



Ricerca Tecnologica e Innovazione 2023

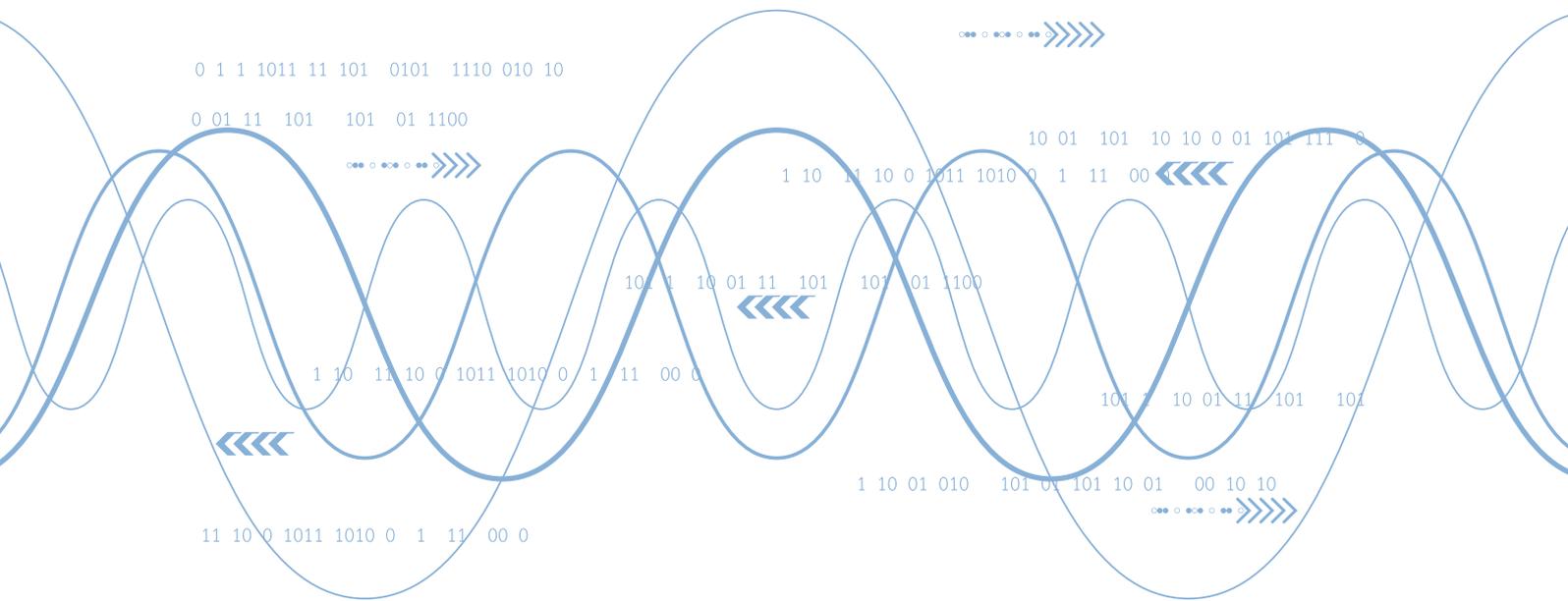
**MINISTERO DELLA DIFESA
SEGRETARIATO GENERALE DELLA DIFESA
E DIREZIONE NAZIONALE DEGLI ARMAMENTI**



Ricerca Tecnologica e Innovazione 2023

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

INDICE



Presentazione Segretario Generale della Difesa DNA	Pag. 4
Prefazione Direttore V Reparto	Pag. 6
Uno sguardo all'organizzazione	Pag. 11
La Ricerca in ambito Nazionale	Pag. 19
La Ricerca in ambito Europeo	Pag. 131
La Ricerca in ambito NATO extra-Europeo	Pag. 151
Riassunto statistico - finanziario delle attività di ricerca tecnologica	Pag. 167
Sigle e acronimi	Pag. 171

PRESENTAZIONE

INTRODUTTIVA A CURA DEL SEGRETARIO GENERALE DEL RAPPORTO DI RICERCA TECNOLOGICA E INNOVAZIONE 2023

Nel segno della tradizione anche per il 2023 ho il piacere di introdurre il Rapporto sullo stato dell'arte della ricerca tecnologica del Segretariato Generale della Difesa e Direzione Nazionale Armamenti. Come noto, l'area tecnico-amministrativa ha due anime: il Segretariato Generale della Difesa, con competenze di natura tecnico-amministrativa, giuridica e ordinativa, e la Direzione Nazionale degli Armamenti, che invece opera nella sfera tecnico-industriale con lo scopo di:

- acquisire i sistemi d'arma e gli equipaggiamenti per le Forze Armate, nel rispetto dei requisiti stabiliti dall'area tecnico-operativa della Difesa e sulla base delle risorse di investimento assegnate;
- valorizzare le capacità del comparto industriale della difesa, anche attraverso accordi e cooperazioni internazionali;
- garantire un vantaggio tecnologico al nostro strumento militare attraverso continue attività di ricerca e di innovazione.

Le due anime svolgono compiti funzionali diversi e complementari; infatti entrambe convergono verso un unico scopo: fornire alle nostre Forze Armate tutte le capacità per esprimere uno strumento militare evoluto ed efficace - contribuendo in modo sostanziale alla crescita del Paese, e alla sua proiezione e rilevanza in ambito internazionale.

Il mutato contesto globale ha messo recentemente in evidenza la necessità di un costante aggiornamento tecnologico a tutela degli interessi nazionali in ogni campo. Per tale motivo è prioritario "preservare l'autonomia strategica nella ricerca

scientifica e tecnologica" per contribuire, in assoluta sinergia con l'area tecnico-operativa, al raggiungimento degli obiettivi di livello strategico chiaramente indicati dal Ministro della Difesa.

Per fare questo è necessario muoversi in maniera proattiva nel campo dell'innovazione per rimanere competitivi e mantenere un vantaggio tecnologico nei confronti di potenziali avversari.

Infatti, in un contesto globale altamente competitivo, essere totalmente dipendenti da tecnologie altrui significherebbe accettare il rischio di farsi cogliere impreparati ad affrontare una situazione di crisi e, ancor più grave, significherebbe subordinare la capacità di difendere gli interessi nazionali alla volontà di coloro che detengono il know-how tecnologico.

Pertanto, l'autonomia strategica nella ricerca scientifica e tecnologica deve essere preservata e rafforzata, favorendo un percorso di collaborazione con altri paesi, in un contesto in cui l'Italia possa mantenere un ruolo di partner capace e fortemente propositivo, e non retrocedere alla mera funzione di utilizzatore.

In tale scenario, è necessario concentrare gli sforzi per il raggiungimento di alcune condizioni decisive:

- rafforzare la sinergia con il mondo accademico, i centri di ricerca e il comparto industriale, implementando tool e hub dell'innovazione, che possano essere incubatori e acceleratori di idee, e che rendano coerente il flusso che va dalla concezione dell'idea all'investimento finale;
- valorizzare le piccole e medie imprese e le start up, che forniscono un contributo rilevante allo sviluppo del pensiero innovativo, facendo in modo che venga agevolata la loro partecipazione nell'ambito dei progetti del Piano Nazionale di Ricerca Militare (PNRM) e di quelli finanziati dalla Commissione europea e nell'ambito



- dell'Alleanza atlantica;
- incrementare la capacità nazionale di influenzare i consessi internazionali sull'innovazione, ricercando l'allineamento degli obiettivi definiti in ambito NATO e Unione europea alle priorità fissate in ambito nazionale.

La capacità di svolgere un ruolo primario nei consessi internazionali è molto importante, perché, nel suo ambito di applicazione, il settore tecnologico militare costituisce un assoluto "amplificatore di influenza" sulla scena geopolitica globale, oltre a contribuire all'esigenza di disporre di sistemi pienamente interoperabili, non solo in ambito interforze, ma anche multinazionale.

Inoltre, sarà indispensabile far convergere, in modo più deciso, i progetti di ricerca tecnologica verso le dinamiche di sviluppo capacitivo dello strumento militare e con quelle di politica industriale della Difesa, concentrando l'attenzione e le risorse su quelle aree in cui siamo consapevoli di avere un potenziale *gap* rispetto alla velocità dello sviluppo tecnologico; tra tutti: cyber, spazio e intelligenza artificiale.

Proprio in merito alla citata convergenza di ricerca e sviluppo capacitivo, ritengo importante sottolineare come la rapidità dell'evoluzione tecnologica

potrebbe offrire soluzioni innovative, difficilmente prevedibili, tanto radicali da imporre una nuova visione del modo in cui operiamo (le c.d. EDTs).

Pertanto, se da un lato la ricerca deve supportare lo sforzo capacitivo, dall'altro dobbiamo essere aperti a definire i nostri stessi *gap* capacitivi attraverso un'approfondita analisi delle opportunità offerte dalle tecnologie emergenti.

Per questo motivo, sarà importante incrementare la sinergia tra tutte le componenti (area tecnico-amministrativa e tecnico-operativa, industria, mondo accademico e centri di ricerca militari e civili), prevedendo nuove metodologie di lavoro che favoriscano la rapida condivisione di esigenze, proposte e opportunità, per identificare le soluzioni migliori.

In altre parole, a mio avviso, il mondo della progettazione e dell'industria della difesa deve affiancare in presa diretta chi opera sul terreno, dimostrando resilienza e rapidità di adattamento e, in molti casi, deve poter precorrere gli accadimenti operativi, con una intensa e costante analisi strategica e di scenario.

**Generale di Corpo d'Armata
Luciano Portolano**

a cura del Direttore del V Reparto "Innovazione Tecnologica"

Nel mutevole quadro strategico e geopolitico europeo, le sfide socio-economiche e tecnologiche degli ultimi anni, dovute prioritariamente all'emergenza pandemica COVID-19, alle recenti tensioni militari sul lato orientale del continente e al vasto arco di crisi nell'area dei prospicienti Paesi medio-orientali, hanno confermato la rilevanza fondamentale di una efficace politica estera e di sicurezza comune europea e di azioni aggregatrici per il settore della Difesa, volte a rafforzare le conoscenze e il *know-how* tecnico-scientifico, con particolare riguardo alle tecnologie abilitanti per l'ammodernamento o il futuro sviluppo di sistemi per la Difesa, e a potenziare le capacità operative delle forze armate così come la relativa base accademico-industriale.

La ricerca tecnologica costituisce quindi, in Europa e per l'UE in particolare, un imprescindibile elemento di raccordo e spinta verso l'integrazione degli assetti tecnologici e delle varie competenze nazionali, al fine di disporre di uno strumento militare costantemente adeguato e aggiornato e di soddisfare il giusto livello di ambizione nazionale e dell'Unione, di concerto con gli indirizzi di *policy* e difesa degli spazi euro-atlantici sviluppati in ambito NATO.

Per far ciò è necessario investire in ricerca e innovazione, disponendo di risorse e strumenti organizzativi e procedurali adeguati ai sopraccitati livelli d'ambizione e cercando, al contempo, di garantire

la protezione delle tecnologie nazionali d'eccellenza, per mantenere un'opportuna e necessaria superiorità tecnologica nei comparti di rilevanza strategica per il sistema di difesa e sicurezza del paese, secondo un approccio teso sempre al migliore equilibrio tra processi d'integrazione industriale volti a far crescere la competitività, specie in ambito internazionale, e dinamiche di protezione. I suesposti lineamenti, in armonia con gli indirizzi generali dettati dalle Autorità di Vertice politiche e

militari, rappresentano le principali linee guida per le attività di ricerca (RT) e discendente innovazione tecnologica portate avanti dal Segretariato Generale della Difesa/Direzione Nazionale degli Armamenti (DNA), attraverso l'azione del V Reparto, nel quadro delle proprie funzioni tecnico-amministrative d'alta guida, direzione e controllo.

Tali attività di ricerca dell'A.D. - che costituiscono la c.d. "ricerca militare" - sono individuate, promosse e lanciate sia nel contesto

sovrano (interno), in armonia con la più ampia politica tecnico - scientifica del Paese¹, attraverso un'iniziativa nazionale, il Piano Nazionale della Ricerca Militare (PNRM), i progetti RT svolti presso i Centri di test della Difesa² e gli Accordi Quadro con Università ed Enti di Ricerca italiani, che in quello della cooperazione internazionale, con programmi RT sviluppati nel quadro collaborativo europeo, prevalentemente dell'UE e della *European Defence Agency* (EDA), NATO ed extra-europeo, attraverso accordi bi-multilaterali.

La cooperazione tecnologica e industriale nell'am-



1 Che trova a sua volta rafforzamento e sostegno negli obiettivi e misure previste dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR).

2 In un'ottica di coordinamento, armonizzazione e potenziamento delle specificità degli Enti tecnici della Difesa.

bito dell'Unione Europea e con i Paesi Alleati, declinata nell'individuazione e potenziale acquisizione di capacità comuni, soprattutto critiche (si pensi, solo per fare qualche esempio, alle tecnologie spaziali/aerospaziali, *cyber*, all'intelligenza artificiale - IA, ai sistemi autonomi, alle biotecnologie/*smart materials* per il *soldier empowerment* e la protezione CBRN etc.), rappresenta sempre più un fattore chiave per l'autonomia strategica nazionale, ovvero il poter agire "da soli se necessario, con i partner quando possibile" attraverso un'azione complementare EU - NATO. Nell'attuale variegato contesto di dinamiche geopolitiche a complessità crescente, si continuano a prendere a riferimento e seguire le due parallele iniziative, dell'Unione Europea e della NATO, sulla base delle quali si andranno a indirizzare, in prospettiva, le politiche e i temi di sviluppo tecnologico. Esse sono, rispettivamente, lo *STRATEGIC COMPASS* e la *EMERGING AND DISRUPTIVE TECHNOLOGIES Roadmap*, e mirano a identificare le sfide future che l'Europa e l'Alleanza dovranno affrontare, prestando particolare attenzione ai confronti tecnologici.

Nello specifico, lo *STRATEGIC COMPASS* rappresenta una guida in materia di sicurezza e difesa, individuando strumenti, tempistiche e minacce, misurando i progressi verso un determinato livello di ambizione, promuovendo e stimolando gli investimenti in ricerca e innovazione, per sviluppare congiuntamente nuove tecnologie e processi di supporto alle stesse. Le *EMERGING AND DISRUPTIVE TECHNOLOGIES* (le c.d. EDTs³) sono intese, prevalentemente, come quelle tecnologie aventi un potenziale impatto disruptive (disruptive) sul vantaggio competitivo e conseguentemente sul tessuto economico e sul posizionamento geopolitico. L'Alleanza ha avviato una *roadmap* specifica per la valorizzazione di que-

sto tipo di tecnologie, prevedendo delle *policy* e dei distinti piani di implementazione per ciascuna di esse. A tal proposito, anche a livello europeo è stato predisposto un "piano d'azione", al quale l'Italia contribuisce insieme agli altri Stati membri, per individuare i *trend* tecnologici più promettenti, individuati sia dal punto di vista strettamente capacitivo/operativo (militare) che focalizzandosi su tecnologie civili aventi applicazioni duali, quindi fruibili anche dal comparto Difesa. Particolare attenzione viene prestata alle capacità industriali esistenti a livello UE, in modo che esse siano stimolate a raggiungere la necessaria prontezza per lo sviluppo e integrazione di tali tecnologie, nonché alle risultanze dei processi di monitoraggio e previsione dei possibili futuri orizzonti scientifico-tecnologici (c.d. *Technology watch* e *foresight*) implementati in ambito EDA (*European Defence Agency*), sempre con il concorso di tutti gli Stati membri. Gli esiti dei suddetti *Technology watch* e *foresight* costituiscono, parimenti, fondamento tecnico per gli strumenti di pianificazione RT e capacitiva realizzati e in uso nel contesto EDA, quali l'*OVERARCHING STRATEGIC RESEARCH AGENDA* (OSRA) e il *CAPABILITY DEVELOPMENT PLAN* (CDP). Inoltre, riguardo alle EDTs, il Segretariato fornisce contributi e pone in essere azioni volte alla messa a punto delle Strategie per la relativa implementazione in ambito Difesa, a partire, p.e., da quella concernente l'intelligenza artificiale (IA), segmento d'innovazione tecnologica di tipo "general purpose"⁴ considerato un *game changer* d'assoluto rilievo, il cui sviluppo può apportare profondi cambiamenti e trasformazioni nello Strumento militare.

Allo stesso tempo, nel contesto UE, si va via via rafforzando e consolidando il contributo del Segretariato Generale della Difesa/DNA nell'ela-

3 In ambito NATO, correntemente: *Data and advanced analytics, Artificial Intelligence, Autonomy, Quantum technologies, Space technologies, Hypersonics, Biotechnology, Human enhancement, Novel materials (& manufacturing), 5G (& microelectronics)*.

4 Ovvero una innovazione tecnica che non introduce nuove funzioni, ma la cui implementazione e messa in opera, anche in combinazione con altre tecnologie, può rivoluzionare gli strumenti e le metodologie fino a quel momento utilizzati. Nel caso in argomento, l'IA costituisce principalmente una fonte di progresso per l'uomo, incrementando capacità intellettive, cognitive e coadiuvandolo in compiti eccessivamente faticosi, complessi e/o routinari, pur tuttavia potrebbe essere causa di potenziali minacce o criticità per la società.

borazione e armonizzazione tecnica dei contenuti delle varie *Call* annuali, relative a ricerca e sviluppo, nell'ambito dello *EUROPEAN DEFENCE FUND* (EDF) gestito dalla Commissione Europea, in particolare l'attività del V Reparto di SGD è stata focalizzata su quelle relative alla RT. I progetti di ricerca che ne derivano e che spaziano dal campo del *Defence medical support/CBRN/Biotech and human factors* al *Simulation and training* (includendovi anche le *disruptive technologies*), sono strategicamente connessi e complementari a quelli lanciati negli altri contesti, soprattutto in riferimento a quello interno, con una prospettiva multi annuale, transnazionale e di portata tecnica molto ampia. Ciò nell'ottica di promuovere quanto più le sinergie e spinte modernizzatrici tra i vari soggetti del settore RT, *in primis* nazionali e quindi europei, pubblici e privati, potenzialmente interessati o coinvolti nella partecipazione alle sopraccitate *Call* EDF, nonché la loro competitività tecnologica, nel quadro di un mercato globale altamente concorrenziale e a forte variabilità. Il rilevante livello di partecipazione e aggiudicazione, da parte di attori italiani della ricerca, alle *Call* EDF finora emanate, apprezzato nel consesso nazionale ed europeo, corrobora le aspettative di positive ricadute per il nostro Sistema Paese, particolarmente in termini di sviluppo delle associate filiere produttive.

Quanto sopra senza mai tralasciare la centrale importanza che il Segretariato Generale della Difesa/DNA attribuisce alle attività di ricerca militare condotte in ambito sovrano nazionale, al fine di soddisfare precisi *gap* tecnologici, prioritariamente attraverso il summenzionato strumento del PNRM, secondo criteri d'indirizzo e presidio di settori di primario interesse, individuati di concerto con lo Stato Maggiore della Difesa, tra i quali possono annoverarsi, senza pretesa d'esser esaustivi, quello del *C2* e *Multi-Domain situation awareness*, delle tecnologie spaziali, *cyber*, dei sistemi autonomi, delle soluzioni di IA, del contrasto alle minacce emergenti, dell'*underwater*, dello *urban warfare*, della sostenibilità, sicurezza e resilienza energetica.

In linea con quanto sopra accennato, degna di nota è l'attenzione che il Segretariato ripone verso le tematiche energetico-ambientali, attraverso la partecipazione del V Reparto di SGD all'iniziativa della Commissione Europea *CONSULTATION FORUM FOR SUSTAINABLE ENERGY IN THE DEFENCE AND SECURITY SECTOR (CF SEDSS)*, attualmente in terza fase, al fine di acquisire e condividere informazioni, conoscenze e *best practice* sul miglioramento della gestione dell'energia, sull'aumento dell'efficienza energetica e delle prestazioni degli edifici, sull'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili nel settore Difesa e Sicurezza e sul potenziamento della resilienza delle infrastrutture energetiche critiche legate a tali comparti.

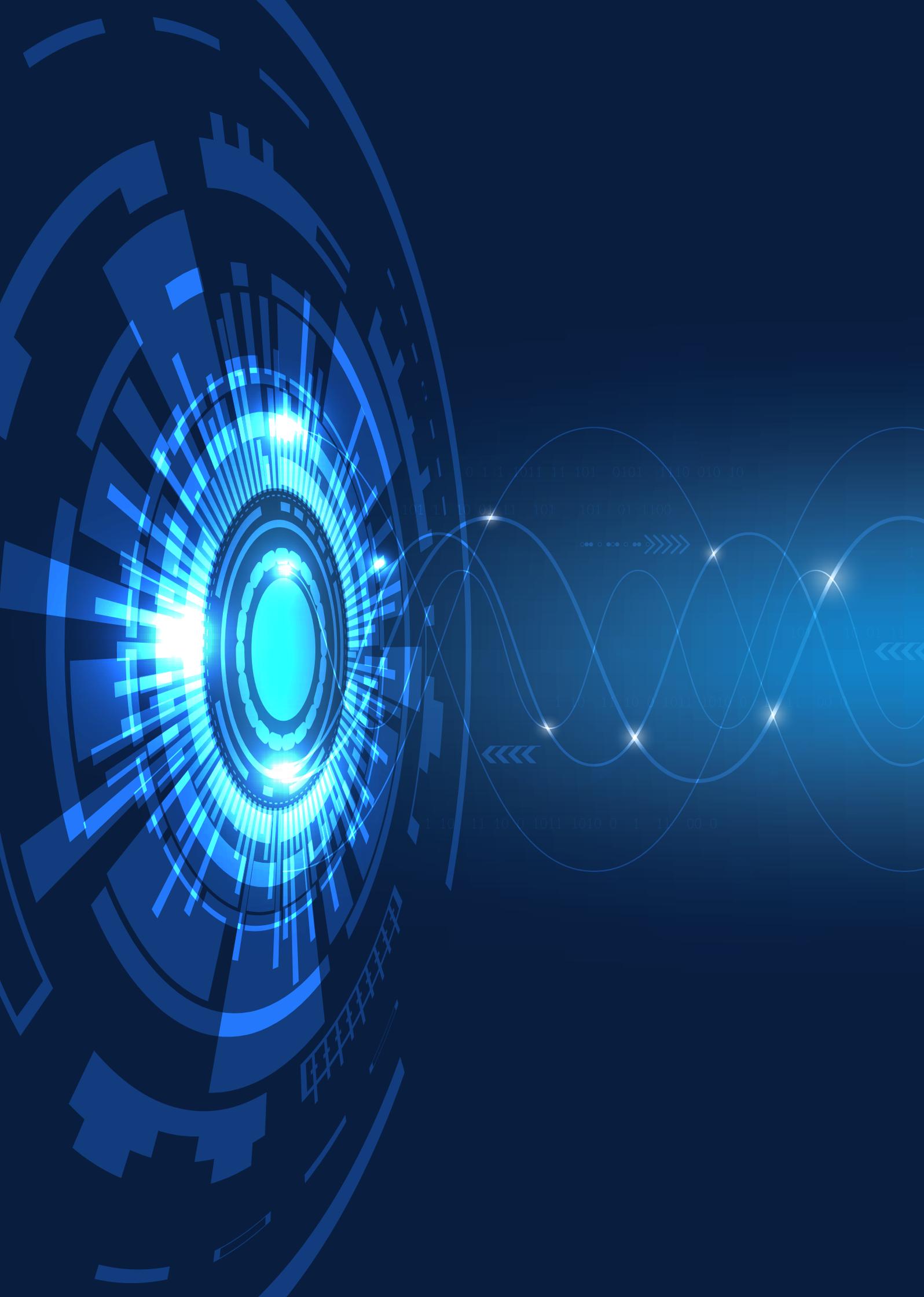
Guardando invece all'innovazione maggiormente sotto l'aspetto metodologico e organizzativo-gestionale, continua e va sempre più a rafforzarsi, in ambito internazionale, nel quadro del mantenimento del vantaggio tecnologico dell'Alleanza Atlantica, il pieno coinvolgimento dell'Italia e del Segretariato Generale della Difesa/DNA nell'iniziativa NATO *DEFENCE INNOVATION ACCELERATOR FOR THE NORTH ATLANTIC (DIANA)*, programma d'accelerazione civile-militare, che prevede dedicati meccanismi e risorse di finanziamento messi a disposizione dai Paesi membri, incentrato sullo studio/sviluppo e sperimentazione (anche con metodiche di lavoro simili o riconducibili alle *challenge* d'ispirazione statunitense) di nuove tecnologie emergenti, all'avanguardia ed aventi forti potenziali ricadute e impatti per il settore difesa e della sicurezza. Riguardo a tale iniziativa, il Segretariato esprime il corrispondente Rappresentante nazionale in seno all'organo direttivo (*DIANA Board of Directors*). Sono parimenti d'interesse e seguiti dal Segretariato gli sviluppi del NATO *INNOVATION FUND*, fondo per l'innovazione a partecipazione volontaria del tipo "*venture capital*" finalizzato a sostenere le *startup* dei Paesi alleati a forte connotazione duale, per le quali si intravedono concrete potenzialità d'applicazione tecnologica nell'ambito difesa e sicurezza. Similmente alla precitata iniziativa NATO DIA-

NA, è giusto segnalare che anche l'EDA ha istituito un *HUB FOR EU DEFENCE INNOVATION (HEDI)*, promosso attraverso la propria rete di *Capability Technology areas/groups* (c.d. "CapTechs"), alla quale partecipano tutti gli Stati membri, con propri rappresentanti della Difesa ed esperti, governativi e non governativi (provenienti dal mondo accademico, industriale, dei centri di RT/test etc.). In tal modo anche il Segretariato Generale della Difesa/DNA ne monitora i rispettivi avanzamenti.

Dal quadro sopra evidenziato, si può chiaramente comprendere come l'insieme delle attività di ricerca tecnologica guidate e coordinate dal Segretariato, sia nazionali che svolte mediante cooperazione internazionale, in un'ottica di continuo proficuo

bilanciamento tra esigenze proprie dello strumento militare nazionale e quelle in vario modo emergenti dal quadro internazionale traguardando i possibili futuri ambiti tecnologici d'interesse strategico, rinsaldi e vada sempre più a rafforzare il fondamentale ruolo del Segretariato Generale della Difesa/DNA, quale imprescindibile riferimento del comparto Difesa (e sicurezza) per la ricerca ed innovazione in tutti i settori ad alto contenuto scientifico-tecnologico, nonché promotore delle potenzialità e capacità tecnologico-industriali del nostro Paese sulla scena internazionale.

