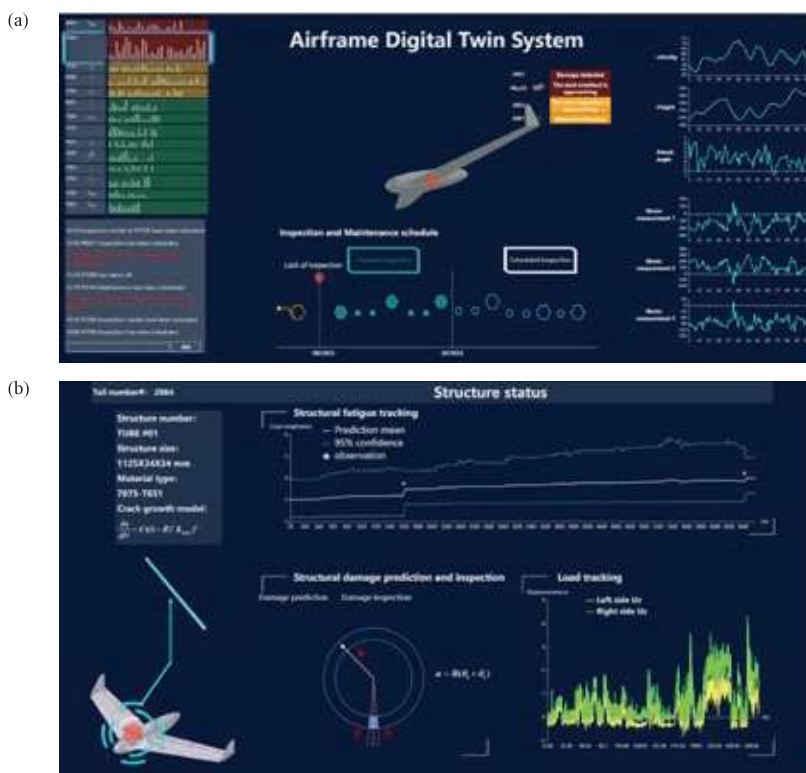


Figura 1 - (a) interfaccia principale del Digital-Twin, (b) sotto-interfaccia diagnostica e prognostica.

re i parametri di volo con le misure locali di deformazione, usando simulazioni agli elementi finiti e di CFD (computational fluid dynamics).

- (ii) Algoritmi per monitoraggio carichi, basati sulla tecnica del FEM inverso, per ricostruire in tempo reale il campo di spostamenti e deformazioni dell'intera struttura a partire da un set di misure di deformazione locale (Figura 2), nonché identificare anomalie.
- (iii) Algoritmi diagnostici e prognostici, basati su tecniche Monte-Carlo e intelligenza artificiale.

La parte di V/S è focalizzata sullo sviluppo di un ambiente di calcolo avanzato composto da:

- (i) metodi analitici per descrivere la minaccia, il sistema e la mutua interazione tra essi. In particolare, si sviluppano modelli analitici di minacce di tipo missile a frammentazione con spoletta di prossimità;
- (ii) un ambiente probabilistico per il calcolo delle probabilità di sopravvivenza di ogni singolo componente, di ogni sistema e della macchina stessa; l'analisi di vulnerabilità permette

di determinare quali siano i componenti più critici di un RPAS analizzato considerando (i) ogni desiderata direzione di provenienza della minaccia e (ii) diversi valori di distanza di detonazione del missile, Figura 3.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

L'impiego di sistemi aeronautici a pilotaggio remoto vedrà un costante aumento negli anni a venire, sia in ambito civile sia in ambito militare. In questo contesto, gli aspetti legati all'affidabilità di molti sotto-sistemi del velivolo giocano un ruolo fondamentale, in quanto anche problematiche ridotte di malfunzionamento o danneggiamento in corso potrebbero tramutarsi velocemente in eventi catastrofici nelle condizioni estreme in cui deve operare il drone. Il presente progetto ha permesso di verificare la fattibilità e l'efficacia dell'implementazione di sistemi HUMS tramite l'utilizzo di Digital-Twin semplificati, nonché di stimarne la robustezza rispetto a condizioni operative e ambientali variabili,

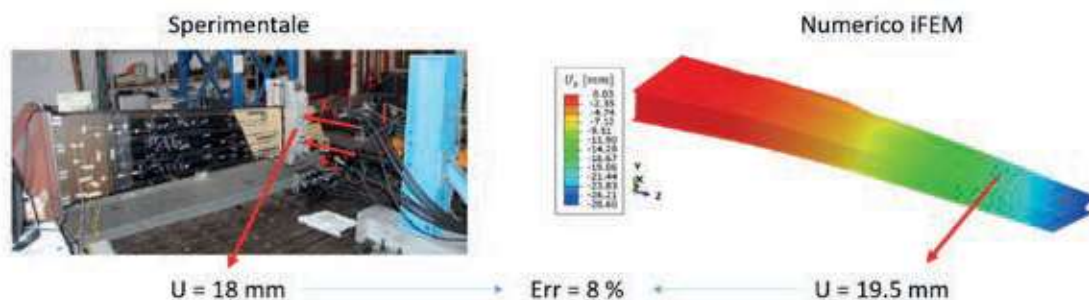


Figura 2 - Applicazione tecnica del FEM inverso ad uno spezzone di ala in materiale composito. Un set di misure locali di deformazione viene utilizzato per ricostruire l'intero campo di spostamenti della struttura, senza necessità di conoscere i carichi applicati, con un errore accettabile.

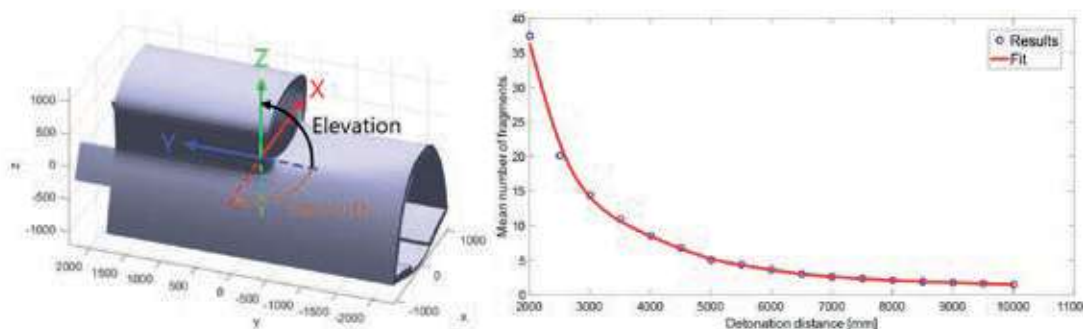


Figura 3 - Applicazione di un modulo di V/S ad un caso verosimile: a) spezzone rappresentativo di una fusoliera (skin) RPAS, b) Relazione tra il numero medio di frammenti che colpisce la Skin, e la distanza del punto di detonazione del missile.

fornendo anche una stima delle potenzialità dei sistemi HUMS tramite un'analisi costi-benefici.

Inoltre, l'assenza di un equipaggio umano rappresenta un aspetto fondamentale nella politica di riduzione della vulnerabilità della macchina; proprio questa caratteristica favorisce l'impiego di tali sistemi a pilotaggio remoto in un variegato ventaglio di condizioni potenzialmente critiche, in grado di esporre il RPAS a potenziali ambienti ostili. Tali aspetti, legati alle tematiche HUMS e V/S evidenziano come la progettazione di un RPAS necessiti di strumenti avanzati che ne migliorino l'efficacia nelle missioni ed elevino il grado di sopravvivenza nei confronti di possibili minacce esterne.

CONCLUSIONI

Il progetto ha permesso di approfondire metodologie applicative HUMS e V/S applicate a piattaforme del tipo RPAS. Sono stati definiti metodi HUMS efficaci ed economicamente vantaggiosi. La soluzione tecnologica proposta integrerà l'uso combinato di sensori

virtuali e di un modello virtuale (Digital-Twin) dei principali sottosistemi e delle loro possibili interconnessioni, sia in condizioni normali che in presenza di danneggiamenti, in maniera tale da avere costantemente una valutazione del comportamento atteso del velivolo integro e poterla confrontare in tempo reale con quanto viene invece osservato dai sensori, al fine di identificare ogni possibile anomalia. È stato inoltre definito uno strumento analitico e statistico per la valutazione della V/S della piattaforma di interesse. In particolare, è possibile rappresentare in un ambiente di calcolo le diverse minacce a cui la piattaforma potrebbe essere sottoposta durante il suo utilizzo, andando ad ottenere valutazioni quantitative sia sui singoli sistemi che sulla piattaforma complessiva. Da queste analisi è possibile quindi operare modifiche migliorative quali la predisposizione di ridondanze, zone con protezione, etc. Il metodo proposto potrà essere applicato durante le varie fasi della progettazione e anche successivamente, nel caso si prevedano modifiche sostanziali alla medesima.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FEM	<i>Finite Element Model</i>
RPAS	<i>Remotely Piloted Air System</i>

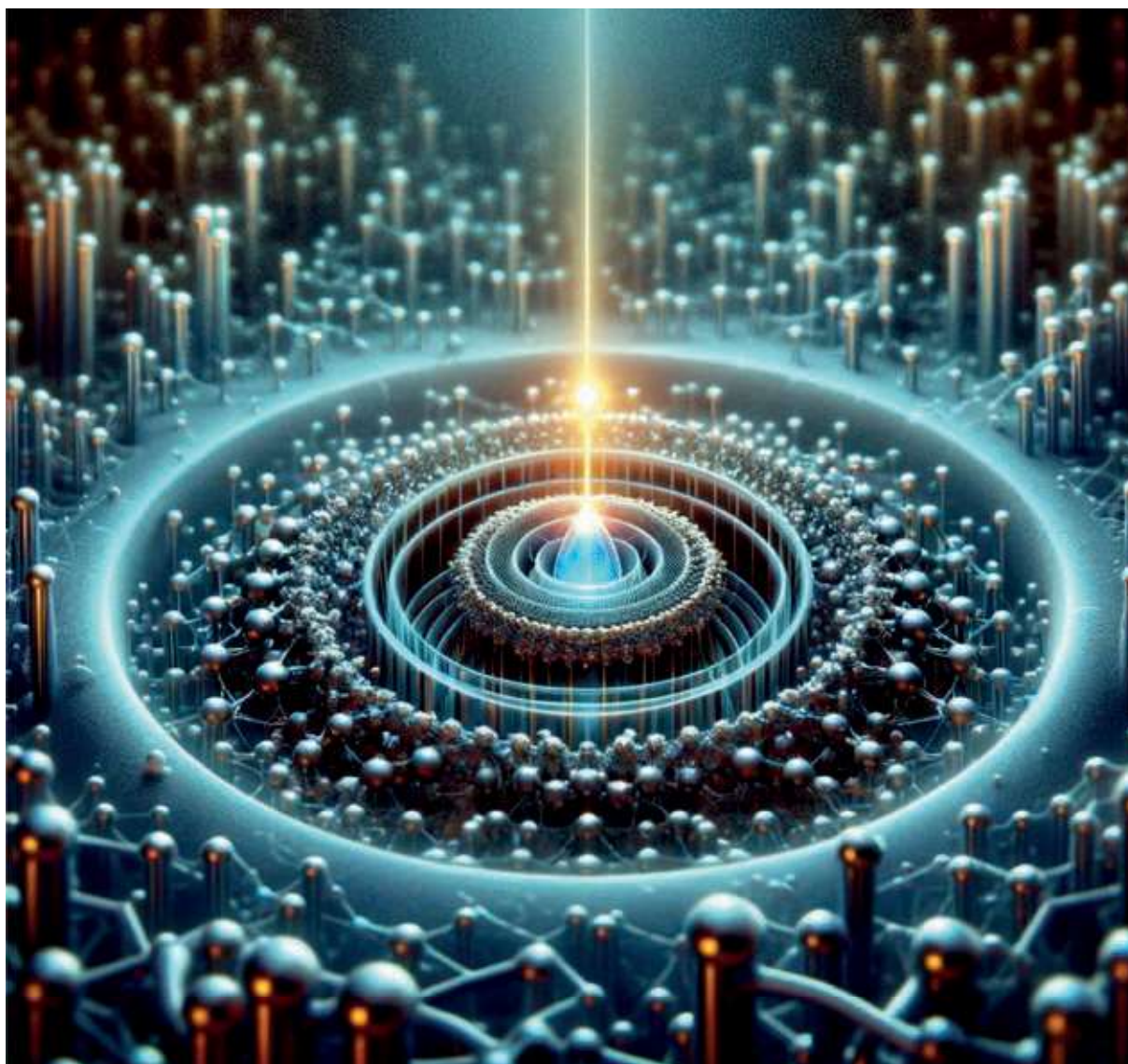
PAROLE CHIAVE

HUMS, Machine Learning, inverse FEM, Digital Twin, Vulnerability, Survivability, RPAS.

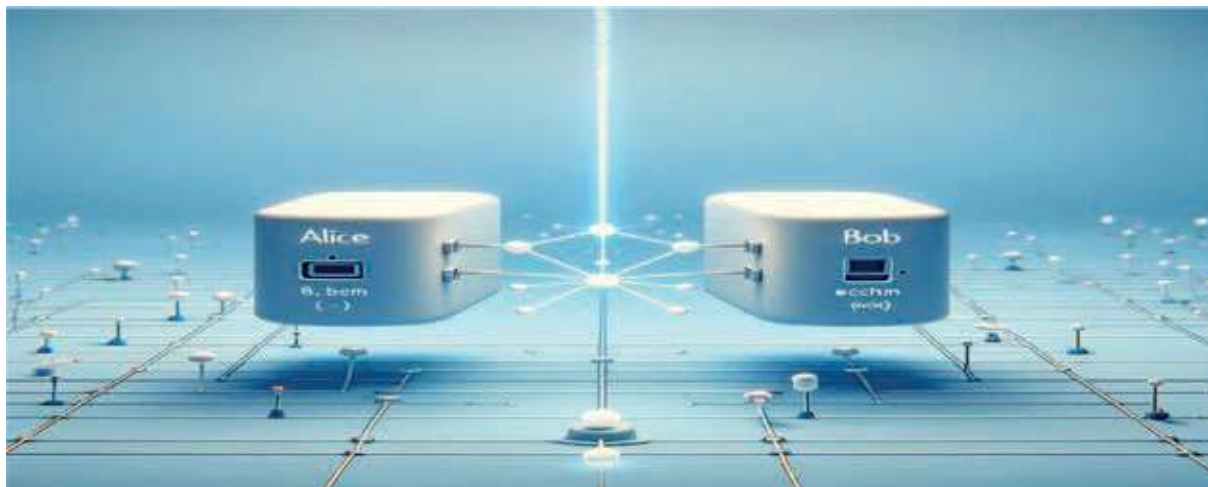
RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2020.302
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (ARMAEREO)
Ente responsabile del progetto:	Politecnico di Milano
Città, Regione:	Milano, Lombardia
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Marco Giglio
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Giuseppe La Masa, 1 - 20156 Milano, Italia
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 02 2399 8234
E-mail del responsabile del progetto:	marco.giglio@polimi.it

Programma di Ricerca Tecnologica PNRM a2019.004 “EWQ – *Electronic Warfare Quantum*”, indirizzato allo sviluppo di tecnologie quantistiche per applicazioni crittografiche, con particolare attenzione alla generazione e manipolazione di singoli fotoni per la *Quantum Key Distribution* (QKD). La ricerca, una collaborazione tra *Smart Manufacturing Lab* e Politecnico di Torino, mira a superare i limiti delle tecnologie esistenti attraverso l'utilizzo di nanotecnologie e metamateriali, per funzionare in ambienti non criogenici. Include lo sviluppo e la valutazione di un dispositivo chiamato SPS (*Single Photon Source*) e l'esplorazione del protocollo BB84 per la distribuzione sicura delle chiavi crittografiche. La Fase 1 si concentra sull'analisi, lo studio e la simulazione del sistema SPS e del suo impiego nel contesto della crittografia quantistica, proponendo un modello sperimentale fisico, che sarà ulteriormente sviluppato nella Fase 2.



SPS rappresentazione



QKD implementazione

INTRODUZIONE

Il progetto si immerge nell'avanguardia delle tecnologie quantistiche, puntando al superamento delle barriere tecniche esistenti mediante l'innovazione in campo di crittografia avanzata. Si focalizza sull'uso di nanotecnologie e metamateriali per facilitare applicazioni non criogeniche, mettendo in luce l'importanza della creazione e ottimizzazione di Sorgenti di Fotoni Singoli (SPS). Queste ultime sono cruciali per la Distribuzione Quantistica di Chiavi (QKD), implementando il protocollo BB84 per una trasmissione sicura di chiavi crittografiche. Attraverso questi avanzamenti, il progetto mira a estendere significativamente la capacità e l'efficienza della crittografia quantistica, promettendo un'evoluzione rivoluzionaria nella sicurezza delle comunicazioni digitali. L'iniziativa si distingue per l'approccio innovativo nell'esplorazione delle potenzialità dei fotoni singoli e dei metamateriali, gettando le basi per futuri sviluppi tecnologici che potrebbero ridefinire gli standard di sicurezza nel vasto panorama dell'informatica quantistica.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

La Fase 1 del progetto ha affrontato il problema della gestione sicura delle chiavi crittografiche, un

nodo cruciale nella sicurezza delle comunicazioni digitali. Tradizionalmente, la distribuzione delle chiavi presenta sfide legate alla loro conservazione sicura e al rischio di intercettazioni. La soluzione proposta sfrutta l'effetto EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) per generare coppie di fotoni con polarizzazioni opposte, uno dei quali viene trasmesso al destinatario. Questo approccio, unito al protocollo BB84, consente una distribuzione sicura delle chiavi, sfruttando la misurazione di un sottoinsieme di fotoni per verificare l'assenza di intercettazioni e l'uso dei fotoni rimanenti per recuperare la chiave privata.

Il problema tecnologico centrale riguarda la realizzazione di un dispositivo SPS (Single Photon Source) funzionante a temperatura ambiente, superando la necessità di condizioni criogeniche. La soluzione tecnologica adottata comprende l'uso di nanotecnologie e metamateriali, in particolare una superficie nanostrutturata otticamente attiva che ottimizza l'emissione e la direzionalità dei fotoni. Questo approccio mira a minimizzare gli errori di posizionamento e a integrare l'SPS direttamente sulla superficie durante la fabbricazione, aumentando l'efficienza del dispositivo.

La Fase 1 ha inoltre incluso lo sviluppo di un banco di prova sperimentale per la valutazione

del protocollo BB84 e la simulazione dell'SPS, ponendo le basi per la successiva implementazione di queste tecnologie in un contesto operativo reale, con l'obiettivo di migliorare significativamente la sicurezza e l'efficienza della crittografia quantistica.

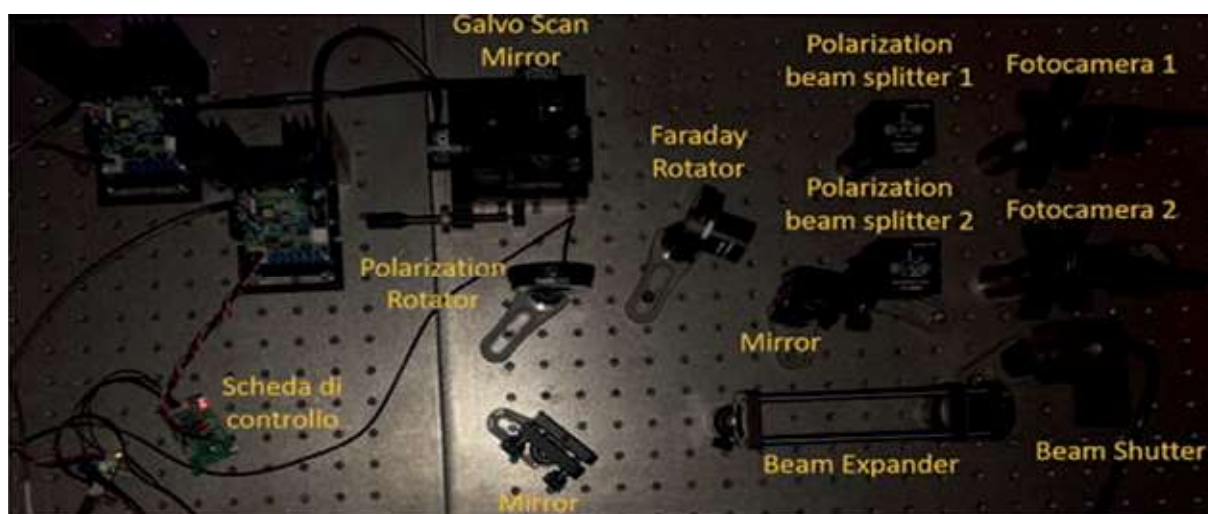
METODOLOGIA

Il progetto sfrutta metodologie all'avanguardia nel campo della crittografia quantistica, con un focus particolare sulla Quantum Key Distribution (QKD) attraverso l'uso di sorgenti di fotoni singoli (SPS). La ricerca si concentra sull'analisi e lo sviluppo di dispositivi SPS operanti a temperature ambiente, superando così le limitazioni delle tecnologie esistenti che richiedono condizioni criogeniche. L'approccio metodologico include la simulazione dell'emissione fotonica e la realizzazione fisica di un banco ottico sperimentale per testare l'efficacia del protocollo BB84, una pietra miliare nella crittografia quantistica per la sicura distribuzione delle chiavi crittografiche.

La fase sperimentale ha contemplato l'uso di un banco ottico pilotato da un laser per emulare l'SPS, fornendo un mezzo per valutare preliminarmente l'interazione tra i fotoni polarizza-

ti necessari per il protocollo BB84. Inoltre, si è proceduto alla progettazione e simulazione di un ambiente fotonico innovativo basato su superfici nanostrutturate (metamateriali iperbolici) per ottimizzare l'emissione e la direzionalità dei fotoni, un aspetto chiave per minimizzare errori e inefficienze tipiche dei dispositivi SPS convenzionali. L'implementazione sperimentale ha incluso anche la configurazione dei moduli optoelettronici standardizzati per Alice e Bob, automatizzando la misura e la gestione della componentistica, evidenziando la piena funzionalità nel processo di scambio di chiavi crittografiche attraverso il protocollo BB84. Questa metodologia ha permesso non solo di testare l'efficacia del sistema di comunicazione proposto ma anche di gettare le basi per future implementazioni che superino le attuali limitazioni tecniche e pratiche dei sistemi di crittografia quantistica.

Dal punto di vista delle immagini si presentano diverse rappresentazioni visive come l'implementazione del protocollo BB84 tra Alice, Bob ed Eva (Figura 1), lo schema di un sistema a due livelli per la generazione di singoli fotoni (Figura 2), e immagini SEM di metamateriali (Figura 3), che illustrano compiutamente gli avanzamenti tecnici e le innovazioni proposte dalla ricerca.



Banco di Test

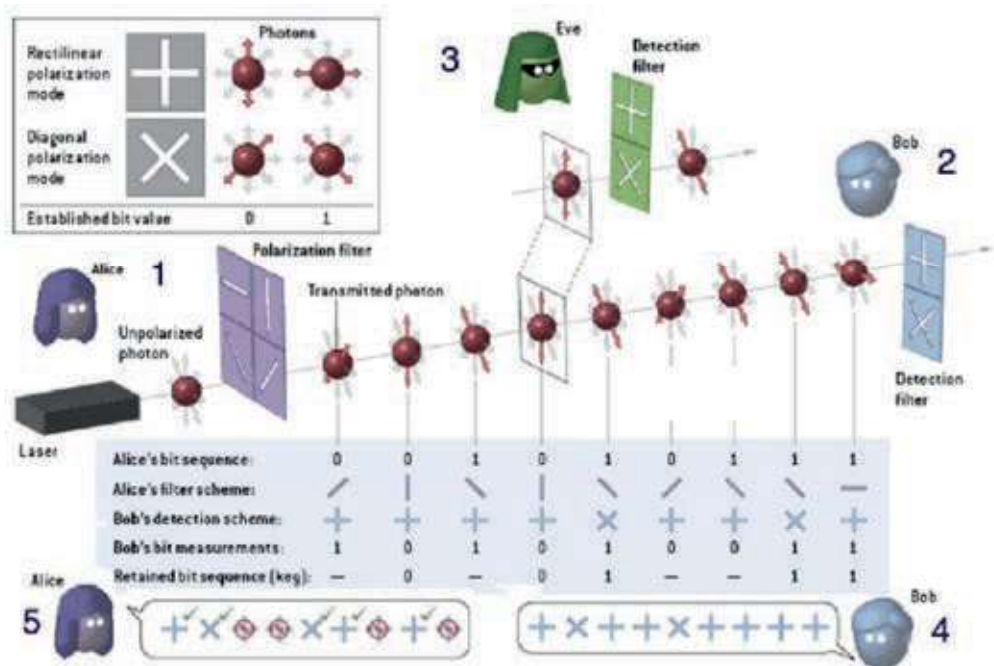


Figura 1 - Implementazione BB84 tra Alice - Bob ed Eva.