**Dirigente Generale
 Dott.ssa Luisa Riccardi**



UNO SGUARDO ALL'ORGANIZZAZIONE



STRUTTURA ORGANIZZATIVA

STRUTTURA ORGANIZZATIVA



LA “RETE” PER LA RICERCA TECNOLOGICA

L'ORGANIZZAZIONE ESTERNA

L'efficacia della strategia di innovazione e ricerca tecnologica operata dal Segretariato Generale/DNA si basa sulla realizzazione e sul costante aggiornamento di una rete di relazioni esterne con elementi ed organizzazioni altamente specializzate

ed eterogenee e che perseguono diversi obiettivi, ma concorrenti in maniera sinergica al conseguimento delle linee di indirizzo della Difesa nel campo dell'innovazione e della ricerca. La rete di relazioni tenute dal Segretario è articolata su 3 cluster di elementi organizzativi:



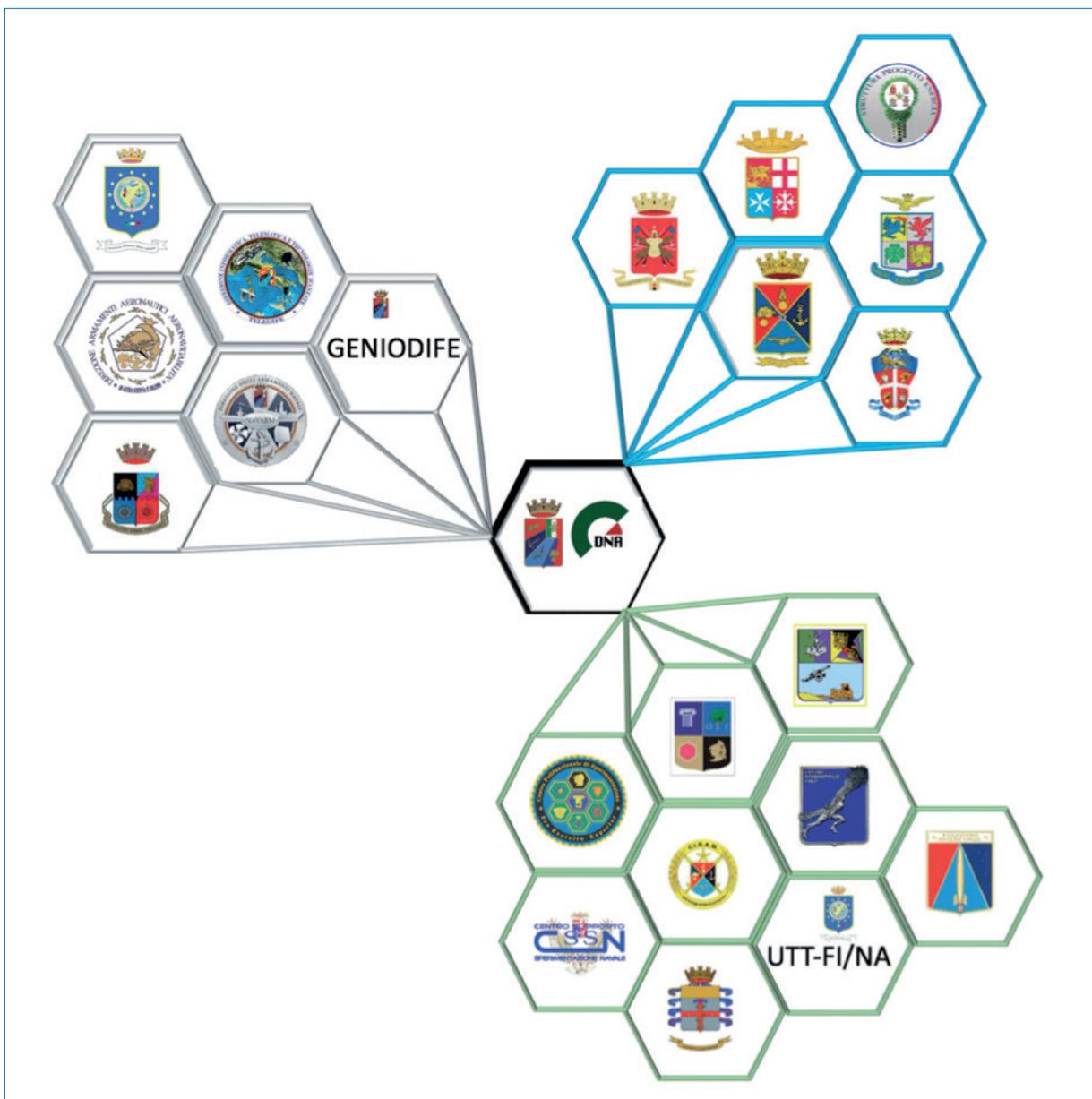
L'ORGANIZZAZIONE INTERNA

Non meno importante, ma al contrario strumento fondamentale per l'individuazione degli obiettivi, la gestione e lo sfruttamento della conoscenza è l'organizzazione interna alla Difesa afferente la ricerca tecnologica che può essere schematizzata anch'essa secondo tre capisaldi:

- lo Stato Maggiore della Difesa e quelli di Forza Armata, orientati ad individuare gli obiettivi ed

a sfruttarne i risultati;

- le Direzioni Tecniche del Segretariato Generale e la Direzione Generale di Commissariato e di Servizi Generali, indispensabili per la competenza tecnica e gestione dei progetti;
- i Centri di Test di FF.AA., banco di prova ideale per la valorizzazione e validazione dei dimostratori tecnologici, obiettivo finale dei programmi di ricerca.



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 capacitivo 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 e Direzione Nazionale degli Armamenti, attraverso 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 condotti 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 tec-

nologica militare, in piena coerenza con le esigenze capacitive della Difesa, includono:

- Protezione e potenziamento delle capacità del soldato: sviluppo di tecnologie per migliorare le capacità individuali e la protezione dei soldati.
- Tecnologie emergenti e disruptive: come la *quantum technology*, i *Big Data*, il 5G/IoT, particolarmente se associate al potenziamento del settore ISR (*Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance*) in ambito terrestre, aereo, marittimo, spaziale e cibernetico.
- Sistemi autonomi, intelligenza artificiale, sicurezza e protezione della navigazione e sviluppo di sensoristica avanzata e comunicazione ottica: focus sull'utilizzo di tecnologie avanzate per sistemi autonomi, intelligenza artificiale, sicurezza della navigazione e sviluppo di sensori e comunicazioni ottiche.
- Capacità satellitari: potenziamento delle prestazioni delle piattaforme, *payload* e sensori per migliorare la qualità e l'efficacia dei servizi spaziali e assicurare la protezione degli assetti in orbita, inclusi i sistemi di comunicazione satellitare, l'osservazione della Terra, il posizionamento, la navigazione e il monitoraggio dello spazio (*Space Situational Awareness - SSA*).
- Armamenti laser o armi ad energia diretta (*Direct Energy Weapons - DEW*): sviluppo di armi ad alta energia come armamenti laser.
- Sicurezza cibernetica e analisi e sfruttamento dei dati: incremento della sicurezza cibernetica e protezione delle infrastrutture critiche attraverso l'utilizzo di tecnologie di analisi e sfruttamento dei dati.
- Tecnologie e capacità a duplice uso della Difesa: come l'accesso allo spazio (*space economy*) e l'*in-orbit servicing*, focalizzandosi sulle tecnologie che permettono l'accesso autonomo e reattivo allo spazio, nonché la manutenzione in orbita dei satelliti.
- Tecnologie per il volo suborbitale ed ipersonico: sviluppo di tecnologie che consentano il volo ad altissima velocità e ad altitudini suborbitali.

- Tecnologie innovative per il settore *underwater*: ricerca, sviluppo, sperimentazione e applicazione di tecnologie avanzate per le piattaforme sommerse, sia *manned* che *unmanned*, coinvolgendo diversi enti e agenzie.
- Tecnologie per piattaforme stratosferiche: sviluppo di tecnologie che consentano l'impiego di piattaforme stratosferiche per attività operative con costi inferiori e maggiore flessibilità rispetto alle tradizionali piattaforme satellitari, anche in collaborazione con altre istituzioni interessate.
- Tecnologie per la sostenibilità energetica e la sicurezza: sviluppo di tecnologie innovative per la realizzazione di *Smart City* e distretti militari energeticamente sostenibili, compresi materiali e tecnologie per la produzione e l'accumulo decentralizzato di energia, garantendo la protezione dalle minacce nel dominio della *energy security* e della *cyber security*.
- Sviluppo/acquisizione di nuove tecnologie e materiali per il supporto dei veterani e delle vittime di traumi fisici connessi al servizio: ricerca

di soluzioni tecnologiche per ridurre gli effetti negativi delle infermità e sostenere coloro che hanno subito menomazioni o traumi fisici durante il servizio.

Questi settori, 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-tecnologici prioritari identificati annualmente con lo Stato Maggiore della Difesa. L'individuazione di tali settori 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 SEGREDIFESA 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.

0 1 1 1011 11 101 0101 1110 010 10

0 01 11 101 101 01 1100



10 01 101 10 10 0 01 101 111 0

1 10 11 10 0 111 1010 0 1 11 00



101 1 10 01 11 101 101 01 1100



1 10 11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0

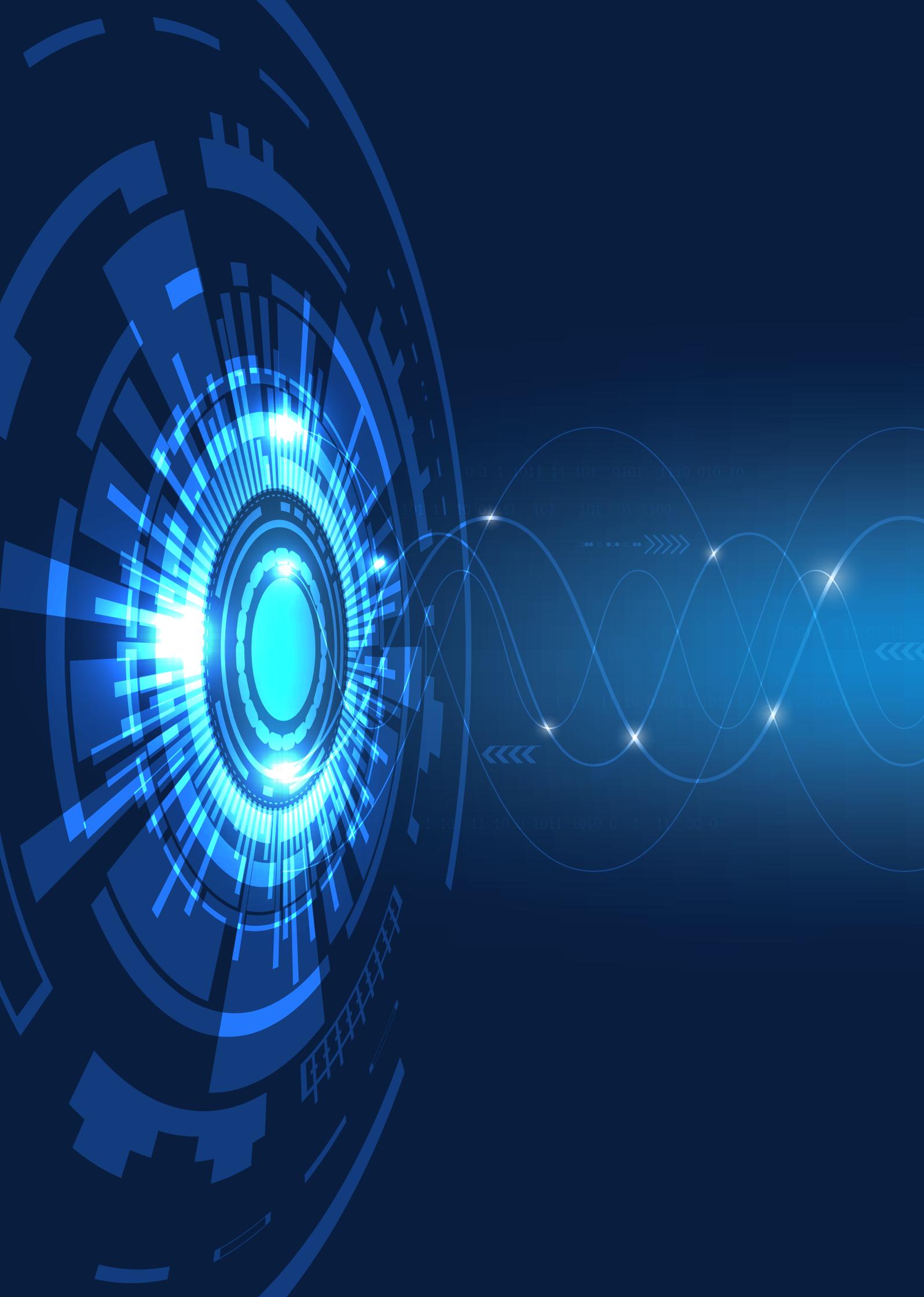


101 1 10 01 11 101 101

1 10 01 010 101 01 101 10 01 00 10 10



11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0



LA RICERCA IN AMBITO NAZIONALE



INTRODUZIONE

Nell'alveo dei programmi di ricerca nazionale condotti dal Segretariato Generale della Difesa e Direzione Nazionale degli Armamenti nel corso del 2022 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 di occultamento acustico per sottomarino (**SUWIMM**)
- Sensori programmabili e modulari per il monitoraggio acustico passivo (**DAMPS**)
- Bersaglio artificiale semovente per la valutazione dei sistemi ASW (**SPARTA**)
- Poligono di tiro mobile navale (**AVNT**)
- Piattaforma prototipica di analisi firmware (**SAFE**)
- Progetti sanitari per la radioprotezione (**iDETEC e Healt Shell**)
- Metamateriale a cambiamento di fase per telecomunicazioni satellitari sicure (**METEORE**)
- Accesso radio avanzato per soluzioni militari (**ARAMIS**)
- Giubbotto antiproiettile (**PBI-G12-EVO**)
- Spettro compresso per il monitoraggio radio e la localizzazione delle emissioni (**zSpectrum**)
- Sistemi di protezione elettromagnetica HERP (**HEPROSYS**)
- Addestramento immersivo e manutenzione a distanza 4.0 per Aeronautica Militare (**AIR4MAM**)
- Sorgenti laser ad alta efficienza e alta potenza utilizzando come mezzi attivi materiali ceramici microstrutturati (**CeMILAP2**)
- Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto (**HERO**)
- Sensori sviluppati per la rivelazione di IED (**MILDAR**)
- *Artificial intelligence* per sciame di drone (**NAIS**)
- Crittografia quantistica su rete (**QUCRYPTNET**)
- Esoscheletro modulare arti inferiori e superiori (**EMArIS**)
- Ricevitore Scanning EW a 6 canali basato su fotonica (**esa-SCAN**)

La potenzialità dei meta-materiali è quella di andare oltre le caratteristiche dei materiali fisici, permettendo di ottenere proprietà vibro-acustiche altrimenti irraggiungibili. Il progetto “SUWIMM - *Submarine UnderWater Invisibility through MetaMaterials*” ha come obiettivo la realizzazione di un prototipo di rivestimento esterno per sottomarini (detto meta-mantello) in grado di guidare il segnale acustico incidente attorno alla forma dello scafo al fine di rendere lo stesso invisibile agli impulsi di sonar attivi, sia monostatici che multistatici.

Nella fase 1 del progetto sono state identificate le caratteristiche del meta-materiale, ne sono state simulate le prestazioni ed è stato realizzato un primo prototipo 2D in scala che è stato testato in acqua con risultati particolarmente incoraggianti. Nella fase 2 del progetto si è passati alla definizione del meta-mantello in 3D, sempre in scala, che ricopre un simulacro di sottomarino, estendendo, al caso 3D, la soluzione ingegnerizzata della fase 1 con la geometria effettiva del sottomarino. Nella fase 3, infine, verrà testato il prototipo di meta-mantello in ambiente subacqueo.

I risultati, già ottenuti nelle prime fasi del progetto, incoraggiano a continuare lo studio, pur essendo noto che, oltre alla riduzione del “*target strength*” prodotto dall’impiego di tale tecnologia, si dovranno successivamente valutare le implicazioni che il meta-mantello ha sullo scafo del sottomarino. Tuttavia, i meta-materiali si candidano pienamente ad assumere l’appellativo di tecnologia “*disruptive*”. Basti pensare ai riverberi che si avrebbero nel mondo della caccia “*ASW*” non appena questa tecnologia diverrà matura.

INTRODUZIONE

La crescente evoluzione tecnologica nel mondo subacqueo, unita all’importanza strategica che assumono le infrastrutture che ivi giacciono, portano ad accrescere l’importanza di un assetto bellico unico per il suo genere: il sottomarino. Quest’ultimo, in una cornice globale in rapida evoluzione, deve, ora più che mai, rispondere adeguatamente alle costanti innovazioni tecnologiche nel campo in cui opera, incrementando le sue capacità di occultamento.

Tuttavia, fino a non molti anni fa, la localizzazione di un bersaglio sottomarino presentava caratteristiche di simmetria, basandosi principalmente sul confronto *one-to-one* nave-sottomarino: la nave (o la piattaforma aerea), dotata di sonar attivo monostatico, riusciva a localizzare il sottomarino nel solo caso in cui quest’ultimo si fosse trovato a portata sonar. In questo contesto, il sottomarino era senza

dubbio in vantaggio, giocando sul *Range Advantage Factor* che limitava il rischio di scoperta, rendendo di secondario interesse considerazioni in merito all’assorbimento dell’energia acustica emessa dai sonar attivi. Con l’avvento dei sonar multistatici, i fattori di vantaggio dei sottomarini si sono drasticamente abbattuti: la capacità di localizzazione da parte delle navi aumenta considerevolmente, limitando la capacità del sottomarino di operare in maniera occulta. Inoltre, anche il semplice assorbimento dell’energia acustica incidente sul sottomarino, diviene non più sufficiente per evadere dai moderni sonar multistatici, in quanto, anche drastiche riduzioni del segnale in arrivo al ricevitore, vengono considerate anomalie da investigare.

Dunque, il requisito ricercato dai moderni sottomarini diviene la trasparenza acustica in mare, obiettivo a cui tende proprio il PNRM (Piano Nazionale di Ricerca Militare) SUWIMM.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

La soluzione tecnologica individuata dal Politecnico di Milano consiste nel rivestire il sottomarino con un mantello acustico in grado di rendere perfettamente invisibile ciò che sta al suo interno nei confronti di un'onda di pressione acustica, realizzando quello che la comunità scientifica chiama *acoustic cloak* [1]. Questo implica che la copertura costituita dal mantello debba essere in grado di eliminare contemporaneamente le riflessioni dell'onda incidente (*backward scattering*) e l'ombra formata a valle dell'oggetto nascosto all'interno del mantello stesso (*forward scattering*).

Il progetto prende spunto dallo stato dell'arte della tecnologia sui meta-materiali in cui, sostanzialmente, la comunità scientifica appropria il problema dell'invisibilità acustica in due differenti modi: uno basato sull'*inertial cloak* [2] [3] e uno basato sul *pentamode material* [4]. Entrambi, concepiti come dimostratori del principio fisico, hanno portato a realizzazioni dove sono presenti vincoli allo spessore del mantello e alle lunghezze d'onda coinvolte che, essendo anche svariate volte più piccole della dimensione caratteristica del bersaglio da occultare, rimangono lontane da realizzazioni interessanti per possibili applicazioni reali.

SUWIMM ha l'ambizione di colmare questo *gap*, studiando la soluzione basata su *pentamode materials*, che risulta la più promettente, perché evita il problema della massa infinita che si avrebbe con l'approccio basato sull'*inertial cloak*. Nonostante ciò, la massa totale del mantello, nel caso di *pentamode cloak* perfetto, è uguale alla massa della regione di fluido che occuperebbe il volume totale del sottomarino più mantello. Questo comporterebbe l'impossibilità del galleggiamento e, dunque, anche adottando questa soluzione, si sono sviluppate strategie per ridurre il peso totale del mantello a fronte di una riduzione delle *performance* [5].

METODOLOGIA

In figura 1 viene mostrata la trasformazione necessaria al fine di rendere acusticamente invisibile un oggetto. La progettazione di un mantello di invisibilità che lavori nel modo illustrato si traduce quindi in un problema di *design* inverso: è noto il comportamento del materiale che si vuole ottenere e bisogna trovare le proprietà fisiche del materiale che corrispondono a tali specifiche (inomogeneità, anisotropia e *matching* di impedenza). In buona sostanza, va ingegnerizzato un meta-materiale in grado di deviare i raggi acustici: nella direzione radiale, i raggi devono subire una contrazione rispetto alla regione originaria senza sottomarino e devono ora percorrere, nello stesso tempo, traiettorie più corte. Al contrario, in direzione circonferenziale, i raggi che originariamente dovevano percorrere traiettorie rettilinee, devono ora percorrere, nello stesso tempo, traiettorie più lunghe e, di conseguenza, sarà necessaria un'estensione dello spazio. Si deduce quindi che il materiale di cui è composto il mantello, deve possedere una velocità di propagazione maggiore di quella del fluido in direzione circonferenziale, mentre una velocità di propagazione minore in direzione radiale [6].

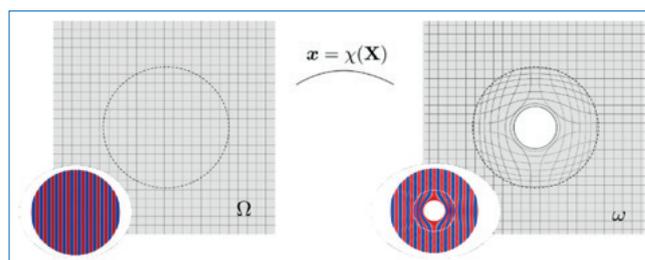


Figura 1: trasformazione acustica da realizzare

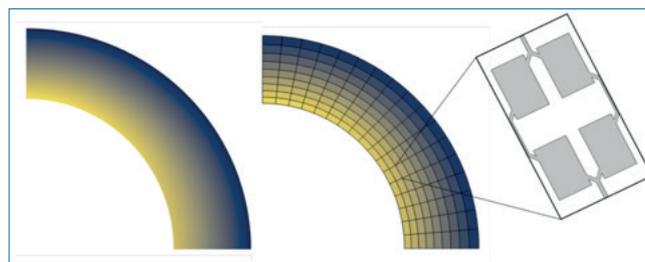


Figura 2: ingegnerizzazione delle celle elementari del meta-mantello

Nella fase 1 del progetto, non solo sono state simulate le prestazioni del meta-mantello in 2D (sezione ellittica), progettando le celle elementari (figura 2), ma sono stati eseguiti anche i test in vasca delle reali prestazioni del meta-mantello 2D prodotto, confrontando il *target strength* (grandezza che esprime la quantità di energia diffusa in tutte le direzioni dall'oggetto immerso in acqua) della sezione di sottomarino nel caso "senza mantello", "con mantello" e nel caso di sottomarino a "diametro ridotto" (figura 3). I risultati sono stati estremamente incoraggianti: il mantello ha ridotto l'energia diffusa dalla sezione di sottomarino, rendendolo acusticamente più piccolo, di fatto abbattendo "l'impronta" di un sottomarino convenzionale fino a farla divenire quella di un *Underwater Unmanned Vehicle* (figura 4) Nella fase 2 l'ambizione del progetto cresce por-

tando lo studio sul modello 3D in scala, sia a livello di progettazione ingegneristica (figura 5) che di realizzazione fisica. Nella fase 3 verranno nuovamente testate in acqua le proprietà acustiche del prototipo di meta-mantello 3D.

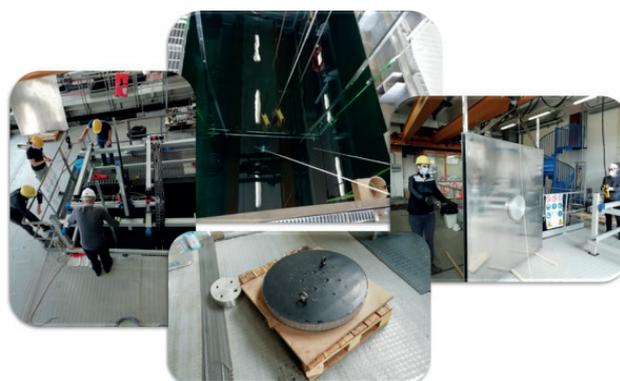


Figura 3: test in vasca di misura del Target Strength del prototipo di meta-mantello 2D

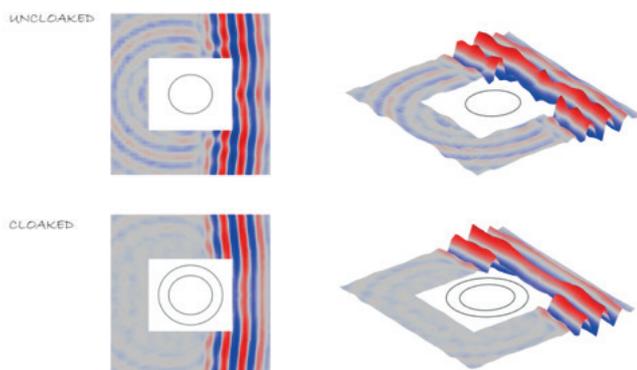


Figura 4: confronto delle misure reali di backscattering e forward scattering della sezione senza e con meta-mantello

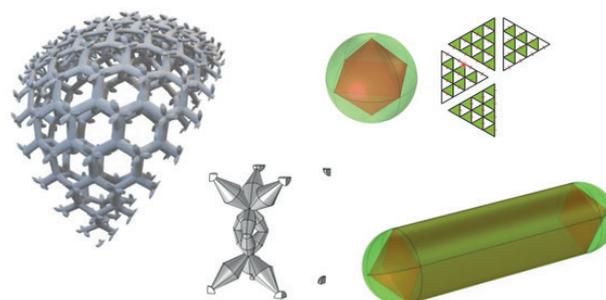


Figura 5: fase di ingegnerizzazione del mantello 3D

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

I risultati già ottenuti dal progetto dimostrano che la strada intrapresa risulta promettente e incoraggia a continuare lo studio per verificare l'effettiva efficacia anche del modello 3D. Tuttavia, a programma ultimato, si conoscerà l'effettiva riduzione del *target strength* prodotto dall'impiego di tale tecnologia.

L'applicazione di tale soluzione porterà un nuovo *disruptive concept* del sottomarino e dovrà necessariamente essere tenuta in considerazione sin dalle prime fasi dello sviluppo del progetto per le impli-

cazioni sulla piattaforma e sul sistema di combattimento connesse con l'adozione del meta-mantello. Le ricadute di questa tecnologia all'avanguardia, oltre che su tutto l'indotto di costruzione cantieristica navale militare, sarebbero dirompenti anche in altri contesti. Basti pensare che, ad oggi, nel panorama mondiale, non sono noti cantieri in grado di produrre meta-mantelli subacquei e di conseguenza essere i precursori, oltre a dare immagine di eccellenza della ricerca nazionale, costituirebbe un importante nuovo "tassello" a sostegno del "Polo Nazionale della Subacquea" che nasce, per l'appunto, con lo scopo di valorizzare, implemen-

tare e promuovere le potenzialità e la competitività del nostro Paese nel mondo subacqueo. Il progetto SUWIMM e le sue potenzialità sono quindi una ulteriore testimonianza che, l'interesse di ciò che avviene sott'acqua, costituisce un significativo impulso che rende l'Italia una delle nazioni più sviluppate a livello mondiale nel campo di ricerca delle emergenti tecnologie industriali nel settore *underwater*.