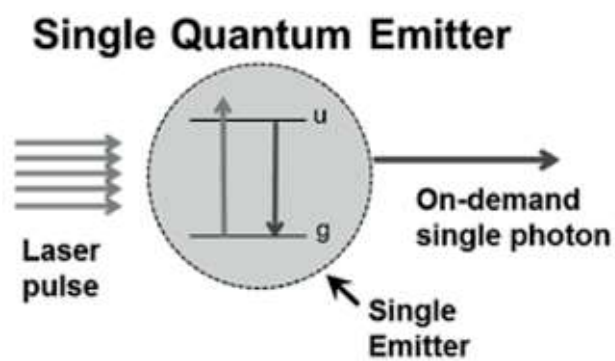


Figura 2 - Schema di un sistema a due livelli per la generazione di singoli fotoni.

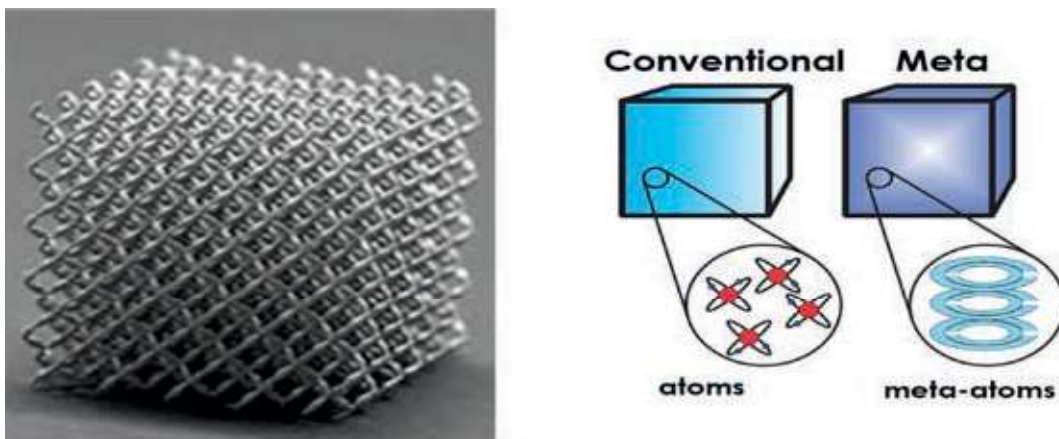


Figura 3 - Immagine SEM di un metamateriale e rappresentazione schematica della differenza tra un materiale e un metamateriale.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il progetto ha evidenziato potenziali utilizzi e ricadute applicative significative nell'ambito della sicurezza delle comunicazioni digitali. Attraverso l'implementazione di tecnologie avanzate per la Quantum Key Distribution (QKD), basate sul protocollo BB84 e l'uso di Sorgenti di Fotoni Singoli (SPS) operanti a temperatura ambiente, si apre la strada a innovazioni nel campo della crittografia quantistica. Le applicazioni pratiche di questa tecnologia sono molteplici e comprendono la sicurezza informatica per le infrastrutture critiche, i sistemi bancari, le comunicazioni militari e governative, nonché le reti di telecomunicazione.

Le ricadute applicative si estendono anche al miglioramento della sicurezza nelle transazioni online e nella protezione dei dati sensibili, rendendo la tecnologia QKD una soluzione ideale contro le potenziali minacce poste dai computer quantistici alla crittografia classica. Inoltre, l'adozione di dispositivi SPS che funzionano a temperatura ambiente potrebbe significare una maggiore facilità di integrazione e una riduzione dei costi operativi, rendendo la crittografia quantistica più accessibile e praticabile per un'ampia varietà di applicazioni. La ricerca ha anche posto le basi per lo sviluppo futuro, puntando a superare le attuali limitazioni tecniche e a esplorare nuove frontiere nella sicurezza quantistica. Con l'avanzare della Fase 2 del progetto, si prevede l'integrazione e il test completo del dispositivo SPS, con l'obiettivo di validare ulteriormente l'efficacia e l'efficienza del sistema di comunicazione quantistica proposto. Questo rappresenta un passo fondamentale verso la realizzazione di una rete di comunicazione esclusivamente dedicata allo scambio sicuro di

chiavi crittografiche, marcando un'avanzata significativa nel campo della sicurezza informatica e della crittografia quantistica.

CONCLUSIONI

Le conclusioni della Fase 1 del progetto evidenziano il successo nell'implementazione delle attività previste, con risultati promettenti che abilitano la prosecuzione verso la Fase 2. La ricerca ha approfondito le problematiche legate alla gestione delle chiavi crittografiche attraverso la Quantum Key Distribution (QKD), affrontando la sfida di mantenere la sicurezza delle chiavi continuamente aggiornate. La sperimentazione si è concentrata sullo sviluppo e la valutazione di dispositivi per l'emissione di singoli fotoni (SPS), con la realizzazione di un banco di prova sperimentale per testare il protocollo BB84, essenziale per lo scambio sicuro di chiavi.

La fase ha portato alla concezione, progettazione e simulazione di un dispositivo SPS innovativo, ottimizzando l'emissione fotonica mediante superfici nanostrutturate. Questo approccio mira a superare le limitazioni attuali, come l'esigenza di condizioni criogeniche, verso soluzioni pratiche a temperatura ambiente. Inoltre, la validazione del protocollo BB84 ha confermato la sua efficacia nello scambio di chiavi, pur evidenziando la necessità di ulteriori sviluppi per affrontare le sfide poste dalle tecnologie di comunicazione esistenti. In sintesi, la Fase 1 ha gettato solide basi scientifiche e tecnologiche per avanzare nella crittografia quantistica, promettendo significativi progressi nella sicurezza delle comunicazioni. La prossima fase vedrà lo sviluppo completo e il test del dispositivo SPS, con l'obiettivo di realizzare una comunicazione quantistica efficace e sicura.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

EPR	<i>Einstein-Podolsky-Rosen</i>
QKD	<i>Quantum Key Distribution</i>
SPS	<i>Single Photon Source</i>

PAROLE CHIAVE

Quantum Key Distribution (QKD), Crittografia quantistica, Single Photon Source (SPS), Protocollo BB84, Sicurezza delle comunicazioni, Nanotecnologie, Metamateriali, Generazione di fotoni singoli, Computazione quantistica, Ambienti non criogenici.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.004
Amministrazione appaltante:	Direzione Informatica, Telematica e Tecnologie Avanzate (TELEDIFE)
Ente responsabile del progetto:	ATS (Associazione Temporanea di Scopo) – Politecnico di Torino, Smart Manufacturing Lab
Città, Regione:	Torino, Piemonte
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Fabrizio Pirri (Politecnico di Torino) , ing. Roberto Mo (SMLab)
Recapiti del responsabile del progetto:	Politecnico di Torino - Corso Duca degli Abruzzi, 24, 10129 Torino SMLab - Via Principe Tommaso, 49, 10125 Torino
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	Pirri: 3454470638 – Mo: 3349654545
E-mail del responsabile del progetto:	fabrizio.pirri@polito.it – roberto.mo@smlab.org

L'incremento esponenziale del volume di dati raccolti dai satelliti di osservazione implica una maggiore richiesta di banda, potenza e dimensioni delle antenne per le comunicazioni terrestri, sollevando questioni economiche e di sicurezza. Una soluzione innovativa è l'adozione della comunicazione laser nell'infrarosso.

Il progetto GIRL realizza un sistema bordo-terra di comunicazione ottica con illuminazione a terra estremamente inferiore, velocità elevatissima e dimensioni estremamente ridotte degli apparati a terra e a bordo. Lo sviluppo ha richiesto la progettazione di telescopi nell'infrarosso e l'utilizzo di apparati previsti per le trasmissioni in fibra ottica opportunamente modificati per l'utilizzo a bordo del satellite.

Il progetto ha consentito di realizzare un apparato di bordo di massa (1 kg), potenza (30 W) e volume (1 dm³) ridottissimi ed un telescopio ed apparati di terra altrettanto efficienti (45 kg, 250 W). In particolare il telescopio di bordo ha un diametro di 2 cm mentre quello di terra ha un diametro di 20 cm. Il sistema GIRL sarà imbarcato su un micro-satelliti e pertanto, l'imbarco su satelliti di classe superiore non presenterebbe alcuna difficoltà realizzativa.

INTRODUZIONE

GIRL è un'innovazione che permette l'utilizzo delle tecnologie sviluppate nel settore delle telecomunicazioni su fibra ottica. La principale innovazione tecnologica è quella di rendere la tecnologia dei Gbit/s accessibile ai satelliti con una massa di soli 25kg. Un collegamento laser consente di avere una singola sessione di comunicazione per orbita, rispetto ai molteplici collegamenti a microonde, permettendo di massimizzare la raccolta delle immagini.

La stazione di terra è costituita da un telescopio di 20 cm, con annesso sistema di puntamento e un semplice ricevitore. Le dimensioni ridotte della stazione di terra (meno di 25 kg) e il suo basso costo possono consentire il dispiegamento di più stazioni di terra in relazione alle esigenze operative. Per il suo ridotto ingombro, la stazione di terra può essere anche trasportata "a spalla".

Le comunicazioni laser satellitari sono state oggetto di ricerca negli ultimi 20 anni, con l'obiettivo di massimo interesse da parte della Difesa, per le intrinseche capacità anti-jam e anti-intercettazione: il breve tempo di connessione e l'area di ricezione

ristretta garantiscono la massima sicurezza.

Il sistema è intrinsecamente duale: l'attrattiva dei sistemi di comunicazione satellitare è legata al fatto di operare in copertura globale senza "atterraggi" intermedi sulle reti terrestri. Inoltre, le comunicazioni laser non richiedono alcun coordinamento con l'ITU.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

La complessità e la risoluzione spaziale dei sensori di telerilevamento imbarcati su satelliti di osservazione della Terra (EO) è in continuo aumento, così come la quantità di dati raccolti da tali strumenti. Di conseguenza, c'è una crescente necessità di larghezza di banda per scaricare tali dati durante il tempo di contatto limitato con le stazioni di terra. Il problema è reso più acuto dall'emergere di costellazioni di satelliti.

L'utilizzo di sistemi di trasmissione nelle microonde, all'aumentare della velocità di trasmissione, richiede elevati valori di potenza e antenne di dimensioni importanti sia a bordo dei satelliti che

a terra. Accanto al problema tecnico si aggiunge l'impatto sulla riservatezza delle comunicazioni e la suscettibilità ad interferenze malevole.

L'utilizzo di collegamenti laser in spazio libero viene proposto come soluzione di problemi precedentemente identificati. Un laser in banda C (1550 nm), modulato a 2 Gbit/s, consente tempi di collegamento dell'ordine del minuto in un'area circolare di 100 metri di diametro.

L'uso delle frequenze nella regione dell'infrarosso consente di attuare il collegamento sia di giorno che di notte. Con l'uso di comunicazioni ottiche si realizza anche la possibilità di sfruttare in campo satellitare l'enorme progresso tecnologico compiuto nel settore della trasmissione in fibra ottica, che mostra le stesse finestre di trasmissione dell'atmosfera. Il progetto GIRL ha permesso di consentire le comunicazioni ottiche anche a satelliti di massa inferiore ai 20 kg.

L'aspetto negativo delle comunicazioni ottiche attraverso l'atmosfera è dato dall'attenuazione e dispersione del segnale dovuta a nebbia e nuvole. Naturalmente la posizione della stazione ricevente ha una grande influenza e nel caso di stazioni "fisse" si suggerisce la localizzazione oltre i 1000 m di altezza e in zone asciutte in modo da migliorare la disponibilità che si mantiene comunque oltre il 90% del tempo per il territorio Italiano.

METODOLOGIA

Il collegamento ottico richiede una estrema precisione di puntamento ($<1\mu\text{rad}$) e quindi la stazione di terra trasmetterà un segnale a 830 nm cui il terminale di bordo si aggancerà prima di trasmettere il suo segnale modulato (Figura 1):

Il sistema sarà composto da (Figura 2):

- una elettronica di controllo per la gestione ed interfaccia del sistema GIRL con il satellite



Figura 1 - Descrizione funzionale della sequenza di Puntamento, Acquisizione e tracking: la stazione di terra segue il satellite, di cui conosce i dati orbitali, con una logica di puntamento programmato e inizia a trasmettere una portante non modulata. Il satellite punterà il centro del fascio ricevuto e inizierà a trasmettere il proprio segnale modulato. I terminali terranno conto del tempo di propagazione per un corretto inseguimento.

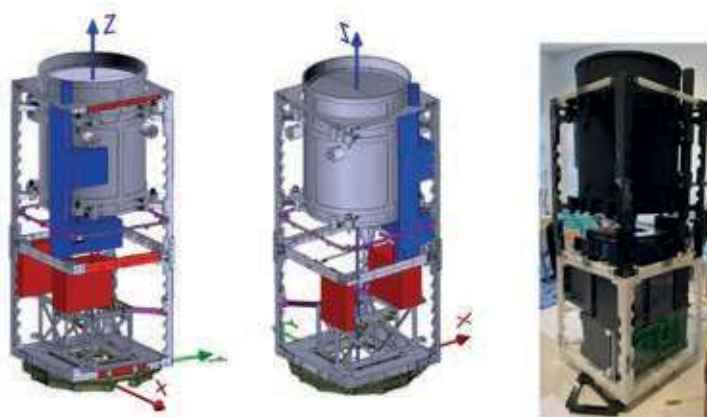


Figura 2 - Rendering del sistema GIRL montato sul satellite EAGLET 2 (dimensioni 274x295x580 mm3). Si sottolineano gli ingombri resi disponibili al sistema GIRL in cui verranno alloggiati tutti i componenti elettronici e il sistema ottico. (OPT). DHTE= Data Handling Electronic and Transmitter; EDFA= Amplificatore ottico; OPT= telescopio, specchietto per la correzione del puntamento (FSM) e sensore del beacon da terra.

ospitante per la telemetria, telecomandi e per la gestione dei dati da trasmettere;

- un emettitore laser con amplificatore ottico (EDFA) per raggiungere la potenza di 1 W;
- un sensore per rilevare il beacon e annullare l'errore di puntamento tramite un Fine Steering Mirror (FSM).

Prima dell'integrazione di GIRL sul satellite, sono state eseguite prove esaustive (Figura 3).

conseguire capacità in un settore altamente innovativo che vede pochi attori della classe di *Small Medium Enterprise* (SME). In campo europeo (fondi EDF) l'attenzione alle SME è considerato un fattore importante nello sviluppo di innovazioni *breakthrough*, con la conseguente messa a disposizione di risorse incentivanti l'aggregazione di SME europee che desiderino superare il livello di sotto-fornitori divenendo fornitori di prodotti finiti.

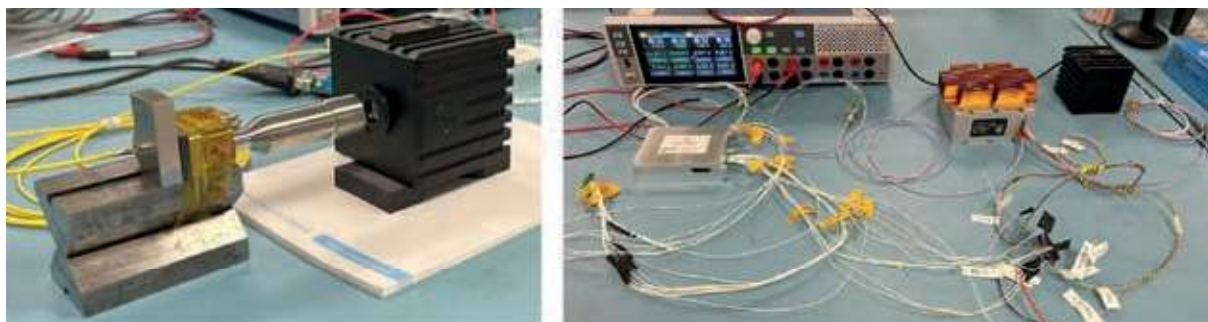


Figura 3 - Le prove a banco hanno consentito di caratterizzare sia la parte ottica (OPT) che la parte elettronica.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il progetto GIRL costituisce un prodotto che potrà essere imbarcato su uno dei due satelliti EAGLET 2 di OHB-I, attualmente in acquisizione dal Ministero della Difesa per sperimentazione in orbita.

La successiva sperimentazione condotta da On-Air in collaborazione con detto Ministero consentirà di verificare la possibilità di imbarcarlo sui satelliti delle costellazioni di EO militari e civili. Sistemi FSO sono proposti anche per collegamenti con piattaforme stratosferiche ed aerei troposferici. On-Air sta inoltre sviluppando il concetto di un sistema bidirezionale utilizzabile in collegamenti fra satelliti ad altissima velocità di trasmissione dati. Tale sistema consentirebbe inoltre, ad un singolo satellite, sia la trasmissione dei dati acquisiti dal satellite stesso che la raccolta dei dati da siti remoti con la consegna ad un destinatario remoto (*store and forward*).

On-Air, vuole sviluppare sistemi di trasmissione avendo già esperienza nei trasmettitori in banda X e nelle antenne *phased array*, installati sui satelliti EAGLET 2 di OHB-I. On-Air ritiene opportuno

CONCLUSIONI

La limitazione della banda disponibile a radio-frequenza per la trasmissione di dati da satelliti di osservazioni e di comunicazioni rende sempre più pressante l'utilizzo di mezzi alternativi come le comunicazioni LASER che offrono la possibilità di comunicare a velocità di Gbit/s con sistemi molto compatti, pienamente compatibili anche con micro-satelliti. Le comunicazioni ottiche oltre a non essere soggette a notifiche presso la ITU offrono anche collegamenti sicuri e non intercettabili. Il progetto GIRL ha realizzato un prodotto di massa, volume e potenza estremamente ridotto e il primo prototipo è pronto ad essere imbarcato su un satellite del Ministero della Difesa per una intensa campagna sperimentale. La tecnologia realizzata si presta anche ad un utilizzo come interconnessione fra satelliti. Le attività future dovrebbero consentire di affrontare velocità di trasmissione dell'ordine del Terabit/s oltre che rendere possibile la trasmissione da terra a bordo. La dualità della soluzione raggiunta consente di ipotizzare un utilizzo in costellazioni civili quali quelle previste dal piano italiano di PNRR.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

EO	<i>Earth Observation/Osservazione della Terra</i>
EDF	<i>European Defence Fund</i>
EDFA	<i>Erbium-Doped Fiber Amplifier</i>
FSM	<i>Fine Steering Mirror / Specchio con movimenti fini</i>
FSO	<i>Free Space Optics / Ottica nello Spazio aperto</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
PNRR	<i>Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza</i>
On-Air	<i>On-Air Consulting & Solutions SRL</i>
SME	<i>Small Medium Enterprise/Piccola Media Azienda</i>

PAROLE CHIAVE

FSO, Comunicazioni LASER, Comunicazioni Infrarosso, Gbit/s.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.010
Amministrazione appaltante:	TELEDIFE
Ente responsabile del progetto:	On-Air Consulting & Solutions SRL
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Enrico SAGGESE
Recapiti del responsabile del progetto:	Viale Regina Margherita, 278, 00198 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3487361300
E-mail del responsabile del progetto:	enrico.saggese@onaircs.com

BIBLIOGRAFIA MINIMA

Olivier Bouchet, Hervé Sizun, Christian Boisrobert, Frédérique de Fornel, Pierre-Noël Favennec. Free-Space Optics: Propagation and Communication. ISBN:9781905209026. 1 January 2006
 Arun K. Majumdar Advanced Free Space Optics (FSO) A Systems Approach. Springer Series in Optical Sciences, 186. 2015

Il Progetto M5G si prefigge di sviluppare un *Modem* con protocollo 5G da installare a bordo di un UAV e che consenta il collegamento “*seamless*” 5G sia con un segmento spaziale di Microsatelliti 5G sia con una Stazione di Terra. La Ricerca si svolge in tre distinte Fasi, di cui nella Prima è stato effettuato un progetto preliminare, nella Seconda si realizzerà un *breadboard* da provare al banco e nella Terza ed ultima si realizzerà il dispositivo prototipale che sarà sperimentato in volo.

Alla fine della Prima Fase è stata individuata l’architettura HW e SW per la realizzazione del *breadboard* che sarà realizzato nella Seconda Fase ed il Prototipo volante che sarà realizzato nella Terza Fase.

Al momento la configurazione selezionata è basata sul *chipset Qualcomm Snapdragon X55* integrato nel modulo *Telit* che implementa lo *standard 3GPP 15* unico al momento effettivamente disponibile agli sviluppatori, non escludendo di prendere in esame successivi *standard* non appena saranno fisicamente disponibili.



INTRODUZIONE

Il mercato dei veicoli *unmanned* (UAV) è in forte e continua crescita, ed il numero di potenziali applicazioni sia in campo civile che militare per questa tipologia di veicoli è in continuo aumento. Per sostenere questa crescita lo sviluppo di nuove ed innovative tecnologie di comunicazione *wireless* è diventata una richiesta imperativa sia al fine di garantire maggiore affidabilità agli attuali sistemi di Comando e Controllo (C2) per la sicurezza dell’operatività in volo, sia per migliorare la trasmissione dei dati

di missione, aumentando la velocità di trasferimento dei dati per applicazioni *rate-demanding*.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Nell’ambito del settore degli UAV è in atto una forte richiesta di innovazione dei sistemi di C2 e dei *data-link* di comunicazione dei *payload* di bordo che superi i limiti attualmente presenti delle comunicazioni, in particolare andando ad aumentare il *data-rate*, l’affidabilità, la sicurezza dei

dati, riducendo la vulnerabilità alle interferenze e superando le limitazioni dovute all'utilizzo esclusivamente in *modalità Line-of-Sight (LoS)*.

Questa spinta tecnologica presente nel mercato civile risulta essere un'opportunità di innovazione anche in campo militare per il quale, oltre a poter beneficiare degli *improvement* tecnologici per le problematiche sopra indicate, è fortemente sentita la necessità di migliorare la sicurezza dei dati e la resilienza ad interferenze non intenzionali e, soprattutto, intenzionali (*Denial of Service / Jamming Attack*).

L'integrazione degli UAV nell'ambito delle reti di comunicazione 5G anche con la componente satellitare è una delle risposte tecnologiche maggiormente interessanti per superare le problematiche sopra esposte.

Nella Figura 1 è riportato uno schema dei servizi TLC 5G in base alle risultanze del gruppo di lavoro 3GPP.

In questo ambito, i sistemi di comunicazione di bordo degli UAV possono essere connessi alla

rete cellulare come una tipologia di utenti speciali (*cellular-connected UAVs*). Grazie alla ormai diffusa accessibilità delle reti mobili attuali (LTE) e dell'immediato futuro (5G) e la presenza di meccanismi di autenticazione sempre più avanzati, i sistemi di C2 di *cellular-connected UAVs* possono ottenere sensibili miglioramenti delle prestazioni delle comunicazioni rispetto agli attuali sistemi *ground-to-UAV* sia in termini di affidabilità che di sicurezza dei dati, nonché di *range operativo* e velocità di scambio dati. Inoltre una delle le caratteristiche principali del 5G è la accresciuta resistenza ad interferenze, grazie a tecnologie innovative (*digital beamforming*, MIMO) che estendono i loro benefici anche al caso di interferenze intenzionali (*jamming*). Non ultimo, la presenza nell'ecosistema 5G di una componente satellitare potrà agevolare le comunicazioni *Beyond Line of Sight (BLoS)* per gli UAV.

Nella Figura 2 è riportato lo schema di interconnessione dei vari elementi di Sistema.

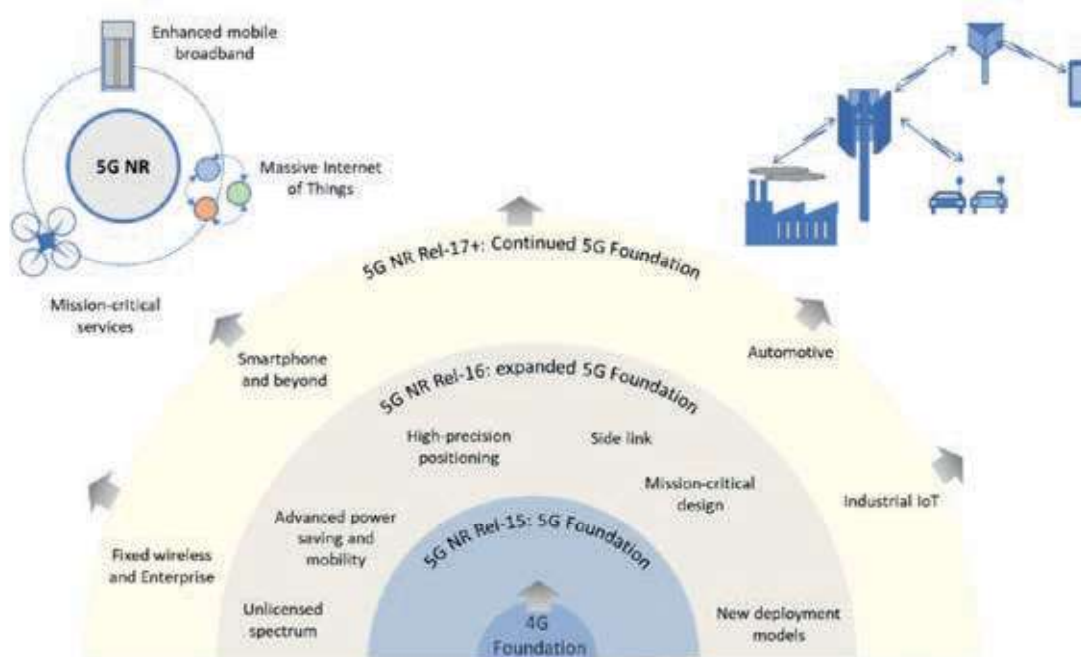


Figura 1 - Schema dei servizi TLC 5G.