CONCLUSIONI

Nel prossimo futuro, l'impiego dei meta-materiali per scopi connessi alla riduzione del *target strength*, potrà giocare un ruolo fondamentale per determinare la supremazia di una nazione in un campo, quello *underwater*, con le sue infrastrutture strategiche, che cresce di importanza giorno dopo giorno. Questa tecnologia, destinata non

solo per applicazioni legate al *cloaking* acustico, ma anche, ad esempio, alla focalizzazione delle onde di pressione per generare proiettori acustici di nuova generazione, assume valenza tale da meritarsi l'appellativo di "*disruptive*". Basti pensare a ciò che potrebbe essere il futuro della lotta ASW. Laddove una nazione riuscisse a realizzare il primo sottomarino acusticamente invisibile, verrebbero a decadere, contestualmente, tutti gli studi, le tattiche, gli investimenti fatti per realizzare sistemi subacquei di tipo bi-multistatico volti proprio a massimizzare le capacità di scoperta e tracciamento delle diffusioni di energia acustica prodotte dai sottomarini avversari. Il mondo della caccia ASW dovrà essere in quel momento rivalutato e ripensato interamente.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

2D	<i>bi-dimensionale</i>
3D	<i>tri-dimensionale</i>
ASW	<i>AntiSubmarine Warfare</i>
PNRM	<i>Piano Nazionale di Ricerca Militare</i>
SUWIMM	<i>Submarine UnderWater Invisibility through MetaMaterials</i>

PAROLE CHIAVE

Sottomarini, Sommergibili, Underwater, SSK, Meta-Materiali, *Acoustic Cloak*, *Target Strength*, *pentamode materials*

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.096
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali - NAVARM
Ente responsabile del progetto:	NAVARM – 3 ^a Divisione.
Città, Regione:	Roma
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 simone.lariviera@marina.difesa.it

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. N. Norris, “Acoustic cloaking”, *Acoustics Today*, 11(1), pp. 38-46, 2015.
- [2] D. Torrent e J. Sanchez-Dehesa, “Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach”, *New Journal of Physics* 10.6: 063015, 2008.
- [3] J. B. Pendy e J. Li, “An acoustic metafluid: realizing a broadband acoustic cloak”, *New Journal of Physics* 10.11: 115032, 2008.
- [4] G. W. Milton e A. V. Cherkaev, “Which elasticity tensors are realizable?” pp. 483-493, 1995.
- [5] Davide Enrico Quadrelli, Matteo Alessandro Casieri, Gabriele Cazzulani, Francesco Braghin “Experimental validation of a broadband pentamode elliptical-shaped cloak for underwater acoustics”, Elsevier, *Extreme Mechanics Letters*, 2021.
- [6] Davide Enrico Quadrelli, Gabriele Cazzulani, Francesco Braghin, “Acoustic scattering reduction of elliptical targets via pentamode near-cloaking based on transformation acoustics in elliptic coordinates”, Elsevier, *Journal of Sound and Vibration*, 2021.

Il progetto Distributed Autonomous Mobile Passive System si pone l'obiettivo di progettare, modificare e valutare l'impiego di sensori programmabili e modulari per il monitoraggio acustico passivo (da intendersi anche come componente ricevitore di un sistema multistatico), valutando il coordinamento delle risorse e delle capacità tra più veicoli autonomi per conseguire gli obiettivi prefissati. Data la potenziale elevata mole d'informazioni da sincronizzare e valutare per consentire decisioni rapide a livello centralizzato, il progetto ha l'obiettivo di sviluppare logiche automatiche di analisi nella specifica piattaforma periferica, incrementandone la modularità, potenziandone la versatilità operativa, ottimizzandone i costi nel lifecycle. Inoltre, il progetto ha anche l'obiettivo di studiare protocolli covert di comunicazione subacquea su rete sicura, scambio dati tra più unità in ambiente di acque basse e confinate, con elevato rumore ambientale, in generale garantendo le caratteristiche di robustezza, sicurezza, adattività e interoperabilità della rete di sistemi. Partendo dalla già esistente capacità di navigazione subacquea autonoma, si svilupperanno sistemi di detezione distribuita, in grado di operare in molteplici scenari di applicazione, basati su elaborazione locale e fusione dati con infrastruttura di comunicazione subacquea adattiva, sicura, non rilevabile.

INTRODUZIONE

Il progetto DAMPS (Distributed Autonomous Mobile Passive Sonar system) nasce con lo scopo di studiare e realizzare un sonar distribuito implementato mediante un sistema volumetrico a geometria adattiva che operi la fusione dei dati di sensori eterogenei per il Passive Acoustic Monitoring (PAM) gestibili da una squadra di veicoli subacquei autonomi (AUV). Il sistema prevede che ciascun AUV, localmente e autonomamente, sia in grado di elaborare il segnale del proprio PAM stimando le direzioni di arrivo (Direction of Arrival o DoA) del segnale utile.

Il sistema di sistemi progettato prevede sei veicoli con sensori per PAM e due veicoli che avranno funzioni di boa mobile gateway. I veicoli coinvolti trasmettono tra loro solo i risultati delle elaborazioni locali: un algoritmo di consenso sarà eseguito automaticamente grazie all'infrastruttura di comunicazione della squadra e, qualora venga individuato un target, sarà dato il consenso per riportarlo al comando e controllo (che sarà una stazione manned posizionata a bordo mothership o a terra, aspetto

indifferente per l'architettura modulare del sistema). L'algoritmo di consenso è eseguito in DAMPS con una rete di comunicazione subacquea i cui segnali saranno a bassa potenza e sicuri.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

La localizzazione di sorgenti acustiche subacquee viene utilizzata in molte applicazioni subacquee come il monitoraggio di mammiferi marini, operazioni di ricerca e salvataggio, sorveglianza tattica di esplorazione off-shore, raccolta di dati oceanografici e monitoraggio dell'inquinamento. La localizzazione subacquea di una sorgente di rumore è un compito impegnativo a causa dei vincoli tecnologici e ambientali. I sensori acustici devono inevitabilmente affrontare un'attenuazione imprevedibile e dipendente dalla frequenza, effetti multipath variabili nel tempo, ampi spread Doppler, ritardi finiti e larghezza di banda limitata. I sistemi acustici subacquei esistenti per la localizzazione della sorgente si basano su sensori PAM (Passive Acoustic Monitoring) che possono fornire il rilevamento

della sorgente, ma non la distanza. Combinando le misure provenienti da più sensori collocati in luoghi diversi è possibile stimare la posizione della sorgente acustica.

I sistemi multi-robot sono solitamente impiegati in questo tipo di applicazioni e, poiché il livello di maturità tecnologica degli Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) sta diventando sempre maggiore negli ultimi anni, con una capacità nazionale di eccellenza sui sistemi robotici in rete, DAMPS affronta lo sviluppo di un sistema multi-robot per il tracciamento della posizione della sorgente di rumore in ambiente subacqueo. È stato proposto come un sistema sonar passivo, distribuito e riconfigurabile, composto da un team di AUV e sistemi di rilevamento distribuiti.

METODOLOGIA

Il sistema DAMPS è composto da un team di AUV che collaborano per localizzare un bersaglio in ambiente subacqueo. Il sistema funziona nel seguente

modo: ogni AUV che compone il team elabora localmente il segnale proveniente dal proprio sensore PAM, rileva un potenziale bersaglio e condivide le informazioni elaborate localmente attraverso il sistema di comunicazione con gli altri membri del team, inizializzando un algoritmo che permette di fondere i dati. Questa combinazione di processo decisionale locale e cooperazione autonoma nella fusione dei dati termina con la trasmissione della posizione target stimata a una stazione remota, dove un operatore umano può integrare tali informazioni e riconfigurare il sistema o altri potenziali asset. L'architettura del sistema (Figura 1) è composta dai seguenti componenti:

- architettura AUV;
- sistema di comunicazione;
- Sistema di comando e controllo (C&C nel seguito);
- sistema di navigazione, guida e gestione della missione;
- sistema sonar.

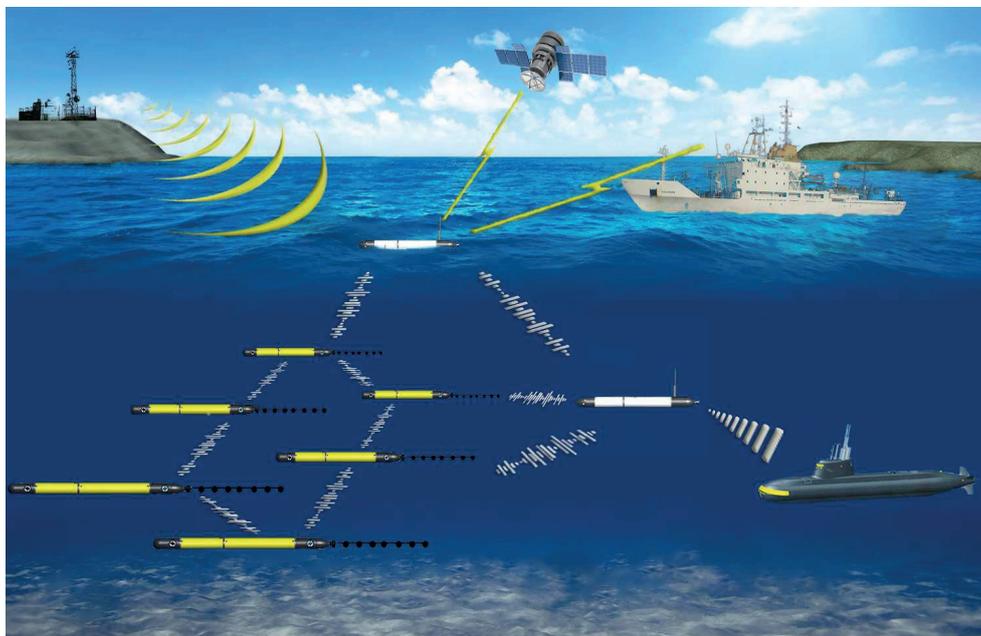


Figura 1 – Architettura del Sistema DAMPS

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

I possibili scenari applicativi in cui il sistema DAMPS sarà validato includono operazioni ASW (Anti-Submarine Warfare) e monitoraggio passivo dei mammiferi marini.

Dato che le caratteristiche degli scenari generici in termini di range e frequenze sono ampie, tutte le scelte tecniche saranno meglio specificate in funzione dei sensori PAM, dei sistemi di comunicazione e localizzazione e della relativa influenza

reciproca in termini di prestazioni. Per quanto riguarda gli specifici scenari applicativi, è possibile identificare (Figura 2):

- Hold at risk (a);
- Scudo marino (b);
- Monitoraggio dei mammiferi (c).

Il sistema è progettato per essere flessibile ed estensibile.

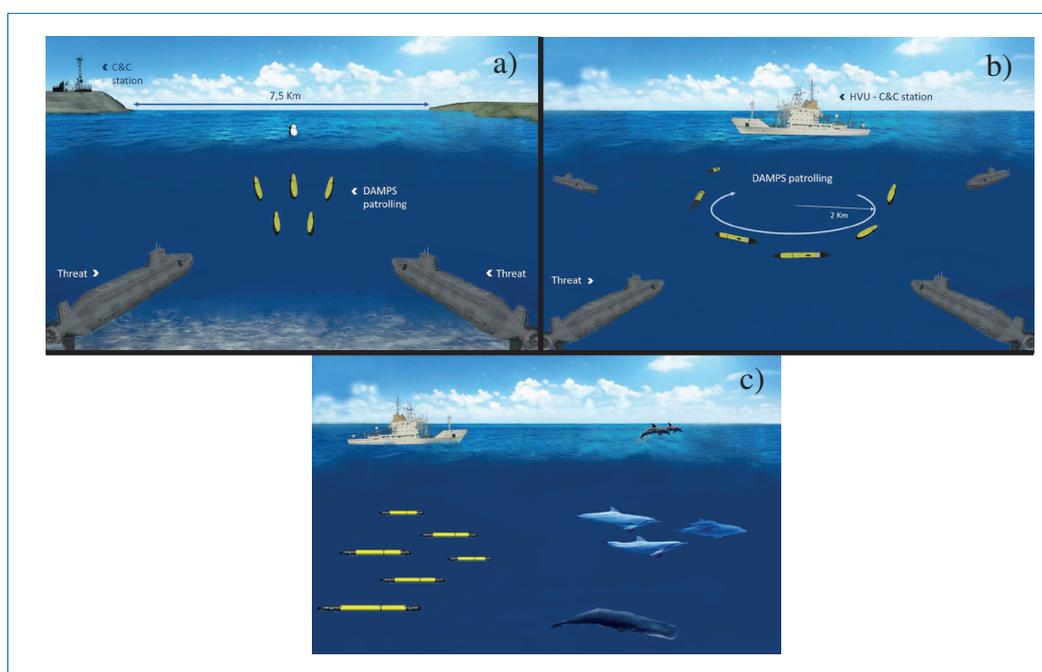


Figura 2 – Scenari applicativi: Hold at risk (a), Scudo marino (b), Monitoraggio dei mammiferi (c)

CONCLUSIONI

Il progetto DAMPS riguarda lo sviluppo di un sistema multi-robot per il tracciamento della posizione di sorgenti di rumore in ambiente subacqueo. I robot che compongono il team collaborano per fondere le informazioni locali provenienti dall'analisi di un sensore di monitoraggio acustico passivo, con l'obiettivo finale di stimare la posizione di una sorgente acustica. Il team multi-robot è quindi un sistema sonar distribuito, modulare e riconfigurabile

che può essere controllato a distanza da un centro di controllo e comando. Il sistema è stato progettato e testato mediante simulazioni ed emulazioni, con primi test in mare di sottocomponenti. Le attività future previste in possibili futuri lotti riguarderanno l'implementazione di tutti i sottomoduli, l'integrazione e la validazione dell'intero sistema di sistemi in uno scenario realistico in mare.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>PAM</i>	Passive Acoustic Monitoring
<i>AUV</i>	Autonomous Underwater Vehicles
<i>DoA</i>	Direction of Arrival
<i>FFAA</i>	Forze Armate
<i>SGD</i>	Segretariato Generale della Difesa

PAROLE CHIAVE

underwater acoustic source localization, acoustic communication, multi-robot control

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.165
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	Wsense Srl capofila ATS
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Chiara Petrioli
Recapiti del responsabile del progetto:	3318610153
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+393318610153
E-mail del responsabile del progetto:	chiara.petrioli@wsense.it
Titolo e nome del responsabile scientifico del progetto:	Prof. Giovanni Indiveri, Direttore ISME
Recapiti del responsabile del progetto:	ISME c/o DIBRIS UNIGE, via all'Opera Pia 13, 16145 Genova
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 010 33 52799
E-mail del responsabile scientifico del progetto:	giovanni.indiveri@unige.it

BIBLIOGRAFIA

Benedetto Allotta, Gianluca Antonelli, Antonino Bongiovanni, Andrea Caiti, Riccardo Costanzi, Daniela De Palma, Paolo Di Lillo, Matteo Franchi, Petrika Gjanci, Giovanni Indiveri, Chiara Petrioli, Alessandro Ridolfi, and Enrico Simetti, Underwater acoustic source localization using a multi-robot system: the DAMPS project, Proceedings of the IEEE 2021 International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea 2021), Reggio Calabria, Italy, 4th - 6th Oct. 2021, pp. 388-393;

DOI: 0.1109/MetroSea52177.2021.9611595.

<https://doi.org/10.1109/MetroSea52177.2021.9611595>

L'entrata in servizio dei sistemi Sonar di ultima generazione ha reso obsoleti i bersagli tradizionalmente utilizzati per l'addestramento alla guerra antisommergibile. A questo si aggiunge l'indisponibilità di bersagli rappresentativi per la valutazione del comportamento in mare di siluri con elevate capacità anticontromisure. Attualmente l'addestramento può essere eseguito con forti limitazioni logistiche solo utilizzando bersagli reali o veicoli autonomi di grandi dimensioni. L'obiettivo dello studio è quello di valutare soluzioni innovative di sistemi di propulsione, controllo di assetto e trattamento del segnale acustico per la realizzazione di bersagli sonar e siluro con limitate esigenze logistiche e capaci di eseguire missioni di lunga durata. Lo studio è stato eseguito selezionando le tecnologie più promettenti per la realizzazione di un sistema di propulsione e controllo di assetto integrato e le modalità di trattamento di segnale acustico applicabili a veicoli di piccole dimensioni. Tramite l'esecuzione di prove a banco e a mare si sono evidenziate le capacità del bersaglio di eseguire missioni di lunga durata anche alle velocità di crociera di un sommergibile e di generare eco e segnatura acustica proprie di un sommergibile reale.

INTRODUZIONE

I Sonar di nuova generazione richiedono la disponibilità di bersagli per addestramento equipaggiati con sistemi acustici a frequenza più bassa e Source Level più elevato rispetto ai bersagli in commercio e capaci di eseguire missioni di più lunga durata dovendo coprire distanze maggiori. Solo i bersagli reali o veicoli autonomi di grandi dimensioni sono attualmente in grado di svolgere queste funzioni. La disponibilità di bersagli costituiti di veicoli autonomi di piccola dimensione e senza esigenze particolari di messa a mare e recupero consentirebbe alle piattaforme su cui sono installati i sistemi Sonar di eseguire l'addestramento in piena autonomia. I veicoli autonomi di piccola dimensione attualmente disponibili non possono essere impiegati come bersagli validi per le velocità di navigazione troppo basse, la limitata autonomia e la difficoltà di integrare un sistema acustico con elevata sensibilità di ricezione nelle bande di interesse di Sonar e Teste Acustiche di siluri. Lo studio è stato quindi indirizzato in due direzioni principali, il sistema di propulsione e il generatore di eco e segnatura acustica. Tra le soluzioni possibili si è data priorità allo studio delle tecnologie che permettono la mi-

nimizzazione dei costi di produzione e di esigenze di manutenzione.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

I veicoli subacquei autonomi si distinguono in due grandi famiglie, veicoli destinati a monitoraggio in bassa velocità il cui controllo di assetto è basato su thrusters e veicoli destinati a operazioni specifiche in velocità, il cui controllo di assetto è realizzato mediante timoni. Un bersaglio Sonar rappresentativo deve essere in grado di navigare sia a velocità basse, al di sotto dei 4 nodi, che alte, almeno fino a 15 nodi. Per raggiungere l'obiettivo di mantenere dimensioni limitate e minimizzare le esigenze di manutenzione, è stata individuata una soluzione innovativa che prevede di integrare il controllo di assetto con il sistema di propulsione, utilizzando quattro motori disposti nella zona posteriore del veicolo, come illustrato in Figura 1.

Il controllo di assetto sui piani orizzontale e verticale è realizzato regolando la differenza di spinta dei quattro motori, che provvedono anche a regolare la velocità di navigazione. In questa configurazione tutti i componenti in movimento sono

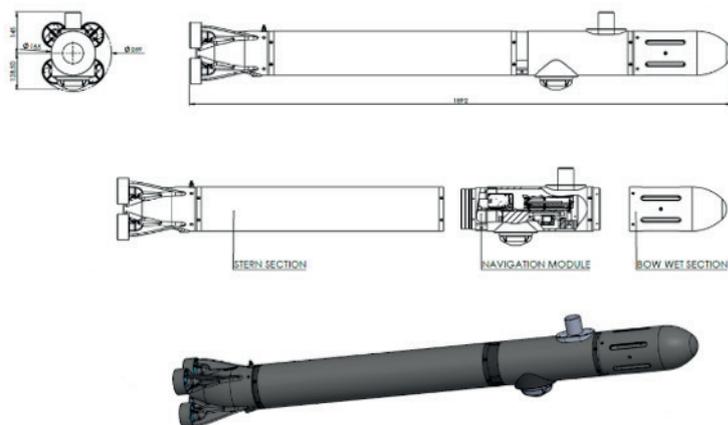


Figura 1 - Configurazione scelta degli organi di propulsione e controllo di assetto; il veicolo è composto di tre sezioni, la sezione di poppa (stern section) che contiene i sistemi di propulsione e controllo di assetto, la sezione centrale (Navigation Module) che comprende i sensori di navigazione e la sezione anteriore (Bow Wet Section) che contiene il modulo acustico.

esterni e facilmente accessibili senza la necessità di smontare il veicolo.

Un'altra conseguenza della necessità di mantenere limitate le dimensioni del veicolo è la ridotta tensione di alimentazione che presenta due aspetti critici. Da una parte, i regimi di corrente e di conseguenza la rumorosità elettronica sono elevati e dall'altra l'emissione di Source Level elevati a bassa frequenza richiede l'integrazione di trasformatori di grandi dimensioni. Le misure adottate per ridurre queste criticità sono state quella di utilizzare trasduttori separati per la ricezione e la trasmissione, selezionare un trasduttore di trasmissione che non richiede circuiti di accordo e realizzare una catena di ricezione unica a larga banda per coprire con continuità la banda dalla minima alla massima frequenza di utilizzo con una dinamica molto ampia. Questo permette di selezionare con precisione il segnale utile per generare l'eco.

METODOLOGIA

Lo studio è stato effettuato sulla base di simulazioni numeriche e prove di singoli componenti per dimostrare l'adeguatezza delle scelte effettuate. Prove finali a mare di un prototipo hanno permesso di valutare il comportamento di sistema.

La capacità del sistema di propulsione di spingere il veicolo alle velocità richieste dall'applicazione è stata dimostrata tramite prove in vasca. Il veicolo

è stato trattenuto tramite una fune su cui era connessa una bilancia per la misura della spinta, come rappresentato in Figura 2.

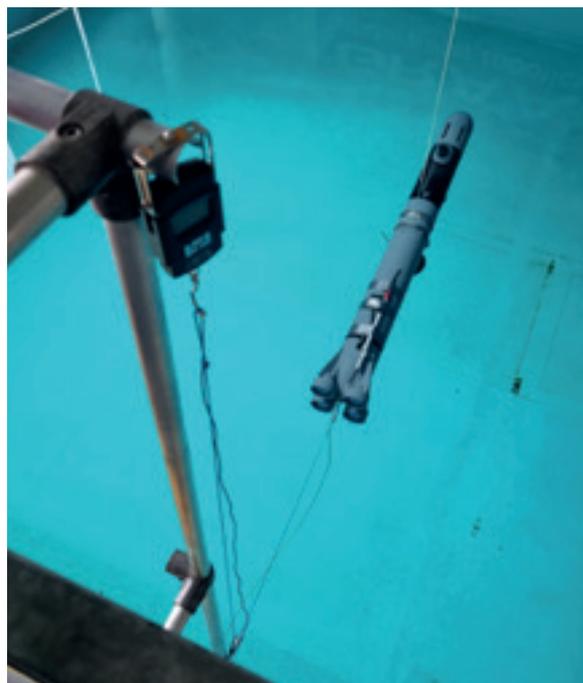


Figura 2 - Set up di misura della spinta del sistema di propulsione.

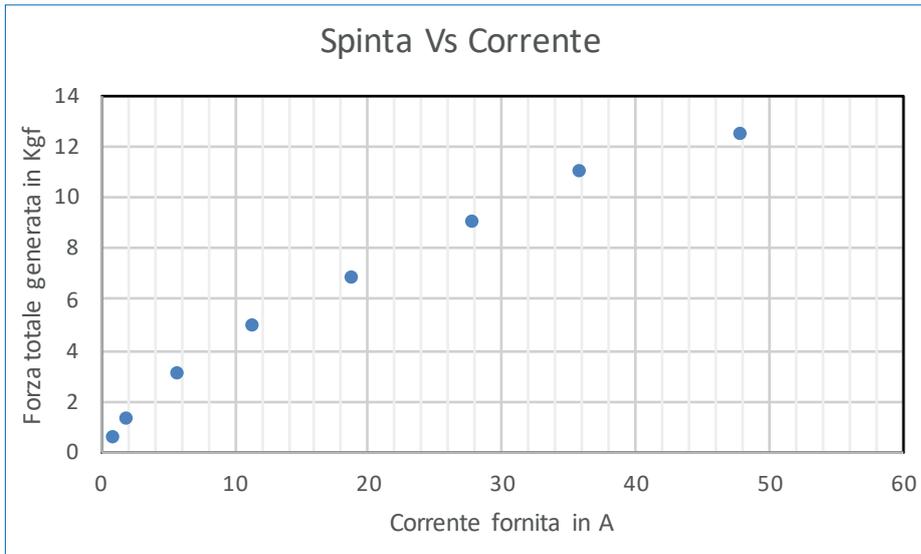


Tabella 1 - Valori misurati di spinta e corrente di alimentazione del sistema di propulsione.

Il sistema di propulsione è in grado di fornire una spinta di 130 N (o 13 kgf) come illustrato nella Tabella 1.

Questo valore di spinta corrisponde ad una velocità di navigazione di 10 nodi.

Il sistema di propulsione è alimentato da una batteria appositamente progettata per fornire 1425

Wh di capacità a 50 A. Il progetto della batteria ha compreso anche lo studio di un caricabatteria che minimizzasse i tempi di carica in modo da consentire operazioni ripetute con minimi tempi di attesa. La carica completa può essere effettuata in meno di un'ora a veicolo assemato, come rappresentato in Figura 3.

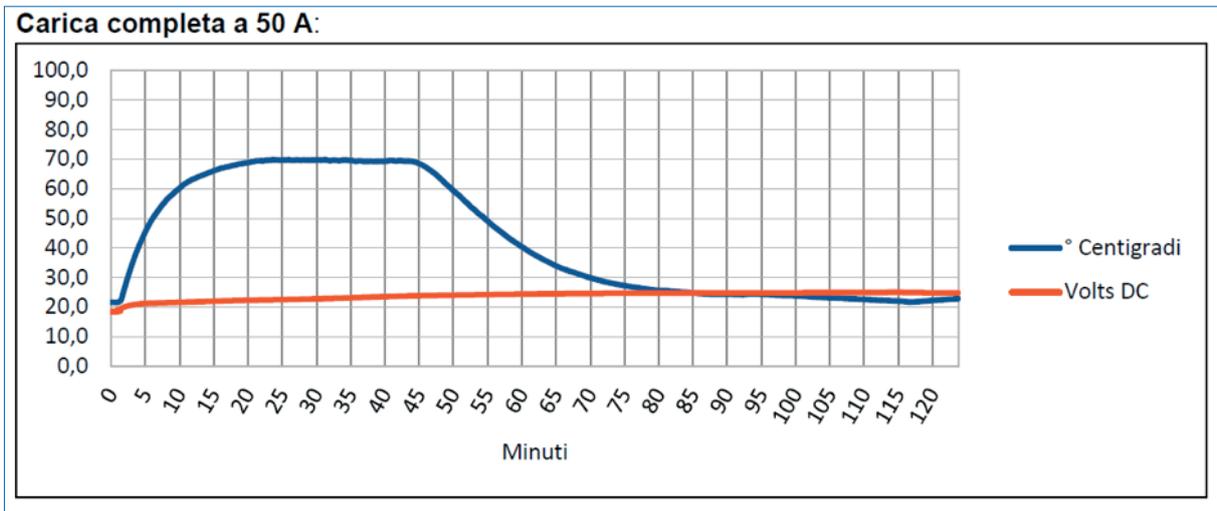


Figura 3 - Curva di carica completa della batteria; il completamento della carica è evidenziato dalla riduzione della temperatura dopo 45 minuti

Il controllo di assetto è stato realizzato con due regolatori PID separati sul piano orizzontale e verticale. Le uscite dei regolatori sono trasformate nel-

le spinte dei quattro motori, secondo lo schema di principio di Figura 4.