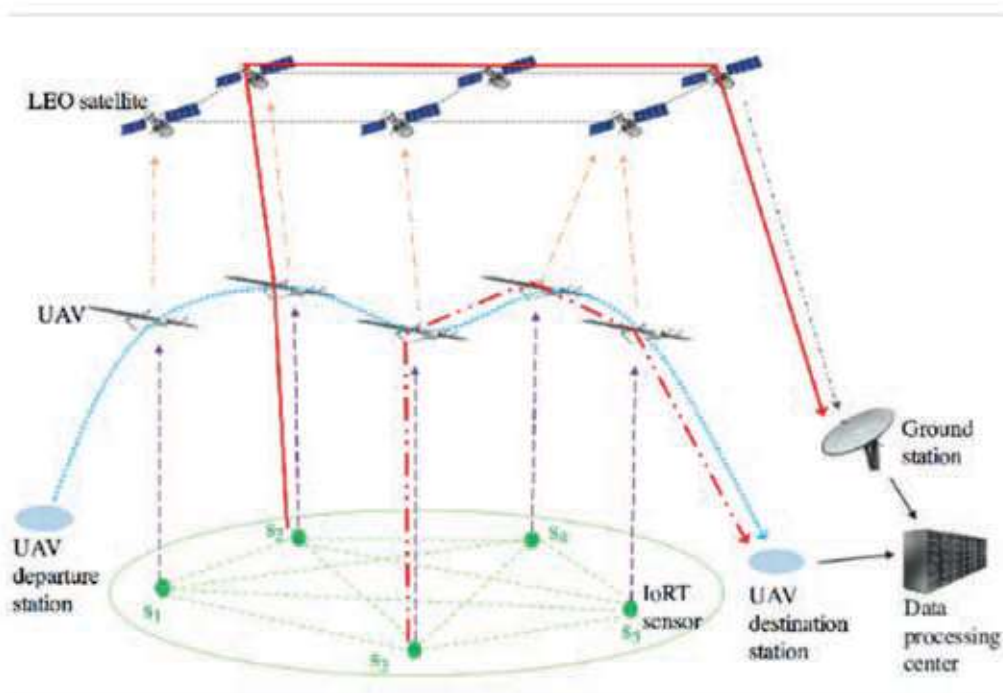


Figura 2 - Schema di interconnessione.

Nella figura seguente è riportata l'Architettura del Modulo con integrato il Chipset Qualcomm.

- Fase II: Progetto di Dettaglio ed eventuale Realizzazione di Breadboards critici.

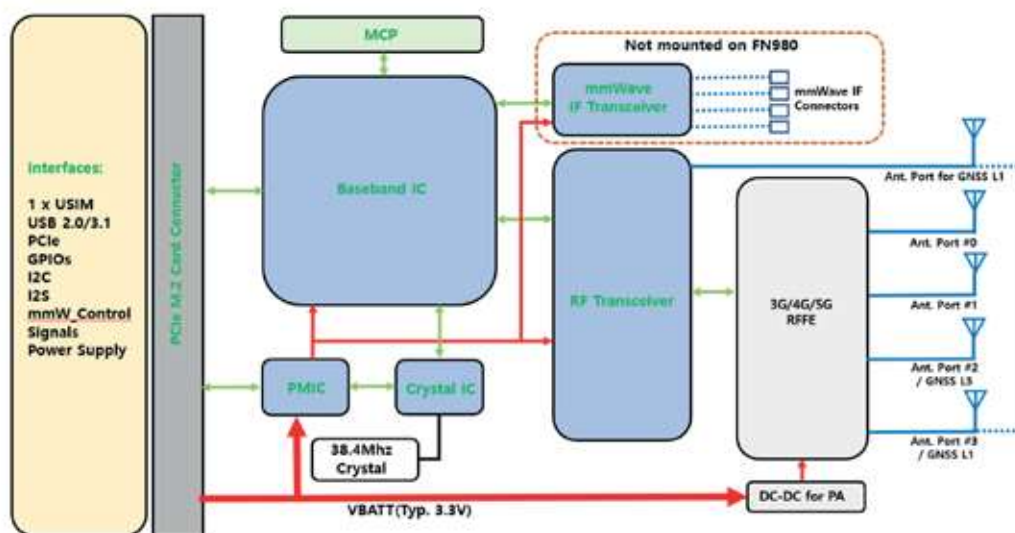


Figura 3 - Architettura preliminare del Modulo.

METODOLOGIA

Il progetto e lo sviluppo contemplati nella presente proposta sono divisi in fasi:

- Fase I: Studio Preliminare.

- Fase III: Realizzazione del Modem 5G e Sperimentazione.

La Prima Fase prevede lo studio, il progetto, l'implementazione della piattaforma di simula-

zione End-to-End, la definizione di dettaglio dei requisiti e lo sviluppo del progetto preliminare sulla base dei risultati ottenuti in ambiente di simulazione. È richiesto lo studio approfondito dell'interfaccia radio 5G-NR e dei modelli di canale teorici o semi teorici tra il trasmettitore e l'UAV sia in modalità LoS che BLoS.

La Seconda Fase prevede la finalizzazione del modello End-to-End, la progettazione di dettaglio del sistema e la realizzazione di breadboard di elementi del sistema che saranno ritenuti critici a valle degli studi di Fase 1.

Nell'ultima e Terza Fase sarà realizzato il Modem 5G che sarà quindi installato su un velivolo ultraleggero appositamente predisposto al fine di simulare in volo le capacità del Modem 5G raggiungendo un stadio di ricerca complessivo di TRL 6. Verrà quindi effettuata la messa in opera della stazione di terra al fine di effettuare una campagna di test atta a verificare la funzionalità del sistema in ambiente il più vicino possibile a quello operativo per la componente LOS.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La valenza militare del progetto è insita nella descrizione riportata precedentemente. L'innovazione principale consiste nel permettere ad UAV di poter essere equipaggiati con sistemi di comando e controllo di ultima generazione i quali sfruttano i vantaggi derivante dalla tecnologia 5G sopra esposti. È presumibile che sempre più gli Assetti Militari si troveranno ad operare in contesti dove la differenza tra disponibilità di prodotti e tecnologie militari o civili sarà sempre più sottile. La differenza potrà consistere solo in alcune particolari implementazioni della tecnologia, in particolare per quanto riguarda la problematica della sicurezza informatica.

La valenza duale è insita negli aspetti sopra descritti, in quanto il progetto prevede di mutuare

la tecnologia in fase di sviluppo in ambito civile per applicazioni militari. Viceversa la possibilità di usare questa tecnologia in ambito militare, dato che la problematica UAV è sostanzialmente confinata all'impiego Difesa fino a che non sarà risolta la tematica del volo non segregato, permetterà di esplorare anticipatamente le problematiche del C2 applicato ad applicazioni civili. Infatti, se si andasse verso un impiego massivo degli UAV per applicazioni civili, sicuramente si presenterà la sicurezza verso persone e cose degli eventuali guasti collegabili a qualsiasi mezzo in movimento.

CONCLUSIONI

È stata completata la Prima Fase delle attività e nel corso del 2024 sarà completata anche la Seconda Fase.

In virtù delle attività svolte nello Studio Preliminare, la Fase 2 prevede:

- Un progetto di dettaglio per la progettazione dell'apparato di trasmissione e ricezione dati adatto allo scenario in esame;
- Realizzazione di prototipi di parti ritenute critiche, per la verifica delle funzioni e delle caratteristiche di progetto;
- Completamento del simulatore sulla base delle scelte di progetto definite nello studio preliminare;
- Realizzazione di un prototipo completo del modem secondo i risultati della Fase 1. I prototipi realizzati durante la progettazione della waveform e del modem, per la verifica delle parti più critiche e specifiche, potranno essere utilizzate per l'assemblaggio finale del modem;
- Test di collaudo dell'HW, volto alla verifica del corretto funzionamento di quanto sviluppato, come ad esempio il corretto funzionamento dei componenti elettronici montati a bordo del prototipo e delle interfacce di comunicazione tra i singoli componenti o moduli che compongono il prototipo stesso.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
5G	<i>Fifth generation technology standard for broadband cellular networks</i>
ATC	<i>Air Traffic Control</i>
Band C	<i>RF band from 4 to 8 GHz</i>
Band Ka	<i>RF band from 26 to 40 GHz</i>
BLoS	<i>Beyond Line of Sight</i>
CONOPS	<i>Operational Scenario and Concept of Operations</i>
CNR	<i>Carrier To Noise Ratio</i>
FSS	<i>Fixed Satellite Service</i>
GEO	<i>Geosynchronous Equatorial Orbit</i>
ICT	<i>Information and Communications Technology</i>
ITU-R	<i>International Telecommunications Union Radio</i>
LEO	<i>Low Earth orbit</i>
LoS	<i>Line-of-Sight</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
NTN	<i>Non-Terrestrial Network</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

PAROLE CHIAVE

Modem, 5G, Comando e Controllo, C2, UAV, Cyber, BLOS, LOS.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.125
Amministrazione appaltante:	Direzione Informatica, Telematica e Tecnologie Avanzate (TELEDIFE)
Ente responsabile del progetto:	ITS - Information Technologies Services S.r.l.
Regione della sede legale e operativa:	Lazio
Indirizzo:	Via Giunio Bazzoni 15, 00195 Roma (RM)
Telefono:	06 3215001
E-mail:	pecintese@pec.it
Referente responsabile del progetto:	Ing. MARIO FRANCESI
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	06 3215001
E-mail del responsabile del progetto:	mfrancesi@intese.com

Questo documento descrive il progetto dal titolo “Super-Risoluzione spaziale per immagini Iperspettrali Satellitari” che ha riguardato il problema del miglioramento della risoluzione spaziale dei dati iperspettrali della missione satellitare PRISMA dell’Agenzia Spaziale Italiana. Nel progetto il problema è stato affrontato sfruttando algoritmi di fusione fra i dati iperspettrali a risoluzione di 30 m ed i dati a risoluzione spaziale più elevata della missione multispettrale Sentinel-2. In particolare, sono state considerate le dieci bande Sentinel-2 con risoluzione di 10 m e 20 m. Questo articolo presenta una nuova procedura, denominata PRISMA-SR, che, partendo dai dati Sentinel-2 e dall’immagine a bassa risoluzione spaziale di PRISMA, fornisce un’immagine super-risolta con una risoluzione spaziale di 10 m e la stessa risoluzione spettrale del sensore iperspettrale PRISMA. Il primo passo della procedura PRISMA-SR consiste nel fondere i dati Sentinel-2 a diverse risoluzioni spaziali per ottenere un’immagine multispettrale sintetica con 10 bande e risoluzione spaziale di 10 m. Successivamente, viene applicata una procedura non supervisionata per co-registrare l’immagine Sentinel-2 e l’immagine PRISMA. Infine, le due immagini a diverse risoluzioni spaziali vengono combinate opportunamente al fine di ottenere l’immagine iperspettrale super-risolta. La procedura PRISMA-SR propone soluzioni innovative per ciascun passaggio della catena di elaborazione teste’ descritta.

INTRODUZIONE

I sensori iperspettrali (HS) consentono un’analisi dettagliata delle proprietà chimiche e fisiche delle scene osservate grazie alla capacità di misurare la radianza proveniente dalle stesse attraverso numerosi canali spettrali. La missione PRISMA dell’Agenzia Spaziale Italiana, attiva dal marzo 2019, impiega questa tecnologia per il monitoraggio della Terra su larga scala. Tuttavia, la risoluzione spaziale limitata dei dati acquisiti (30 m) riduce le potenziali applicazioni. Un possibile modo per superare questa limitazione è quello di combinare i dati HS con immagini multispettrali (MS) della stessa scena con maggiore risoluzione spaziale. In questo studio, si propone uno schema di fusione HS-MS che utilizza i dati satellitari Sentinel-2 (S2) e le immagini PRISMA. La procedura include la fusione dei dati S2 a diverse risoluzioni spaziali per ottenere immagini sintetiche S2 a 10 m di risoluzione. Successivamente, si applica un algoritmo

di co-registrazione tra le immagini sintetiche S2 e PRISMA, seguito dall’applicazione di un algoritmo di fusione HS-MS per ottenere immagini PRISMA ad alta risoluzione. Tale procedura permette di migliorare l’accuratezza degli algoritmi adottati sia in applicazioni militari, sia nel monitoraggio degli ecosistemi, nella mappatura dei minerali e nell’analisi delle superfici urbane.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Un elemento critico della tecnologia iperspettrale satellitare (HS-SAT) è la bassa risoluzione spaziale dovuta alla necessità di mantenere un rapporto segnale rumore elevato in tutte le bande spettrali. La risoluzione spaziale dei sistemi HS-SAT, incluso PRISMA, è di circa 30 metri, con ogni pixel che copre un’area di 900 metri quadrati. Tale caratteristica non rispetta i requisiti operativi in applicazioni di *intelligence e security*

in cui i fenomeni di interesse hanno dimensioni di pochi metri (navi di medie dimensioni, mezzi tattici). Per sfruttare le capacità dei sistemi HS-SAT, sono necessarie strategie di elaborazione che consentano l'estrazione di informazioni spettrali a una scala spaziale inferiore, mediante l'analisi dell'immagine iperspettrale stessa e l'integrazione con dati provenienti da sensori ad alta risoluzione spaziale (a banda larga o multi-spettrali).

L'analisi dello stato dell'arte indica che per migliorare la risoluzione dei sensori HS-SAT si possono fondere le informazioni presenti nell'immagine HS a bassa risoluzione spaziale con quelle fornite da un'immagine MS ad elevata risoluzione spaziale. Tale approccio è noto in letteratura come super-risoluzione iperspettrale (HS-SR). Lo scopo delle tecniche HS-SR è quello di iniettare le informazioni spaziali del sensore MS nel dato ad alta risoluzione spettrale del sensore HS.

Il payload di PRISMA non include un sensore MS ad alta risoluzione spaziale. Quindi, per implementare una strategia HS-SR, sono necessari dati da sensori MS di altre missioni satellitari come S2, un programma dell'European Space Agency

che offre una copertura regolare con tempo di rivista medio di 4 giorni.

S2 include quattro bande nel VNIR con risoluzione di 10m e 6 bande nel VNIR/SWIR con una risoluzione spaziale di 20 m. Le suddette bande coprono un intervallo spettrale che si sovrappone a quello misurato dal sensore PRISMA, e possono essere sfruttate per migliorare la risoluzione spaziale dei dati PRISMA mediante l'algoritmo di fusione proposto nel progetto.

METODOLOGIA

La strategia proposta, denominata PRISMA-SR [1], consiste in un algoritmo di fusione fra i dati S2 e il dato PRISMA in grado di ottenere un'immagine HS con risoluzione spaziale di 10 m. La strategia è applicata ai dati in riflettanza spettrale per minimizzare le differenze radiometriche fra l'immagine HS e l'immagine MS.

PRISMA-SR si sviluppa su tre livelli funzionali (Figura 1). Riceve in ingresso tre immagini: le due immagini S2 a 10m (X'_{10}) e 20 m (X'_{20}) e l'immagine PRISMA (Y). Nel primo livello (*S2 data fusion*) si applica l'algoritmo di fusione MTF-GL-

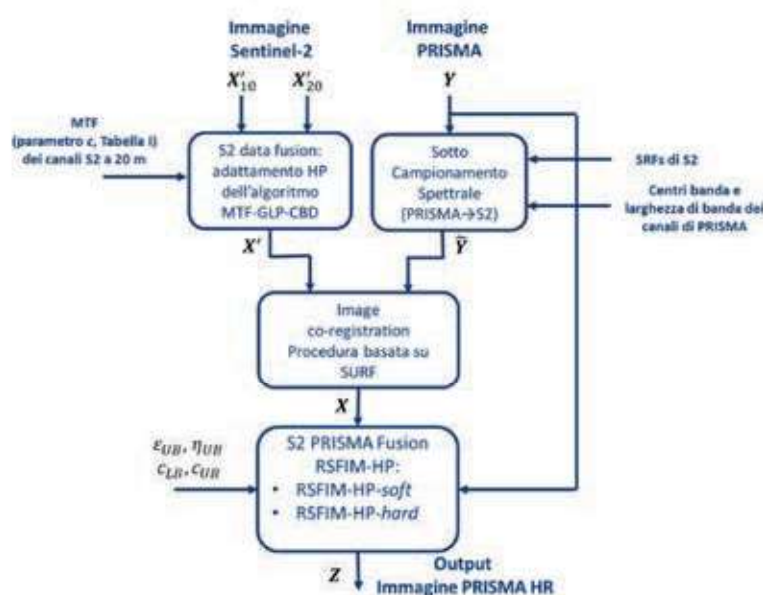


Figura 1 - Schema a blocchi della strategia PRISMA-SR. X'_{10} e X'_{20} indicano rispettivamente l'immagine S2 su 4 bande e con risoluzione di 10 m e l'immagine S2 su 6 bande e risoluzione di 20 m. Y è l'immagine PRISMA a 230 bande e con risoluzione di 30 m. X' è l'immagine S2 super-risolta ottenuta fondendo i due dati S2 e contiene 10 bande con una risoluzione di 10 m. X è l'immagine S2 super-risolta dopo il processo di co-registrazione con l'immagine PRISMA. Z è l'immagine iperspettrale ad alta risoluzione spaziale contenente 230 bande con risoluzione di 10 m.

P-CBD [2] ai dati S2 con l'obiettivo di portare la risoluzione spaziale dell'immagine X'_{20} a 10 m, ottenendo l'immagine X' con 10 bande e 10 m di risoluzione spaziale. Il secondo livello funzionale (*Image co-registration*) si occupa di co-registrazione spazialmente l'immagine X' ad alta risoluzione con l'immagine PRISMA. Per allineare correttamente le immagini X' e Y , è essenziale implementare una strategia di co-registrazione, poiché i dati di geolocalizzazione di PRISMA, con errori fino a 200 metri, richiedono un'adeguata compensazione. Il terzo livello funzionale, applica al dato PRISMA (Y) ed al dato S2 super-risolto e co-registrato (X), una procedura di fusione per ottenere un'immagine con risoluzione spaziale di 10 m e 230 bande spettrali (Z). Tale procedura si basa su una versione robusta sia agli errori residui di registrazione sia alla non perfetta conoscenza dei parametri del sistema ottico di PRISMA, dell'algoritmo *Smoothing Filtered-based Intensity Modulation* ([3]) applicato seguendo il paradigma *Hyper sharPening* ([4]).

In Figura 2, a titolo di esempio, si mostrano esempi dei risultati ottenuti con l'algorit-

mo PRISMA-SR su tre scenari differenti. Per ogni scenario si riportano le rappresentazioni a falsi colori ottenute nel visibile e nello SWIR dell'immagine PRISMA originale (Y) e dell'immagine Z ottenuta applicando l'algoritmo di super-risoluzione.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le tecniche di super-risoluzione iperspettrale da satellite nel contesto militare migliorano la capacità di individuare su larga scala obiettivi mimetizzati, mappare terreni con precisione per la pianificazione delle operazioni e rilevare dettagli cruciali come installazioni militari. Queste tecniche potenziano le operazioni di sorveglianza e identificazione di minacce. Integrare queste tecniche ad altre sorgenti di informazioni può aumentare l'efficacia delle operazioni militari, consentendo una migliore raccolta di informazioni strategiche e una maggiore consapevolezza del contesto operativo. In ambito civile le tecniche di super-risoluzione permettono di affinare i risultati dell'analisi iperspettrale su larga scala

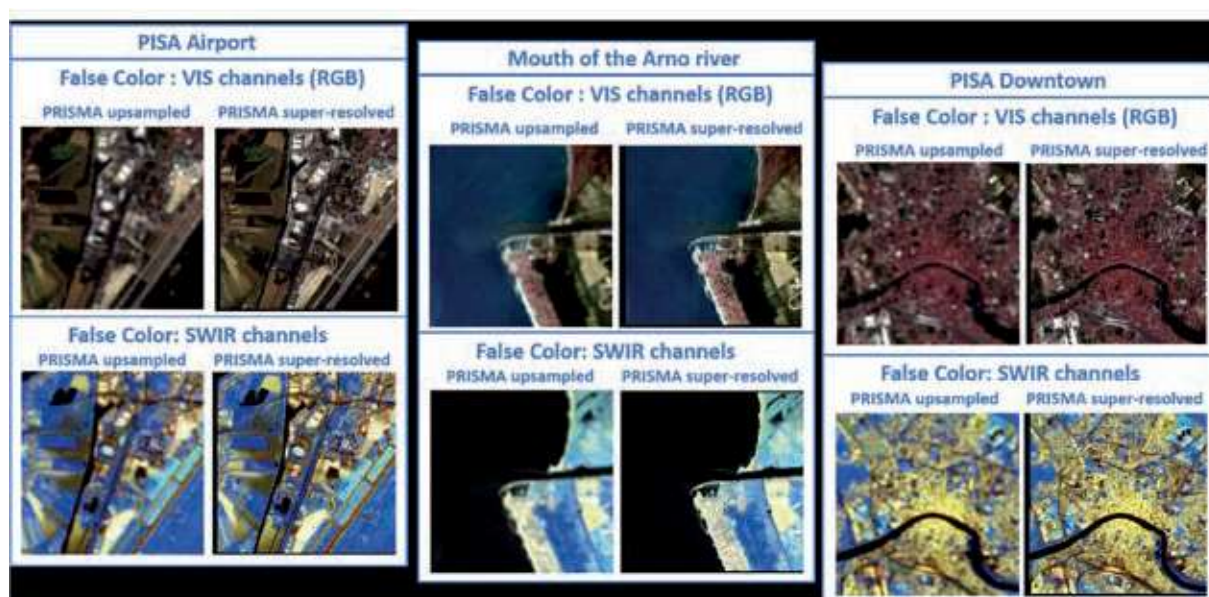


Figura 2 - Risultati dell'algoritmo PRISMA-SR ottenuti su tre scenari corrispondenti all'aeroporto di PISA, alla foce del fiume ARNO ed al centro città di PISA. Per ogni scenario si riportano le rappresentazioni a falsi colori nel visibile (RGB) e nello SWIR dell'immagine PRISMA originale (sinistra) e della corrispondente immagine prodotta da PRISMA-SR (destra).

includendo informazione spaziali più dettagliate e consentendo di esaminare le relazioni tra le cause individuabili dall'informazione spettrale e gli effetti sul territorio, infrastrutture, edifici associate all'informazione di maggiore dettaglio. Si elencano, a titolo esempio, alcune possibili applicazioni: analisi del danno subito dalla vegetazione in aree colpite da incendi, individuazione di abusi edilizi, individuazione di discariche abusive e classificazione delle tipologie di rifiuti, mappe di contaminazione del suolo, mappe di uso del suolo, rivelazione di scarichi abusivi di acque reflue. In particolare, le metodologie oggetto del progetto potrebbero essere integrate in sistemi *software* di gestione dei dati satellitari che incontrerebbero l'interesse di vari *stakeholder* pubblici e privati.

CONCLUSIONI

La procedura PRISMA-SR permette di migliorare la risoluzione spaziale delle immagini HS della missione PRISMA fondendo le stesse con immagini S2 acquisite sulla stessa scena. Lo studio effettuato ha previsto un'analisi su dati simulati che

ha dimostrato come utilizzando immagini S2 a 10 bande opportunamente elaborate al fine di uniformare la risoluzione spaziale a 10 m, si ottengano ottimi risultati in termini di immagine HS super-risolta. Negli esperimenti effettuati le prestazioni ottenute sfruttando la fusione delle immagini S2 a risoluzione diversa, sono state migliori di quelle ottenute adottando la sola immagine S2 nel VNIR (4 bande) con risoluzione nominale di 10 m.