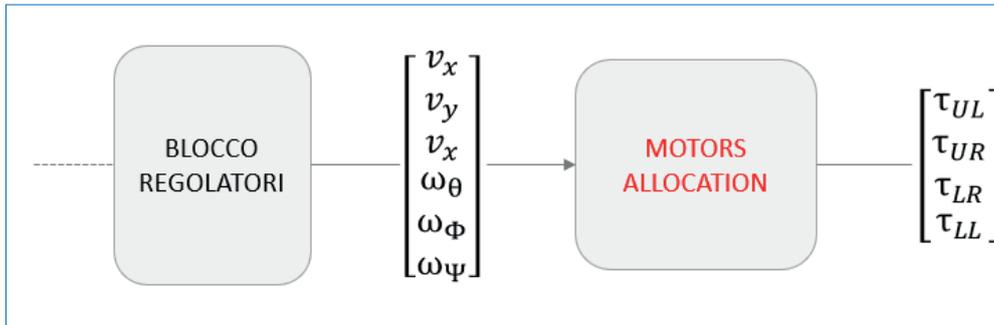


Figura 4 - Schema di principio del controllo di assetto: i due errori di imbardata e beccheggio sono trattati da due regolatori PID separati (Blocco Regolatori); la matrice di velocità lineari e angolari all'uscita dei regolatori viene inviata al modulo Motors Allocation che calcola le spinte dei quattro motori tenendo conto del posizionamento ed orientamento di ognuno di essi .

I guadagni proporzionale, integrale e derivativo dei due regolatori PID sono stati messi a punto tramite simulazioni e verificati nelle prove a mare.

Il modulo acustico deve ricevere un'emissione Sonar da una distanza minima di 1000 m ad una distanza massima di 80 km ed una emissione siluro da una distanza di 3500 m fino a meno di 50 m. Il ricevitore del segnale deve quindi avere una dinamica maggiore di 160 dB. Questa dinamica è stata distribuita tra un amplificatore di ricezione a guadagno variabile tra 25 e 85 dB con una frequenza minima di 10 Hz ed una massima di 120 kHz ed

un convertitore analogico digitale a 18 bit, per una dinamica complessiva di 200 dB. Il rumore elettronico in ingresso dell'amplificatore è stato misurato a banco pari a 0,38 inferiore al rumore ambientale con mare forza 0. L'elettronica di processo esegue il riconoscimento dell'emissione Sonar e siluro e pilota il generatore di segnali, a singolo highlight per l'emissione Sonar e multi-highlight per i siluro in maniera coerente con il tipo di bersaglio che si intende emulare. Lo schema della sezione acustica è riportato in Figura 5.

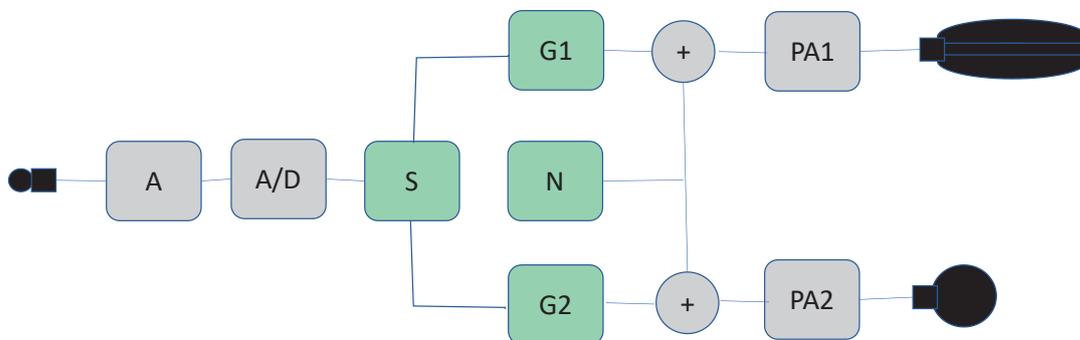


Figura 5 - Schema del modulo acustico: l'amplificatore a guadagno variabile (A) ed il convertitore A/D costituiscono la sezione di ricezione con dinamica di 200 dB nell'intera banda 50 Hz – 120 kHz; il software provvede al processo segnali (S), alla generazione di eco, a singolo highlight per il Sonar (G1) nella banda 100 Hz – 16 kHz e multi-highlight per il siluro (G2) nella banda 16 kHz – 35 kHz, ed alla generazione della segnatura di rumore realizzata con un unico generatore in modo da garantire la correlazione tra le frequenze; i segnali costituiti dalla somma dell'eco e della segnatura sono inviati ai due amplificatori di potenza (PA1 e PA2) ed ai proiettori omnidirezionali, capaci di generare 160 dB di Source Level.

Una volta caratterizzati i singoli componenti, sono state effettuate prove a mare per valutare le prestazioni in navigazione tramite manovre separate e

combinata sui piani orizzontale e verticale a diverse velocità tra 2 e 7 nodi, ottenendo risultati positivi come mostra l'esempio di Figura 6.

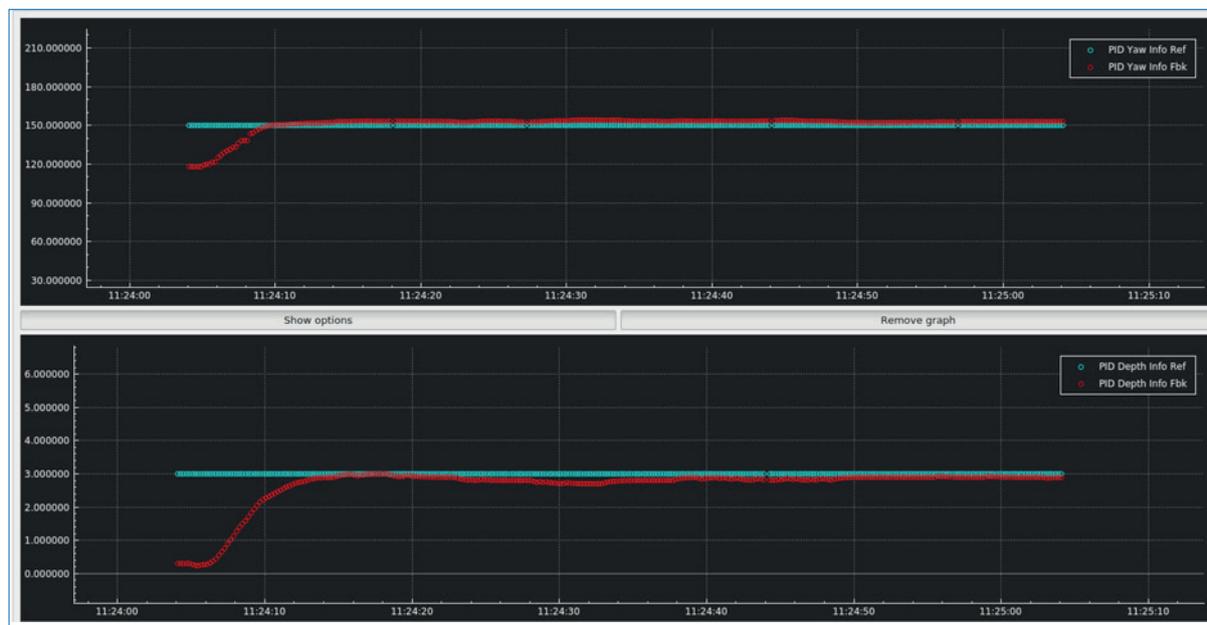


Figura 6 - Manovra combinata sui piani orizzontale e verticale; il veicolo esegue un'accostata da 120° a 150° contemporaneamente ad un salto quota da 0,2 a 3 m; in celeste è rappresentato il comando ed in rosso l'assetto eseguito.

Durante le prove a mare, eseguite in assenza di un vero Sonar, le caratteristiche di echo repeater sono state verificate emettendo un segnale acustico sinusoidale a 1 kHz con un proiettore in posizione fissa e verificando la risposta del trasmettitore durante le corse.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il bersaglio Sonar è realizzato sviluppando alcune tecnologie di interesse in campi diversi. In particolare, la capacità di un veicolo di navigare sia in bassa velocità per favorire il monitoraggio di precisione che in alta velocità per consentire un rapido trasferimento tra diverse zone di interesse può essere applicata nei diversi ambiti dell'esplorazione subacquea non solo per difesa o sicurezza, ma anche in applicazioni oil&gas. Il controllo di assetto e di direzione tramite regolazione della spinta di più motori, che trova già applicazione nella navigazione di mezzi di superficie, può essere esteso a

tutte le applicazioni di veicoli subacquei. Lo sviluppo di queste tecnologie è inserito nelle strategie di prodotto di GRAALTech per l'ampliamento delle applicazioni Oil&Gas. Il sistema acustico di ricezione sviluppato per il bersaglio è concepito come sistema a larga banda e ampia dinamica utile in applicazioni multisensori, come array volumetrico e cortina fissa o trainata che sono negli obiettivi di TECNAV Systems.

CONCLUSIONI

Le attività svolte hanno permesso di sviluppare i componenti principali di un bersaglio Sonar di piccole dimensioni, compatibile con le esigenze di addestramento del personale ASW (Anti-Submarine Warfare) dei Sonar di nuova generazione. Il veicolo è in grado di generare un'eco coerente con le caratteristiche dei Sonar e di seguire le cinematiche tipiche di un sommergibile reale. Il prototipo realizzato dovrà essere ulteriormente potenziato nella sua sezione di propulsione per raggiungere velocità

più elevate e dovrà essere equipaggiato di un trasmettitore per generare l'eco alle frequenze proprie delle Teste Acustiche di siluri per poter essere impiegato in scenari rappresentativi anche della reazione antisommergibile, ma le tecnologie di base,

in particolare il controllo di assetto e il sistema di ricezione acustica hanno già dimostrato nella versione prototipo di garantire le prestazioni necessarie sia durante le prove a banco che durante quelle a mare.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

ASW	Anti-Submarine Warfare
N_v / \sqrt{Hz}	Unità di misura della densità spettrale di rumore elettronico
PID	Proportional Integral Derivative regulator (Regolatore Proporzionale, Integrale e Derivativo)

PAROLE CHIAVE

Bersaglio, Sonar, Addestramento, Controllo di assetto, Batteria, Veicoli subacquei.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.014
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	GRAALTech s.r.l.
Città, Regione:	Genova, Liguria
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Andrea Caffaz
Recapito del responsabile del progetto:	Via E. Tagliolini, 16152 GENOVA
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0108597680
E-mail del responsabile del progetto:	andrea.caffaz@graaltech.it
Partner:	Tecnav systems
Città e Regioni:	Livorno, Italy
Recapito del partner del progetto:	Via Aurelio Lampredi, 3
Email:	vittorio.falcucci@tecnavsystem.com

BIBLIOGRAFIA

Altro materiale pubblicato:

Caffaz A., Falcucci V. Seafuture 2021 – SPARTA Self Propelled Artificial Target.

Attualmente le campagne di tiro navali per le quali si rende necessario valutare i punti di caduta a mare vengono svolte in ambito costiero ma sono soggette a restrizioni temporali, particolarmente durante il periodo estivo, e a problematiche di tipo ambientale derivanti dall'emissione di metalli pesanti in prossimità delle stazioni di tiro e della dispersione dei proiettili negli specchi di mare adiacenti.

Il presente progetto prevede una soluzione installabile su unità navali ed utilizzabile in alto mare per il rilevamento e misurazione dei punti di caduta a mare dei proiettili sparati per attività di valutazione delle prestazioni di tiro. Si tratta in sostanza di "portare in mare aperto" il sistema di misurazione dei punti di caduta impiegato in un poligono costiero per avere gittate senza limitazioni e minor impatto ambientale.

INTRODUZIONE

L'obiettivo del progetto è lo sviluppo di un dimostratore tecnologico in grado di rilevare in alto mare i punti di caduta di proiettili sparati dalle Unità Navali durante le serie di tiro a caldo nel corso di esercitazioni, verifiche e calibrazioni.

Il dimostratore è stato pensato composto da tre stazioni locali di rilevamento ed elaborazione dati dotate di capacità autonome di calcolo e da una

console operativa centralizzata (prevista in fase 2 del progetto) in grado di gestire e pilotare l'intero poligono.

Ogni stazione di rilevamento è dotata di una console operativa locale, una torretta optronica girostabilizzata integrante un sensore ottico diurno, un ricevitore GPS ed un ricetrasmittente radio per l'interconnessione con le altre stazioni (Figura 1).

Ogni stazione è in grado di rilevare i punti di cadu-

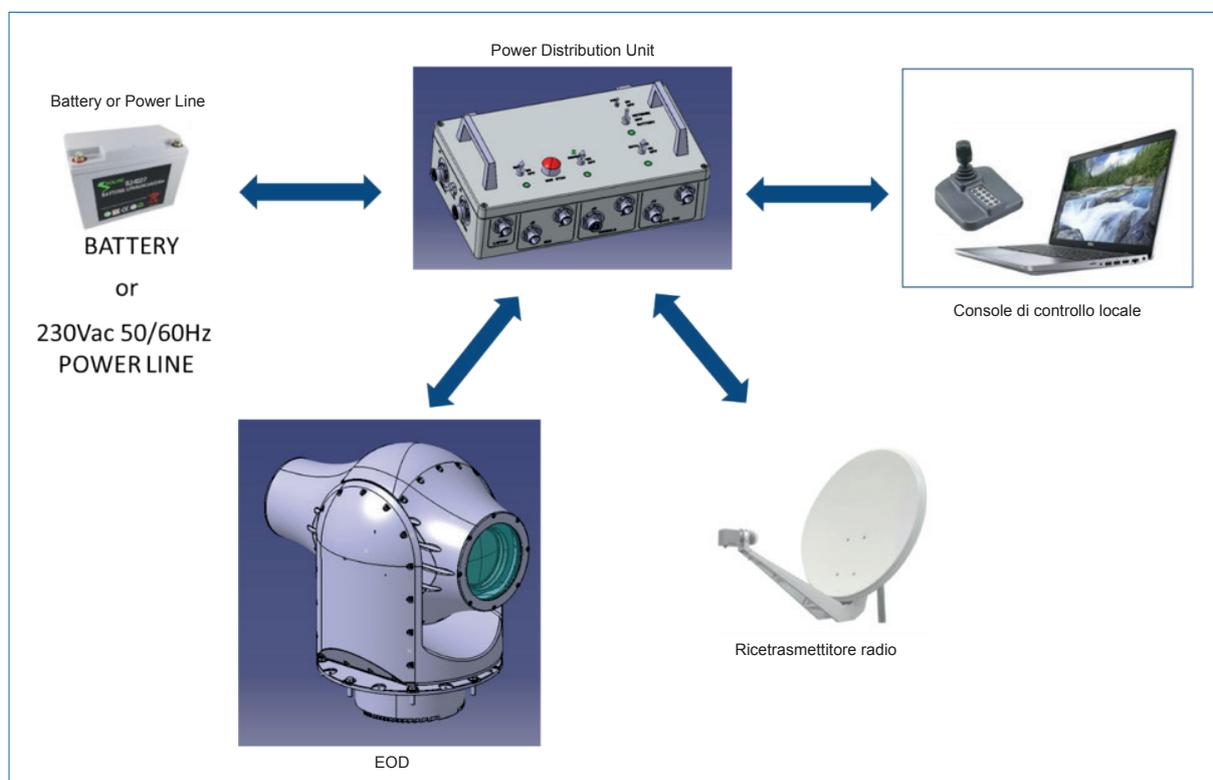


Figura 1 - Stazione Locale – Layout

ta a mare dei colpi sparati verso un bersaglio (reale o teorico) e comunicarli in termini di scarto rispetto alla propria linea di mira alla console centralizzata che effettuerà il calcolo del punto geografico reale di caduta del proietto, avendo a disposizione anche i dati di tutte le torrette che hanno rilevato il fenomeno, compresa la loro posizione geografica, il loro assetto, gli angoli di brandeggio ed elevazione ed il tempo di rilevamento.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Dallo studio dello scenario italiano in termini di gestione dei poligoni di tiro militari sono emerse criticità riguardanti principalmente la bonifica periodica dei poligoni, il limite temporale per le esercitazioni ed i costi di gestione e programmazione delle attività balistiche.

In particolare, limitatamente al Poligono del Baliopedio Cottrau della Spezia, fra le varie problematiche esistenti sono emerse:

- Zona di tiro ricade interamente all'interno del Golfo della Spezia ed è interessata da elevato traffico diportistico e mercantile.

- Munizionamento, esigenze di sicurezza impediscono utilizzo di dotazioni di guerra tal quali.
- Impatto ambientale, l'immissione di proietti nel Golfo della Spezia potrebbe in futuro generare limitazioni alle attività di tiro.

In questo ambito è nata la soluzione di spostare le stazioni di rilevamento in mare aperto come sistemi da imbarcare a bordo delle unità navali di MMI. Per svolgere questo compito il sistema è composto da tre stazioni locali di osservazione imbarcabili su unità navali oltre, da implementarsi in fase 2 del progetto, ad una console centralizzata e da un sistema radio di ricetrasmissione (Figura 2).

Mediante un algoritmo di image processing installato a bordo delle torrette viene identificata la caduta a mare del proietto e comunicati alla console centralizzata gli scarti rispetto alla LOS della torretta di rilevamento stessa del fenomeno rilevato (Figura 3).

Successivamente verranno svolti i calcoli del punto di caduta geografico avendo a disposizione i dati di tutte le torrette che hanno rilevato l'evento, compresi i dati di posizione geografica delle torrette, il loro assetto e la loro LOS (Figura 4).

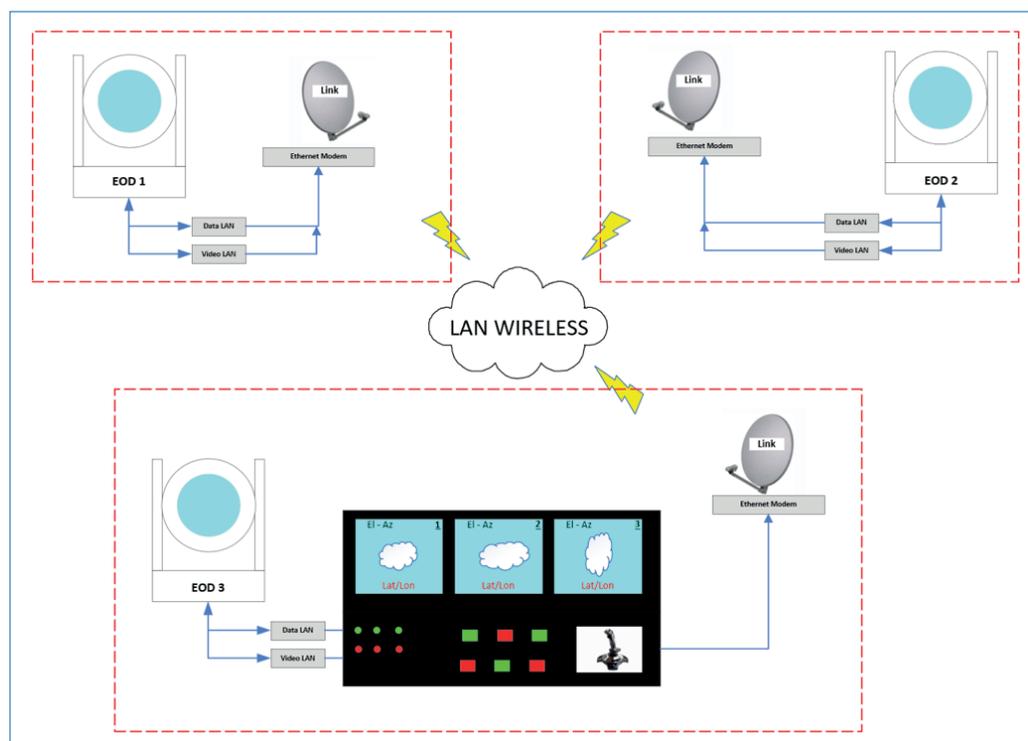


Figura 2 - Architettura sistema

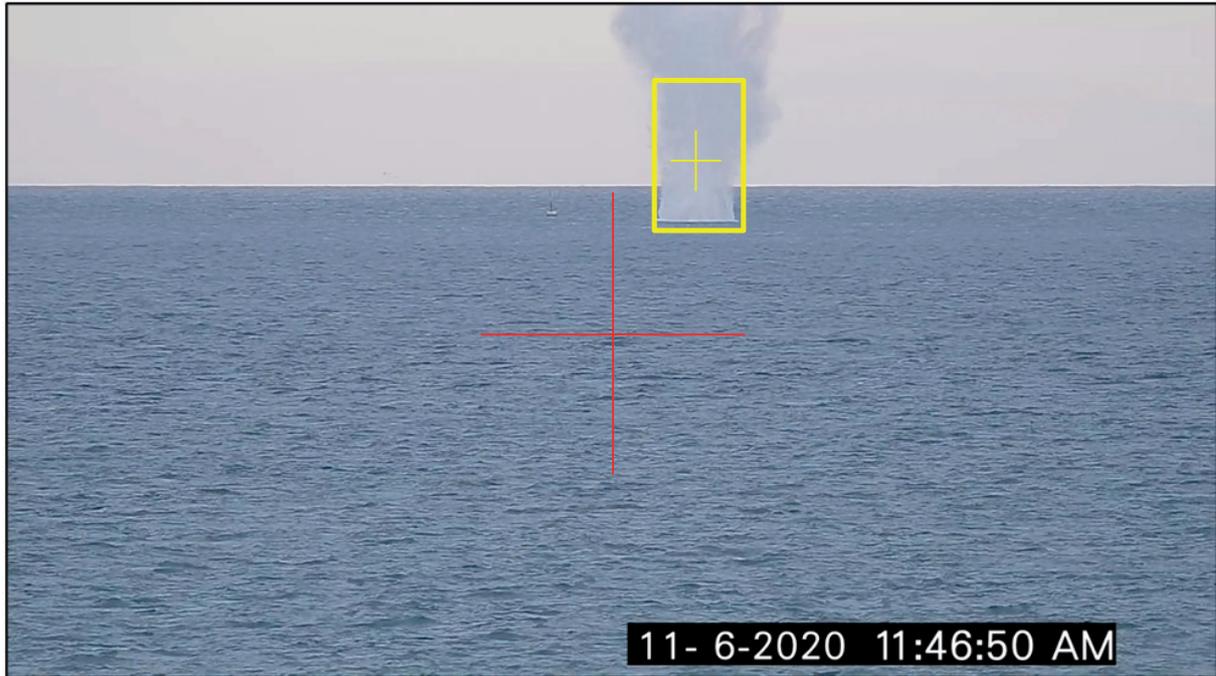


Figura 3 - Rilevamento evento – Il punto di caduta a mare del proiettile può essere individuato tramite un algoritmo di detezione automatica oppure tramite posizionamento manuale del crocicchio giallo sul punto di caduta da parte di un operatore. Individuato il punto di caduta, sono noti gli scarti in termini di pixels fra il punto di caduta (crocicchio giallo) e la linea di mira del sensore (crocicchio rosso).

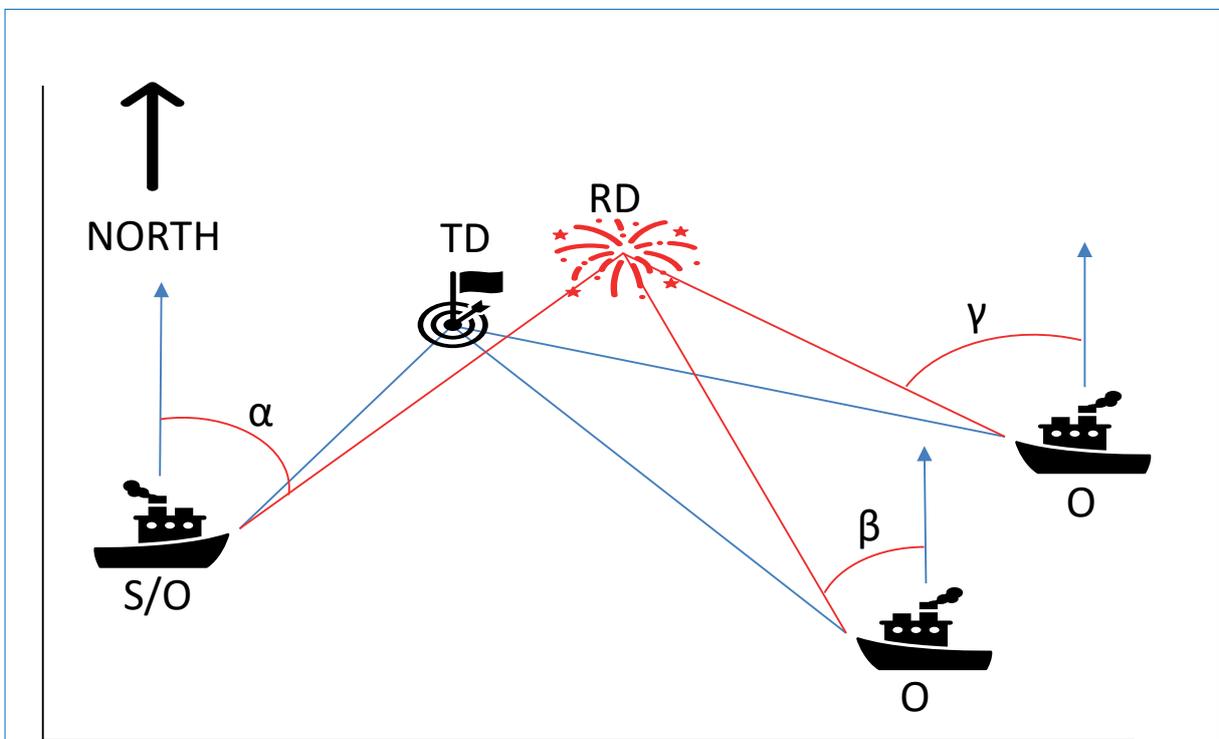


Figura 4: Funzionamento – Nella figura è mostrato un possibile scenario operativo in cui due torrette di rilevamento sono installate a bordo di Unità Navali (O) e una torretta di rilevamento si trova a bordo della nave che effettua i test di sparo (S/O). È indicato con TD il bersaglio (punto teorico di caduta) e con RD il punto reale di caduta rilevato.