La maggiore criticità riscontrata nel progetto è legata al fatto che la super-risoluzione è ottenuta combinando immagini provenienti da sensori a bordo di satelliti che non seguono esattamente la stessa orbita e non effettuano acquisizioni in contemporanea. Le immagini adottate nel processo di fusione potrebbero non rappresentare esattamente la stessa scena. Di conseguenza, in corrispondenza dei cambiamenti occorsi fra le due acquisizioni, PRISMA-SR produce sull'immagine super-risolta risultati non affidabili. In future missioni sarebbe opportuno montare sulla stessa piattaforma il sensore HS ed il sensore MS in modo da eliminare gli artefatti dovuti alle differenti condizioni di acquisizione.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

HS	<i>Iperspettrale</i>
MS	<i>Multispettrale</i>
S2	<i>Sentinel-2</i>
VNIR	<i>Visibile e Vicino InfraRosso</i>
SWIR	<i>InfraRosso ad Onde Medie</i>
HS-SAT	<i>Iperspettrale da satellite</i>
HS-SR	<i>Super-risoluzione iperspettrale</i>

PAROLE CHIAVE

Iperspettrale Satellitare, Super-risoluzione spaziale, fusione Multispettrale/Iperspettrale.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.043
Amministrazione appaltante:	Direzione Informatica, Telematica e Tecnologie Avanzate (TELEDIFE)
Ente responsabile del progetto:	Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni (CNIT)
Città, Regione:	Parma, Emilia-Romagna
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Nicola Acito
Recapiti del responsabile del progetto:	Via G. Caruso, 16, 56122 Pisa (PI) c/o Dipartimento di Ingegneria dell'informazione – Università di Pisa
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0502217603
E-mail del responsabile del progetto:	nicola.acito@unipi.it

BIBLIOGRAFIA

1. N. Acito, G. Corsini, M. Diani, “PRISMA spatial resolution enhancement by fusion with Sentinel-2 data,” IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, Vol. 15, pp. 62-79, Jan. 2022.
2. B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti, A. Garzelli, and M. Selva, “MTF tailored multiscale fusion of high-resolution MS and Pan imagery,” Photogramm.Eng.RemoteSens., Vol. 72, No. 5, pp. 591–596, May 2006.
3. N. Yokoya, C. Grohnfeldt, J. Chanussot, “Hyperspectral and Multispectral data fusion: a comparative review of recent literature”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, Vol. 5, No. 2, pp. 29-56, June 2017.
4. M. Selva, B. Aiazzi, F. Butera, L. Chiarantini, and S. Baronti, “Hyper sharpening: A first approach on SIM-GA data,” IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, Vol. 8, No. 6, pp. 3008–3024, Jun. 2015.

Il progetto PNRM ADAPTIVE, nella *roadmap* di R&T militare di Amministrazione Difesa, ha l'obiettivo di rispondere alle esigenze operative di flessibilità nella configurazione della missione satellitare TLC Difesa e protezione delle comunicazioni da segnali disturbatori, mediante lo studio di un sistema di antenna adattativa con avanzate funzionalità di *steering* e *shaping* del fascio e capacità di anti-interferenza, tramite un'implementazione tecnologica a larga-banda, compatta e ad alte prestazioni comparata alle esistenti soluzioni attuabili su ristretti *range* di frequenza con alti consumi. La metodologia adottata prevede le seguenti attività in 2 fasi (i) identificazione di un'architettura di riferimento per il sistema ADAPTIVE; (ii) progetto e sviluppo prototipo della componente SW di terra per la stima della prestazione attesa ed il calcolo e la gestione delle configurazioni della rete formatrice del fascio di antenna (BFN); (iii) specifica e realizzazione prototipo tecnologico HW di BFN basato su TTDL realizzate tramite *switch* MEMS (inclusa qualifica della tecnologia abilitante per impiego spaziale). *Trade-off* e dimostrazione in fase 1 hanno fornito promettenti risultati. Il progetto ADAPTIVE, una volta completato, fornirà un solido *know-how* tecnico ed elementi tecnologici *HW&SW* a supporto delle future missioni satellitari, quali SICRAL, contribuendo al rafforzamento del ruolo della Difesa Italiana nel settore MILSATCOM.

INTRODUZIONE

L'Infrastruttura per le comunicazioni satellitari della Difesa Italiana rappresenta una componente chiave per la Nazione Italia e per il suo riconosciuto ruolo nel contesto della Difesa Internazionale e degli Interventi in Coalizione. A partire dal 2001 la Difesa Italiana si è dotata di una flotta di *asset* satellitari operativi in differenti bande di frequenza, comprendenti attualmente SICRAL-1, SICRAL-1B, SICRAL 2 e ATHENA-FIDUS.

L'evoluzione tecnologica apportata a tali *asset* evidenzia un costante miglioramento delle prestazioni generali ed una crescente flessibilità operativa, in termini di capacità di riconfigurazione in volo della missione TLC. Tale evoluzione è dettata dalla necessità di soddisfare le molteplici variazioni di esigenze operative che insorgono durante la vita operativa del satellite, ad esempio l'insorgenza non predicibile di nuovi teatri opera-

tivi o la necessità di garantire il servizio anche in presenza di interferenti.

Al fine di soddisfare l'ancor maggiore rilevanza di tali aspetti nel futuro prossimo, il progetto ADAPTIVE ha l'obiettivo di studiare un sistema di antenna adattativa con funzionalità di *steering* e *shaping* del fascio e funzione di anti-interferente, caratterizzato da un'implementazione tecnologica a larga banda e altamente performante.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Al fine di soddisfare le necessità introdotte, gli *asset* SICRAL-1B, SICRAL-2 e ATHENA-FIDUS sono stati dotati di soluzioni tecnologiche che consentono il ripuntamento meccanico delle antenne in banda SHF e EHF e la sagomatura elettrica del fascio di copertura in banda SHF, per l'implementazione della funzionalità di protezione dagli interferenti (antenna *nulling*).

L'evoluzione tecnologica individuata per il soddisfacimento dell'ancor maggiore rilevanza che le suddette esigenze assumeranno nel futuro è l'avanzamento tecnologico della funzionalità di antenna adattativa in termini di (i) integrazione in un numero maggiore di bande; (ii) soluzione a larga banda istantanea; (iii) ridotto ingombro e consumo per l'imbarcabilità su piattaforme medio/piccole; (iv) limitata complessità in termini sia di progettazione che di integrazione a bordo satellite e (v) basse perdite di inserzione sul segnale utile. In maggior dettaglio, i principali obiettivi del progetto ADAPTIVE sono i seguenti:

- identificazione, mediante *trade-off* architetturali ed analisi prestazionali, di un'architettura di riferimento per il sistema ADAPTIVE;
- specifica, per l'architettura di riferimento identificata, della sezione di rete di formazione del fascio (*Beam Forming Network* - BFN), basata su tecnologia a linee di ritardo (*True Time Delay Line* - TTDL) con tecnologia di *switch* di tipo MEMS (Figura 2);
- progetto e realizzazione del SW di "*ADAPTIVE Antenna Diagram Computing and Management*" (A2-DCM) della componente di terra del sistema ADAPTIVE, comprensivo degli algoritmi per il calcolo della configurazione ottima della BFN e funzionale anche alla stima delle prestazioni delle varie soluzioni oggetto di valutazione (Figura 3);
- progetto e realizzazione di un prototipo tecnologico HW di BFN basato su linee di ritardo (*True Time Delay Line* - TTDL) realizzate tramite tecnologia abilitante di *switch* di tipo MEMS, specializzato per la banda X. Qualifica per impiego in ambiente spaziale della tecnologia MEMS alla base della soluzione innovativa.

METODOLOGIA

Il progetto ADAPTIVE è articolato in successive fasi contrattuali, come riportato in Tabella 1/Figura 1.

A tempo di scrittura del presente rapporto (Febbraio '24), si riporta il completamento del Lotto 1,

ed il successivo Lotto 2 da attivare, visto il buon esito delle attività precedenti.

Le attività del Lotto 1 hanno riguardato:

- definizione di requisiti utente e servizio per il sistema ADAPTIVE, per l'impiego di funzioni di *steering* e *shaping* del fascio di copertura e di *nulling* e del sistema *SW* di terra per il calcolo della configurazione della BFN e simulazione della prestazione attesa;
- identificazione di scenari operativi di riferimento nelle bande militari di interesse UHF/SHF/EHF.

Sulla base dei requisiti e scenari operativi definiti sono state effettuate attività di definizione preliminare del Sistema ADAPTIVE e *trade-off* architetture per la valutazione delle principali figure di merito di interesse per le opzioni tecnologiche identificate al fine di supportare l'identificazione dell'architettura di riferimento per il sistema ADAPTIVE.

L'attività di identificazione di un'architettura di riferimento è stata supportata, oltre che dai *trade-off* architetture, dai risultati dalle analisi prestazionali fondate su:

- Modelli numerici delle soluzioni di antenna a *trade-off*;
- Figure di merito di interesse delle differenti tecnologie di sezione BFN a *trade-off*;
- Scenari operativi identificati per le differenti bande militari;
- Componente algoritmica sviluppata per il calcolo della configurazione ottima della BFN.

Tali attività sono state supportate da un simulatore *SW* appositamente sviluppato, che, a seguito di ulteriori sviluppi nel proseguo dello studio, costituirà il *SW* A2-DCM, ovvero un *SW* di terra in grado di supportare attività di test o dimostrative degli algoritmi e costituire la base per lo sviluppo di sottosistemi di *Beam-forming* e *Nulling* specializzati per le future missioni Difesa.

In ultimo, è stato definito il prototipo HW della TTDL che sarà oggetto di progetto e realizzazione delle attività previste nel successivo Lotto 2.

PROJECT PHASE		STATE	PLANNED ACTIVITIES
LOT	SUB-LOT		
1	1.A	Completed	- User and service requirements generation - Preliminary definition of the ADAPTIVE subsystem - Definition of the requirements of the SW prototype “ADAPTIVE Antenna Diagram Computing and Management” - A2-DCM - Performance analysis - Architectural Trade-Off
	1.B	Completed	- Performance analysis - cont. - Architectural Trade-Offs - cont. - Identification of the reference architecture - Definition of HW ADAPTIVE prototype - Design, development and testing of the SW A2-DCM prototype - Performance demonstration campaign
2	2.1	To be activated	- Specification of the ADAPTIVE subsystem demonstrator - Test campaign definition - Design of the HW TTDL technological prototype - Definition of the technology qualification campaign
	2.2		- Design and development of the verification test-bed of the ADAPTIVE subsystem - Upgrading and testing of the SW A2-DCM - Integration of the demonstrator and execution of the test campaign - Development and test of HW TTDL prototype - Definition and execution of the technology qualification campaign - Specification of the overall ADAPTIVE subsystem

Tabella 1 - Dettaglio delle fasi contrattuali e delle attività pianificate per il progetto PNRM ADAPTIVE.

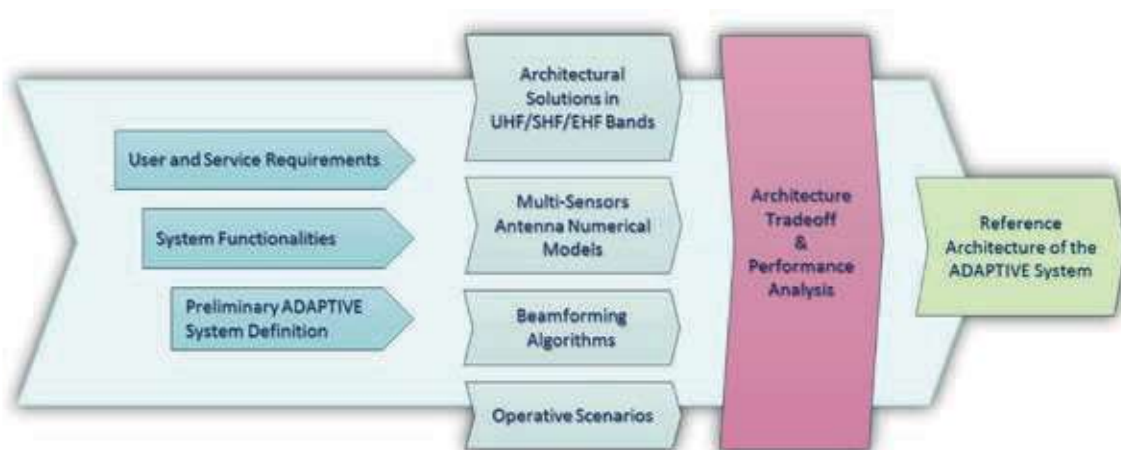


Figura 1 - Rappresentazione grafica del flusso delle attività propedeutiche all'identificazione dell'architettura di riferimento per il Sistema ADAPTIVE.

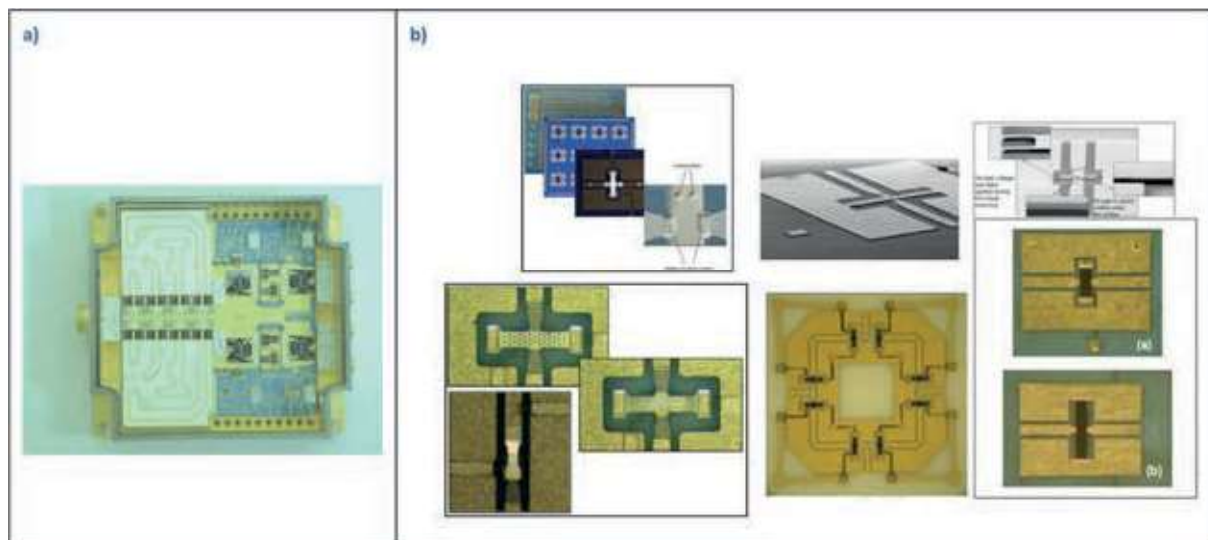


Figura 2 - Esempi di soluzioni tecnologiche per la componente di rete di alterazione del fascio (Beam Forming Network – BFN): (a) Linee di ritardo (True Time Delay Line - TTDL); (b) Dettaglio switch MEMS realizzati in TAS-I.

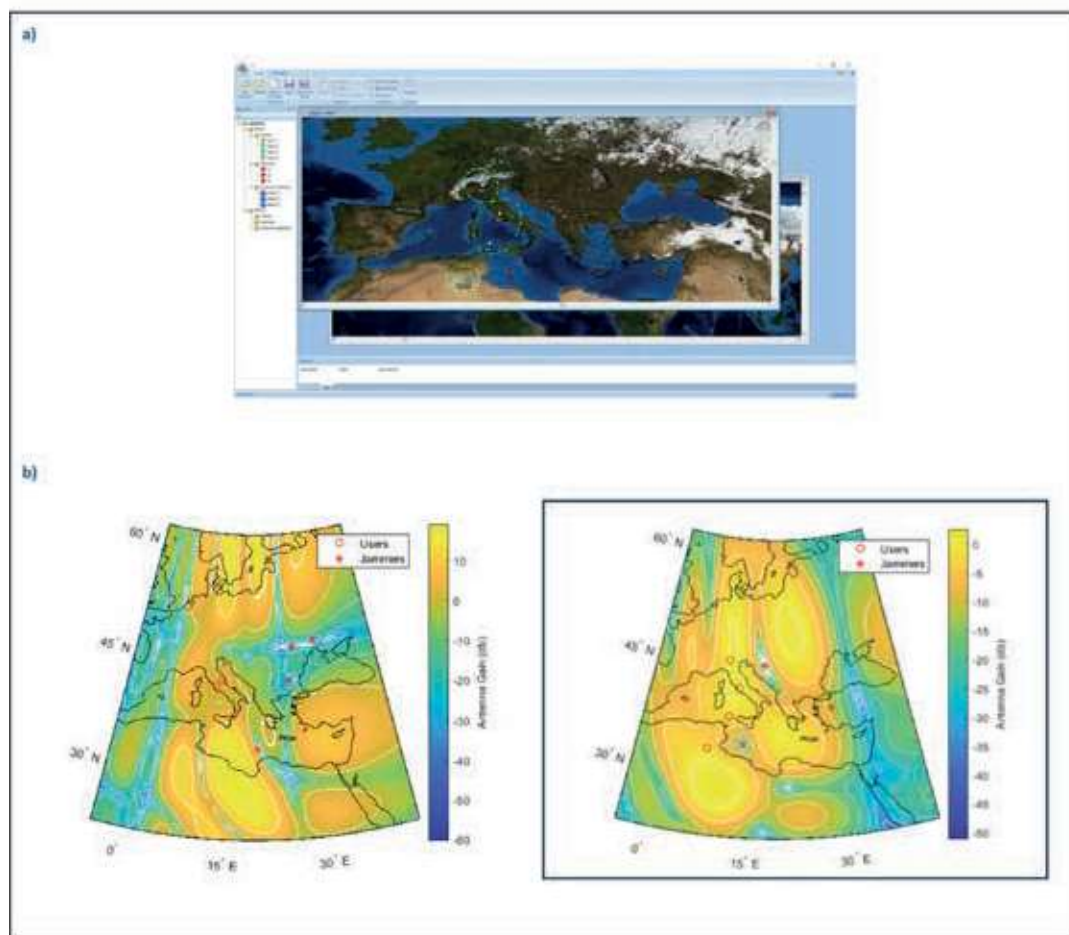


Figura 3 - Analisi prestazionali mediante simulazioni: (a) Vista principale del prototipo SW A2-DCM per il calcolo e la gestione della configurazione della BFN e per la stima della prestazione attesa; (b) Esempi di coperture ottimizzate sulla base di differenti vincoli.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

I principali contributi alla ricerca militare forniti dallo studio ADAPTIVE, considerando sia le attività del lotto 1 in corso che quelle del secondo Lotto, ancora da attivare, consistono principalmente nella realizzazione del prototipo HW della BFN basata su TTDL e tecnologia di *switch* MEMS, qualificata nell'ambito dello stesso progetto per l'impiego nello spazio, e nella realizzazione del software di terra A2-DCM dedicato al calcolo ed alla gestione del diagramma di antenna ed alla dimostrazione di stima della prestazione del sistema, specializzabile con gli algoritmi per le missioni Difesa.

Tali due componenti potranno rappresentare una solida base tecnologica di partenza per la realizzazione di un sistema di antenna adattativa di nuova generazione per le future missioni SICRAL.

Inoltre, la componente SW di terra di A2-DCM rappresenterà una tecnologia di terra utilizzabile in prospettiva nell'ambito del segmento di terra satellitare a supporto di funzioni di *Beam-forming* e *Nulling* di antenna, integrabile nell'attuale infrastruttura, e specializzabile per la soluzione tecnologica implementata a livello di segmento spaziale; questo grazie al *design* modulare della soluzione tecnologica ed alla modellizzazione numerica della soluzione di antenna.

CONCLUSIONI

Il progetto di Ricerca tecnologica ADAPTIVE, una volta completato, potrà rafforzare l'indipendenza dell'industria nazionale Italiana nel settore SATCOM militare, ciò in vista delle nuove missioni satellitari che Amministrazione Difesa intende avviare, nonché delle richieste NATO di capacità satellitare protetta e flessibile, come da *Capability Package* CP130.

L'acquisizione di una nuova tecnologia spaziale alla base della realizzazione delle TTDL, così come previsto nel Lotto 2, si prospetta vincente in termini di flessibilità, di prestazioni e di imbarcabilità su piattaforme medio-piccole per cui è richiesta la compatibilità con il lanciatore Italiano Vega, come già anticipato dai risultati delle attività completate nel primo Lotto contrattuale, che si soffermano principalmente sulla generazione dei requisiti utente e di servizio, sulla definizione preliminare del sottosistema ADAPTIVE e sulla realizzazione del SW prototipale di terra A2-DCM con la dimostrazione prestazionali mediante simulazioni. Tali contributi, in linea con la pianificazione delle attività, vanno a costituire una solida base per lo sviluppo delle successive attività pianificate per il Lotto 2 (ancora da attivare).

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

PNRM	<i>Piano Nazionale Ricerca Militare</i>
ADAPTIVE	<i>ADattività d'Antenna, su larga banda, per funzioni di beam steering e anti-interferente, con sviluppo di Prototipo e Validazione</i>
TLC	<i>Telecommunication</i>
BFN	<i>Beam Forming Network</i>
MEMS	<i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>
TTDL	<i>True Time Delay Line</i>
HW	<i>Hardware</i>
SW	<i>Software</i>
A2-DCM	<i>ADAPTIVE Antenna Diagram Computing and Management</i>
SATCOM	<i>Satellite Communication</i>

PAROLE CHIAVE

SICRAL, SATCOM, Beam-forming, BFN, Anti-interferente, Nulling, Anti-Jamming, MEMS, TTDL, Broadband.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2017.166
Amministrazione appaltante:	Direzione Informatica, Telematica e Tecnologie Avanzate (TELEDIFE), Segretariato Generale della Difesa e Direzione Nazionale degli Armamenti.
Ente responsabile del progetto:	THALES ALENIA SPACE ITALIA SpA
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Giuseppe Matarazzo
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Saccomuro, 24, 00131 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	06 41513139
E-mail del responsabile del progetto:	giuseppe.matarazzo@thalesalieniaspace.it

La diffusione delle infezioni trasmesse da vettore rappresenta una minaccia globale per la salute dell'umanità. Il personale militare, impiegato nelle missioni, è fortemente esposto a tale rischio. Il progetto si propone di dotare le forze armate di strumenti innovativi per la diagnosi rapida e per l'analisi biologica in sicurezza di agenti patogeni trasmessi da artropodi raccolti in diversi teatri operativi, nonché di realizzare un prototipo di insettario in strutture di biosicurezza di classe 3 per studi sperimentali.

INTRODUZIONE

Alla fine del secolo scorso era opinione diffusa nella comunità scientifica che la battaglia contro le malattie infettive stava volgendo al termine. Contrariamente a queste aspettative, fin dall'inizio del secolo il mondo sta vivendo una nuova fase senza precedenti di emergenza sanitaria dominata dalle zoonosi (1). Tra queste, le arbovirosi, ovvero infezione virali trasmesse da artropodi (*Vector Born Diseases*, VBD), giocano un ruolo primario (2).

Le VBD hanno da sempre rappresentato un problema per il personale militare. I Teatri Operativi in cui sono impiegate le forze armate si trovano distribuiti per lo più nelle zone tropicali dei continenti asiatici e africani dove, con cadenza ciclica, si alternano epidemie di agenti virali (3, 4). Eccezion fatta per pochi agenti, non esistono vaccini o terapie specifiche contro tali infezioni. Il modo più efficiente per mettere in sicurezza il personale militare è l'analisi del rischio nelle zone di interesse ed al contempo l'attuazione di tutte le misure di prevenzione, contenimento e bonifica atte ad abbattere o quantomeno ridurre il rischio di infezioni (5). L'analisi del rischio è intimamente legata alla sorveglianza attiva degli agenti infettivi, dei rispettivi vettori e dalla competenza di quest'ultimi nel veicolare l'infezione.

Il progetto C3Lab ha l'obiettivo di dotare le forze armate di strumenti idonei per la raccolta e identificazione in sicurezza dei VBD nei teatri operativi e contestualmente fornire metodiche per la rilevazione specifica, sensibile e rapida degli agenti patogeni presenti nei vettori.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Per la sorveglianza attiva è necessario catturare i vettori presenti nel sito di interesse, classificarli, conoscere le competenze vettoriali (agenti potenzialmente "trasportabili") e stimare la densità nell'area di studio. La cattura dei vettori viene generalmente eseguita con l'ausilio di trappole commerciali e la successiva classificazione è appannaggio di esperti entomologi. La cattura con i strumenti in commercio non contempla il mantenimento in vita degli esemplari catturati (zanzare e flebotomi e zecche) non permettendo di eseguire studi di competenza/xenodiagnosi, necessari per avere un quadro completo della potenziale pericolosità del vettore.

Per la classificazione dei vettori sono state proposte due soluzioni, la prima attraverso l'identificazione morfologica del vettore basate su una serie di schede iconografiche semplificate fruibili anche da personale non specializzato; la seconda mediante lo sviluppo di un protocollo di classificazione dei vettori tramite analisi di immagini con algoritmi di intelligenza artificiale.

Per lo studio della competenza si è scelto di modificare le trappole commerciali con lo scopo di mantenere in vita gli esemplari raccolti per poterli successivamente studiare in strutture di biosicurezza di classe 3 (BSL3).

Per la rilevazione degli agenti patogeni presenti nei vettori esistono diverse procedure, dai classici metodi colturali fino all'utilizzo dei metodi di sequenziamento di nuova generazione (NGS). Queste metodiche purtroppo non trovano un facile im-

piego nei teatri operativi poiché richiedono tempi lunghi e dei veri laboratori, oltre ad un personale altamente qualificato (6).