METODOLOGIA

La torretta è dotata di sensori di posizione ed inerziali di velocità, di contatti striscianti (slipping) e di servomotori che permettono l'orientamento della camera DLTV in elevazione ed azimuth mantenendo la Line Of Sight (LOS) stabile sul target anche in presenza di moti di disturbo esterni.

Per garantire la necessaria precisione e accuratezza di posizionamento, la torretta è dotata di motori a presa diretta, encoder ottici assoluti ed un modulo IMU-GPS per la corretta geo-referenziazione del sistema e l'opportuno calcolo di coordinate in piani sbandati.

Il sensore di visione è una camera DLTV operante nello spettro del visibile che permette di rispondere alle esigenze operative consentendo l'osservazione di target di dimensione minima di un metro a 20 Km di distanza (Figura 5).

A verifica delle performances ottiche della camera selezionata, è stata condotta una campagna di prove testando la camera su differenti targets e a diverse distanze e da diversi punti di osservazione: Punta

Corvo, Punta Castagna e balipedio (Figura 6 e Figura 7).

La console di controllo locale è la principale unità di interfaccia tra operatore e sistema EOD; è costituita da un laptop su cui viene installato il programma di controllo ed HMI del sistema ed una unità IP desktop per controllo movimentazione EOD e controllo telecamera.

L'architettura software del sistema è composta da due sottosistemi principali:

- sistema di controllo (*embedded*) che gestisce il controllo della torretta, ovvero comanda gli attuatori ed acquisisce i sensori dell'EOD allo scopo di eseguire le operazioni richieste dall'operatore attraverso il sottosistema Interfaccia Utente (UI).
- interfaccia utente (PC SW) che realizza l'interfaccia grafica dell'utente permettendo l'acquisizione dati (video, scarti, ...) dalla stazione locale.

I due sottosistemi comunicano attraverso un collegamento LAN Ethernet.

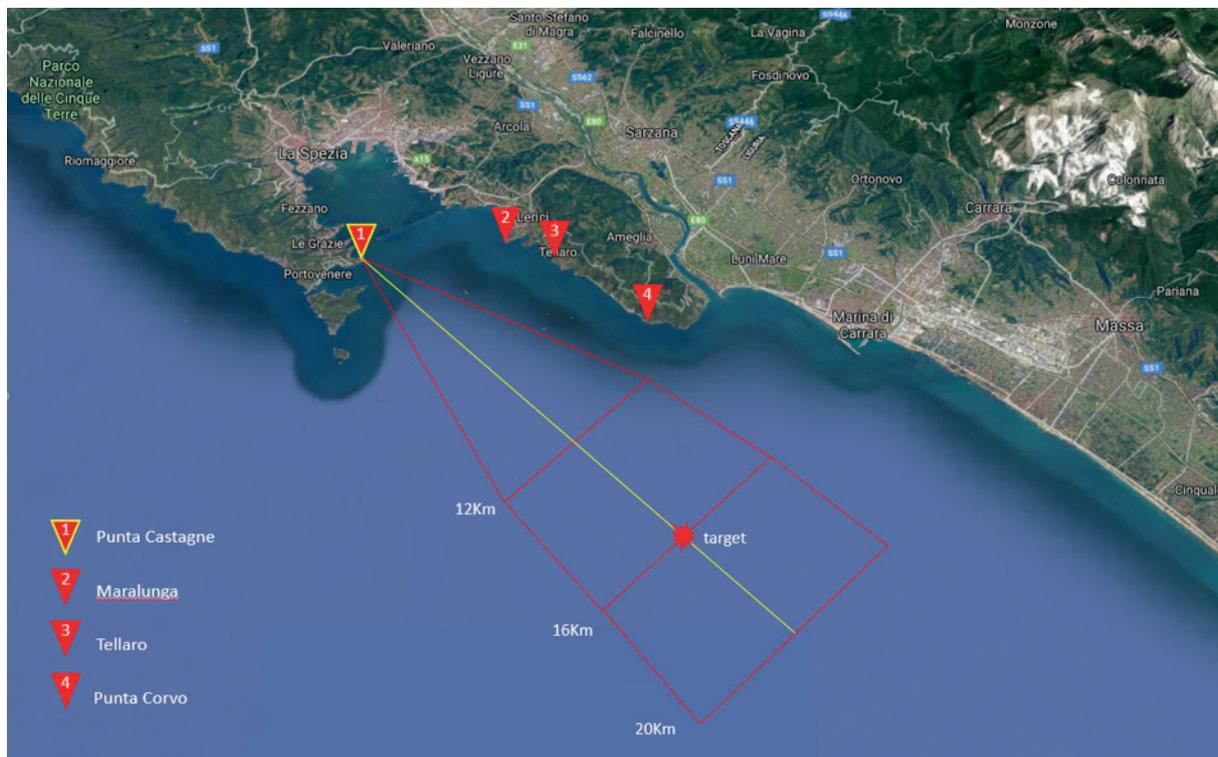


Figura 5 - Scenario operativo principale



Figura 6 - Osservazione colonna d'acqua sollevata dalla caduta a mare del proietto calibro 127 mm [distanza = 6.500 m] dal sito di Punta Castagna.



Figura 7 - Osservazione colonna d'acqua sollevata dalla caduta a mare del proietto calibro 76 mm [distanza > 10.000 m] dal sito di Punta Castagna.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il sistema è stato concepito per poter essere utilizzato in differenti scenari operativi:

- A. Una nave che effettua i test di sparo (oppure un'arma posizionata a terra) e le torrette di rilevamento posizionate in postazioni fisse terrestri tipicamente nello scenario di test del Golfo della Spezia.
- B. Una nave che spara con a bordo una torretta di rilevamento e una nave che trascina il target con a bordo un'altra torretta di rilevamento (Figura 8).
- C. Una nave che spara con a bordo una torretta di rilevamento, una nave che trascina il target con

a bordo un'altra torretta di rilevamento ed una terza nave con a bordo un'ultima torretta di rilevamento.

Oltre agli scenari sopra descritti, più in generale, la soluzione può essere utilizzata per l'osservazione del punto di caduta del proietto indifferentemente da postazioni fisse o mobili o da una loro combinazione.

Inoltre, le singole stazioni locali, se installate a bordo delle unità navali di MMI possono essere utilizzate oltre che per le attività di poligono, anche come dotazioni di bordo per attività a lungo raggio di sorveglianza, controllo e monitoraggio, grazie al sensore diurno a grande capacità di zoom e risoluzione installato nelle torrette elettro-ottiche.

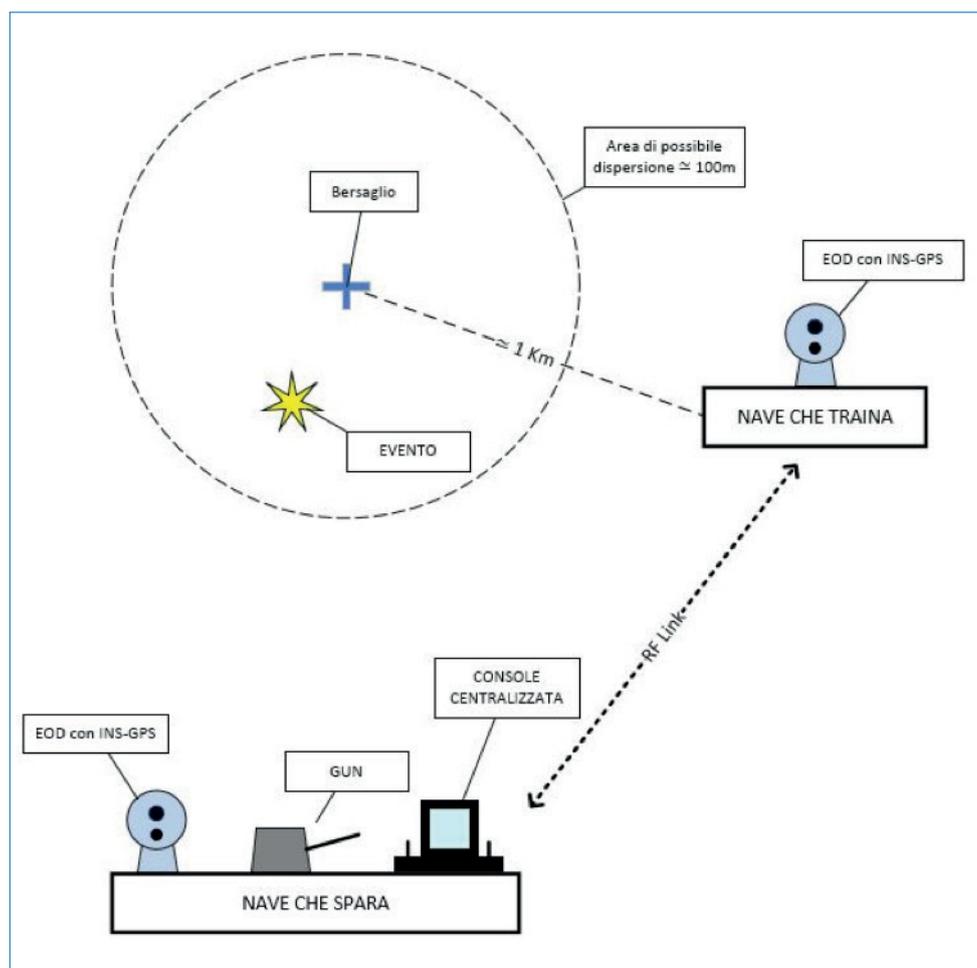


Figura 8 - Scenario operativo con torretta di rilevamento e console centralizzata su nave che spara (S/O) e seconda torretta di rilevamento su nave che traina il target (T/O)

CONCLUSIONI

La progettazione e lo sviluppo delle stazioni di rilevamento locali ha evidenziato un ottimo livello di maturazione tecnologica raggiunta dal dimostratore sviluppato con elementi COTS, già orientato alla producibilità, al valore di mercato competitivo, alla qualità del prodotto finale e alla sua testabilità. Per il momento, le campagne di prova a verifica delle performance ottiche del sensore di visione diurno hanno dimostrato le ottime prestazioni della camera DLTV selezionata, e i collaudi sulle torrette girostabilizzate hanno confermato le carat-

teristiche tecniche attese in termini di precisione e accuratezza nella valutazione del punto di caduta del proietto a mare.

Le prossime fasi del progetto prevedono la progettazione e lo sviluppo dei Sottosistemi Consolle Operatore Centralizzata e Comunicazione e Geolocalizzazione e lo studio propedeutico all'installazione del sistema sia a terra che a bordo delle Unità Navali, nonché lo svolgimento di alcune campagne di tiro e raccolta dati per testare l'efficacia del dimostratore tecnologico.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>COTS</i>	Commercial-off-the-shelf
<i>DLTV</i>	Day-Light Television
<i>EOD</i>	Electro Optic Device
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>HMI</i>	Human Machine Interface
<i>IP</i>	Internet Protocol
<i>LOS</i>	Line of Sight
<i>MMI</i>	Marina Militare Italiana
<i>PC</i>	Personal Computer
<i>SW</i>	Software
<i>UI</i>	User Interface

PAROLE CHIAVE

Poligono, proietto, EOD, DLTV, optronica, girostabilizzata.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	A2018.002
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Navali (NAVARM)
Ente responsabile del progetto:	FINCANTIERI NexTech S.p.A.
Città, Regione:	Milano, Lombardia
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Andrea NARDONE
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Trieste, 3, 19020 Follo (SP)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 335 6848613
E-mail del responsabile del progetto:	andrea.nardone@fincantierinx.it

Con il Progetto PNRM SAFE è stata sviluppata una piattaforma prototipica di analisi del firmware applicando reti neurali ricorrenti con auto-attenzione (*self-attentive RNN*) capaci di riconoscere la similarità tra file binari e tra funzioni in linguaggio assembly. L'attività di ricerca ha generato un set di documentazione tecnica di progetto, che riassume lo stato dell'arte nell'ambito dell'uso delle reti neurali applicate all'analisi dei files binari, e gli scenari d'uso per la messa in sicurezza (sicurezza cibernetica) delle supply chain hardware e software. Il prototipo software realizzato è in grado di identificare codice malevolo negli eseguibili del firmware e la versione delle librerie utilizzate per la sua compilazione. Questo a favore di un controllo approfondito della configurazione degli apparati IT e OT dei sistemi critici e a supporto degli analisti di sicurezza cibernetica nelle fasi di aggiornamento/ammodernamento delle piattaforme.

INTRODUZIONE

Il progetto SAFE mira all'implementazione di una capacità automatica di verificare l'integrità e la sicurezza dei *firmware* utilizzati su piattaforme automotive, navali o terrestri, indipendentemente dalla disponibilità del codice sorgente. L'aggiornamento del firmware costituisce un elemento critico nei processi di gestione del ciclo di vita degli apparati IT e OT. Il controllo puntuale della configurazione

software dei sistemi d'arma e dei sistemi di supporto è parte essenziale dei diversi controlli necessari a garantire la sicurezza cibernetica degli impianti. L'uso estensivo di sistemi COTS anche nei sistemi d'arma rende la sicurezza della supply chain un elemento critico per lo sviluppo dei sistemi critici. Nella seguente Figura 1 viene riportata la *supply chain* di distribuzione del firmware:

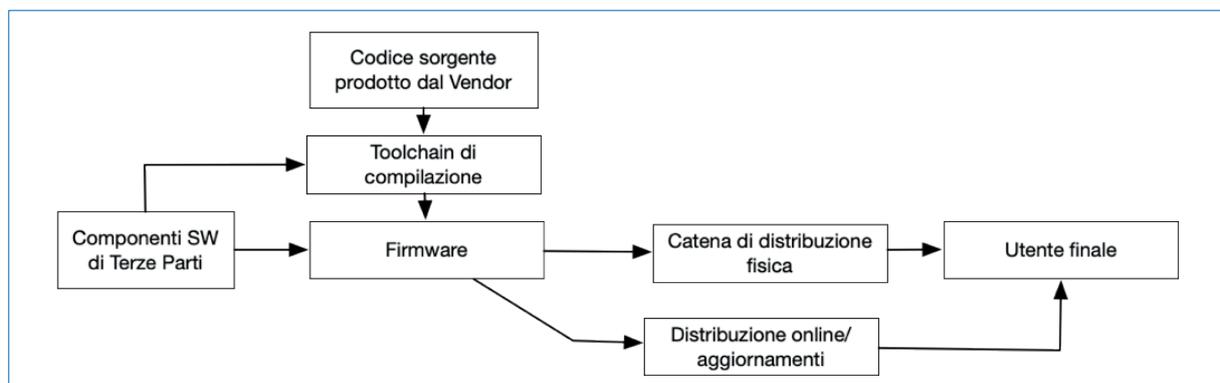


Figura 1- Firmware supply chain

L'uso di librerie e componenti hardware e software di terze parti complica i controlli necessari affinché il prodotto impiegato operativamente sia perfettamente conforme agli standard di sicurezza richiesti dall'utente finale.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

I sistemi oggetto dello studio sono attaccabili mediante tecniche codificate come *Supply Chain Compromise*- T1195 (MITRE ATT&CK, 2020)). Non potendo garantire agli utenti finali l'accessibilità al codice sorgente dei produttori dei sottosistemi costituenti i sistemi complessi impiegati nei sistemi

critici, risulta evidente la necessità di individuare strategie alternative al *reverse engineering* degli eseguibili. Le attività di reverse engineering sono molto complesse e particolarmente onerose, e quindi difficilmente applicabili in modo estensivo su tutti gli asset a disposizione. SAFE si propone di utilizzare sistemi di Intelligenza Artificiale come supporto alle attività di verifica di sicurezza, mirando a semplificare drasticamente i controlli preliminari da eseguire su sistemi in produzione o in fase di acquisizione/aggiornamento. Gli obiettivi del progetto si possono sintetizzare in

due macro-obiettivi principali:

- a. Verificare l'integrità di un firmware installato su un sistema in servizio attraverso l'analisi automatica della similitudine tra funzioni; tale attività consente di verificare se due versioni differenti di firmware provengano dal medesimo codice sorgente quando questo non sia disponibile, ovvero individuare se vi siano sorgenti differenti per le due versioni di firmware.

Nella seguente Figura 2 viene riportata una schematizzazione del punto a., relativa alla compromissione con inserimento di codice malevolo:

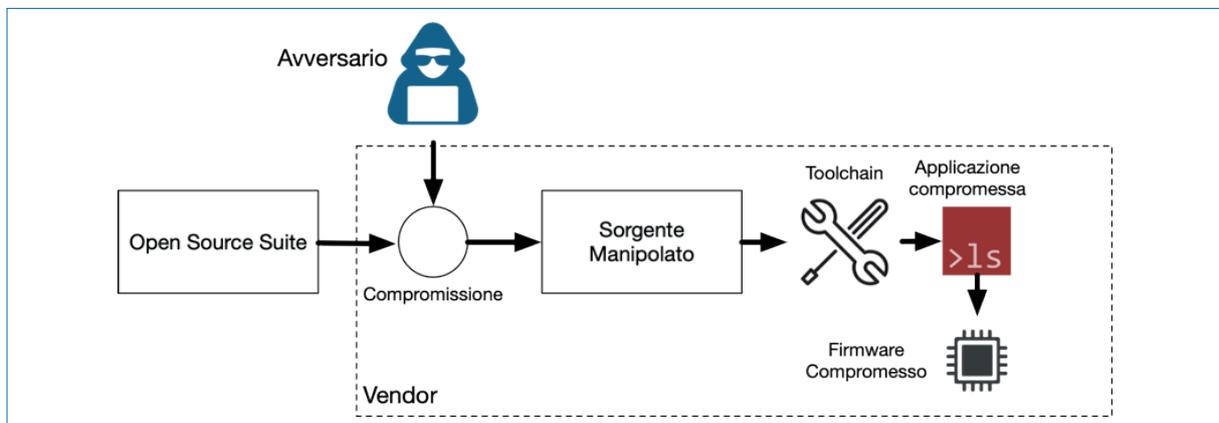


Figura 2 - Compromissione con inserimento di codice malevolo (e.g. backdoor)

- b. Quando si hanno due firmware che non derivano dallo stesso codice, ad esempio due versioni successive dello stesso firmware, capire quali sono le funzionalità in comune e quali invece quelle aggiunte nel nuovo firmware (ovvero ve-

rificare la presenza di nuove funzionalità qualora il codice sorgente non sia disponibile).

Nella seguente Figura 3 viene riportato il flusso, descritto al punto b., dello sfruttamento della vulnerabilità mediante downgrade di una libreria:

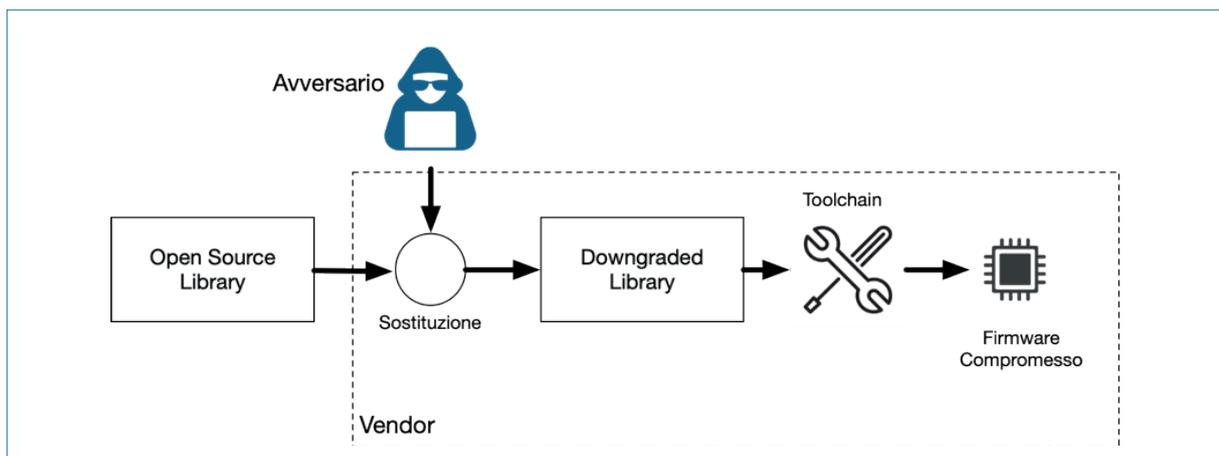


Figura 3 - Introduzione di una vulnerabilità mediante downgrade di una libreria.

METODOLOGIA

Le tecniche utilizzate in questo progetto sono tecniche che attraverso l'utilizzo di reti neurali creano delle "rappresentazioni semantiche" del codice. Queste rappresentazioni sono dei vettori numerici che catturano le specificità semantiche degli oggetti analizzati dalla rete. Nel caso dei codici (sorgenti o binari) questi vettori, anche detti *embedding*, saranno vicini nello spazio, se i codici sono simili e saranno lontani nello spazio, se invece i codici sono dissimili. Nel caso specifico del progetto, sono state analizzate reti neurali che hanno auto-attenzione, dall'inglese *Self-Attentive*. Nello specifico la soluzione proposta crea degli *embedding* utilizzando una rete neurale ricorrente (RNN - *Recurrent Neural Network*).

Nella seguente Figura 4 viene riportata l'architettura logica del progetto SAFE:

In questo caso un campione è rappresentato con una sequenza $[X_1, X_2, \dots, X_N]$ di elementi, dove ogni elemento è a sua volta rappresentato da un vettore di features. Questi campioni emergono

naturalmente in vari ambiti, quali classificazioni di testi o frasi (una frase è una sequenza di parole), di audio/video (sequenze di fotogrammi) e di software (sequenze di istruzioni). Solitamente queste sequenze hanno lunghezze diverse: si pensi alle frasi che sono composte da un diverso numero di parole.

Le Reti Neurali Ricorrenti sono basate sull'idea di riutilizzare l'architettura neurale per ogni elemento della sequenza (questa tecnica viene chiamata *weight sharing*, condivisione dei pesi). Ossia la stessa rete viene applicata a tutti gli elementi della sequenza a partire dal primo elemento. Ad ognuno di questi passi, la rete calcola sia un vettore di uscita sia uno stato non visibile (*hidden state*); quest'ultimo che sarà dato in input nel passo successivo assieme al prossimo elemento della sequenza. Da un punto di vista intuitivo, la rete sequenziale calcola una sorta di riassunto nello *hidden state* degli elementi della sequenza che ha già visto e poi utilizza questo *hidden state* per definire il suo comportamento nel passo successivo..

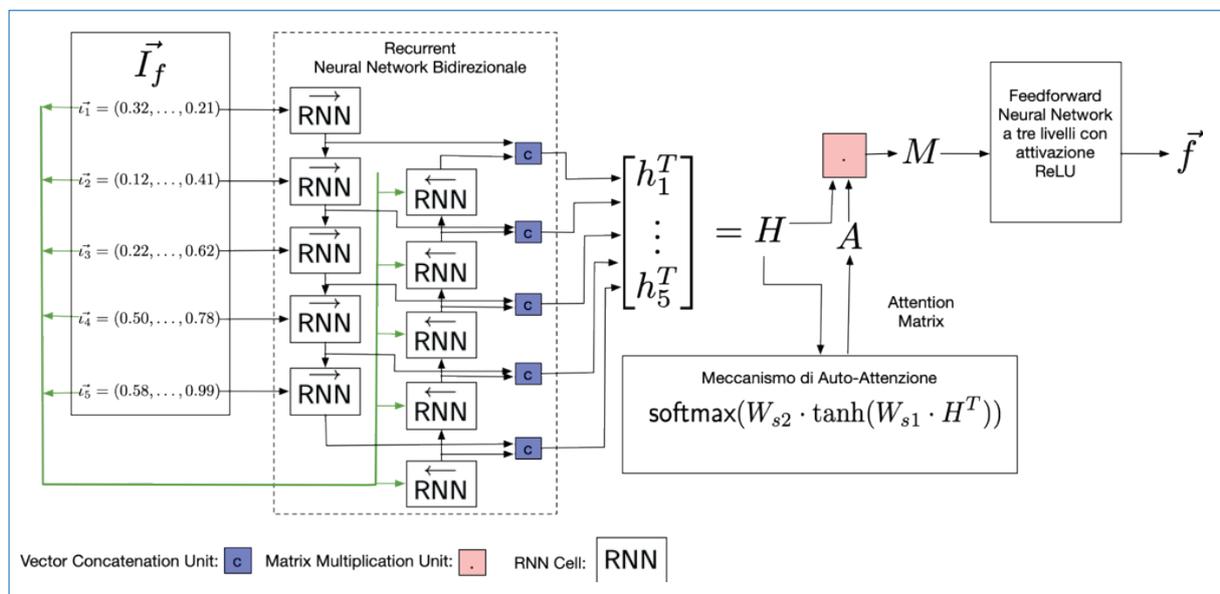


Figura 4 - Architettura di SAFE

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

SAFE costituisce uno strumento fondamentale per la sicurezza della *supply chain*, volta a ridurre drasticamente i costi dei controlli di sicurezza, limitando il ricorso ad attività di *reverse engineering* ai soli casi in cui si sospetti una reale compromissione dei sistemi.

Il progetto SAFE è per sua natura *dual use*, ossia applicabile in modo estensivo a tutte le applicazioni basate sulle architetture di riferimento (X64, ARM 32/64bit e MIPS 32/64bit), indipendentemente dal settore di applicazione. La tecnologia è quindi direttamente applicabile a moltissimi dei dispositivi impiegati nelle infrastrutture critiche e nei sistemi IoT, anche di tipo *Consumer*, basate appunto sulle architetture di riferimento. Non è da escludere lo sviluppo di soluzioni analoghe anche per altre architetture al momento non incluse nello scenario di riferimento del progetto finanziato.

CONCLUSIONI

Il progetto SAFE promette di offrire agli analisti di sicurezza cibernetica nuovi strumenti per la verifica di integrità dei sistemi IT, OT e IoT, anche a fronte di una rapida evoluzione tecnologica di hardware e software, permettendo di gestire in modo

più efficiente i controlli di sicurezza in occasione degli aggiornamenti software frequentemente proposti dai produttori dei sistemi COTS.

L'uso delle tecnologie di intelligenza artificiale può quindi aiutare a rendere più sicure le *supply chain* del firmware, introducendo controlli sistematici da eseguire mediante sistemi automatici o semiautomatici. Questo strumento potrà dare vita ad una classe di prodotti in grado di rendere accessibile su larga scala l'analisi sistematica del software, ed in particolare del firmware, a partire dai soli applicativi in formato binario, e questo anche da parte di personale non specificatamente formato nella attività di *reverse engineering*. Queste ultime, spesso molto onerose in termini di risorse temporali e di formazione degli operatori, potranno comunque rendersi necessarie in caso di accertata compromissione dei sistemi: anche in questo caso lo strumento potrà essere d'ausilio all'analista nell'individuare in tempi più rapidi le specifiche funzioni interessate dalla compromissione.

SAFE rappresenta infine un ottimo esempio di come i sistemi di intelligenza artificiale applicati all'analisi di problemi complessi possano affiancare gli analisti nel loro lavoro, permettendo loro di potenziare le proprie capacità su scale ad oggi non gestibili da singoli team di esperti.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>IoT</i>	Internet of things
<i>IT</i>	Information Technologies
<i>OT</i>	Operational Technologies.
<i>RNN</i>	Redundant Neural Networks
<i>COTS</i>	Commercial off the shelf

PAROLE CHIAVE

Cyber Security, IOT, OT, Firmware, RNN, SAFE, Reverse Engineering, Supply chain.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.195
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Navali
Ente responsabile del progetto:	Cy4Gate – “La Sapienza” Università di Roma
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Stefania Sica
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Coponia 8 - 00131 Roma – Italy
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 331 6077126
E-mail del responsabile del progetto:	stefania.sica@cy4gate.com

BIBLIOGRAFIA

CY4GATE S.p.A. - "La Sapienza" Università di Roma. (2022). Rapporto tecnico sulla validazione del modello e dei risultati. In *PNRM SAFE SubLotto 1.3*.

CY4GATE S.p.A. - "La Sapienza" Università di Roma. (2021). Definizione dei casi di studio, con analisi e definizione delle toolchain, disassembly ed estrazione del codice software. In *PNRM SAFE - Sublotto 1.1*.

CY4GATE S.p.A. - "La Sapienza" Università di Roma. (2022). Definizione dei modelli di riferimento basati su Deep Neural Network (DNN) e definizione delle basi di dati necessarie all'addestramento (dataset). In *PNRM SAFE Sub-lotto 1.2*. Roma.

MITRE ATT&CK. (2020). *Supply Chain Compromise: Compromise Software Dependencies and Development Tools*. Retrieved 2022, from MITRE ATT&CK: <https://attack.mitre.org/techniques/T1195>.

Nel contesto della ricerca militare mirata allo sviluppo di strumenti adeguati per la rilevazione e la protezione dalle radiazioni ionizzanti, il Servizio Sanitario Militare ha recentemente coordinato i progetti di ricerca Health Shell e i-Detect. Il primo progetto, HEALTH SHELL, consiste in uno strato protettivo leggero, sottile e a basso costo che può essere facilmente integrato in attrezzature o veicoli del personale senza pesi, dimensioni o consumo energetico significativi. HEALTH SHELL è progettato per aumentare la probabilità di sopravvivenza del personale in aree contaminate e proteggere le attrezzature da eventuali danni. La seconda soluzione, i-Detect, prevede la prototipazione di un sistema di rilevamento in tempo reale per le radiazioni ionizzanti Gamma in ambienti operativi. Il sistema è composto da sensori miniaturizzati e dispositivi mobili come smartphone, che inviano i dati a un centro operativo in tempo reale. Il software è progettato per consentire la trasmissione dei dati tra i componenti del *team* sul campo e il centro operativo. I rilevatori di radiazioni ionizzanti si basano sulla tecnologia dei cristalli semiconduttori organici e possono misurare con precisione e tempestività le radiazioni rilevate dai sensori, come dimostrato da test sul campo realistici. In conclusione, questi due progetti tecnologici rappresentano un passo importante per la protezione della salute e della sicurezza del personale militare e delle attrezzature utilizzate in aree a potenziale rischio radiologico.

INTRODUZIONE

I progetti sono concepiti per offrire al personale militare dotazioni innovative da utilizzare per la protezione dalle possibili esposizioni alle radiazioni ionizzanti X e Gamma negli scenari operativi che possono provocare diverse tipologie di danno, aumento del rischio di cancerogenesi, danni al sistema cardiocircolatorio e sindromi acute. Attualmente, le protezioni da radiazioni ionizzanti disponibili sono generalmente caratterizzate da un elevato peso e spessore, limitando il dinamismo dei veicoli, la movimentazione dei dispositivi portatili e la vestibilità. Il progetto HEALTH SHELL ha individuato le gomme siliconiche come uno dei materiali più adatti per la realizzazione di schermi leggeri e flessibili, in grado di proteggere il personale militare e l'equipaggiamento. Tra i composti schermanti testati, il Bario si è dimostrato particolarmente efficace grazie al suo elevato potere riflettente alle radiazioni ionizzanti.

Il progetto iDetect si concentra invece sulla rile-

vazione in tempo reale delle radiazioni ionizzanti, fornendo ai soldati un'informazione tempestiva sui livelli di esposizione. Il sistema è facilmente integrabile nell'equipaggiamento del soldato o nei mezzi in dotazione, come i mini UAV o i veicoli. La soluzione sviluppata permette di mitigare le difficoltà legate alla realizzazione di contromisure efficaci e all'identificazione della fonte delle emissioni, gestendo in modo efficace lo stress derivante dall'esposizione a radiazioni ionizzanti. Oltre all'applicazione militare, il sistema iDetect può essere utilizzato anche in ambienti industriali a rischio di esposizione alle radiazioni, nell'ambito della bonifica di discariche illegali o per il controllo di siti sensibili come porti e aeroporti, esposti a possibili atti di terrorismo. In definitiva, questi due progetti tecnologici rappresentano un importante contributo alla sicurezza e alla protezione del personale militare e degli equipaggiamenti impiegati in situazioni potenzialmente a rischio di esposizione alle radiazioni ionizzanti.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Le radiazioni ionizzanti rappresentano una fonte di pericolo per gli organismi viventi e per i manufatti, con effetti diretti sulla capacità operativa dei contingenti militari. L'esposizione alle radiazioni può provocare diversi problemi di salute, che possono manifestarsi anche anni dopo l'esposizione. Inoltre, gli stessi manufatti, se esposti a radiazioni, possono subire danni diversi a seconda dei materiali di cui sono composti. Attualmente, il piombo è il materiale di protezione più utilizzato, ma presenta diverse problematiche legate alla densità, alla tossicità e all'opacità. *Health Shell* è una soluzione tecno-

logica innovativa è una gomma silanolica arricchita con bario, che garantisce un'efficace protezione dalle radiazioni ionizzanti (Figura 1).

i-Detect si inquadra nel modello di dottrina basato sulla *Network Centric Warfare* (NCW), che prevede la connessione di tutte le forze operative alla rete per condividere informazioni e aumentare l'*Information Superiority*. In questo contesto, è una delle soluzioni che il progetto "Soldato Futuro", previsto nel programma Forza NEC, potrebbe adottare al fine di disporre di una capacità di rilevazione automatica, in tempo reale, delle radiazioni ionizzanti, che possono essere presenti nell'ambiente o rilasciate a seguito di incidenti industriali o atti intenzionali (Figura 2).

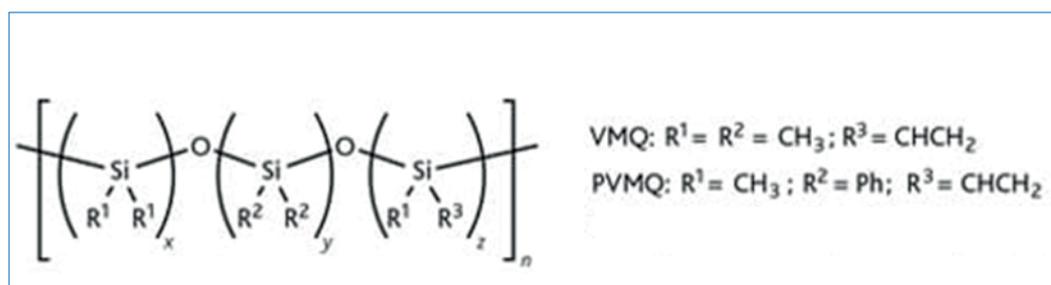


Figura 1 - Tipi di gomma utilizzati. VMQ: Vinyl-Methyl-Polisiloxane e PVMQ: Phenyl-Vinyl-Methyl-Polisiloxane.



Figura 2 - Dall'alto a sn. al basso a dx: smartphone (Soldato 1 e Soldato 2); 3 elettroniche di lettura dedicate (iDT001, iDT002, iDT003) e 5 sensori (2 per alfa e 2 per gamma). Dettaglio dei sensori iDetect: 3 sensori gamma a perovskite (Gamma1, Gamma2 e Gamma3); 2 sensori alfa (iDetAlfa4 e iDetAlfa5) più il supporto di screening per le particelle alfa per la lettura differenziale.

Queste soluzioni tecnologiche innovative rappresentano un importante passo avanti nella protezione del personale militare e nella gestione dei rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti in contesti operativi complessi e impegnativi.

METODOLOGIA

Il processo di realizzazione dei *layer* Health Shell consiste delle seguenti fasi: Mescolazione, Vulcanizzazione, Post Curing e Stabilizzazione, rappresentate graficamente in Figura 2. Al termine del processo produttivo si realizzano fogli grezzi dotati di ottime caratteristiche di protezione dai raggi X e Gamma, pur mantenendo la caratteristica elasticità, flessibilità e peso contenuto delle gomme silconiche (Figura 3).

Per verificare le proprietà assorbenti dei materiali realizzati in laboratorio si è utilizzato un ambiente di test sviluppato appositamente per effettuare le verifiche necessarie, registrare le misure effettuate e contemporaneamente garantire la massima sicurezza di prova.

L'ambiente di Test è suddiviso in un'area protetta dove vengono effettuate le emissioni delle radiazioni per i test dinamici ed un'area controllata, nella quale sono allocate le postazioni di controllo delle attività nel bunker e personale dotato di dosimetro. L'effetto schermante del progetto è stato testato su fogli silanici a diverso grado di arricchimento di Bario:

1. "VMQ60Sh-WHITE" spesso 1.8 mm, non ottimizzato per assorbimento di raggi X (riferimento);
2. "VMQ75Sh-GREY" spesso 2.2 mm, con una mescola di Bario al 50% della soluzione identificata;
3. "VMQ75Sh-LIGHTGREY" spesso 2.4 mm con una mescola di Bario al 100% della soluzione identificata.

In Tabella 1 si riportano i valori di assorbimento delle radiazioni misurate durante le prove di validazione, mentre in Figura 4 sono riportati i valori di attenuazione alle radiazioni ionizzanti rilevati nell'ambito delle evoluzioni tecniche raggiunte nel

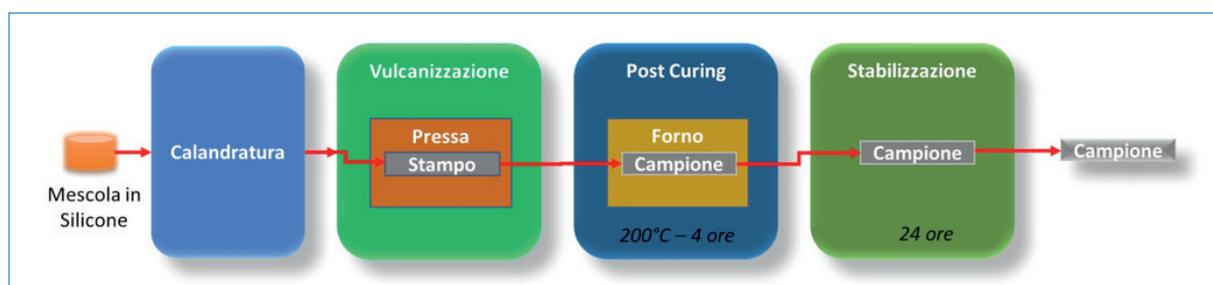


Figura 3 - Processo di realizzazione campioni "x-ray".

Energia XR (kVp) I = 500uA	Attenuazione XR (%)		
	VMQ60Sh(1.8mm)	VMQ75SH (2.2mm) Grey	VMQ75SH (2.4 mm) Light grey
40	81.5 ± 3	99.63 ± 0.01	99.55 ± 0.03
60	76.5 ± 0.1	99.23 ± 0.02	99.83 ± 0.01
80	73.6 ± 0.1	98.77 ± 0.02	99.63 ± 0.01
100	70.0 ± 1.0	97.89 ± 0.05	99.07 ± 0.02
120	66.5 ± 1.1	96.58 ± 0.13	98.39 ± 0.04
140	63.3 ± 0.9	95.67 ± 0.01	97.77 ± 0.02
150	61.1 ± 0.4	94.95 ± 0.05	97.26 ± 0.03

Tabella 1 - Calcolo dell'assorbimento dei campioni per differenti energie dell'emettitore.

corso del presente progetto. Dai risultati emerge una significativa capacità schermante del *layer* realizzato ed un conseguente abbattimento delle radiazioni ionizzanti.

iDetect, invece, è un sistema di rilevamento e quantificazione delle radiazioni ionizzanti che consente la comunicazione automatica dei dati alla catena di comando e ai vari livelli di condotta e pianificazione. Il sistema può essere utilizzato sia a fini militari che civili, in contesti dove è possibile l'esposizione a radiazioni ionizzanti, come nell'industria nucleare. I sensori realizzati in laboratorio sono di due tipologie, una basata su 4-idrossicianobenzene, per

rilevare radiazioni X e gamma di energie variabili tra 30 e 660 keV, mentre la seconda, basata su film sottili di MAPI, rileva radiazioni X con energie da 17 keV a 150 keV per spessori fino a 1 micron. Entrambi i sensori sono stabili, riproducibili e hanno risposta lineare, e operano con basso consumo energetico. I rilevatori sono connessi ad un sensore, un sistema di controllo, che raccoglie le rilevazioni dei sensori ed un sistema di gestione che riceve ed elabora i dati in ingresso. Il sistema è stato validato con l'esposizione dei sensori a diverse sorgenti di fotoni gamma e particelle alfa, dimostrando un'ottima capacità di rilevazione (Figura 5).

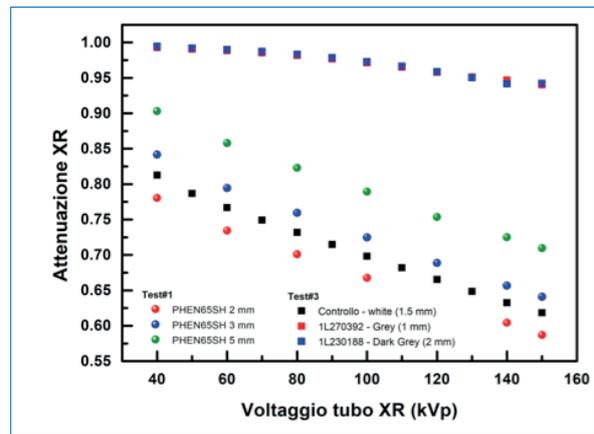
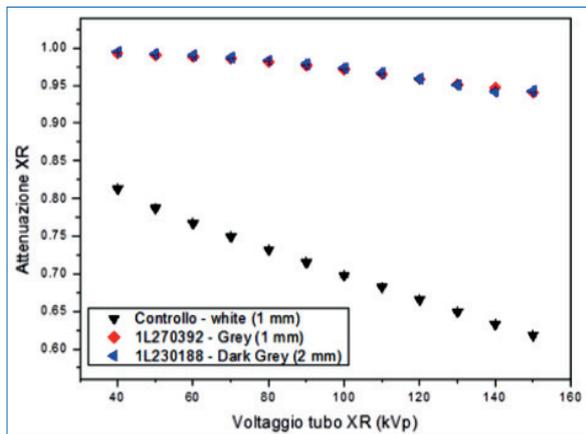


Figura 4 - Sn: Attenuazione dei raggi X a corrente costante (500 µA) al variare della tensione di accelerazione del tubo (40 – 150 kVp). L'attenuazione è riportata in percentuale, normalizzata ad 1. Dx: Confronto del potere di attenuazione XR tra le mescole testate

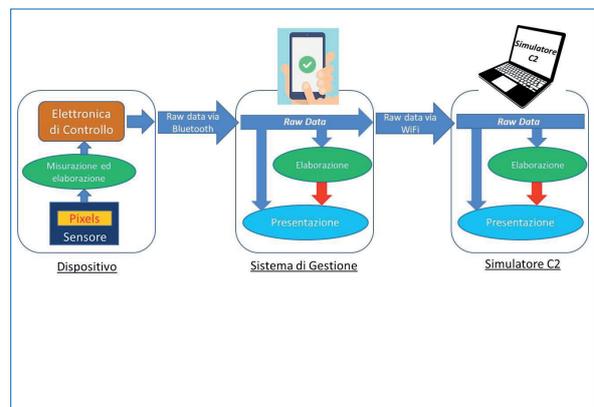
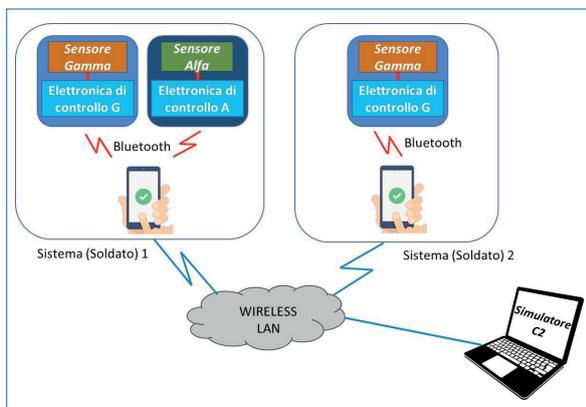


Figura 5 - Schema logico della dislocazione degli elementi del sistema sul campo (sn) e schema concettuale delle comunicazioni (dx).

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le tecnologie HEALTH SHELL e iDETECT rappresentano risposte innovative alla necessità di rilevare e proteggere dagli effetti delle radiazioni ionizzanti. HEALTH SHELL offre un'efficace protezione dalle radiazioni per personale militare e per la sicurezza di equipaggiamento, nonché in settori a rischio come l'industria aerospaziale e l'edilizia. Inoltre, ha un grande potenziale per applicazioni duali, come l'individuazione di discariche illegali contenenti rifiuti radioattivi e nei checkpoint di porti e aeroporti.

D'altro canto, iDETECT è un sistema di rilevamento di radiazioni ionizzanti in grado di integrarsi nel progetto "Soldato Futuro" e nella tutela del personale militare in ambienti ostili. iDETECT trova anche impiego in applicazioni civili per il monitoraggio di aree a rischio di presenza di radiazioni ionizzanti. Inoltre, ha un forte potenziale per l'industria energetica nucleare, laddove l'inquinamento radioattivo e gli incidenti nucleari richiedono una soluzione di rilevamento e monitoraggio.

Entrambe le tecnologie hanno forti implicazioni commerciali in molte applicazioni civili e militari,

inclusi i settori industriali ad alto rischio, come la lavorazione dei metalli rifusi, la radiologia medica e l'edilizia. In sintesi, HEALTH SHELL e iDETECT sono soluzioni avanzate in grado di affrontare i rischi associati alle radiazioni ionizzanti, con impatti significativi sulla protezione delle persone e della proprietà, in una vasta gamma di applicazioni militari e civili.

CONCLUSIONI

Sono state sviluppate due soluzioni per la tutela dalla radiazione ionizzante. HEALTH SHELL schermata edifici e mezzi, riducendo gli effetti negativi sul personale e sui materiali, trovando applicazioni in ambito militare e civile e presentando anche opportunità commerciali. iDetect è un sistema di rilevazione delle radiazioni ionizzanti che fornisce dati in tempo reale e comunicazione automatica alla catena di comando, adatto per uso militare e civile in contesti a rischio, come l'industria nucleare, e anche come completamento dell'equipaggiamento UAV. Entrambe le soluzioni offrono una maggiore protezione alle persone e ai materiali esposti alle radiazioni ionizzanti, fornendo anche opportunità di applicazione commerciali.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>eV</i>	Elettronvolt
<i>Ci</i>	Curie
<i>Bq</i>	Becquerel
<i>VMQ</i>	Vinyl-Methyl-Polysiloxane
<i>PVMQ</i>	Phenyl-Vinyl-Methyl-Polisiloxane
<i>XR</i>	X-Rays

PAROLE CHIAVE

Sistema di rilevamento radiazioni ionizzanti, sensore, raggi gamma, raggi X.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.018 and a2020.007
Amministrazione appaltante:	COMMISERVIZI
Ente responsabile del progetto:	SOLUZIONI INGEGNERIA SVILUPPO Srl.
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Sig.ra Tiziana RUSSO
Recapiti del responsabile del progetto:	Via del Velodromo, 00181 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 78.20.234
E-mail del responsabile del progetto:	info@sisrl.it

BIBLIOGRAFIA

Cucinotta et al, Evaluating shielding effectiveness for reducing space radiation cancer risks, *Radiat. Meas.*, 2006, 41, 1173–1185.

Clough et al., Radiation resistance of polymers and composites. In D.W. Clegg & A.A. Collyer (Eds.), *Irradiation effects on polymers* (pp. 79-156). 1991, London & New York: Elsevier Applied Science.

Defects and radiation damage in metals, Thompson, M W, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1974.

Hobbs et al., Radiation effects in ceramics, *J. Nucl. Mater.*, 1994, 216, 291-321.

Primary Radiation Damage in Materials, OECD/NEA Report, 2015, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/066/46066650.pdf

Wani et al., Lead toxicity: a review, *Interdiscipl. Toxicol.*, 2015, 8, 55–64.

La sicurezza nelle telecomunicazioni militari, in particolare quelli satellitari, è sicuramente uno dei settori strategici di sviluppo tecnologico. Il progetto PNRM METEORE “METAmateriali a cambiamento di fase per telecomunicazioni satellitari sicure” (A2019.234, inizio: 25 agosto 2021) intende contribuire a tale tematica, collocandosi nell’ambito dei potenziali interessi della Difesa nello sviluppo di azioni e tecnologie per la sicurezza anche in ambito spaziale.

METEORE si pone infatti come obiettivi primari la progettazione, la realizzazione e l’ottimizzazione di sorgenti a singolo fotone basate su terre rare da utilizzare nella crittografia quantistica per telecomunicazioni sicure da satellite o aerospaziali nel vicino infrarosso o nel visibile. A tale scopo verranno utilizzati emettitori quantistici (Er o Eu per esempio) accoppiati a metamateriali riconfigurabili attivamente a base di VO⁻², sfruttandone le proprietà di materiale a cambiamento di fase. Questo consentirà di sviluppare anche *smart radiators* a base di VO₂ per la gestione termica attiva dei dispositivi su satellite.

Il Consorzio di METEORE è formato dall’Unità di Ricerca dell’Università di Padova (UniPD) coordinata dal Prof. Giovanni Mattei (Dip. di Fisica e Astronomia, Responsabile Scientifico del Progetto), dall’Unità di Ricerca dell’Università di Roma La Sapienza (UniRM), coordinata dalla Prof.ssa Concita Sibia (Dipartimento di Scienze di Base e Applicate per l’Ingegneria), e dall’Unità di Ricerca dell’Università di Palermo (UniPA), coordinata dal Prof. Roberto Macaluso (Dipartimento di Ingegneria).

INTRODUZIONE

Le telecomunicazioni ed in particolare quelle satellitari (militari e civili) richiedono sempre maggiori standard di sicurezza [1,2]. La crittografia quantistica, basata su leggi fondamentali della fisica, recentemente si è imposta come nuova frontiera per ottenere livelli di sicurezza non raggiungibili con la crittografia standard. Ad esempio, per la Quantum Key Distribution (QKD), la crittografia quantistica richiede lo scambio di fotoni singoli in cui l’informazione viene codificata ad esempio nello stato di polarizzazione. Recentemente la possibilità di QKD è stata dimostrata tra satellite e terra con trasmissione a 850 nm. [3]

La generazione di fotoni singoli per telecomunicazioni satellite-a-satellite e satellite-a-terra richiede lo sviluppo di nuove sorgenti sempre più efficienti che siano in grado idealmente di produrre singoli fotoni on-demand in diverse regioni spettrali. Inol-

tre, mentre la trasmissione in fibra o nello spazio vuoto sono più immuni da perdita di fotoni e da decoerenza [1], per avere una efficace trasmissione attraverso l’atmosfera di fotoni singoli coerenti alcune finestre di frequenze sono particolarmente adatte come ad esempio la Near-Infrared NIR (0.75 - 1.4 μm), la Short-Wavelength Infrared SWIR (1.4 - 3.0 μm) o la Long-Wavelength Infrared LWIR (8.0 - 14.0 μm).

Un altro dei problemi tipici della generazione di luce non-classica e di singoli fotoni è la stabilizzazione e/o l’isolamento termico dei componenti opto-elettronici usati. In generale, infatti le sorgenti attualmente usate lavorano a temperature criogeniche di pochi Kelvin. Nei satelliti questo problema è particolarmente sentito a causa dell’elevato scarto termico esistente tra la fase in cui il satellite è sotto illuminazione solare (che richiede componenti che schermano la radiazione rimuovendo il

calore in eccesso) e la fase in cui il satellite si trova nel cono d'ombra terrestre. [4] L'isolamento termico potrebbe essere assicurato sia a livello di circuito che dell'intero satellite.

Il progetto METEORE si pone quindi come obiettivi primari la progettazione, la realizzazione e l'ottimizzazione di sorgenti a singolo fotone basate su terre rare da utilizzare nella crittografia quantistica per telecomunicazioni sicure da satellite o aerospaziali nel vicino infrarosso o nel visibile. A tale scopo verranno utilizzati emettitori quantistici (Er o Eu per esempio) accoppiati a metamateriali riconfigurabili attivamente a base di VO_2 , sfruttandone le proprietà di materiale a cambiamento di fase. Questo consentirà di sviluppare anche smart radiators a base di VO_2 per la gestione termica attiva dei dispositivi su satellite.