La tecnologia dell'amplificazione degli acidi nucleici (NAATs) è quella che meglio soddisfa i requisiti per un'analisi *"in situ"*. La metodica è stata estensivamente validata e con lo sviluppo della *Real-Time PCR* (7) i tempi di risposta dell'analisi si sono ridotti a poco più di un'ora. Lo strumento è di ridotte dimensioni ed i reattivi necessari per l'analisi possono essere liofilizzati, eliminando quindi la logistica per mantenere la "catena del freddo".

METODOLOGIA

Per la classificazione del vettore sono state realizzate schede iconografiche per l'identificazione rapida dei principali generi di zanzare presenti sul pianeta. Le schede si concentrano sui caratteri diagnostici più evidenti e identificabili ed includono delle mappe con la distribuzione schematica dei vettori a livello globale. Ad integrazione, è stata realizzata una seconda sezione (figura 1A, 1B) co-

struita come una chiave dicotomica tradizionale, ma con riferimento iconografico diretto immediatamente confrontabile con la definizione riportata. Ciò permette un riconoscimento immediato con un eventuale approfondimento dei caratteri morfologici generici selezionati.

Contestualmente, numerosi pannelli di immagine di questi vettori sono state acquisite digitalmente ed elaborate tramite algoritmi di intelligenza artificiale. L'analisi è basata sul *software* Yolov5 (<https://docs.ultralytics.com/it/yolov5/>). Il programma necessita di requisiti *hardware* minimi, ed è stato testato su un *laptop* con 8 Mb RAM, CPU Intel, i5 64 bit, *hard disk* SSD da 250 Mb.

Al momento l'algoritmo risulta particolarmente efficiente nella classificazione di genere delle zanzare. Una minore efficienza si è osservata nella identificazione dei flebotomi (figura 2A, 2B). Il processo di *"learning"* del *software* è in continua evoluzione mediante la acquisizione continua di immagini.

Per gli studi di competenza/xenodiagnosi è stata modificata la trappola commerciale BG-Pro

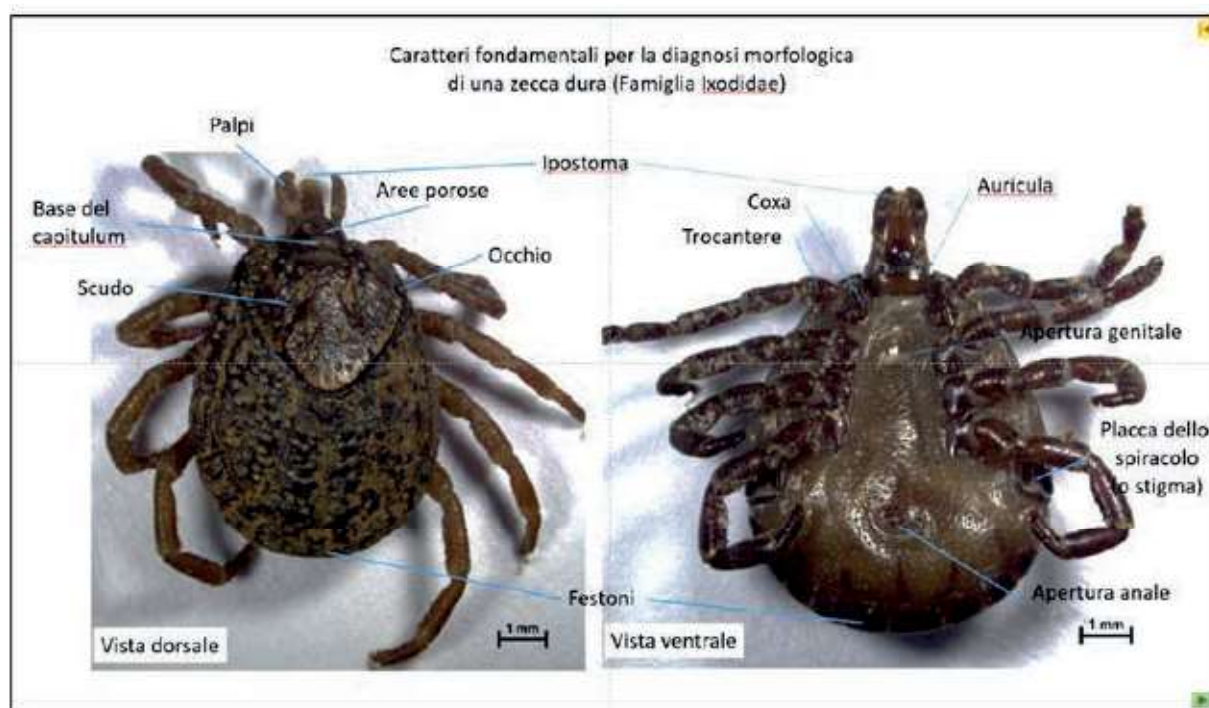


Figura 1A - Nel pannello è mostrato un esempio di scheda per l'identificazione delle zecche attraverso i caratteri morfologici fondamentali.

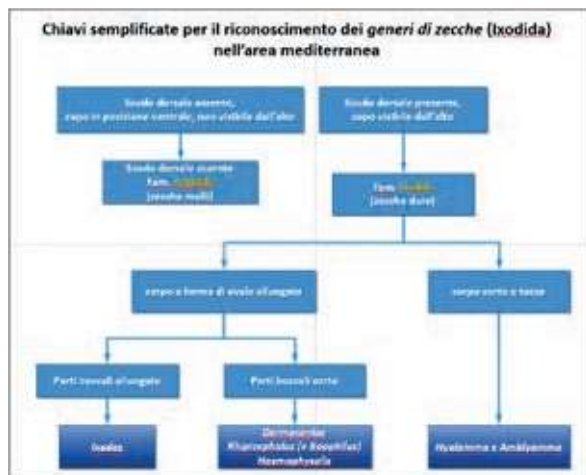


Figura 1B - Nel pannello viene mostrato un esempio di chiavi semplificate dicotomiche per il riconoscimento dei generi di zecca Ixodida.



Figura 2A - L'algoritmo di intelligenza artificiale dopo il processo di "e-learning" analizza l'immagine acquisita e genera il risultato mostrando gli esemplari rilevati, evidenziati e classificati.

```

Fusing layers...
E:\Python39\lib\site-packages\torch\functional.py:445: UserWarning: torch.meshgrid: in an upcoming release, it will be required to pass the indexing argument. (Triggered internally at ..\aten\src\ATen\native\TensorShape.cpp:2157.)
  return _VF.meshgrid(tensors, **kwargs) # type: ignore[attr-defined]
Model Summary: 232 layers, 7254689 parameters, 0 gradients
Image 1/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 03.jpg: 416x320 12 Aedes, 6 Flebotomos, Done. (0.066s)
Image 2/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 10.jpg: 416x320 4 Aedes, 6 Flebotomos, Done. (0.061s)
Image 3/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 104.jpg: 416x320 7 Anopheles, 6 Culex, Done. (0.054s)
Image 4/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 121.jpg: 416x320 9 Aedes, 4 Flebotomos, Done. (0.052s)
Image 5/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 127.jpg: 416x320 9 Anopheles, 3 Flebotomos, Done. (0.055s)
Image 6/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 132.jpg: 416x320 1 Anopheles, 6 Culex, 5 Flebotomos, Done. (0.051s)
Image 7/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 136.jpg: 416x320 4 Aedes, 2 Anopheles, 4 Flebotomos, Done. (0.054s)
Image 8/48 C:\Users\silvestrini_francesco\Desktop\yolov5\test\images\C3L - 141.jpg: 416x320 4 Anopheles, 4 Culex, 5 Flebotomos, Done. (0.053s)
  
```

Figura 2B - Esempio di output della shell dopo l'esecuzione del comando in cui sono riportati il numero di oggetti (in questo caso identificazione zanzare/flebotomi) identificati per immagine.

introducendo in corrispondenza della camera di raccolta un FTA card (<https://it.vwr.com/store/product/565085/fta-card-whatmantm>) impregnata di una soluzione a base di miele con idrogel al 2% in rapporto 3:2 per garantire la sopravvivenza delle zanzare. La FTA card permette inoltre di analizzare gli acidi nucleici dei patogeni presenti nella saliva rilasciati dal vettore durante i pasti. Nella figura 3A, 3B viene mostrata l'efficienza di raccolta e di sopravvivenza delle specie raccolte con trappola modificata BG-Pro comparata con la CDC trap, quest'ultima considerato lo standard di riferimento. Le trappole sono state testate sia in Italia che in Colombia. Degno di nota, studi di competenza su flebotomi raccolti in Toscana (*P. perfiliewi*) all'infezione con *Leishmania tropica*

(agente eziologico di leishmaniosi cutanea) hanno dato un tasso di positività del 23,4%. Questo risultato dimostra la competenza di *P. perfiliewi* verso *L. tropica* e quindi un potenziale rischio di introduzione di questo patogeno sul nostro territorio.

In ultimo, un pannello di protocolli per la rilevazione mediante PCR di agenti patogeni è stato sia allestito *ex-novo* che ottimizzato sulla base di metodi già presenti in letteratura. In alcuni casi sono stati sviluppati dei saggi multiplex, come nel caso degli agenti batterici *Borrelia* e *Rickettsia* o come per la rilevazione simultanea di *Leishmania* e *Phlebovirus* (Toscana virus) (figura 4).

Nei diversi pannelli della figura 5 sono indicati i protocolli molecolari allestiti e/o ottimizzati per l'identificazione di patogeni veicolati dai vettori studiati.

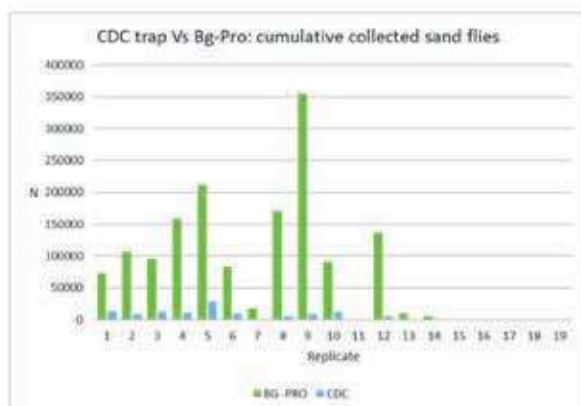


Figura 3A - Il Grafico a dispersione mostra sulla ascissa le repliche delle raccolte eseguite e sulle ordinate il quantitativo di flebotomi raccolti. In blu i risultati ottenuti con la CDC trap ed in verde i risultati ottenuti con la BG-pro modificata. Il test è stato eseguito nel comune di di Magliano (Toscana).

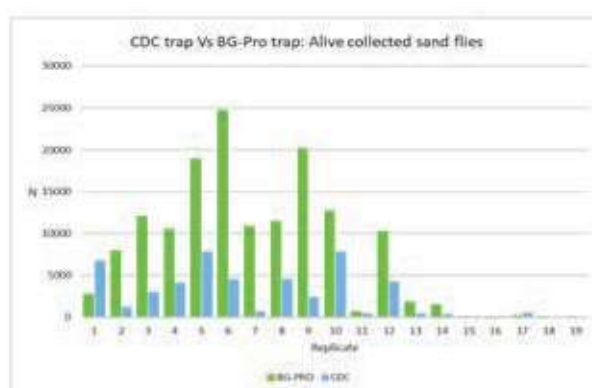


Figura 3B - Stime numeriche dei flebotomi catturati vivi con trappole BG-Pro (verde) e CDC trap (blu) nelle diverse repliche di campionamento.

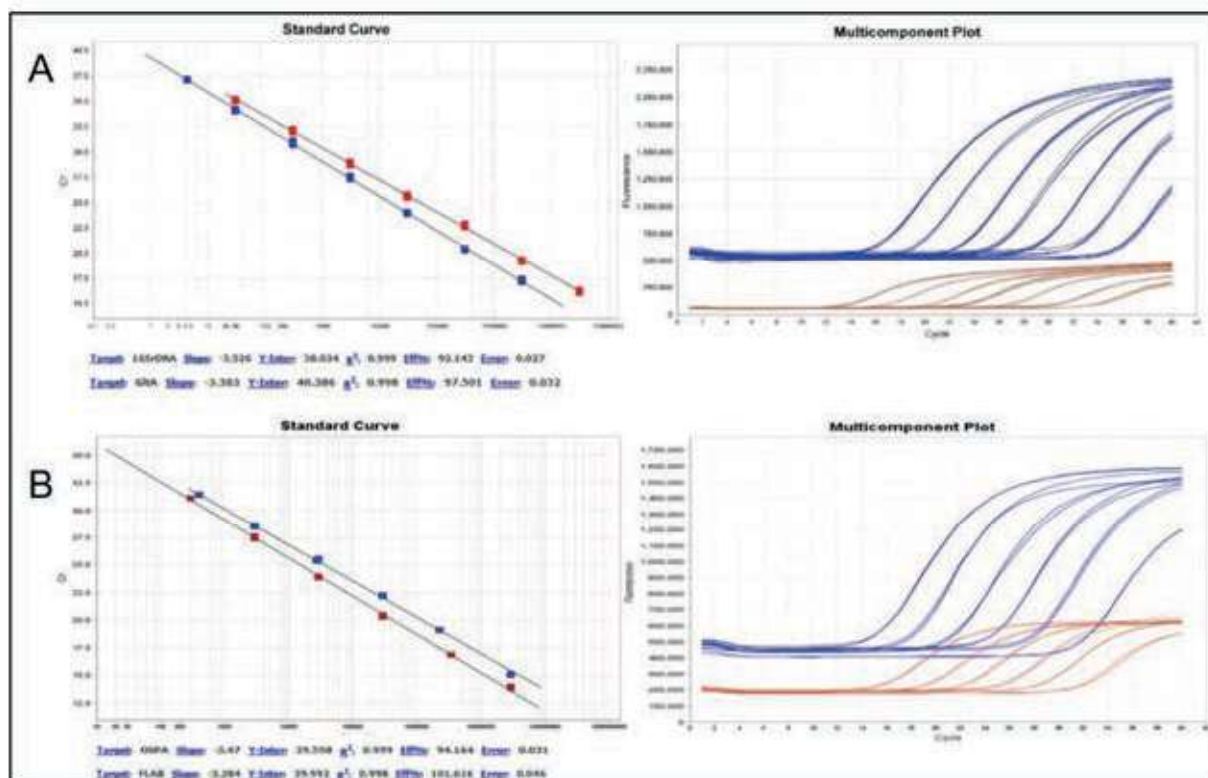


Figura 4 - In figura sono mostrate due Real-Time PCR eseguite entrambe in modalità duplex (geni 16Sr e OspA) per gli agenti *Rickettsia* spp e *Borrelia* spp. Nel pannello di sinistra sono riportate le curve standard degli stessi esperimenti ottenute con diluizioni seriali dei due campioni.

IDENTIFICAZIONE MOLECOLARE PATOGENI PATOGENI IN ZECCHE	
Patogeno	Modalità PCR
<i>Borrelia</i> spp	Monoplex/duplex
<i>Borrelia</i> si complex	Monoplex/duplex
<i>Borrelia</i> TBFR group	Monoplex/duplex
<i>Rickettsia</i> spp	Monoplex/duplex
<i>Rickettsia</i> felis	Monoplex/duplex

IDENTIFICAZIONE MOLECOLARE PATOGENI PATOGENI IN ZANZARE Aedes	
VIRUS	Modalità PCR
Pan-ahavirus	Monoplex per identificazione rapida
virus Mayaro (MAYV)	Nested e sequenza amplicone
virus Chikungunya (CHIKV)	
virus dell'encefalite equina occidentale (WEEV)	
virus dell'encefalite equina orientale (EEEV)	
Venezuelan equine encephalitis virus (VEEV)	
Sindbis virus (SINV)	
Bermah Forest virus (BFV)	
Ross River virus (RRV)	
Chyong-nyong virus (CHNV)	
virus Chikungunya (CHIKV)	
virus Zika (ZIKV)	Triplex
pan-virus Dengue (DENV)	
virus Dengue (DENV) Sierotipi 1,2,3,4	Quadruplex
virus West Nile (WNV)	
virus Usutu (USUV)	Multiplex, stessa piastra, strumento e profilo termico
virus dell'encefalite giapponese (JEV)	
Pan-virus dengue (DENV),	
virus Chikungunya (CHIKV),	
virus Zika (ZIKV)	
virus Dengue (DENV) Sierotipi 1, 2, 3, 4	
virus Febbre gialla (YFV)	
virus Rift Valley fever (RVFV)	
virus dell'encefalite equina occidentale (WEEV)	
virus dell'encefalite equina orientale (EEEV)	

IDENTIFICAZIONE MOLECOLARE PATOGENI PATOGENI IN ZANZARE Culex	
VIRUS	Modalità PCR
virus West Nile (WNV)	Multiplex stessa piastra e profilo termico
virus USUTU (USUV)	
virus encefalite giapponese (JEV)	
virus encefalite equina occidentale (WEEV)	Duplex (WEEV, EEEV, Mono VEEV, multiplex stessa piastra e profilo termico)
virus encefalite equina orientale (EEEV)	
virus encefalite equina Venezueliana (VEEV)	
virus della febbre gialla (YFV)	Mono

IDENTIFICAZIONE MOLECOLARE PATOGENI PATOGENI IN ZANZARE ANOPHELES	
PROTOZOI	Modalità PCR
<i>Plasmodium</i> spp	Monomultiplex
<i>P. falciparum</i>	
<i>P. vivax</i>	
<i>P. ovale</i>	
<i>P. malariae</i>	

IDENTIFICAZIONE MOLECOLARE PATOGENI PATOGENI IN FLEBOTOMI	
VIRUS	Modalità PCR
Pan-Phlebovirus	Mono, identificazione rapida
Phlebovirus RAD1	Mono e sequenziamento amplicone
Phlebovirus CORFU	
Phlebovirus ARBIA	
Phlebovirus SFS/ Sand fly Sicily	
Phlebovirus TOS V Toscana	
Phlebovirus SFNV Sand fly virus Naples	
Phlebovirus Punta	
Phlebovirus Ferra	
Phlebovirus TOS V Toscana	multiplex
PROTOZOI	
<i>Leishmania</i>	Mono

Figura 5 - La figura elenca tutti gli agenti patogeni rilevabili con la tecnologia NAATs allestiti ex-novo e/o ottimizzati nel progetto C3Lab suddivisi per competenza del vettore.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

I saggi diagnostici sviluppati potranno essere brevettati e resi disponibili per dotare le Forze Armate di strumenti innovativi per la diagnosi rapida e sensibile di agenti patogeni trasmessi da artropodi. È possibile anche che in un appropriato partenariato industriale, potranno essere incorporati in kit diagnostici commerciali specifici per le infezioni vettoriali di cui l'attuale contesto epidemiologico fa prevedere un utilizzo ampio e prolungato sia nel contesto nazionale che estero.

CONCLUSIONI

Le VBD costituiscono un importante rischio per la salute delle forze armate impiegate nelle zone tropico-equatoriali dei continenti asiatici e africani. Va inoltre enfatizzato che, come indicato dall'OMS (*Organizzazione Mondiale della Sanità*) nel documento "Global Vector Control Response 2017-2030", i cambiamenti climatici, la tropicalizzazione e desertificazione di aree con il conseguente stabile insediamento di nuovi vettori, rappresentano un rischio globale per la salute umana (8). Lo stesso continente europeo nell'ultimo

decennio ha visto un crescente aumento di focolai infettivi da virus dengue e *west nile* (9). In Italia il virus *west nile* è ormai endemico, il virus *chikungunya* ha già causato tre modesti eventi epidemici nel 20007, 2012 e 2015 (10) mentre nel 2023 sono stati registrati 81 casi di dengue (11-13).

L'obiettivo del progetto C3Lab è stato quello di equipaggiare le nostre forze armate con degli strumenti che permettano una rapida e sensibile diagnosi delle VBD e di studiare in sicurezza i vettori presenti nei teatri operativi. I protocolli e strumenti testati in queste fasi permettono di eseguire le analisi nel sito di interesse e di avere in tempo reale la situazione epidemiologica nel luogo di impiego. Poter eseguire una sor-

veglianza in tempo reale nella zona di interesse è di basilare importanza poiché, fluttuazioni ambientali di temperatura ed umidità possono determinare un drastico cambiamento del quadro epidemiologico in un lasso di tempo relativamente breve, specialmente nella diffusione dei vettori. Il progetto, ancora in corso, prevede nell'ultima fase l'acquisizione di un prototipo di laboratorio/insettario BSL3 campalizzabile. Ciò permetterà di lavorare *in loco* in sicurezza e di condurre esperimenti di competenza e xenodiagnosi. L'esperienza acquisita durante tutto il progetto potrà infine essere utilizzata anche sul territorio nazionale e messa a disposizione del sistema sanitario nazionale.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

BSL3	<i>BioSafety Level 3</i>
NAATs	<i>Nucleic Acid Amplification Test</i>
NGS	<i>Next Generation Sequencing</i>
OMS	<i>Organizzazione Mondiale della Sanità</i>
PCR	<i>Polymerase Chain Reaction</i>
VBD	<i>Vector Born Diseases</i>

PAROLE CHIAVE

Infezioni trasmesse da vettore, insettario BSL3, controllo dei vettori, diagnostica di campo, *Vector Born Diseases*, xenodiagnosi.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.057
Amministrazione appaltante:	Direzione Generale di Commissariato e di Servizi Generali (COMMISERVIZI)
Ente responsabile del progetto:	Istituto Superiore di Sanità
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dott. Pietro Alano
Recapiti del responsabile del progetto:	Viale Regina Elena, 299-00161 Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	0649902663
E-mail del responsabile del progetto:	pietro.alano@iss.it

REFERENZE

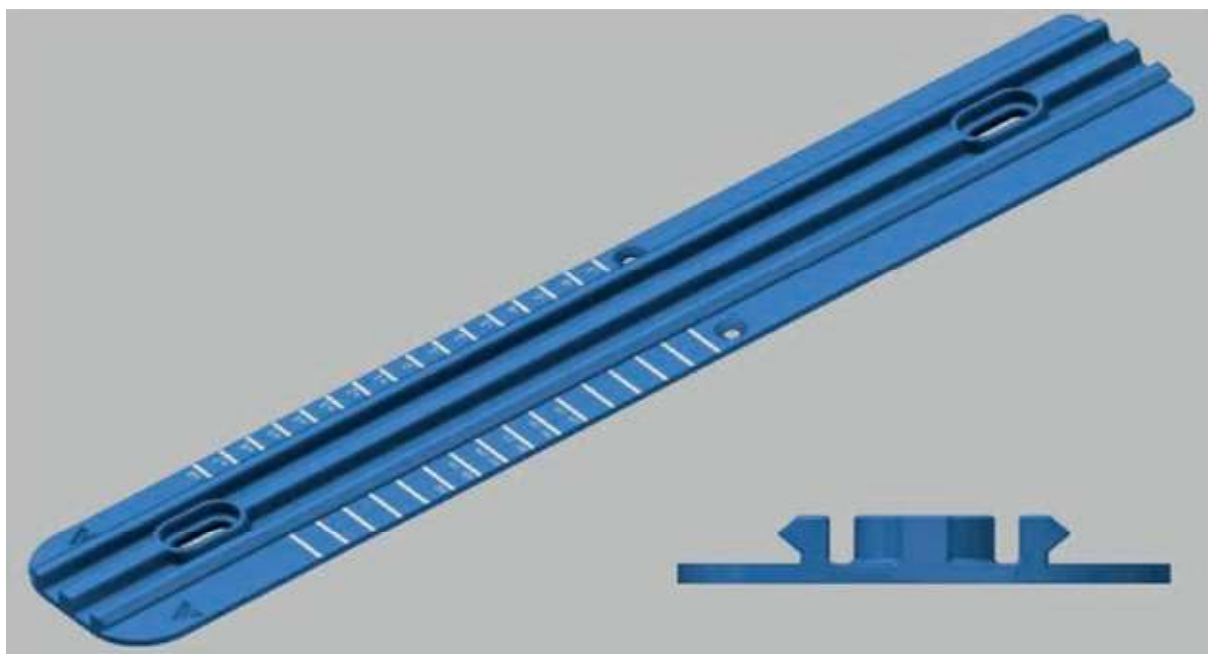
- 1) Hallaj Z. Global trends in emerging zoonoses. *Int J Antimicrob Agents*. 2010 Nov;36 Suppl 1:S1-2. doi: 10.1016/j.ijantimicag.2010.06.010.
- 2) Wilder-Smith A, Gubler DJ, Weaver SC, Monath TP, Heymann DL, Scott TW. Epidemic arboviral diseases: priorities for research and public health. *Lancet Infect Dis*. 2017 Mar;17(3):e101-e106. doi: 10.1016/S1473-3099(16)30518-7.
- 3) Weetman D, Kamgang B, Badolo A, Moyes CL, Shearer FM, Coulibaly M, Pinto J, Lambrechts L, McCall PJ. Aedes Mosquitoes and Aedes-Borne Arboviruses in Africa: Current and Future Threats. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 Jan 28;15(2):220. doi: 10.3390/ijerph15020220.
- 4) Dash AP, Bhatia R, Sunyoto T, Mourya DT. Emerging and re-emerging arboviral diseases in Southeast Asia. *J Vector Borne Dis*. 2013 Apr-Jun;50(2):77-84.
- 5) Girard M, Nelson CB, Picot V, Gubler DJ. Arboviruses: A global public health threat. *Vaccine*. 2020 May 19;38(24):3989-3994. doi: 10.1016/j.vaccine.2020.04.011.
- 6) Vasiljevic N, Lim M, Humble E, Seah A, Kratzer A, Morf NV, Prost S, Ogden R. Developmental validation of Oxford Nanopore Technology MinION sequence data and the NGSpeciesID bioinformatic pipeline for forensic genetic species identification. *Forensic Sci Int Genet*. 2021 Jul;53:102493. doi: 10.1016/j.fsigen.2021.102493.
- 7) Martin J. Updating PCR. *Biotechniques*. 2019 Jul;67(1):3-5. doi: 10.2144/btn-2019-0076.
- 8) World Health Organization: Global Vector Control Response 2017-2030. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241512978>
- 9) Papa A. Emerging arboviral human diseases in Southern Europe. *J Med Virol*. 2017 Aug;89(8):1315-1322. doi: 10.1002/jmv.24803. Epub 2017 Mar 22. PMID: 28252204.
- 10) Rossi B, Barreca F, Benvenuto D, Braccialarghe N, Campogiani L, Lodi A, Aguglia C, Cavasio RA, Giacalone ML, Kontogiannis D, Moccione M, Malagnino V, Andreoni M, Sarmati L, Iannetta M. Human Arboviral Infections in Italy: Past, Current, and Future Challenges. *Viruses*. 2023 Jan 27;15(2):368. doi: 10.3390/v15020368. PMID: 36851582; PMCID: PMC9963149.
- 11) Regione Lombardia. Virus Dengue, identificato in provincia di Lodi primo caso lombardo [in Italian: Dengue virus, first Lombard case identified in the province of Lodi]. 2023. Available at: [https://www.lombardianotizie.online/virus-dengue-lodi/\(link is external\)](https://www.lombardianotizie.online/virus-dengue-lodi/(link%20is%20external))
- 12) Regione Lombardia. Dengue virus, in Castiglione d'Adda (Lodi) identified 2 more cases [In Italian: Dengue virus, in Castiglione d'Adda (Lodi) identified 2 more cases], 24 August. 2023. Available at: <https://www.lombardianotizie.online/virus-dengue/>
- 13) Istituto Superiore di Sanità (ISS). Febbre dengue: Ultimi aggiornamenti. Rome: ISS; 2023. Available at: <https://www.epicentro.iss.it/febbre-dengue/aggiornamenti>

SCIARE CON DISABILITÀ

Il progetto “Sciare con disabilità” ha l’obiettivo di avvicinare agli sport invernali Veterani delle Forze Armate che hanno avuto dei gravi infortuni. Lo scopo è quello di creare materiali adatti a facilitare la pratica sciistica e ad aumentare l’autonomia.