STATO DELL'ARTE DELLA TECNOLOGIA PROPOSTA

Le sorgenti a singolo fotone sono alla base di molte tecnologie quantistiche e in particolare per telecomunicazioni satellitari sicure. La sorgente ideale dovrebbe fornire un singolo fotone, on-demand e con un definito stato di polarizzazione. [5]

Le sorgenti principali si basano su due metodi principali: conversione in frequenza nonlineare o emissione spontanea di singoli emettitori. Il primo è attualmente il riferimento tecnologico, ma soffre della crescente probabilità di generare fotoni multipli all'aumentare della brillantezza, [6] perdendo efficacia. Perciò le sorgenti a singolo emettitore – singoli ioni, centri di colore (come centri N-V in diamante) o quantum dots- si stanno imponendo in quanto assimilabili ad un sistema a 2 livelli intrinsecamente in grado di emettere fotoni singoli indipendentemente dalla brillantezza. [7] Molti di questi emettitori lavorano solo a temperature criogeniche e anche se ciò nello spazio è meno critico, comunque richiede uno sforzo di stabilizzazione della temperatura nei satelliti in orbita. Le sorgenti basate su ioni di terre rare in ossidi offrono transizioni atomiche spettralmente molto

strette (utilizzabili anche a temperature non criogeniche) e lunghi tempi di coerenza. [8] I tempi di vita molto lunghi dello stato eccitato radiativo (circa 10 ms per l'Er a $1.5 \mu\text{m}$) però portano a efficienze di emissione molto basse. Una strada promettente è l'accoppiamento con cavità nanostrutturate, ad esempio di Si, che ha portato ad un aumento della efficienza di emissione di 2-3 ordini di grandezza per l'Er a $1.5 \mu\text{m}$, cioè nel range tipico delle telecomunicazioni. [9] Il design di risonatori ottici più efficienti e la possibilità di riconfigurarli dall'esterno con variazioni controllate della Local Density of States LDOS attorno all'emettitore consentirebbe performance ancora più spinte. I satelliti sono soggetti a sbalzi di temperatura esterna da -150 a $+150$ °C, ma internamente regolata tra -10 e 50 °C. Gli attuali sistemi di controllo termico dinamico usano feritoie meccaniche aperte e chiuse per regolare l'irraggiamento. [10] Un radiatore semplice in Al mantiene la temperatura interna nel range consentito ma solo per bassi carichi termici ($2-8 \text{ W/m}^2$). Per carichi termici maggiori (150 W/m^2) si impongono rivestimenti con elevata emissività. Gli attuali Smart Radiator usano rivestimenti a film sottile su coperte termiche in Kapton e Teflon FEP o su radiatori termici in Al [11], ma notevoli vantaggi in termini di peso, costi e integrazione si possono ottenere con materiali a transizione di fase come film sottili di WO_3 o VO_2 . [12]

ASPETTI TECNICI E INNOVATIVI DELLA TECNOLOGIA PROPOSTA

La soluzione tecnologica proposta in METEORE si basa sull'uso di materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials, PCM) a stato solido quali il biossido di vanadio (VO_2) accoppiati con emettitori quantistici (ioni di terra rara come Er^{3+} o Eu^{3+}).

Il VO_2 mostra una transizione reversibile semiconduttore-metallo (semiconductor-to-metal transition, SMT) dalla fase Monoclina M1 a quella Rutilo R alla temperatura di circa 68 °C modifica-

bile con opportuni drogaggi (con W, Ge, ...) e/o nanostrutturazioni superficiali, come mostrato in Fig. 1 [15].

È possibile cambiare dinamicamente le proprietà

ottiche di VO_2 (quali riflettività, in particolare nello spettro Infrarosso IR) ma anche la conducibilità elettrica e quella termica, rendendolo compatibile con i severi requisiti dell'ambiente spaziale.

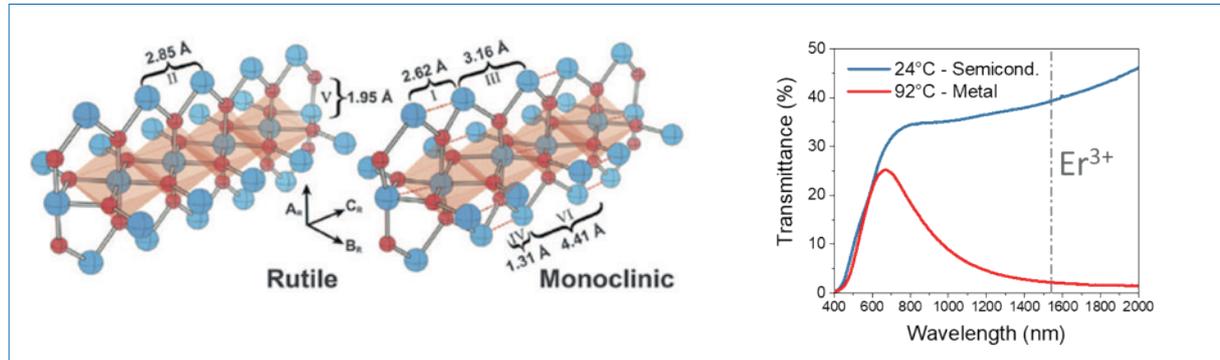


Fig. 1 - A sinistra: le due strutture cristallografiche del VO_2 : rutile (alta temperatura, metallico), monocino (temperatura ambiente, semiconduttore). A destra: trasmittanza ottica nelle due fasi relativamente allo ione Er^{3+} , l'emettitore scelto in METEORE. [15]

L'uso di ioni di terre rare in dielettrici come sorgenti a singolo fotone è legato alla natura delle transizioni radiative che coinvolgono stati $4f$ che essendo schermati dagli elettroni più esterni li rendono approssimabili a sistemi quantistici ideali a due livelli. Le transizioni fra stati $4f$ hanno però una bassa efficienza di emissione. L'idea base del progetto è di aumentare l'efficienza di emissione di singoli ioni di terre rare (Er a 1.5 μm e Eu a 0.6 μm) tramite accoppiamento con nanostrutture fotoniche con LDOS ingegnerizzata. Di recente il nostro gruppo ha dimostrato un aumento di quasi un ordine di grandezza dell'efficienza di emissione a T ambiente di ioni Er in SiO_2 accoppiata a nanohole array plasmonici con trasmissione ottica straordinaria a 1.5 μm . [13] Lavorando a temperature criogeniche le performance possono essere ancora aumentate. [9] L'aspetto più innovativo del progetto è l'uso di risonatori ottici con metamateriali riconfigurabili a base di VO_2 , che permettono un controllo attivo sull'emissione della terra rara con due meccanismi: ingegnerizzazione degli stati ottici e loro modifica sfruttando la transizione ultrafast indotta da pompaggio laser al ps o fs. Il nostro gruppo ha recentemente mostrato con simulazioni

elettrodinamiche come semplici nanostrutture in cui ioni Er in SiO_2 sono accoppiati ad un nanostrato di VO_2 e ad array ordinati di nanoantenne di Au aumentino di un ordine di grandezza l'efficienza di emissione e la direzionalità a valle della transizione SMT a metallo. [14] L'idea innovativa del progetto è duplice: disegnare e realizzare risonatori ottici ancora più efficaci testati su sistemi di emettitori e poi spingere lo studio verso il singolo emettitore posto dove la cavità ottica offre il maggior aumento di efficienza quantica. Il progetto dimostrerà la possibilità di ottenere emissione a singolo fotone da una sorgente meno sensibile alla temperatura rispetto alle sorgenti attualmente studiate. L'ulteriore grado di innovatività è nel controllo termico realizzato ancora con metamateriali riconfigurabili contenenti VO_2 . Disegnando opportunamente metasuperfici nanostrutturate di VO_2 si ottiene un significativo miglioramento dell'emissione nell'IR. Il progetto dimostrerà come radiatori intelligenti basati su metasuperfici nanostrutturate di VO_2 aprano una nuova strada a sistemi di controllo termico passivo a risparmio energetico ed economico dei veicoli spaziali.

METODOLOGIA

Il Progetto si articola in 3 Fasi (ognuna di durata annuale) come di seguito descritto.

Fase 1 – Progettazione e sviluppo dei metamateriali (TRL 1-2)

In questa Fase (appena conclusa) sono state effettuate simulazioni delle proprietà dei metamateriali (assorbimento e riflettività spettrali) e di controllo della LDOS degli emettitori (riduzione del tempo di vita radiativo, effetto Purcell e direttività) per il design di risonatori ottici nanostrutturati riconfigurabili. Sono poi stati prodotti film sottili di VO_2 , da utilizzare come risonatori ottici nanostrutturati e per il controllo attivo della temperatura. Si è proceduto allo studio della transizione SMT dei metamateriali e delle proprietà di emissione degli emettitori accoppiati e allo studio delle proprietà di dissipazione termica dei metamateriali.

Fase 2 – Ottimizzazione dei metamateriali (TRL 2-3)

In questa fase si produrranno film sottili di VO_2 a diverso drogaggio (W, Co o Ti, Ge) per il controllo della temperatura di SMT e delle proprietà ottiche. Si procederà poi alla progettazione e alla sintesi di metamateriali avanzati (es., a dispersione iperbolica) a base di VO_2 per il controllo della efficienza quantica di emissione ed in particolare allo studio dell'emissione a singolo fotone con controllo termico o ottico dei nanosistemi a base di VO_2 .

Fase 3 – Sviluppo di un dimostratore (TRL 3-4)

Nella fase finale si completerà lo studio della stabilità termica e dell'ottimizzazione del grado di purezza dell'emissione a singolo fotone. Questo anche attraverso lo sviluppo di tecnologie per integrare il pompaggio ottico al ps o fs per indurre la transizione di fase in VO_2 . Si valuteranno possibili soluzioni alternative per il controllo della transizione SMT con potenziali elettrici. Alla fine si procederà all'integrazione dei metamateriali in un di-

mostratore da laboratorio che emetta fotoni singoli on-demand con schermatura termica esterna.

RISULTATI

Al momento i risultati ottenuti da METEORE riguardano la Fase 1 (“Progettazione e Sviluppo dei Metamateriali”). Sono stati raggiunti due obiettivi principali: (i) la dimostrazione del controllo dell'efficienza quantica di emissione di Er^{3+} a 1.5 micron attraverso l'accoppiamento con la VO_2 ; (ii) la dimostrazione del controllo dell'emissività nell'IR di film sottili nanostrutturati di VO_2 .

Accoppiamento metamateriale a cambiamento di fase con emettitore

La dimostrazione del controllo attivo dell'emissione di ioni Er^{3+} in SiO_2 è stata ottenuta come mostrato in Fig. 2 per un film di VO_2 spesso 135 nm ottenuto per PVD accoppiato in near-field ad uno strato di 20 nm di Er in SiO_2 (emettitore a temperatura ambiente a 1540 nm) ad una distanza di 16 nm dall'interfaccia. In particolare, nella Fig. 2d si vede come con lo strato di VO_2 il tempo di vita dell'emissione risulti accelerato di un fattore 10 rispetto al riferimento $\tau_{ref} = 10.8$ ms) in ottimo accordo con l'aumento del fattore di Purcell e della densità degli stati ottici. Questo aumento dell'efficienza quantica di emissione legata alla diminuzione del tempo di vita, può essere controllata attivamente variando la temperatura del VO_2 . Infatti, come mostrato in Fig. 2d, una ulteriore accelerazione dell'emissione reversibile si misura durante il cambiamento di fase della VO_2 ($\tau_{M1} = 1.33$ ms e $\tau_R = 0.65$ ms, per la fase monoclinica e rutilo, rispettivamente), come previsto dalle simulazioni.

La dimostrazione dell'ottenimento del controllo attivo e continuo dell'emettitore in funzione della temperatura è ulteriormente mostrata in Fig. 3. In particolare, si vede come il tempo di vita (Fig. 3a) segua lo stesso ciclo di isteresi attorno alla temperatura attesa per la transizione SMT (68°C) seguito sia dalla struttura cristallina che dalla trasmittanza ottica (Fig. 3b), legate tutte alla variazione della frazione relativa della fase monoclinica (M1, semicon-

duttore, bassa temperatura) a quella rutilo (R, metallica, alta temperatura) come mostrato in Fig. 3c.

Controllo dell'emissione nell'Infrarosso

Il controllo dell'emissività infrarossa tramite VO₂ è dimostrato in Fig. 4 per i campioni con diverso spessore ottenuti per Pulsed Laser Deposition PLD

su zaffiro a 550°C in funzione del numero di impulsi laser (riportate in Fig. 4a). Come si vede la diversa nanostrutturazione legata al diverso spessore produce una diversa variazione delle proprietà di emissività nell'intervallo Long-Wavelength Infrared LWIR (8 - 14 μm). In particolare, l'emissività presenta cicli di isteresi in funzione della tempera-

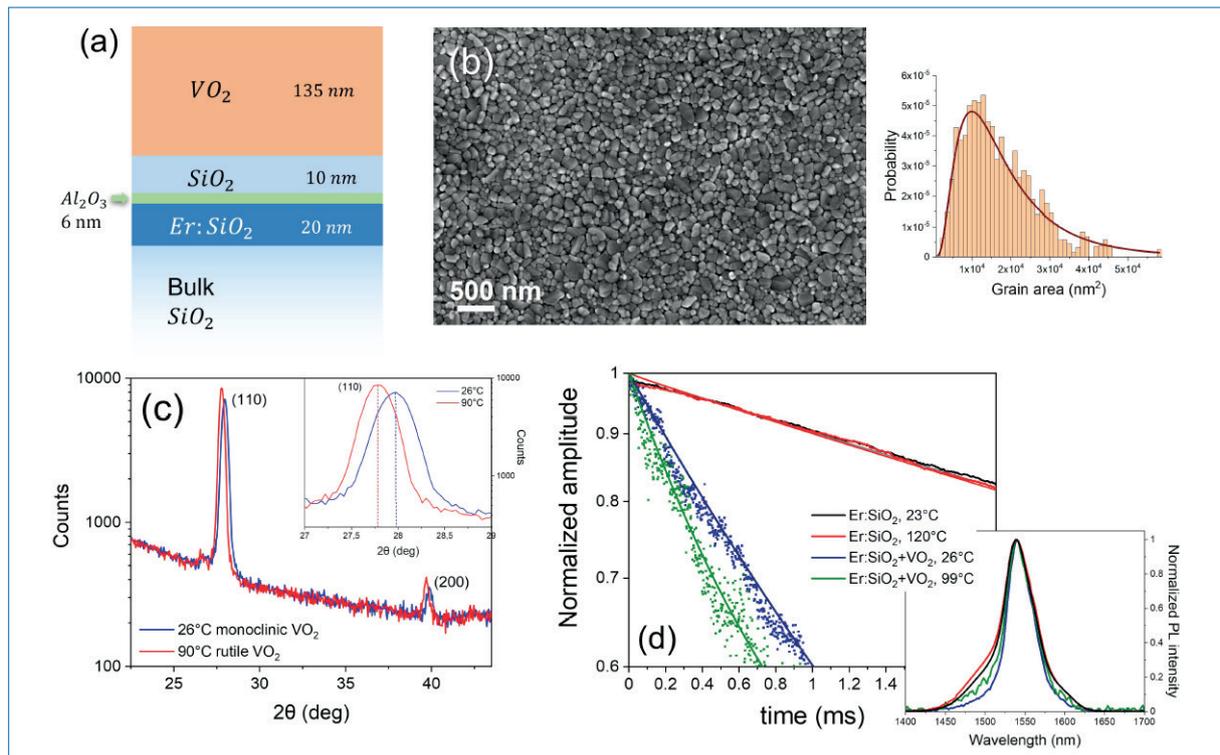


Fig. 2 - a) schema della struttura del campione. b) immagine SEM in vista piana della superficie dello strato VO₂; Il pannello a destra mostra la distribuzione granulometrica e il corrispondente fit lognormale (curva rossa). c) spettri GIXRD del film sottile VO₂ ottenuto a temperatura ambiente (26 °C) e ad alta temperatura (90 °C); l'inserto mostra lo spostamento del picco del VO₂ (110) come conseguenza della sua transizione di fase da monoclinico a rutilo. (d) curve di decadimento temporale normalizzate dell'emissione Er³⁺ a 1540 nm (in scala logaritmica) misurate a bassa e alta temperatura dallo strato Er:SiO₂, senza e con il film sottile VO₂ sulla parte superiore; Le linee continue sono i fit ai dati sperimentali. L'inserto mostra gli spettri Er³⁺ PL a temperatura ambiente misurati nell'intervallo 1400-1700 nm.

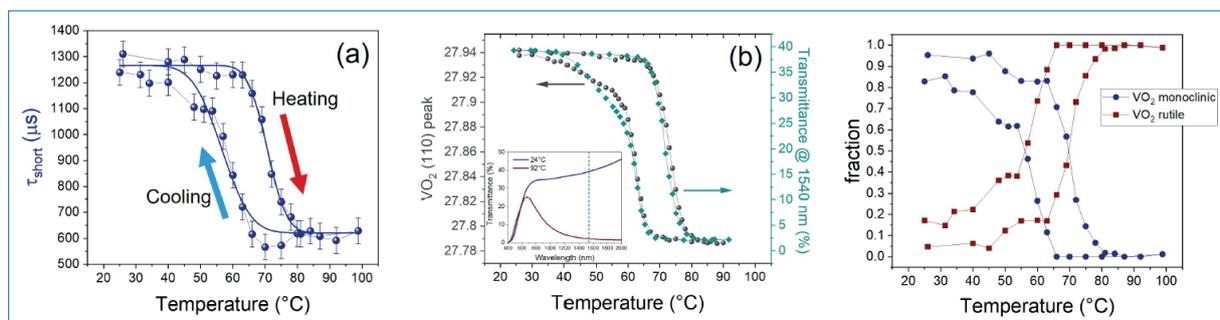


Fig. 3: a) Evoluzione, in funzione della temperatura, del tempo di vita della emissione dello ione Er³⁺. Le linee continue sono i fit ai dati sperimentali. (b) Cicli di isteresi termica del picco VO₂ (110) GIXRD (punti grigi, scala di sinistra) e della trasmittanza del campione a 1540 nm (punti ciano scuro, scala di destra). L'inserto mostra le curve di trasmittanza nell'intervallo 400-2000 nm, misurate a bassa (24 °C) e alta (92 °C) temperatura; La linea tratteggiata indica la lunghezza d'onda di 1540 nm. (c) Frazioni di ioni Er₃₊ accoppiati con VO₂ nella fase monoclinica (fM, punti blu) o nella fase rutilo (fR, quadrati rossi), in funzione della temperatura del campione.

tura che hanno ampiezza che scala con lo spessore, come mostrato in Fig. 5. Inoltre, in funzione dello spessore del film, l'emissività LWIR mostra una netta diminuzione sopra la transizione SMT della VO₂ rispetto al dato a temperatura ambiente.

CONCLUSIONI

La sicurezza nelle telecomunicazioni militari, in particolare quelli satellitari, è sicuramente uno dei

settori strategici di sviluppo tecnologico. Il Progetto METEORE intende contribuire a tale tematica, collocandosi nell'ambito dei potenziali interessi della Difesa nello sviluppo di azioni e tecnologie per la sicurezza anche in ambito spaziale. Inoltre, i risultati ottenibili da METEORE sul controllo attivo della dissipazione termica hanno certamente valenza anche oltre ai sistemi satellitari: infatti essi potranno essere trasferiti ed ampliati per contri-

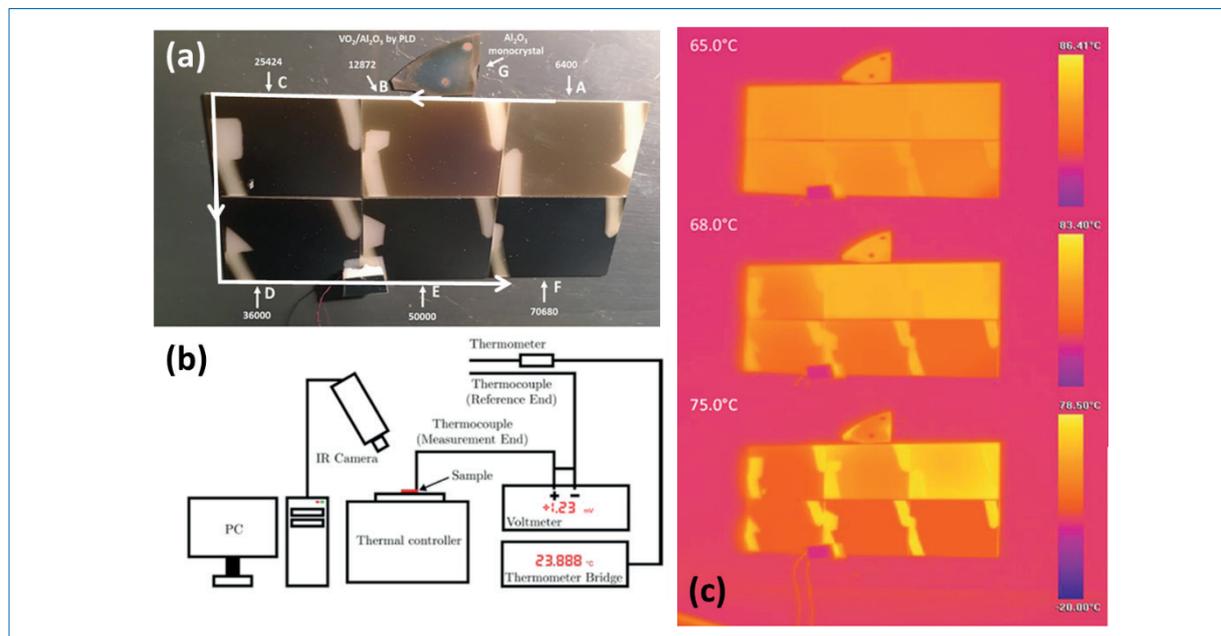


Fig. 4 - (a) foto dei film di VO₂ ottenuti per PLD in funzione del numero di impulsi laser a T=550°C; (b) schema dell'apparato di termografia infrarossa usato per ottenere le immagini termografiche; (c) Immagine termografica dei campioni A,B,C,D,E e F al di sotto e al di sopra della temperatura di transizione (65, 68 e 75 °C) durante il ciclo di riscaldamento. I campioni sono posti su una piastra di alluminio secondo la stessa disposizione in (a). A sinistra la temperatura apparente misurata dalla termocoppia. A destra la mappa a colori della temperatura apparente.

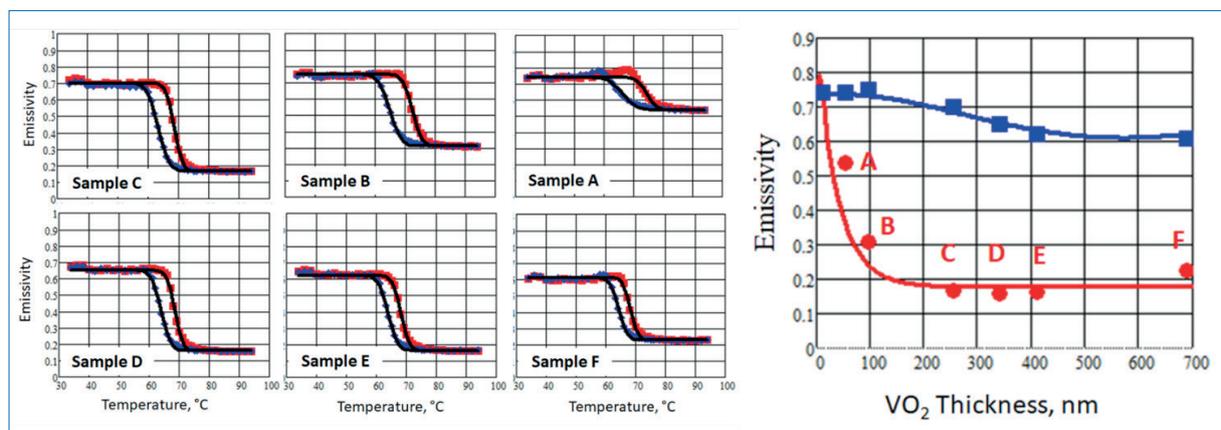


Fig. 5 - a sinistra: emissività in funzione della temperatura reale per film sottili di VO₂ per campioni A, B, C, D, E e F depositati su un substrato di zaffiro di 0.5 mm mediante PLD a 550 °C. L'emissività viene calcolata mediante termografia IR nell'intervallo LWIR (8 - 14 μm). I colori rosso (blu) si riferiscono al ciclo di riscaldamento (raffreddamento). Le linee nere continue rappresentano il fit. A destra: emissività integrata nello spettro LWIR in funzione dello spessore dei film di VO₂ per la fase monoclinica (blu) e rutilo (rossa).

buire per esempio alla riduzione dei problemi di budget termico in tutti quei sistemi aerospaziali ma anche terrestri che necessitano di lavorare in condizioni di forte scarto termico.

Lo sviluppo di sorgenti a singolo fotone e la gestione dei problemi di dissipazione termica presentano una valenza anche in campo civile: lo sviluppo di efficienti sorgenti a singolo fotone nell'infrarosso infatti può trovare immediata applicazione anche nelle tecnologie di interesse delle telecomunicazioni civili in fibra. Ad esempio, le fibre ottiche attualmente in uso a base di silice presentano una banda col minimo di perdite di propagazione proprio nella finestra attorno a 1.5 μm in cui infatti l'Er è già ampiamente usato. Inoltre i metamateriali svi-

luppati per gestire la dissipazione termica possono immediatamente essere trasferibili alla tecnologia civile architettonico-abitativa delle smart window, in cui si può autolimitare e/o regolare in maniera intelligente l'insolazione indoor con i materiali a cambiamento di fase, contribuendo ad una gestione più green, con minore impatto ambientale.