Il progetto mira a rendere la pratica dello sci più semplice e sicura per gli sciatori amputati e ipovedenti. Ci si è concentrati su 3 aspetti: sulla geometria dello sci, su uno specifico sistema piastra/attacco e su un sistema di sensori. Lo sci sarà progettato per gli sciatori in piedi e si realizzerà un paio di sci specifico anche per gli atleti che si avvalgono di una protesi per sciare con due arti. I sensori inviano dati al supervisore che potrà interagire in tempo reale con lo sciatore.

Lo sci sarà costruito in modo che risulti asimmetrico nelle tre direzioni mentre dei sensori di analisi inviano dati relativi all’inclinazione del terreno, alla temperatura, all’assenza di motion e alle accelerazioni fornite (integrando dati provenienti dal GPS dello smartphone) con l’invio di specifici messaggi di emergenza in base a potenziali collisioni, impatti o condizioni ambientali troppo estreme. Il supervisore potrà ricevere i dati di posizione ed eventuali emergenze mediante il software di supervisione.



INTRODUZIONE

Il progetto PNRM 2020 – Proposta n. a2019.202 dal titolo “S.C.D. - Sciare con Disabilità”, ha come obiettivo quello di facilitare

la pratica sciistica per personale con disabilità aumentandone la sicurezza e l’autonomia realizzando sci e attrezzatura specifica per sciatori diversamente abili.

Il progetto includerà buona parte delle forme di disabilità:

- sciatori non vedenti (visually impaired);
- sciatori in piedi senza un arto (standing);
- sciatori seduti (sitting).

Consentire al personale veterano delle FFAA e al personale civile con disabilità, di approcciarsi allo sci in maniera più semplice, più sicura e maggior autonomia attraverso la realizzazione di un pacchetto composto da sci, attacchi e sensoristica dedicata che si adattino interamente allo sciatore diversamente abile.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Attualmente non esistono sci progettati specificamente per personale disabile. Chi si avvicina allo sci utilizza attrezzature progettate per normodotati, che non tengono conto delle specifiche limitazioni. Si è partiti da un'analisi delle limitazioni per sviluppare dei materiali specificatamente pensati per personale disabile e apparati tecnologici che ne aumentino l'autonomia e l'efficienza. Si è deciso di lavorare in due direzioni parallelamente; la prima sulla ricerca di materiale sciistico studiato appositamente per personale amputato per facilitare la sciata, la seconda sullo sviluppo di un sistema di sensori per guidare personale ipovedente.

Il pool di aziende che stanno lavorando sono:

RTI costituita da:

- Impresa GROOVE DI PETER HUTA (capogruppo) – C.F. HTUPTR66E16Z156H
via Castel Beseno n. 20/2 CALLIANO (TN)
- Società MECHLAB S.R.L. - C.F. 02050510995
Traversa della Ripolta n. 72-76 PRATO (PO);
- Società SESTO SENSO S.R.L. - C.F. 04179160264
via Terraglio n. 271/B PREGANZIOL (TV).

METODOLOGIA

Il percorso è stato suddiviso in tappe con obiettivi da raggiungere prima della prosecuzione nella tappa successiva.

Si sono create dei modelli e dei prototipi che ven-

gono testati e migliorati. Ad oggi siamo alla fine del secondo step.

RISULTATI CONSEGUITI AL TERMINE DELLA FASE CONCLUSA

Al termine della Fase 2 conclusa, sono stati realizzati dei dimostratori tecnologici relativi a:

- realizzazione di uno sci asimmetrico dedicato agli sciatori standing con angoli convergenti differenti in base all'amputazione dell'arto subito
- sci, con architettura elastomerica specifica, adatta ad attenuare le frequenze vibratorie che si creano con il contatto tra la struttura e il manto nevoso.
- Notevole miglioramento della piastra per l'aggancio dell'attacco, definito isostatico, vincolato posteriormente ma libero di spostarsi assialmente allo sci nella parte anteriore, in modo da migliorare la deformazione della tavola e conferire maggiore stabilità e sensibilità dell'attrezzo allo sciatore. Tale soluzione consente una riduzione delle sollecitazioni con conseguente eliminazione degli sganci improvvisi ad essa legata.
- Sono stati realizzati i dimostratori tecnologici per la sensoristica, hardware e software, per consentire al non vedente di recepire informazioni relative al proprio posizionamento nella pista. In particolare a seconda della distanza laterale dai vari sensori di misurazione, collocati lungo la pista, lo sciatore riceve dei feedback somatosensoriali (vibrazioni) tramite due bracciali, che indicano allo sciatore la direzione da tenere. Ulteriori sensori di analisi, inviano e registrano i dati relativi all'inclinazione del terreno, alla temperatura e alle accelerazioni relative allo sciatore con l'invio di specifici messaggi di emergenza in base a potenziali collisioni, impatti o condizioni ambientali troppo estreme. Il supervisore riceve i dati di posizione e di eventuali emergenze, mediante il software di supervisore. Inoltre sono state realizzate delle scatole di contenimento ergonomiche delle sensoristiche hardware e dei relativi firmware. I sensori sono stati progettati in maniera completa e la prototipazione della scheda PCBA è stata effettuata.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La tecnologia potrebbe successivamente aprire la possibilità di fare sport a molte persone che ad oggi non hanno la possibilità. Una tecnologia di questi tipo prodotta su larga scala abbatterebbe notevolmente i costi della pratica dello sci per persone disabili. Le innovazioni derivate possono altresì trovare applicazioni in ambito militare nell'attività sciistica operativa, viste le limitazioni derivate dagli alti carichi con cui il personale opera. Questa tecnologia potrebbe trovare applicazione nella fase di riabilitazione ed educazione al movimento del personale colpito da menomazio-

ne. Questa tecnologia potrebbe essere esportata anche ad altri campi ad oggi non noti.

CONCLUSIONI

La Fase 2 del Progetto “Sciare con Disabilità” si è conclusa con la realizzazione di un dimostratore tecnologico relativamente a sci asimmetrici e piastra rinnovata sensoristica dedicata, raggiungendo pienamente gli obiettivi prefissati.

Sulla base degli ottimi risultati conseguiti, si ritiene di forte interesse proseguire con la Fase 3 del progetto in argomento rispetto al quale si riversano considerevoli aspettative per il miglioramento della qualità di vita dei Veterani della Difesa.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

PNMR	<i>Piano Nazionale Ricerca Militare</i>
RTI	<i>Rete Tecnica Industriale</i>
SCD	<i>Sciare Con Disabilità</i>
CF	<i>Codice Fiscale</i>
SRL	<i>Società con Responsabilità Limitata</i>
PCBA	<i>Printed Circuit Board Assembly</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
FFAA	<i>Forze Armate</i>

PAROLE CHIAVE

Disabilità, Sci, Piastra, Sensori, Sicurezza, Autonomia, Sport, Veterano, Tecnologia, Innovazione.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	2019.202
Amministrazione appaltante:	Direzione Generale di Commissariato e di Servizi Generali
Ente responsabile del progetto:	Grooves Ski di Peter Huta
Città, Regione:	Trentino Alto Adige
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Sig. Peter Huta
Recapiti del responsabile del progetto:	via Castel Beseno 20/2 Calliano (TN)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3355347858
E-mail del responsabile del progetto:	info@grooves-ski.com





LA RICERCA IN AMBITO INTERNAZIONALE



INTRODUZIONE

Nell'alveo della cooperazione internazionale, sia in ambito europeo (prevalentemente in coordinamento con l'Agenzia Europea per la Difesa, *European Defence Agency* - EDA) che NATO ed extra-europeo, anche attraverso accordi bi-/multilaterali laterali, l'Italia sostiene

e ha in essere, da anni, una rilevante e proficua attività collaborativa di ricerca tecnologica (R/T).

Tra i progetti di ricerca che possono ritenersi esemplificativi di tale attività di cooperazione internazionale R/T si evidenziano, in particolare:

- il progetto (ambito cooperazione Italia - Israele) “*Real-Time Structural Health and Usage Monitoring Systems for Unmanned Aerial Systems*” (**RESUME**);
- il progetto (contesto/egida EDA) “*Computational Modelling for long-term inter-sectoral advanced knowledge on Non Newtonian Fluid*” (**COMMON-LINK**).

Il progetto RESUME (*Real-Time Structural Health and Usage Monitoring Systems for Unmanned Aerial Systems*) è una cooperazione italo-israeliana finanziata dai Ministeri della Difesa e parte di un programma finalizzato all'incremento delle attività di ricerca congiunta nel settore delle strutture aeronautiche.

RESUME sviluppa un sistema per il monitoraggio continuo (*real-time*) dello stato di integrità strutturale di un velivolo senza pilota a bordo (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*). La relativa architettura è basata su una rete di sensori concentrati (FBG, *Fibre Bragg Gratings*) per acquisire le deformazioni strutturali locali. Tali dati vengono inviati ad un algoritmo originale di elaborazione che identifica l'eventuale presenza di un danneggiamento. L'informazione viene quindi trasferita ad un software di interfaccia con l'operatore, cui è rimandata qualsiasi decisione operativa sul prosieguo della missione. Il flusso di informazioni è continuo.

In RESUME si è fatto riferimento a diversi elementi strutturali reali, di diversa scala. La disponibilità dei relativi modelli numerici e dei risultati delle sperimentazioni in laboratorio ed in galleria del vento, hanno permesso di collezionare una mole significativa di dati per l'ulteriore sviluppo della tecnologia. Il suo livello attuale, valutato secondo la scala del TRL (*Technology Readiness Level*), si colloca tra 4 e 5, con elementi significativi del 6.

INTRODUZIONE

L'aumento dell'uso di UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*, velivoli senza pilota a bordo), è una tendenza consolidata nei settori civile e militare che ha portato a nuovi regolamenti per garantire la sicurezza delle aree abitate. Lo STANAG 4671 regola le operazioni in aree aperte (non segregate) di UAV militari con peso massimo fino a 20 tonnellate.

Coerentemente con questa visione, il monitoraggio continuo dello stato di salute strutturale (SHM, *Structural Health Monitoring*) mira a conoscere istantaneamente (*real-time*) il livello di integrità del velivolo, aumentando l'affidabilità delle operazioni. Esso modifica anche la filosofia della manutenzione, spostandone il focus sulla necessità (*on demand*) rispetto alla pianificazione, riducendone i costi.

Il riconoscimento dell'SHM come tecnica affidabile di ispezione non distruttiva da parte degli

organismi certificanti è centrale per lo sviluppo dei nuovi scenari, ed è fondamentale per l'ulteriore espansione delle architetture in composito, irrinunciabili per ottenere abbattimenti significativi dei pesi/costi produttivi con benefici in termini di sicurezza.

Per queste ultime, le normative attuali richiedono misure estremamente onerose: ad esempio, si prescrive che la struttura in presenza di possibili danneggiamenti critici sia in grado di sopportare pienamente i carichi di progetto. Occorre così ispessire il materiale o utilizzare connessioni meccaniche ridondanti, riducendo drasticamente i benefici attesi.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

RESUME realizza un sistema SHM per rilevare tempestivamente danni strutturali, a garanzia della sicurezza operativa (*safety critical*) di UAV in spazi

aerei non segregati, nonché ridurre i costi operativi passando dalla manutenzione pianificata a quella *on-demand*. Le tecnologie chiave sono, Figura 1:

- **Fibre ottiche.** Filamenti flessibili vetrosi o plastici attraverso cui la luce transita con elevata larghezza di banda, per notevoli distanze e con attenuazioni limitate. Sono di piccola sezione, passive, tolleranti alle condizioni ambientali, poco sensibili ai disturbi elettromagnetici e facilmente integrabili nelle architetture di riferimento e nei compositi.
- **Fibre Bragg Gratings (FBG).** Parti sensibili della fibra ottica ottenute tramite incisione, assorbono specifici intervalli dello spettro della luce passante. Se aderenti alla struttura, l'assorbimento viene modulato con la deformazione, permettendone la misura dall'analisi del segnale luminoso.
- **Reti sensoriali FBG.** Sono serie di sensori (*array*) distribuiti sulle superfici da monitorare per ottenere informazioni dense su regioni critiche come l'ala, ad esempio per misurarne la deflessione o valutare gli effetti conseguenti l'impatto da uccelli (*bird impact*).

- **Algoritmi basati sulle deformazioni.** Elaborano l'elongazione di sensori contigui, identificando anomalie locali della rigidità legate al danno, anche senza modello strutturale di riferimento. Gli algoritmi proprietari alla base della tecnologia proposta sono stati sviluppati attraverso attività su serbatoi pressurizzati, elementi di fusoliera e segmenti alari.
- **Algoritmi Real-Time.** Permettono la gestione continua delle informazioni dai sensori ad uno o più algoritmi di elaborazione, e da questi all'interfaccia utente cui si demanda la decisione sull'intervento finale.
- **Modellistica FEM.** Strumento numerico di supporto alla comprensione dei processi fisici strutturali, altrimenti difficili da caratterizzare compiutamente in laboratorio. Consente una caratterizzazione degli effetti del danneggiamento, fornendo indicazioni importanti per la decodifica dei segnali acquisiti.

Per quanto a conoscenza del team di progetto, RESUME è il primo teso a dimostrare l'integrazione e l'automazione *real-time* della raccolta dati e della fase diagnostica.



Figura 1 - Architettura e logica del sistema SHM concepito all'interno del progetto RESUME. 1. Struttura di riferimento disponibile presso gli stabilimenti di Piaggio Aerospace e rappresentante una sezione in scala reale di un wing-box alare; 2. Una rappresentazione pittorica dei reticoli di Bragg e delle fibre ottiche; 3. Uno degli interrogatori usati nel progetto, Smart Scan II, capace di tradurre il segnale ottico in valore di deformazione; 4. Schema logico di comunicazione dei dati dall'interrogatore al PC; 5. SW di gestione ed organizzazione dei dati, capace di garantire un flusso continuo di dati ai 6. SW di elaborazione, in grado di identificare la presenza di un danneggiamento strutturale sulla base delle anomalie registrate; 7. Feedback del sistema all'operatore, gestito da un pacchetto dello stesso SW di gestione ed organizzazione dei dati, cui è demandata la decisione di intervento sul sistema aereo.

METODOLOGIA

L'algoritmo alla base della tecnologia sviluppata è basato sull'identificazione di anomalie del profilo di deformazione, Figura 2. L'analisi avviene attraverso un confronto delle variazioni registrate lungo la catena di misura (dominio spaziale), e nel tempo (dominio temporale). Le deformazioni sono ricavate da una catena di sensori FBG disposti sulla struttura di riferimento, come in Figura 3. I dati acquisiti vengono gestiti da un software che ha il doppio scopo di: organizzare i dati in pacchetti successivi senza soluzione di continuità e quindi trasmetterli ad un numero arbitrario di codici di elaborazione; trasferire il risultato di queste elaborazioni e mostrarle all'operatore del velivolo, Figura 4. La tecnologia viene dimostrata su tre componenti strutturali in scala reale di complessità crescente, rappresentativi di un velivolo di medie dimensioni; nel dettaglio: un longerone di un cassone alare in composito, un segmento di cassone alare del P180, ed una semiala completa

di un aereo senza pilota, Figura 5. Nei primi due casi, le prove sperimentali sono state condotte in laboratorio, rispettivamente presso gli stabilimenti del CIRA e di PAI, mentre la terza campagna sperimentale è stata condotta in una galleria del vento presso gli stabilimenti di IAI. Le analisi sono state sempre accompagnate da simulazioni numeriche (FEM) con il duplice scopo di testare il funzionamento ideale dell'algoritmo implementato, e quello di caratterizzare il campo di deformazione strutturale sotto carico. Nei tre casi considerati, il sistema SHM sviluppato ha permesso di identificare la posizione dei danni in maniera puntuale, Figura 6, Figura 7, Figura 8. Per ulteriormente verificare le capacità dell'algoritmo, è stata effettuata un'analisi preliminare sulla probabilità di rilievo del danneggiamento strutturale (POD, *Probability of Detection*), Figura 9. Infine, l'analisi sul livello tecnologico raggiunto (TRL), Figura 10, indica una collocazione del sistema proposto tra 4 e 5, avendo già conseguito elementi importanti del livello 6.

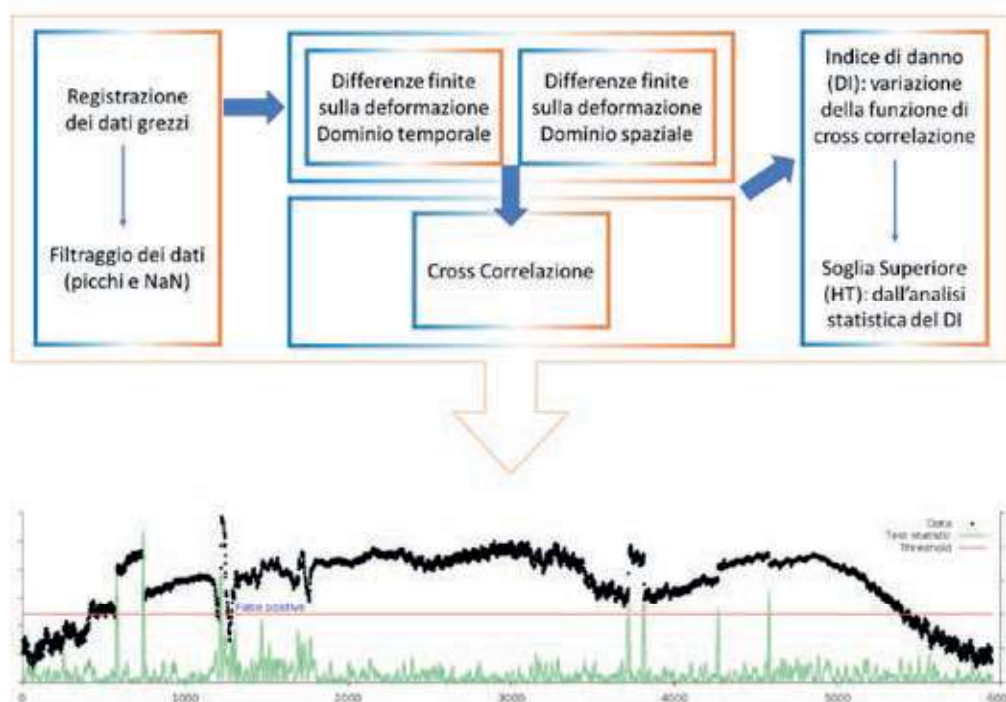


Figura 2 - Logica dell'algoritmo SHM utilizzato. In alto: Schematizzazione essenziale del processamento dei dati. In basso: Tipico diagramma della deformazione (linea nera) di un tipico elemento strutturale come rilevato da una distribuzione lineare densa di sensori; è evidente la presenza del danneggiamento (zone di variazione maggiormente intensa); risultato dell'elaborazione dei dati con indicazione congruente delle zone in cui è presente il danno (linea verde), e soglia oltre la quale il sistema riconosce effettivamente la presenza delle singolarità (linea rossa).

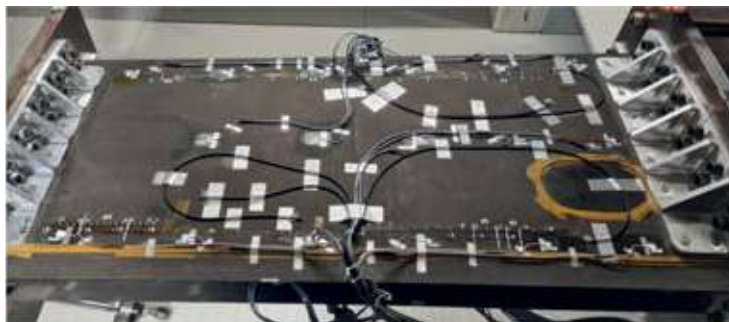


Figura 3 - Sezione di cassone alare strumentato con diverse serie di FBG distribuiti sulla sua superficie. Di fatto invisibili a meno di un'analisi approfondita, essi corrispondono ai marker bianchi distribuiti in maniera regolare sul pannello, tracciati per permettere agli operatori un più rapido riscontro. L'articolo di prova è stato installato nella camera climatica dei laboratori Piaggio.

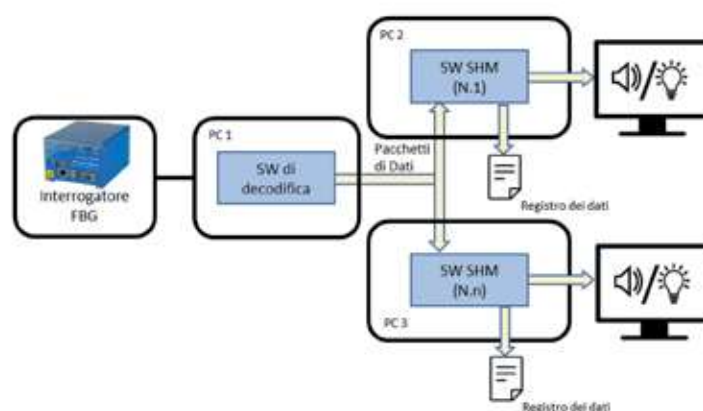


Figura 4 - Schema logico del flusso di dati provenienti dall'interrogatore (l'elemento strutturale sensorizzato è omissso da questo diagramma senza pregiudicare il significato). Trasferiti attraverso una connessione Ethernet, essi vengono organizzati in pacchetti di lunghezza prestabilita con continuità ed inviati ad uno o più software di SHM, all'interno dello stesso o di altri computer. I risultati delle elaborazioni vengono poi salvati in un registro tramite apposita routine dello stesso codice di gestione real-time, sia come evidenza numerica, sia inviati all'operatore in forma di allarme sonoro o visivo ove si riconosca la presenza di un danno strutturale.

Articolo di Prova	Costruttore	Modello FEM Originale	Modello FEM Adattato	Prove Sperimentali @
Longherone in Composito	IAI	IAI	CIRA	CIRA
Segmento di Cassone Alare	IAI	Piaggio	CIRA	Piaggio
Ala di un UAV	IAI	IAI	CIRA	IAI

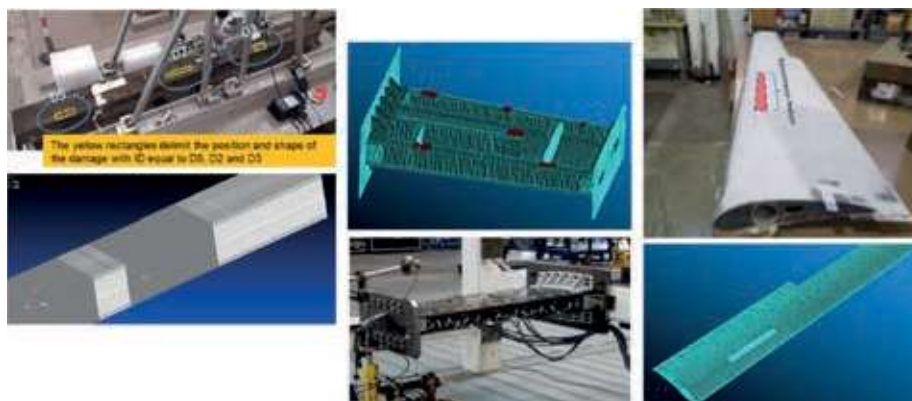


Figura 5 - Schema riassuntivo dei tre articoli di prova utilizzati nel progetto, ordinati per complessità crescente, da sinistra a destra. Viene riportata sia un'immagine presa nei laboratori dei partner, sia la rispettiva rappresentazione FEM. Le posizioni dei danni imposti sono riportate in colore. Sinistra: trave in composito. Centro: segmento di cassone alare. Destra: ala di un UAV.

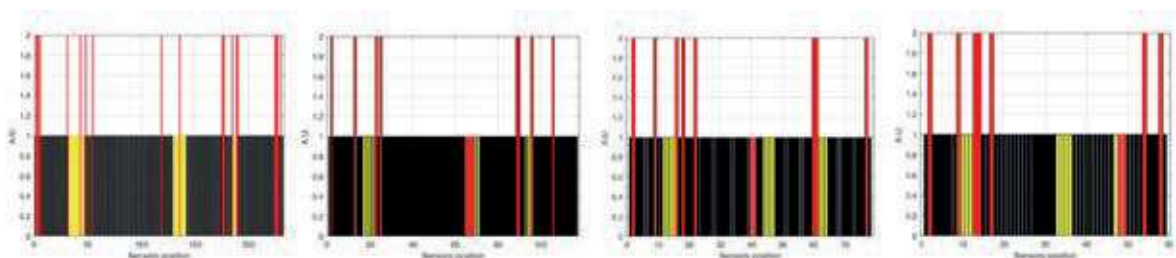


Figura 6 - Esempio dei risultati derivanti dall'elaborazione dei dati di deformazione attraverso l'algoritmo proprietario SHM sulla trave in composito. Le barre nere lungo l'asse x, rappresentano i singoli sensori; i tratti gialli la posizione e l'estensione dei danni imposti; le linee rosse l'intensità (asse y, in unità adimensionali, AU) e la posizione dei sensori identificati dall'algoritmo come prossimi (o sovrapposti) alla zona del danneggiamento. La figura riporta i risultati di un'analisi di sensitività condotta sulla densità della rete sensoriale a partire da acquisizioni condotte con una fibra distribuita, capace di leggere informazioni ogni 2.5 mm circa. Si è successivamente proceduto ad un de-campionamento dei dati, pervenendo a densità di 5, 10, 15 e 20 mm, i cui esiti sono ordinati in figura da destra a sinistra. Tale operazione è necessaria per progettare compitamente la rete di sensori FBG da utilizzare nei casi applicativi. Infatti, allo stato attuale della tecnologia non è ancora possibile utilizzare sistemi distribuiti a bordo. È possibile notare una lenta degradazione delle prestazioni dell'algoritmo al diminuire delle informazioni disponibili, pur mantenendo sempre la capacità di identificare il danno.

ID Sensore	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flessione RT						X	X	X	X	
Flessione HT					X			X	X	
Compressione RT						X	X	X	X	
Compressione HT						X				

ID Sensore	0	1	2	3	4	5	6	7
Flessione RT				X	X		X	
Flessione HT				X	X		X	
Compressione RT				X	X		X	
Compressione HT					X		X	X

ID Sensore	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flessione RT				X	X	X	X									
Flessione HT				X	X	X	X									
Compressione RT				X	X	X	X	X	X		X		X			
Compressione HT				X	X	X		X	X	X			X			

Figura 7 - Esempio dei risultati delle elaborazioni dell'algoritmo SHM su segnali derivanti da serie lineari di FBG (array) di diverso passo e lunghezza, disposti su danni imposti della sezione di cassone alare. Sono stati usati array sia immersi nello strato adesivo della giunzione tra pannello di rivestimento e longerone, sia esterni, ovvero incollati sulla superficie. Le caselle scure si riferiscono a sensori disposti nelle aree danneggiate, mentre quelle chiare fanno riferimento a zone integre. Nell'ordine, da sinistra verso destra e dall'alto in basso: danneggiamento di 40 mm con una distribuzione sensoriale immersa per un numero di 10 FBG e passo pari a 10 mm; danneggiamento di 80 mm con una distribuzione sensoriale immersa per un numero di 8 FBG e passo pari a 20 mm; danneggiamento di 80 mm con una distribuzione sensoriale superficiale per un numero di 16 FBG e passo pari a 10 mm. I risultati mostrano un'eccellente capacità dell'algoritmo di rilevare la posizione del danneggiamento e la sua estensione. Alcune escursioni al di fuori della discontinuità strutturale sono attribuite al propagarsi del suo effetto oltre la sua estensione reale.

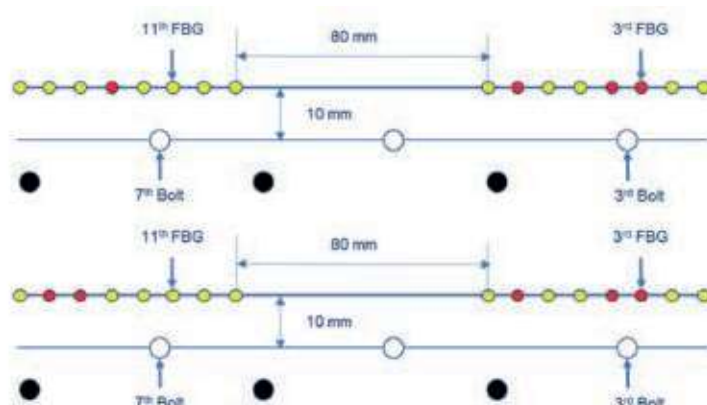


Figura 8 - Esempio del rilievo del danno da parte del sistema SHM sul danneggiamento imposto su uno specifico segmento dell'ala dell'UAV per due diverse velocità del flusso in galleria del vento. In questo caso, l'irregolarità è rappresentata dalla rimozione di alcuni bulloni, disposti con passo pari a circa 40 mm, tra il pannello superiore ed il longerone principale. Nel dettaglio, i bulloni rimossi sono riportati in colore bianco, mentre in nero sono quelli la cui condizione non viene alterata. I sensori FBG sono distribuiti su due sequenze di 8 elementi ciascuna, con passo di circa 10 mm. Nella figura sono in rosso quelli identificati dall'algoritmo come prossimi alla zona del danneggiamento, mentre in giallo sono quelli identificati come prossimi ad aree integre. Le indicazioni ottenute sono generalmente stabili, mentre una certa deviazione dalle zone effettive di discontinuità è legata alla presenza di ulteriori singolarità strutturali come quelle derivanti dalla presenza delle centine.

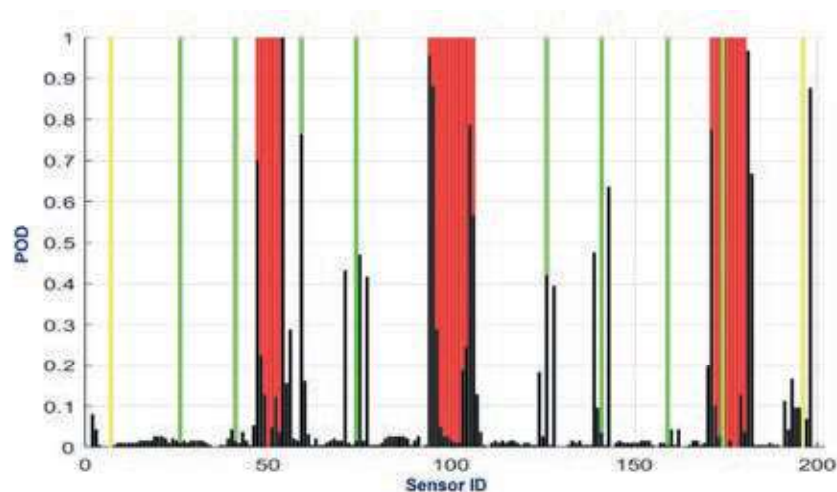


Figura 9 - Risultati di un'indagine della probabilità di rilevamento del danno (POD), condotta sul modello FEM del longherone composito. L'articolo di prova è stato sottoposto ad un carico normale, viaggiante in direzione longitudinale con un passo di 8 mm. La rete sensoriale ha un passo analogo a quello con cui viene eseguito il carico della struttura. Ad ogni analisi è stata registrata l'attribuzione al singolo sensore della presenza della discontinuità nelle sue vicinanze da parte dell'algoritmo SHM. Il numero di evenienze sulla totalità delle indagini eseguite rappresenta la probabilità con cui avviene questa identificazione, riportata come valore normalizzato sull'asse y. Nella figura sono riportate in giallo le posizioni dei supporti di estremità, in rosso l'estensione e la posizione dei danni imposti, in nero la posizione dei sensori (l'altezza delle barre rappresenta il valore normalizzato della POD), ed in verde le discontinuità dello spessore del pannello superiore della trave. L'analisi conferma la capacità dell'algoritmo di rilevare la presenza del danneggiamento, con particolare riguardo ai bordi, dove è più evidente la discontinuità dell'andamento della deformazione.

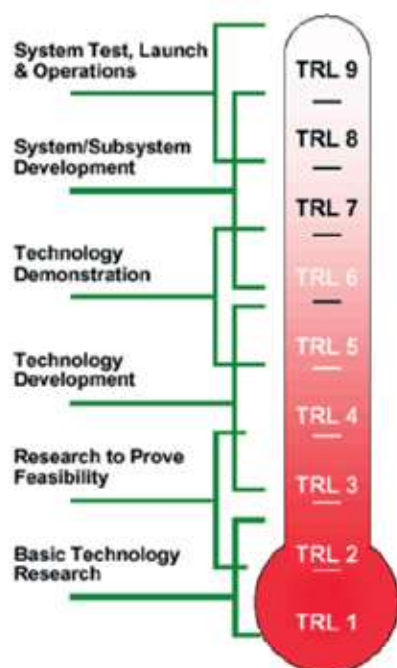


Figura 10 - L'analisi del livello tecnologico del sistema proposto, risultante tra 4 e 5 con elementi del 6, cade nell'intervallo corrispondente allo fase di sviluppo, ed immediatamente prima del segmento dimostrativo. L'analisi è stata condotta attraverso lo strumento definito dal gruppo di lavoro a cui hanno partecipato la NASA, (US) National Aeronautics and Space Administration, e l'AFRL, (US) Air Force Research Laboratory, a cura di Nolte ed altri (versione 1.2beta). Nominalmente il raggiungimento del TRL 4 corrisponde ad una tecnologia convalidata in laboratorio, quello del TRL 5 ad una tecnologia convalidata in ambiente industrialmente rilevante, e quello del TRL 6 ad una tecnologia dimostrata in ambiente industrialmente rilevante (crediti: NASA graphic showing Technology Readiness Levels, 17 Dicembre 2004, <http://as.nasa.gov/aboutus/trl-introduction.html>, by NASA/Airspace Systems (AS), https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NASA_TRL_Meter.png.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Lo studio rientra in una strategia di sviluppo mirata alla messa a punto di un'architettura che permetta lo svolgimento in sicurezza della missione di velivoli senza pilota a bordo, dotando l'aereo di capacità di rilievo di eventuali danneggiamenti, trasmettendo con continuità all'eventuale operatore a terra informazioni sullo stato di salute strutturale, Figura 11. In uno scenario più avanzato, si potrà immaginare il velivolo capace di decisioni autonome sulla base delle informazioni acquisite e propriamente elaborate dal computer di bordo. In questa accezione, la tecnologia è rivolta indistintamente ad usi civili e militari, sia pur con le differenti declinazioni. Analogamente, sebbene sviluppata per l'ambiente aeronautico, essa è trasferibile ad altri sistemi di trasporto, da quello spaziale, al navale ed al terrestre, così come a generici impianti industriali, ferme restando le peculiarità di funzionamento e dei materiali impiegati. Il gruppo di lavoro, che condivide un'esperienza decennale su queste tematiche, ha sperimentato utilizzi della tecnologia su componenti missilistici ed è attualmente coinvolto nella sua applicazio-

ne su serbatoi aeronautici criogenici. Integrando temi di gestione degli UAV, aspetti specialistici delle aerostrutture e dei materiali multifunzionali, nonché della sensoristica integrata e delle strutture adattive, lo studio trova basi solide nella ricerca e sviluppo dei partner.

e dei codici installati dipende esclusivamente dalle capacità della rete e dei computer stessi. Oltre singole azioni puntuali di miglioramento su vari aspetti specialistici, l'architettura messa a punto può essere completata dall'implementazione della trasmissione dati a distanza tra i vari elementi



Figura 11 - Schema della possibile applicazione compiuta della tecnologia, con i dovuti riferimenti alle fotografie ed ai disegni riportati: 1. Velivolo senza pilota (UAV) IAI Heron, 4X-UMG IAI UAV Heron a Emmen, Svizzera, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>; 2. Struttura integrata con rete sensoriale ottica, https://en.wikipedia.org/wiki/File:PhosFOS_flexible_skin.jpg, <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>; 3. Torre radar all'aeroporto di Francoforte, Germania, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radar_tower_airport_Frankfurt_-_Radarturm_Flughafen_Frankfurt_-_03a.jpg, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>; 4. Stazione di Terra Mobile, CIRA; 5. Stazione di Terra. Interno, CIRA (4 e 5, Immagini riprese durante le prove sperimentali dei progetti RAID e GRADE, programma di finanziamento SESAR dell'Unione Europea).

CONCLUSIONI

La ricerca ha permesso di sviluppare la tecnologia SHM, attualmente in via di elaborazione presso gli stessi partner. Da un punto di vista tecnico, è stato ottenuto il notevole risultato di espandere la sua applicabilità a sistemi imbarcabili, partendo da architetture di laboratorio. In accordo all'obiettivo principale, è stato introdotto un tool innovativo che permette la distribuzione dei dati acquisiti a vari pacchetti software di elaborazione SHM con continuità temporale, sino a fornire tempestive informazioni all'operatore a terra. Il numero dei PC

della catena di acquisizione ed elaborazione (interrogatore, PC, sistema di allarme), basata sugli stessi protocolli Ethernet utilizzati in laboratorio e galleria del vento.

Condotta in un contesto internazionale, l'attività ha rafforzato ulteriormente il livello di collaborazione tra partner transnazionali, dotati di competenze complementari pur se con ampi livelli di sovrapposizione. Pertanto, lo sviluppo tecnologico è stato bilanciato tra aspetti innovativi, garantiti dalla fusione di diverse esperienze, ed il consolidamento di capacità disponibili presso gli attori Nazionali.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

AFRL	<i>(US) Air Force Research Laboratory (Laboratorio di Ricercar delle Forze Aeree Statunitensi)</i>
AU	<i>Adimensional Unit (Unità Adimensionale)</i>
CIRA	<i>Centro Italiano Ricerche Aerospaziali</i>
DI	<i>Damage Index (Indice di Danneggiamento)</i>
DNA	<i>Direzione (Italiana) Nazionale degli Armamenti</i>
FBG	<i>Fibre Bragg Grating (Reticolo di Bragg)</i>
IAI	<i>Israel Aerospace Industry (Industria Aerospaziale Israeliana)</i>
NASA	<i>(US) National Aeronautics and Space Administration (Amministrazione Nazionale Statunitense Aeronautica e Spaziale)</i>
PAI	<i>Piaggio Aerospace Industries (Industrie Aerospaziali Piaggio)</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
POD	<i>Probability of Detection (Probabilità di Rilevamento)</i>
RTI	<i>Raggruppamento Temporaneo di Imprese</i>
SGD	<i>Segretariato (Italiano) Generale della Difesa</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring (Monitoraggio dello Stato di Salute Strutturale)</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level (Livello di Maturità Tecnologica)</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle (Velivoli Senza Pilota a Bordo)</i>
UAS	<i>Unmanned Aerial Systems (Sistemi Senza Pilota a Bordo)</i>

PAROLE CHIAVE

Strutture in composito, Danneggiamento strutturale: Monitoraggio dello stato di salute strutturale; Sensoristica integrata; Reticoli di Bragg; Processamento continuo dei dati; Algoritmi di identificazione del danno; Caratterizzazione del danno; Strutture adattive.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	PA ISR-ITA 2019/3
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità, ARMAEREO
Ente responsabile del progetto:	CIRA, Centro Italiano Ricerche Aerospaziali, in RTI con Piaggio Aerospace Industries
Città, Regione:	Capua, Campania
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dr. Antonio CONCILIO
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Maiorise, snc, 81034, Capua (CE)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0823 623 342
E-mail del responsabile del progetto:	a.concilio@cira.it

BIBLIOGRAFIA

Articoli di rivista

- Bado, M.F.; Casas, J.R. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. *Sensors* 2021, 21, 1818.
- Soman, R.; Wee, J.; Peters, K. Optical Fiber Sensors for Ultrasonic Structural Health Monitoring: A Review. *Sensors* 2021, 21, 7345.
- Rocha, H.; Semprinoschnig, C.; Nunes, J.P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review. *Eng. Struct.* 2021, 237, 112231.
- Datta, A.; Augustin, M.J.; Gaddikeri, K.M.; Viswamurthy, S.R.; Gupta, N.; Sundaram, R. Damage detection in composite aircraft wing-like test-box using distributed fiber optic sensors. *Opt. Fiber Technol.* 2021, 66, 102651.
- Monica Murthy, N.; Desai Kakade, P. Review on Strain Monitoring of Aircraft Using Optical Fiber Sensor. *Int. J. Electron. Telecommun.* 2022, 68, 625–634.
- De Martin, A.; Sorli, M.; Jacazio, G. Integrated Health Monitoring for Robust Actuation System of UAV Primary Flight Controls. *Int. J. Mech. Control* 2019, 20, 91–104.
- Kressel, I.; Dorfman, B.; Botsev, Y.; Handelman, A.; Balter, J.; Pillai, A.C.R.; Prasad, M.H.; Gupta, N.; Joseph, A.M.; Sundaram, R.; et al. Flight Validation of an Embedded Structural Health Monitoring System for an Unmanned aerial Vehicle. *Smart Mater. Struct.* 2015, 24, 075022–075030.
- Zhichao, L.; Taoping, S.; Lixin, Y.; Chunhui, L. Local Structural Health Monitoring System in Aircraft-Based on Fiber Bragg Grating Array. *Results Opt.* 2023, 11, 100393.
- Ferreira, P.M.; Machado, M.A.; Carvalho, M.S.; Vidal, C. Embedded Sensors for Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications Review. *Sensors* 2022, 22, 8320.
- Cusati, V.; Corcione, S.; Memmolo, V. Potential Benefit of Structural Health Monitoring System on Civil Jet Aircraft. *Sensors* 2022, 22, 7316.
- Druet, T.; Recoquillay, A.; Chapuis, B.; Moulin, E. Passive guided wave tomography for structural health monitoring. *J. Acoust. Soc. Am.* 2019, 146, 2395–2403.
- Parodi, M.; Fiaschi, C.; Memmolo, V.; Ricci, F.; Maio, L. Interaction of Guided Waves with Delamination in a Bilayered Aluminum-Composite Pressure Vessel. *J. Mater. Eng. Perform.* 2019, 28, 3281–3291.
- Mitra, M.; Gopalakrishnan, S. Guided wave based structural health monitoring: A review. *Smart Mater. Struct.* 2016, 25, 053001.
- Martucci, D.; Civera, M.; Surace, C. The Extreme Function Theory for Damage Detection: An Application to Civil and Aerospace Structures. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1716.

Libri e altre monografie

- Zakirov, R.; Giasova, F. Application of Fiber-Optic Sensors for the Aircraft Structure Monitoring. In *Safety in Aviation and Space Technologies. Lecture Notes in Mechanical Engineering*; Bieliatynskyi, A., Breskich, V., Editori; Springer: Cham, Switzerland, 2022.
- Schmidt, D.; Kolbe, A.; Kaps, R.; Wierach, P.; Linke, S.; Steeger, S.; von Dungern, F.; Tauchner, J.; Breu, J.; Newman, B. Development of a Door Surround Structure with Integrated Structural Health Monitoring System. In *Smart Intelligent Aircraft Structures (SARISTU)*; Wölcken, P., Papadopoulos, M., Editori; Springer: Cham, Switzerland, 2016.
- Yuan, F.G. (Ed.) *Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures*, prima ed.; Woodhead Publishing: Sawston, UK, 2016; ISBN 978-0-08-100148-6.

Altro materiale pubblicato

North Atlantic Treaty Organization (NATO). STANAG 4671 “UAV Systems Air Worthiness Requirements (USAR) for North Atlantic Treaty Organization (NATO) Military UAV Systems”, prima ed.; North Atlantic Treaty Organization (NATO): Washington, DC, USA, 2007.

Ewald, V.; Groves, R.; Benedictus, R. Transducer Placement Option for Ultrasonic Lamb Wave Structural Health Monitoring (SHM) on Damage Tolerant Aircraft Substructure. In Proceedings of the 11th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM) 2017: Real-Time Material State Awareness and Data-Driven Safety Assurance, Stanford, CA, USA, 12–14, Settembre 2017; Volume 2, pp. 1811–1818.

Boller, C. Implementation Strategies for SHM in Civil and Military Applications. In Structural Health Monitoring of Military Vehicles; Suleman, A., Ed.; STO-EN-AVT-220. STO Educational Notes; NATO Science & Technology Organization: Brussels, Belgium, 2014.

Inaudi, D.; Glisic, B. Application of distributed Fiber Optic Sensory for SHM. In Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-2), Shenzhen, China, 16–18 Novembre 2005; Volume 1, pp. 163–169.

Materiale elettronico

EASA AMC 20–29 Composite Aircraft Structure. Accessibile online: <https://www.easa.europa.eu/downloads/1698/en> (visitato il 12 Marzo 2022).

Acellent. Localized (“Hot Spot”) Monitoring. Accessibile online: <https://www.acellent.com/applications/localized-monitoring> (visitato il 27 Maggio 2023).

FPrimeC Solutions, Inc. Sensors for Structural Health Monitoring. Available online: <https://www.fprimec.com/sensors-forstructural-health-monitoring> (visitato il 25 Maggio 2023).

I fluidi elettro-/magneto-reologici (ERF/MRF) sono degli “*smart materials*” le cui proprietà possono essere controllate da un campo elettrico/magnetico esterno. L’acquisizione di una conoscenza avanzata sui loro principi comportamentali è fondamentale per sfruttare appieno le loro capacità. Il progetto di ricerca ha l’ambizioso obiettivo di migliorare la conoscenza sugli ERF/MRF e, a sua volta, di dimostrare la potenziale applicabilità di dispositivi innovativi di interesse militare basati su tali materiali. L’obiettivo è raggiunto migliorando la conoscenza sui principi comportamentali degli ERF/MRF attraverso lo sviluppo di strumenti di modellazione computazionale combinati con test sperimentali. Tali conoscenze saranno sfruttate per promuovere la progettazione e lo sviluppo di dimostratori basati sugli ERF/MRF. I modelli computazionali sono convalidati confrontando i risultati con dati sperimentali, e vengono utilizzati per guidare l’ottimizzazione della sintesi/funzionalizzazione delle nanoparticelle e la prototipazione dei fluidi. Infine, gli ERF/MRF selezionati saranno incorporati in due dimostratori (esoscheletro degli arti superiori - basato su ERF, ammortizzatore adattivo - basato su MRF) per comprovare le capacità della tecnologia. La conoscenza acquisita e gli strumenti computazionali possono essere sfruttati in futuro per sviluppare nuovi dispositivi adatti al settore militare. Non classificato. Basato su “*Foreground information*” ai sensi del contratto EDA B.PRJ.RT.980 relativo al progetto “COMMON LINK”.

INTRODUZIONE

I prossimi decenni vedranno l’insorgere di “*smart materials*” costituiti da fluidi elettro-/magneto-reologici (ERF/MRF) ad alte prestazioni in applicazioni industriali/di difesa. Gli ERF e gli MRF appartengono a un particolare sottodominio della classe dei fluidi non newtoniani il cui comportamento può essere controllato da un campo elettrico o magnetico esterno. La piena applicabilità di tali materiali innovativi si tradurrà, a sua volta, in una forte rivoluzione caratterizzata dalla nascita di dispositivi e sottosistemi adattivi (ad esempio ammortizzatori adattivi, esoscheletri innovativi, sottosistemi elettronici critici, fluidi refrigeranti innovativi, protezione balistica innovativa sostenuta da algoritmi di controllo intelligenti artificiali). Si noti che lo sviluppo di materiali/dispositivi efficienti e robusti per applicazioni militari richiede notevoli sforzi di ricerca per comprende-

re l’intrigante comportamento degli ERF/MRF in condizioni operative specifiche e per orientare le tecniche di produzione/caratterizzazione. In breve, la capacità di sviluppare dispositivi innovativi basati su ERF/MRF, in grado di adattare le proprie caratteristiche alle condizioni di lavoro, va di pari passo con l’acquisizione di una conoscenza avanzata sui loro principi comportamentali. Lo sviluppo di dimostratori per le applicazioni target scelte che beneficino di modelli computazionali convalidati rappresenta l’ambito del progetto COMMON LINK.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Per perseguire gli obiettivi del progetto COMMON-LINK si è scelto di seguire un approccio multidisciplinare comprendente chimica, scienza dei materiali, modellazione computazionale e in-

gegneria meccanica/di controllo. Per supportare gli ingegneri progettisti nell'uso di ERF/MRF per scopi industriali sono necessari modelli predittivi convalidati, tecniche di produzione di nanostrutture avanzate e metodi di caratterizzazione standardizzati. Il progetto è stato quindi suddiviso in 4 aree di ricerca principali:

- Area Chiave 1 (Modellazione): sviluppare/ottimizzare modelli computazionali per ERF/MRF simulando interazioni di particelle nel vettore fluido e identificando complesse relazioni costitutive reologiche per prevedere le proprietà dei materiali in una varietà di flussi. I due approcci sono complementari poiché il primo può determinare il comportamento complessivo e le tendenze delle sospensioni dense a seconda delle caratteristiche delle particelle (forma, dimensione, rivestimento, rugosità superficiale, campi elettromagnetici esterni, ecc.) ma è limitato a piccoli volumi di fluido mentre il secondo può far fronte a volumi di fluido maggiori ma necessita dell'identificazione di relazioni costitutive continue e parametri correlati.
- Area Chiave 2 (sintesi di nanoparticelle): dedicata alla sintesi/produzione di materiali (nanoparticelle) secondo le linee guida ottenute dall'Area Chiave 1;
- Area Chiave 3 (sviluppo di ERF/MRF): dove gli ERF/MRF vengono prototipati e caratterizzati, fornendo feedback all'Area Chiave 1 e 2 in merito ai modelli computazionali e all'ottimizzazione dei processi di produzione;
- Area Chiave 4 (applicazione militare): per definire i requisiti funzionali e le specifiche tecniche per i dimostratori da sviluppare, con l'obiettivo militare principale di progettare, sviluppare e testare uno o più dimostratori specifici per il settore militare basato sui materiali fabbricati.

METODOLOGIA

Le attività dell'Area chiave 1 sono focalizzate sulla previsione del comportamento e del flusso degli

ERF/MRF. Grazie ai modelli costitutivi e i relativi strumenti computazionali sviluppati (Figura 1a-b), è stata studiata la dinamica delle sospensioni mediante "*Immersed-Boundary-Method*". Sono state condotte campagne di simulazioni per analizzare gli effetti della forma, delle dimensioni, della concentrazione e delle proprietà elettromagnetiche delle particelle. Le previsioni ottenute dai casi esaminati sono in linea con i dati sperimentali. È stato ottenuto un set di relazioni costitutive per svariati ERF/MRF e verrà utilizzato per sviluppare modelli comportamentali di ERF/MRF in flussi semplici e complessi. Le attività dell'Area chiave 2 sono focalizzate sulla sintesi e caratterizzazione di nanoparticelle di ossidi metallici e idrossidi per applicazioni basate su ERF/MRF. Sono state caratterizzate sia particelle disponibili in commercio che sintetizzate internamente e il processo di sintesi è attualmente in fase di ottimizzazione in termini di stabilità, qualità e quantità di materiale prodotto. Inoltre, le particelle sono state ingegnerizzate per migliorare l'effetto reologico (e.g. gruppi funzionali, rivestimento delle particelle). Le particelle sono state quindi utilizzate per prototipare diversi campioni di ERF/MRF (Area Chiave 3). Tali campioni sono stati studiati mediante caratterizzazioni fisico-chimiche ed elettromeccaniche, per identificare il candidato più adatto da utilizzare nei dimostratori (Figura 1c). Relativamente all'Area Chiave 4, è stata eseguita un'indagine sulle potenziali applicazioni militari basate su ERF/MRF. Due applicazioni sono state selezionate per il progetto, che hanno portato alla scelta di due dimostratori: esoscheletro degli arti superiori (basato su ERF); ammortizzatore adattivo (basato su MRF). Per ciascun dimostratore sono stati identificati i requisiti funzionali, le specifiche tecniche e il piano di test, utilizzati successivamente per delineare la fase di progettazione. In particolare, dopo un'analisi approfondita dello stato dell'arte, sono state eseguite le progettazioni concettuali, di massima ed esecutive dei dimostratori (Figura 1d-e).



Figura 1 - (a-b) Esempio di modellizzazione di (a) ERF e (b) MRF. (c) Sintesi e prototipazione di nanoparticelle e fluidi. (d-e) Progettazione esecutiva di dimostratori basati su (d) ERF e (e) MRF. / (a-b) Modeling example of (a) ERFs and (b) MRFs. (c) Nanoparticles synthesis and fluid prototyping. (d-e) Executive design of (d) ERF-based and (e) MRF-based demonstrator.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Attraverso le attività di progetto, la conoscenza nella modellazione computazionale di ERF/MRF e della sintesi/caratterizzazione di nanomateriali è ampiamente aumentata, oltre a fornire una prova concettuale dell'utilità di tale tecnologia. La conoscenza acquisita e gli strumenti computazionali sviluppati possono essere sfruttati in futuro per sviluppare diverse potenziali applicazioni chiave basate su ERF/MRF. Nel dominio veicolare, possono essere utilizzati negli ammortizzatori semi-attivi per aumentare le prestazioni (e.g. aderenza, comfort) e la sicurezza dei veicoli in diverse condizioni operative; possono anche essere utilizzati in frizioni/freni intelligenti per aumentare le prestazioni (e.g. coppia/forza applicata) e la durata del dispositivo. In alternativa, possono essere utilizzati come sistemi di smorzamento delle vibrazioni, migliorando la precisione del tiro sul bersaglio per applicazioni balistiche o migliorando la riduzione del rumore, il comfort e la sicurezza della struttura e dello scafo in applicazioni navali. Se inseriti in ortesi/esoscheletri indossabili, possono essere utilizzati per aumentare le capacità umane (e.g. capacità di carico, precisione di tiro sul bersaglio per i cecchini) o nell'addestramento dei soldati (e.g. su bersagli da campo/navi).

CONCLUSIONI

L'obiettivo finale del progetto COMMON-LINK è dimostrare la potenziale applicazione di dispositivi innovativi basati su ERF/MRF nel settore militare. Tali dispositivi saranno in grado di migliorare le capacità di piattaforme e sottosistemi adattandone le caratteristiche alle condizioni di lavoro. Tale obiettivo finale sarà raggiunto migliorando la conoscenza dei principi comportamentali di ERF/MRF attraverso la modellazione computazionale e i test sperimentali e tramite la progettazione e lo sviluppo di dimostratori basati su ERF/MRF. Il raggiungimento di questo obiettivo consentirà lo sviluppo futuro di nuovi dispositivi adatti al settore militare. Un set di relazioni costitutive per svariati ERF/MRF è stato ottenuto utilizzando i modelli costitutivi e i relativi strumenti computazionali sviluppati e saranno utilizzati per sviluppare modelli comportamentali di ERF/MRF in flussi semplici e complessi, per consentire di prevedere le prestazioni di ERF/MRF in dispositivi con diverse geometrie. Sono stati prototipati diversi campioni di ERF/MRF, utilizzando sia particelle disponibili in commercio che sintetizzate internamente, a seguito un'ampia caratterizzazione. Nelle fasi successive del progetto, la sintesi delle nanoparticelle e gli ERF/MRF associati saranno ottimizzati in termini di prestazioni e processo di produzione. Infine, il candidato più idoneo sarà incorporato nei dimostratori ERF/MRF progettati per comprovare le capacità della tecnologia.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

ERF	<i>Fluidi Elettro-Reologici</i>
MRF	<i>Fluidi Magneto-Reologici</i>

PAROLE CHIAVE

Fluidi elettro-reologici, Fluidi magneto-reologici, Modellazione, Dinamica delle particelle, Modelli costitutivi, Nanoparticelle, Protocolli di sintesi, Robotica, Esoscheletro, Ammortizzatore.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	PA B.PRJ.RT.980
Amministrazione appaltante:	European Defence Agency
Ente responsabile del progetto:	Signo Motus s.r.l. come coordinatore del consorzio. Altri membri: Consiglio Nazionale Delle Ricerche (IT) - Università di Roma Tor Vergata (IT) - Brno University of Technology (CZ)- University of Luxembourg (LU)
Città, Regione:	Messina, Sicilia
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dr. Ing. Sandro Scattareggia Marchese
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Panoramica 340, 98168 Messina (IT)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 090 357028
E-mail del responsabile del progetto:	sandroscattareggia@signomotus.it





RIASSUNTO STATISTICO - FINANZIARIO



RIASSUNTO STATISTICO-FINANZIARIO

RIPARTIZIONE DEI FINANZIAMENTI TRA PNRM E PROGRAMMI INTERNAZIONALI

La ripartizione tra progetti del Piano Nazionale della Ricerca Militare (PNRM), progetti in ambito *European Defence Agency* (EDA), progetti derivanti da Accordi Quadro con il settore acca-

demico, attività di ricerca tecnologica dei Centri di Test della Difesa e programmi internazionali (multilaterali e bilaterali) riferita all'anno 2023 è riportata in tabella 1.

Tipologia	n. fasi successive di progetti in corso	nuovi progetti
PNRM	40	31
EDA	1	2
Accordi Quadro	4	5
Centri di Test	5	5
BI-MULTILATERALI	5	2

Tabella 1 - Ripartizione dei mandati effettuati nel 2023.

RIPARTIZIONE DEI FINANZIAMENTI NAZIONALI PER AREE CAPACITIVE/TECNOLOGICHE

La ripartizione annuale dei finanziamenti nazionali per aree capacitive/tecnologiche può variare sulla base delle priorità operative espresse in ambito Difesa.

I progetti nazionali per l'anno 2023 sono stati selezionati in base ai criteri stabiliti nell'atto di indirizzo del Ministro della Difesa ed aggiornati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa, privilegiando le proposte di progetto attinenti ai seguenti cluster applicativi/tecnologici:

- **C2 e Multi-Domain situation awareness:** soluzioni in grado ricevere, fondere e rappresentare in maniera integrata i dati provenienti da sensori e sistemi militari appartenenti ai cinque Domini Operativi (terrestre, marittimo, aereo, cibernetico e spaziale), *Intelligence Surveillance & Reconnaissance* (ISR).
- **Tecnologie spaziali:** difesa assetti, *Military Satellite Communications* (MILSATCOM), Osservazione della Terra, accesso allo spazio, *Space Domain Awareness* (SDA), *In-Orbit Servicing*, Sorveglianza spettro elettromagnetico, piattaforme stratosferiche.

- **Tecnologie cyber:** soluzioni per il conseguimento di capacità di *awareness*, di difesa e di attacco nel dominio cibernetico.
- **Protezione e potenziamento capacità del soldato:** *human enhancement*, *awareness*, difesa e offesa, riduzione degli effetti negativi delle infermità
- **Sistemi Autonomi:** tecnologie per lo sviluppo e il contrasto dei *Robotic Autonomous Systems*, *Unmanned Systems* (UxV).
- **Soluzioni di Intelligenza Artificiale:** gestione dei *big data* e standardizzazione di dati eterogenei (es. sensori, sistemi e *database*), automazione complementare dei sistemi a guida remota in ambiente EM non permissivo, *swarm intelligence*, *targeting* di precisione.
- **Contrasto minacce "emergenti":** armi ad energia diretta (incluso sviluppo capacità offensiva), armi in grado di garantire l'accesso ad aree protette da sistemi *Anti-Access/Area Denial* (A2/AD) ovvero *counter-A2/AD*, attività *Cyber* combinate con azioni di Guerra Elettronica (*Cyber ElectroMagnetic Activities*), armi ipersoniche.
- **Underwater:** tecnologie per il controllo della

dimensione subacquea e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi che vi operano.

- **Urban warfare:** tecnologie per il controllo del territorio urbano e per l'efficacia operativa dei mezzi e dispositivi militari che vi operano.
- **Sostenibilità, sicurezza e resilienza energetica:** soluzioni per la riduzione del *footprint* logistico, ambientale, sicurezza ed efficientamento energetico delle infrastrutture e dei mezzi militari (*smart building*, *Nearzero Energy Building*, strutture campali, biocarburanti e propulsioni ibride, *storage*, fonti energetiche rinnovabili in ambito militare, *energy management system* e diversificazione sistemi di approvvigionamento)

- **Biotecnologie** (Bioinformatica, Biosensori e Bioelettronica), **smart materials e nano tecnologie**, potenziamento e sviluppo delle capacità di difesa **CBRN**.

L'individuazione dei *cluster* prioritari ha consentito una programmazione e gestione più efficace ed efficiente delle risorse, indirizzando le attività di ricerca tecnologica al raggiungimento di obiettivi coerenti con le esigenze capacitive e le attuali priorità delle Forze Armate e minimizzando la frammentazione dei settori tecnologici e la dispersione delle risorse su molteplici e diversificate attività, non tutte specificamente indirizzate a colmare i *gap* capacitivi individuati a livello operativo.

Area Tecnologica (<i>cluster</i>)	% finanziamento	Numero progetti
C2 e Multi-Domain situation awareness	9,7%	3
Tecnologie spaziali	16,1%	5
Tecnologia <i>cyber</i>	6,5%	2
Protezione e potenziamento capacità del soldato	16,1%	5
Sistemi Autonomi	6,5%	2
Soluzioni di Intelligenza Artificiale	9,7%	3
Contrasto minacce "emergenti"	12,9%	4
<i>Underwater</i>	6,5%	2
<i>Urban warfare</i>	0,0%	0
Sostenibilità, sicurezza e resilienza energetica	9,7%	3
Biotecnologie	6,5%	2
TOTALE	100%	31

Tabella 2 - Ripartizione dei nuovi progetti nazionali avviati nel 2023 rispetto ai *cluster* capacitivi/tecnologici prioritari indicati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa.

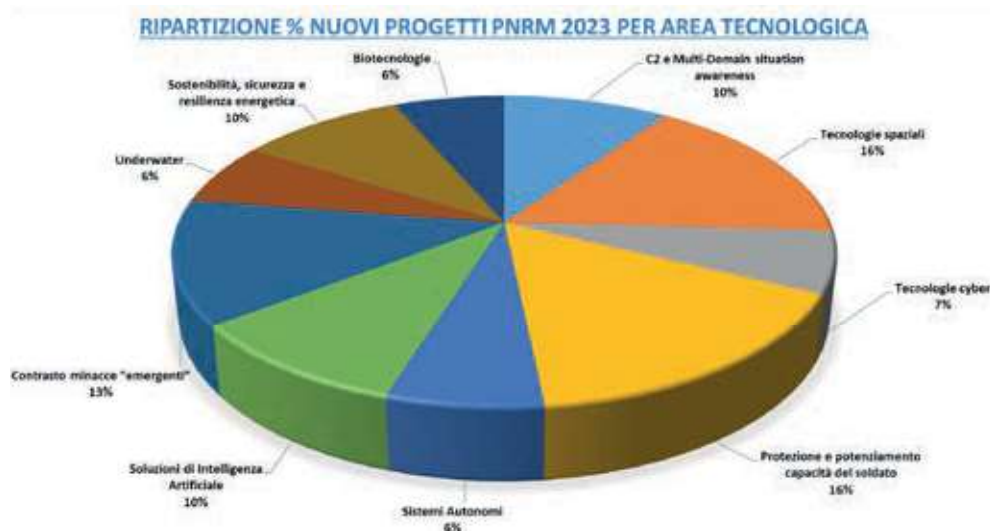


Figura 1 - Ripartizione dei nuovi progetti nazionali avviati nel 2023 rispetto ai *cluster* capacitivi/tecnologici prioritari indicati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa.



SIGLE E ACRONIMI

2-MF	Multi-Functional Modular Frame
AD	Amministrazione Difesa
AES	Advanced Encryption Standard
ALW	Airborne platform effects on laser systems and warning sensors
AODV	Ad Hoc On-Demand Distance Vector
AU	Actuation Unit
BEE DDS	Implementazione Leonardo dello standard DDS
BER	Bit Error Rate
BFN	Beam-Forming Network
BLOS	Behind Line Of Sight
C2	Comando & Controllo
CDMA	Code Division Multiple Access
C4ISTAR	Command, Control, Communications Targeting Acquisition and Reconnaissance
CIRA	Centro Italiano Ricerche Aerospaziali
CPA	Sistema Cooperativo basato su Percezione Aptica
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
CMC	Materiale Composito a Matrice Ceramica
C/SiC	Composito con matrice di SiC rinforzato con fibre di Carbonio
COTS	Commercial Off-the-Shelf
CSM	Communication Spectrum Monitoring
CU	Control Unit
DIRCM	Directed Infrared Countermeasure
DDS	Data Distribution Service
DF	Direction Finding
DM	Directional Modulation (Modulazione Direzionale)
DT	Dimostratore Tecnologico
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
EMI	ElectroMagnetic Interference
ESM	Electronic Support Measures
EFT	Electronic Functional Tray
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
ELINT	Electronic INTelligence
EM	Engineering Model
E2E	End-to-End
EGSE	Electrical Ground Support Equipment
EDA	European Defence Agency

ENIVD	(European Network for Diagnostics of “Imported” Viral Diseases)
EOT	Energy on Target
FM	Flywheel motor
GHIBLI	Galleria la plasma da due MW presso il CIRA
GUI	Graphical User Interface
GFT	Geometric Functional Tray
GIM	Gimbal motor
GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
GPU	Graphical Processing Unit
GEOINT	GEOspatial INTelligence
HfB2	Diboruro di Afnio
IDS	Intrusion Detection System
INS	Inertial Navigation System
ISR	Intelligence Surveillance and Reconnaissance
It-MoD	Italian Ministry of Defense
IMINT	Image INTelligence
ISL	Inter Satellite Link
IR	Infrarosso
J/S	Jammer-to-Signal ratio
LEO	Low Earth Orbit
LC	Load Case
LT CES	Communication Electronic Support Measures
LICOLA	Low Interceptable Communication Link Antennas
MCMG	Mini Control Momentum Gyroscope Assembly
MAC	Medium Access Control
MALE	Medium Altitude Long Endurance
MANET	Mobile Ad-hoc Networks
MCS	Mission Control System
MS-DEP	Multi-Sensor Data Exploitation Platform
MWS	Missile Warning System
NEC	Network Enabled Capability
NCS	Network Control System
OBL	Optical Break Lock
OMG	Object Management Group
OTW	Other Than War

OBP	On-Board Processing
PCR	(Polymerase Chain Reaction)
POC	Posto Operatore Centralizzato
P/F	Piattaforma
P/L	Payload
POI	Point Of Interest
RMSE	Root Mean Square Error
RIFON	Rete Interforze in Fibra Ottica Nazionale
RPAS	Remotely Piloted Air System
RSV	Reparto Sperimentale di Volo
SATCOM	Satellite Communication
S/C	Spacecraft
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalisation
SHF	Super High Frequency
SIC	Carburo di Silicio
SICRAL	Sistema Italiano per Comunicazioni Riservate ed Allarmi
SiC/SiC	Composito con matrice di SIC rinforzato con fibre di SIC
SOTA	State Of The Art
TA	Technical Arrangement
TAPR	Aeromobile a Pilotaggio Remoto
TAS-I	Thales Alenia Space Italia
TAKS	Topology Authenticated Key Scheme
TRL	Technology Readiness LevelDMA
TRM	Traffic Resource Manager
TRM-DB	TRM Data Base
UV	Ultra Violetto
UHF	Ultra High Frequency
VANET	Vehicular Ad-Hoc Networks
VFT	Volumetric Functional Tray
VHF	Very High Frequency
WP	Work Package
WIFI	Wireless Fidelity
WIDS	WPM-based Intrusion Detection System
WSN	Wireless Sensor Network
WHO	(World Health Organization-Organizzazione Mondiale della Sanità)
ZrB2	Diborure di Zirconio

RECAPITI EDITORIALI

PROGETTO, COORDINAMENTO GENERALE ED EDITORIALE

V Reparto - Innovazione Tecnologica, 2° Ufficio

Col. ing. Marco AGABITI

Ten.Col. GArn Giuliano CIOCCOLO

Lgt. Nicola LA NEVE

Ass. Amm.vo Flavia TOFONE

SUPERVISIONE E COORDINAMENTO TECNICO-SCIENTIFICO

Col. ing. Marco AGABITI

Ten.Col. GArn Giuliano CIOCCOLO

COMITATO SCIENTIFICO DI REDAZIONE

Col. ing. Marco AGABITI

Magg. ing. Bruno DI PALMA

Ten.Col. ing. Antonio PALERMO

Magg. ing. Antonio GULIZIA

Ten.Col. GArn Giuliano CIOCCOLO

SEGRETERIA DI REDAZIONE

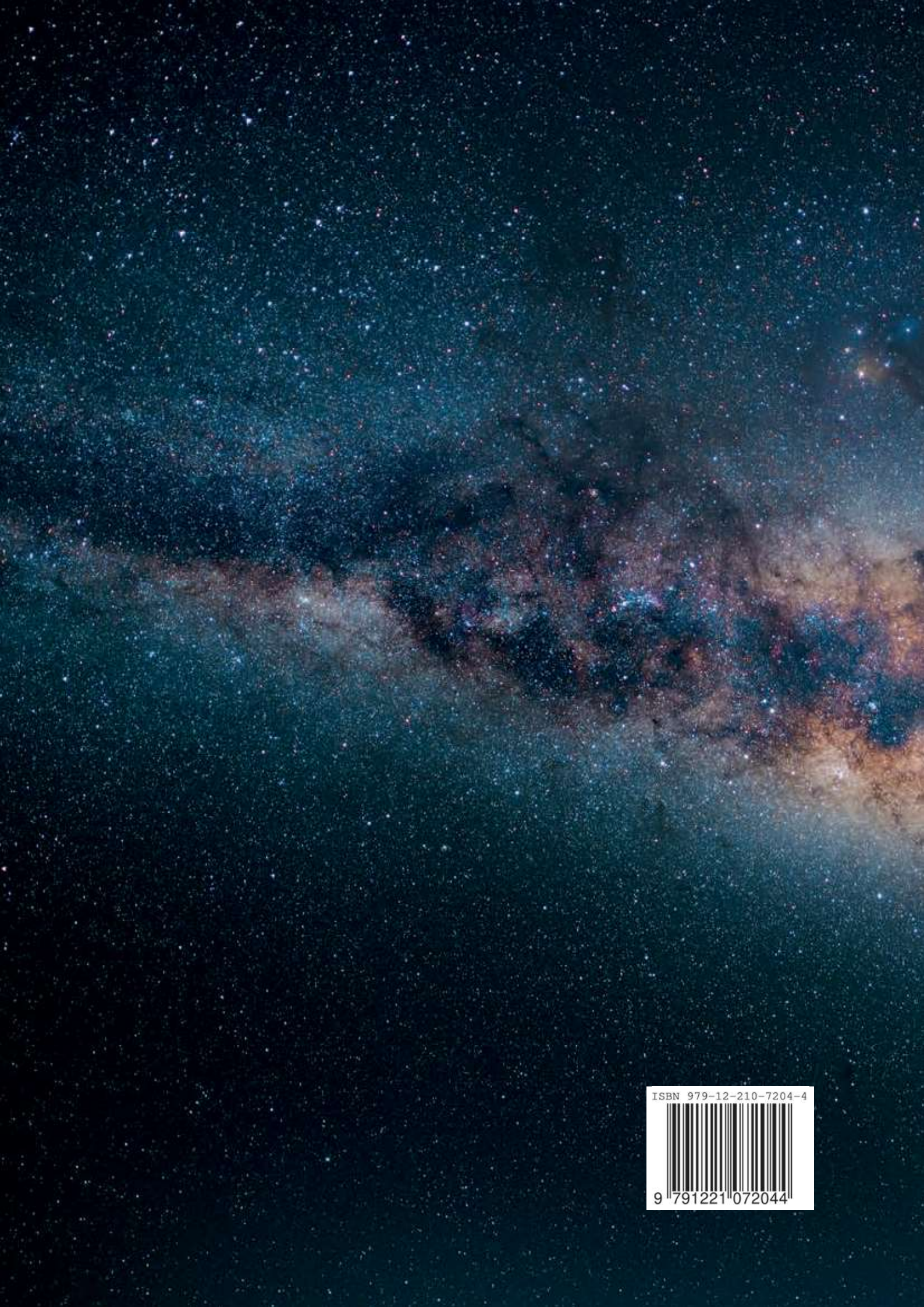
Lgt. Nicola LA NEVE

Ass. Amm.vo Flavia TOFONE

1° Lgt. Marco BONANNI

STAMPA

Teraprint.it - Roma



ISBN 979-12-210-7204-4



9 791221 072044