Come descritto nella sezione di metodologie, il livello di TRL medio di METEORE è più spostato verso lo sviluppo tecnologico di base. Tuttavia, le metodologie proposte si basano su tecnologie facilmente scalabili a livello industriale. Inoltre, nella Fase 3 del progetto l'obiettivo è di sviluppare un dimostratore (TRL 4) che possa essere prodotto in condizioni trasferibili a livello produttivo.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>GIXRD</i>	Grazing-Incidence X-Ray Diffraction
<i>IR</i>	Infrarosso
<i>LDOS</i>	Local Density of States
<i>LWIR</i>	Long-Wavelength Infrared
<i>MI</i>	Fase Monoclina della VO2
<i>NIR</i>	Near-Infrared
<i>PCM</i>	Phase Change Materials
<i>PLD</i>	Pulsed Laser Deposition
<i>QKD</i>	Quantum Key Distribution
<i>R</i>	Fase Rutile della VO2
<i>SMT</i>	Semiconductor-to-Metal transition
<i>SWIR</i>	Short-Wavelength Infrared
<i>TRL</i>	Technology Readiness Level

PAROLE CHIAVE

Materiali a cambiamento di fase, sorgenti a singolo fotone, controllo termico.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda: PNRM:	a2019.234
Ente responsabile del progetto:	Università degli Studi di Padova.
Città Regione:	Veneto
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Giovanni MATTEI
Recapiti del responsabile del progetto:	Via 8 Febbraio Padova
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	049.8277088
Email:	giovanni.mattei.pd@pec.it

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Kurtsiefer, P. Zarda, M. Halder, H. Weinfurter, P. M. Gorman, P. R. Tapster, and J. G. Rarity, *A Step towards Global Key Distribution*, Nature 419, 450 (2002).
- [2] C.-Z. Peng et al., *Experimental Free-Space Distribution of Entangled Photon Pairs Over 13 Km: Towards Satellite-Based Global Quantum Communication*, Phys. Rev. Lett. 94, 150501 (2005).
- [3] S.-K. Liao et al., *Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network*, Phys. Rev. Lett. 120, 030501 (2018).
- [4] R. Karam, *Satellite Thermal Control for Systems Engineers* (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, 1998).
- [5] P. Senellart, G. Solomon, and A. White, *High-Performance Semiconductor Quantum-Dot Single-Photon Sources*, Nature Nanotechnology 12, 11 (2017).
- [6] N. Somaschi et al., *Near-Optimal Single-Photon Sources in the Solid State*, Nature Photonics 10, 5 (2016).
- [7] I. Aharonovich, D. Englund, and M. Toth, *Solid-State Single-Photon Emitters*, Nature Photon 10, 10 (2016).
- [8] T. Zhong, J. M. Kindem, E. Miyazono, and A. Faraon, *Nanophotonic Coherent Light–Matter Interfaces Based on Rare-Earth-Doped Crystals*, Nat Commun 6, 1 (2015).
- [9] A. M. Dibos, M. Raha, C. M. Phenicie, and J. D. Thompson, *Atomic Source of Single Photons in the Telecom Band*, Phys. Rev. Lett. 120, 243601 (2018).
- [10] D. Gilmore, *Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I: Fundamental Technologies* (American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, DC, 2002).
- [11] F. Yu-Dong, W. Zhi-Min, M. Ya-Li, and Z. Fu-Jia, *Thin Film Design for Advanced Thermochromic Smart Radiator Devices*, Chinese Phys. 16, 1704 (2007).
- [12] A. Hendaoui, N. Émond, S. Dorval, M. Chaker, and E. Haddad, *Enhancement of the Positive Emission-Switching Performance of Thermochromic VO₂ Films Deposited on Al Substrate for an Efficient Passive Thermal Control of Spacecrafts*, Current Applied Physics 13, 875 (2013).
- [13] N. Michieli, B. Kalinic, C. Scian, T. Cesca, and G. Mattei, *Emission Rate Modification and Quantum Efficiency Enhancement of Er³⁺ Emitters by Near-Field Coupling with Nanohole Arrays*, ACS Photonics 5, 2189 (2018).
- [14] E. Petronijevic, M. Centini, T. Cesca, G. Mattei, F. A. Bovino, and C. Sibilìa, *Control of Au Nanoantenna Emission Enhancement of Magnetic Dipolar Emitters by Means of VO₂ Phase Change Layers*, Opt. Express, OE 27, 24260 (2019).
- [15] T. Cesca, C. Scian, E. Petronijevic, G. Leahu, R. L. Voti, G. Cesarini, R. Macaluso, M. Mosca, C. Sibilìa, and G. Mattei, *Correlation between in Situ Structural and Optical Characterization of the Semiconductor-to-Metal Phase Transition of VO₂ Thin Films on Sapphire*, Nanoscale 12, 851 (2020).
- [16] J. B. Kana Kana, J. M. Ndjaka, G. Vignaud, A. Gibaud, and M. Maaza, *Thermally Tunable Optical Constants of Vanadium Dioxide Thin Films Measured by Spectroscopic Ellipsometry*, Optics Communications 284, 807 (2011).
- [17] S. A. Bukhari, S. Kumar, P. Kumar, S. P. Gumfekar, H.-J. Chung, T. Thundat, and A. Goswami, *The Effect of Oxygen Flow Rate on Metal–Insulator Transition (MIT) Characteristics of Vanadium Dioxide (VO₂) Thin Films by Pulsed Laser Deposition (PLD)*, Applied Surface Science 529, 146995 (2020).
- [18] C. L. Gomez-Heredia, J. A. Ramirez-Rincon, J. Ordonez-Miranda, O. Ares, J. J. Alvarado-Gil, C. Champeaux, F. Dumas-Bouchiat, Y. Ezzahri, and K. Joulain, *Thermal Hysteresis Measurement of the VO₂ Emissivity and Its Application in Thermal Rectification*, Sci Rep 8, 1 (2018).

Il Progetto ARAMIS (Advanced Radio Access for Military Solution) assegnato all'azienda Italspazio del Ministero della Difesa Italiano (Teledife) nell'ambito del PNRM (Piano Nazionale Ricerca Militare) è rivolto alla finalizzazione di un payload di comunicazione con satellite geostazionario (Athena-Fidus), payload di inter satellite link (ISL) e payload di ricerca di interferenti radar. Ciò è possibile grazie all'uso di piccoli sistemi satellitari unitamente a una strategia di lancio rapida in grado di incrementare le capacità di missione e completare le risorse strategiche esistenti, il tutto "a basso costo".

Dopo una prima analisi delle esigenze operative sono state realizzate delle analisi di missione, che hanno permesso di emettere i requisiti di sistema di ciascun payload. Di seguito si è passati alla definizione delle specifiche realizzative dei singoli componenti e alla progettazione elettrica (RF) e meccanica, avvenuta attraverso i più noti strumenti di progettazione e di simulazione contenuti all'interno della stessa azienda, fino alla realizzazione degli stessi.

Tra gli elementi innovativi è importante citare lo sviluppo dei due payload di comunicazione:

- La comunicazione con il satellite geostazionario realizzata attraverso lo sviluppo di un'antenna in banda Ka di tipo deployable da 60 cm, in grado di essere posizionata in appena 1.5U CubeSat e mediante il progetto di catene di up conversion e down conversion che permettono la condivisione del Modem dati con il payload ISL.
- La comunicazione Intersatellite ISL realizzata attraverso lo sviluppo di un tipo di antenna "bull's eye", che permette di ottimizzare lo spazio necessario al suo posizionamento nel e mediante il progetto di catene di up conversione e down conversione che permettono di condividere l'uso del modem dati con le comunicazioni in banda Ka.

La progettazione, lo sviluppo, la simulazione e la realizzazione della antenna del payload di comunicazione in banda Ka rappresentano una notevole innovazione tecnica e tecnologica e allo stesso tempo una sfida che l'azienda ha perseguito con scelte costruttive, al fine di realizzare un'antenna in versione "deployable" tale da poter essere richiusa in 1,5 U di CubeSat.

L'antenna "bull's eye" risponde all'esigenza di comunicazione tra satelliti (ISL), oltre ad aver permesso di risparmiare spazio all'interno al CubeSat così come mostrato in Figura 1. Il payload di ricezione dei segnali radar da terra è stato progettato e sviluppato utilizzando un front-end RF/microonde capace di traslare, su una banda istantanea di 1GHz, lo spettro



Figura 1 - Antenna "Bull'seye"

da 2 a 18 GHz tipico della osservazione di segnali radar. Associato al front-end è stata progettata una unità digitale composta da un convertitore A/D ad alta velocità di conversione unitamente ad un chip della famiglia MpSoc di nuova generazione avente una FPGA Zynq Ultrascale altamente performante e due processori ARM Cortex dual e quad core. Italspazio ritiene che l'associazione delle due componenti RF front-end ed unità digitale rappresenti una innovazione importante nello sviluppo dei payload per CubeSat e tale da permettere di avere quella flessibilità operativa che permetterà di operare su segnali aventi un vasto range di frequenza, avendo una banda passante istantanea di analisi 1 GHz.

INTRODUZIONE

A fronte di una richiesta di mercato in cui diventa sempre più evidente la necessità di sistemi a basso costo e dalla possibilità di implementazioni veloci, in ambito satellitare esistono già delle risposte a questo tipo di domande, per quanto si tratti di sistemi più inclini ad un uso strategico, con costi genericamente non bassi, sia per la loro realizzazione e dispiegamento che per il loro uso. Il progetto ARAMIS si inserisce all'interno di questo quadro di ricerca, puntando allo studio, progettazione, implementazione e verifica di alcune tecnologie spaziali per CubeSat e anche alla realizzazione di una piccola missione IOV/IOD di un sistema satellitare Low Cost basato su alcuni CubeSat rappresentativi di una piccola costellazione in orbita bassa terrestre (LEO) a 530 km dalla Terra.

Il progetto nei suoi ambiti di applicazione sia militari che civili mira alla creazione di una costellazione di CubeSat per la ricerca di interferenti radar che possa costituire una risposta flessibile sia in ambito militare, con un particolare riferimento ad alcune esigenze tattiche delle nostre Forze Armate e anche per monitorare e mappare i fenomeni naturali, oltre che per usi commerciali, nel campo delle telecomunicazioni e delle immagini satellitari.

L'analisi di missione ha dimostrato la possibilità di realizzare tale sistema attraverso formazioni di tre o quattro piattaforme CubeSat 12U, dispiegate in orbite di media inclinazione, ottimali per la copertura delle regioni alle medie latitudini, o eliosincrone, qualora si esiga una copertura globale. I re-

quisiti dei sottosistemi necessari al mantenimento di tali formazioni sono stati oggetto di un'ampia analisi di missione, che ha coperto anche la verifica in laboratorio di alcuni sistemi, adoperando dei mock-up (Figura 2 e 3).

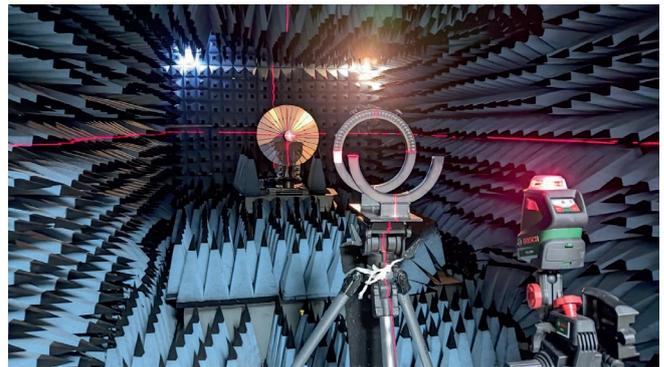


Figura 2 - Test antenna in camera anecoica

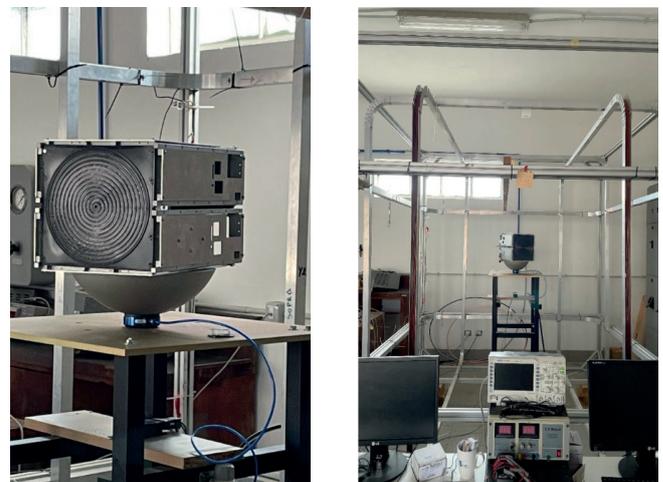


Figura 3 - Test di assetto del satellite in camera di Helmholtz

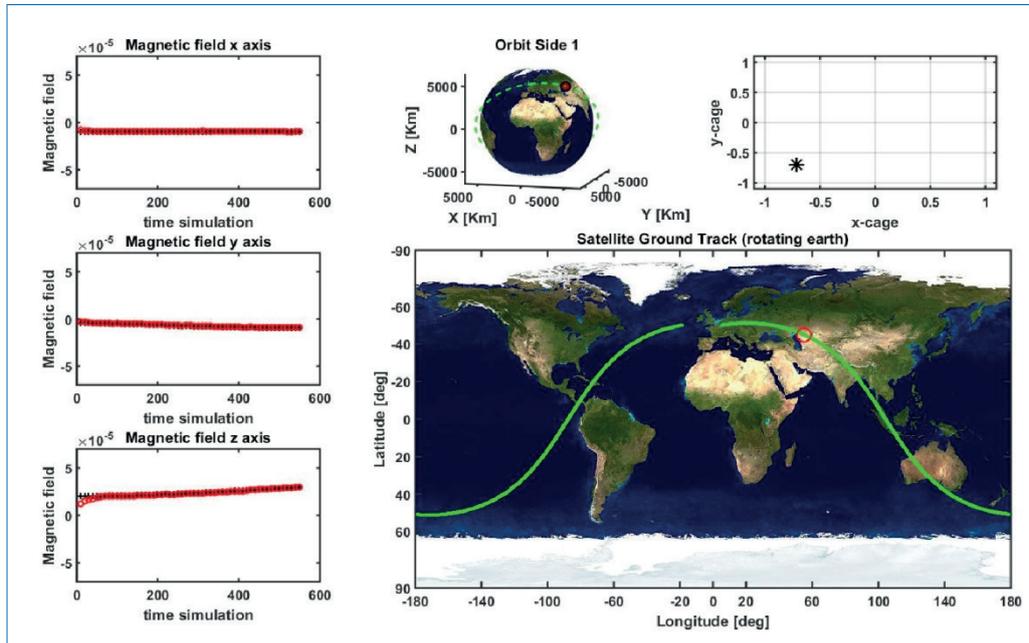


Figura 4
Traiettorie satelliti

PROBLEMATICHE INDIVIDUATE E SOLUZIONE TECNOLOGICHE

Sono state identificate diverse problematiche inerenti allo sviluppo di un ricevitore satellitare in grado di raccogliere le emissioni radar a terra e l'integrazione delle diverse sezioni di comunicazioni radio con il satellite Geostazionario e tra i satelliti in formazione (Figura 4). Le maggiori difficoltà hanno riguardato la necessaria miniaturizzazione delle soluzioni dei vari segmenti costituenti i vari payloads, al fine di integrare, nelle dimensioni di un CubeSat, le varie unità funzionali e mantenere l'affidabilità e robustezza richiesta del life cycle del

satellite a tempi adeguati alle missioni da svolgere. Per permettere la comunicazione tra i satelliti LEO ed il satellite Geostazionario sono state prese in considerazione soluzioni riguardanti l'utilizzo di antenne ad alto guadagno in modo da ridurre la potenza degli amplificatori che comporterebbe anche l'utilizzo massiccio delle risorse di energia e rendere fattibile il link budget di comunicazione. Italspazio ha identificato questa esigenza ed è riuscita a coniugare un alto guadagno con gli spazi limitati del CubeSat, progettando un tipo di antenna deployable sofisticata e complessa come mostrato in Figura 5.



Figura 5 - Antenna Ka deployable

Riguardo alla necessità di garantire la comunicazione tra satelliti (ISL) in formazione, si è preso in considerazione la possibilità di progettare e realizzare antenne a basso impatto volumetrico all'interno degli stessi CubeSat, proponendo delle antenne piatte di tipo "bull's eye".

Le problematiche inerenti allo sviluppo de payload di Ricezione segnali Radar sono legate alla necessità di realizzare un ricevitore avente contemporaneamente un elevato grado di miniaturizzazione per la integrazione negli spazi di un CubeSat, insieme alla capacità di monitorare un ampio spettro di frequenza (2-18 GHz) con una banda istantanea di 1 GHz. Questi obiettivi sono stati raggiunti utilizzando un sistema con tecnologia "super eterodina a doppia conversione" collegata ad un convertitore A/D con una frequenza di campionamento a 3GSpS a sua volta collegato ad una struttura MpSoc, integrando sia la FPGA di nuova generazione che processori ARM dual e quad core adatta ad acquisire i dati ad alta velocità provenienti dal convertitore A/D ed effettuare una prima elaborazione sui dati raccolti. Il processore finale raccoglie i dati manipolati li immagazzina nell'Unità di massa e li rende disponibili alla trasmissione a terra.

METODOLOGIA

Di seguito i dettagli scientifici e tecnici sulla ricerca e lo sviluppo della tecnologia.

PAYLOAD DI COMUNICAZIONE LEO-GEO

L'antenna a doppio riflettore è ottimizzata alla frequenza Ka, nelle bande Rx: 20.7 - 21.2 GHz e Tx: 30.7 – 31 GHz. I riflettori Cassegrain, i riflettori gregoriani e le configurazioni "splash plate" sono stati identificati come possibili candidati alla realizzazione della antenna. Due vincoli principali sono derivati dalla necessità degli azionamenti meccanici. In primo luogo, il rapporto F/D (dove F è la lunghezza focale e D il diametro del riflettore) risulta determinato dalla necessità di ridurre al minimo la curvatura delle centine in modo che esse stesse si adattino tra il meccanismo di distribuzione del sub-riflettore/horn e le pareti del CubeSat.

Per un riflettore da 58 cm viene determinato un rapporto F/D minimo di 0,44. In secondo luogo, l'altezza del sub-riflettore è direttamente influenzata dall'ingombro del sub-riflettore e dal numero di meccanismi necessari per il suo posizionamento. Per vincolare il progetto di dispiegamento del sub-riflettore al solo feed, questo deve essere posizionato al massimo 24 cm sopra il vertice. Tra le possibili soluzioni è stata scelta una configurazione d'antenna di tipo Cassegrain per soddisfare i vincoli di dispiegamento. L'antenna a riflettore mesh dispiegabile in banda Ka è costituita dai seguenti elementi principali: Il feed, tre stralli, un sub-riflettore iperbolico e un riflettore a maglia parabolica dispiegabile da 58 cm (Figura 6).



Figura 6 - Antenna Ka deployable

La lunghezza focale è impostata al minimo richiesto 0,44 (rapporto F/D) e quindi a 25,72 cm, al fine di ridurre al minimo il diametro del sub-riflettore per ridurre l'effetto di bloccaggio. La massima direttività possibile $D_{max} = (D/z)^2$ dell'antenna da 580

cm è pari a: 45,21 dBi alla frequenza di 30,75 GHz. Le figure 7 e 8 seguenti mostrano lo schema a blocchi della sezione Up-Conversione e Down Conversione delle comunicazioni del payload in banda Ka.

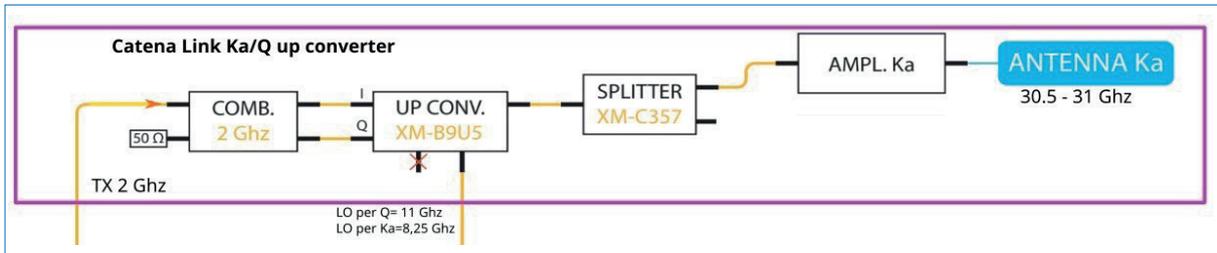


Figura 7 - Linea trasmissione Payload di comunicazione LEO-GEO

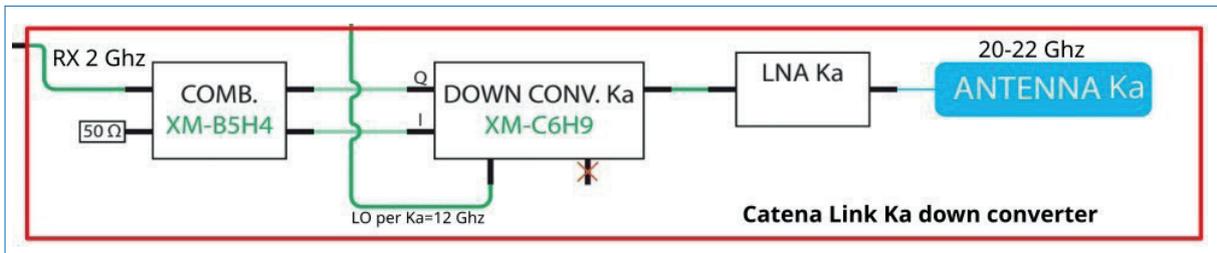


Figura 8 - Linea di ricezione payload di comunicazione LEO-GEO

PAYLOAD DI COMUNICAZIONE LEO-LEO

L'antenna consta di un piatto metallico con una piccola apertura centrale circondata da una struttura periodica, con periodicità di tipo 'onda quadra'. Il range di frequenze operativo è [41.800, 42.200] GHz che viene eccitata da una sezione in guida cir-

colare attraverso uno slot circolare. Lo spessore minimo d'antenna è limitato dalla profondità delle corrugazioni. La struttura corrugata periodica inizia ad una distanza di offset e le correnti non vengono influenzate dai campi reattivi che emergono dalla slot radiante. Inoltre, alla periferia del disco

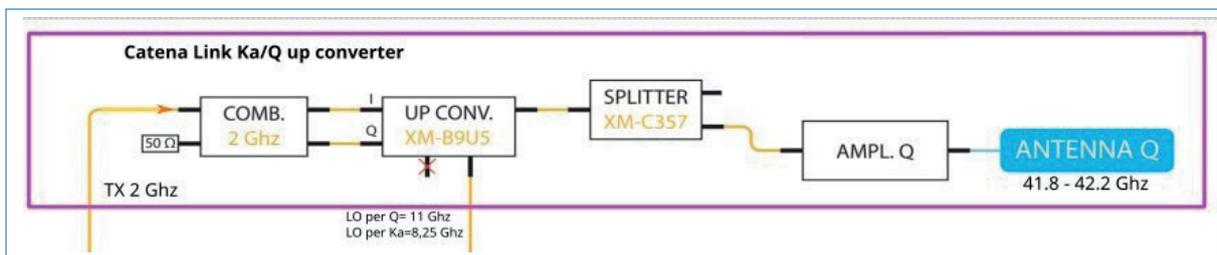


Figura 9 - Linea di trasmissione payload di comunicazioni LEO-LEO

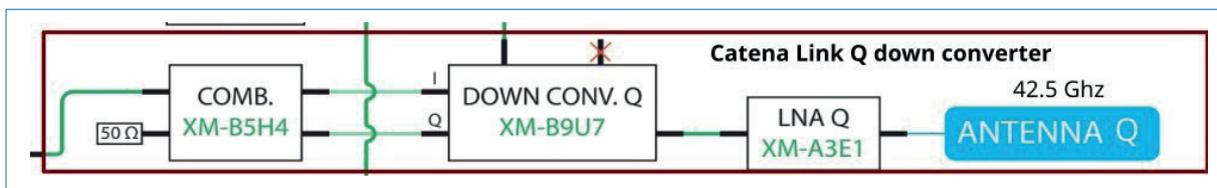


Figura 10 - Linea di ricezione payload di comunicazione LEO-LEO

d'antenna è presente un piccolo offset con lo scopo di ridurre il livello dei lobi laterali. Questo miglioramento può essere legato ad un'ottimizzazione della terminazione rispetto alla propagazione del segnale RF. La radiazione broadside avviene quando il periodo della struttura corrugata è prossimo alla lunghezza d'onda; in questa condizione, insieme ad un dimensionamento opportuno delle corrugazioni, la struttura periodica irradia un fascio stretto per eccitazione dell'armonica spaziale $n = -1$ (o modo di Floquet). La simmetria della struttura ha permesso l'impiego di piani di simmetria elettrico e magnetico ottenendo il vantaggio di poter lavorare su $1/4$ di essa. La lunghezza minima degli elementi mesh (tetraedri) è circa 0.37 mm. La struttura d'antenna presenta un diametro di 193.190 mm con un numero di corrugazioni pari a 12.

Inoltre, sono state realizzate anche le catene di conversione in up e in down converter così come si vede nelle figure 9 e 10 per garantire le comunicazioni dati tra i satelliti.

PAYLOAD DI RICEZIONE SEGNALI RADAR

Il progetto del ricevitore Microwave supereterodina a doppia conversione è caratterizzato dalla prima conversione ad una frequenza più alta della massima frequenza ricevibile. Si è scelto di avere la prima conversione IF a 29 GHz potendo disporre della tecnologia di adeguati componenti microwave GaAs, Mixer e amplificatori, da poter gestire tale frequenza. La Figura 11 mostra l'esempio miniaturizzato del ricevitore a doppia conversione e la Figura 12 illustra lo schema a blocchi del ricevitore eterodina a doppia conversione.

La seconda conversione porta il segnale ad 1 GHz in banda base che verrà inviato ai convertitori A/D per la conversione in digitale e la successiva elaborazione nella unità digitale.

La scelta architettonica di una doppia conversione è determinata dalla necessità di ridurre sia il numero che il livello di spurie in banda prodotte dal mixer ed eliminare l'impatto della frequenza immagine che potrebbe entrare nella banda del filtro IF.

Questo risultato, come detto, si è ottenuto facendo una prima up-conversione del segnale ricevuto

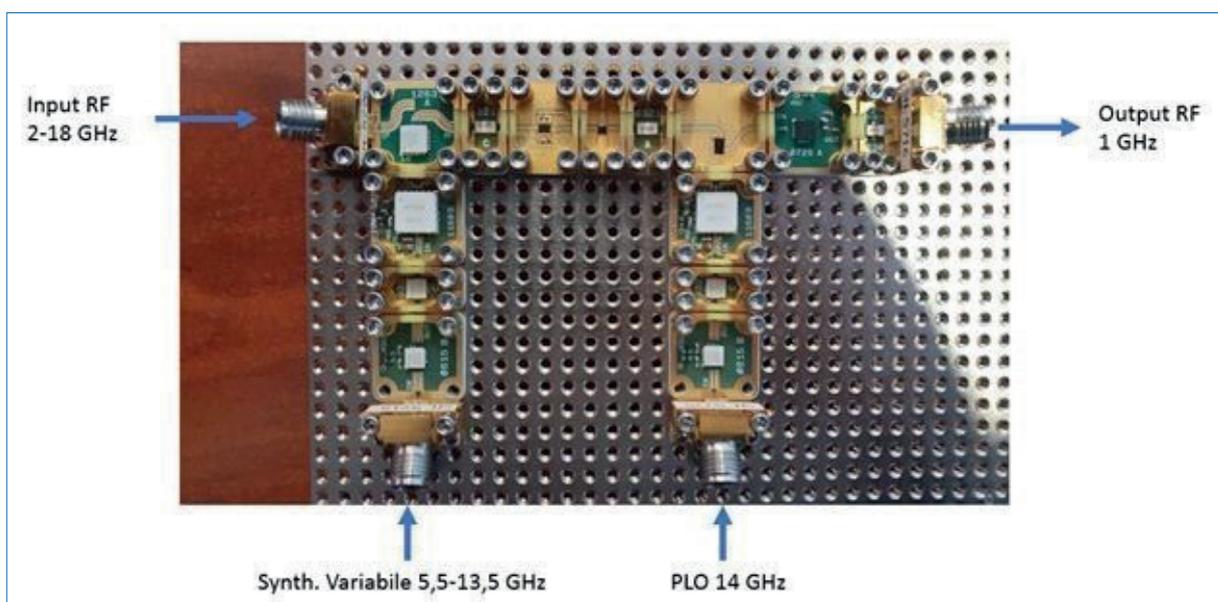


Figura 11 - Layout ricevitore eterodina del payload di ricezione miniaturizzato

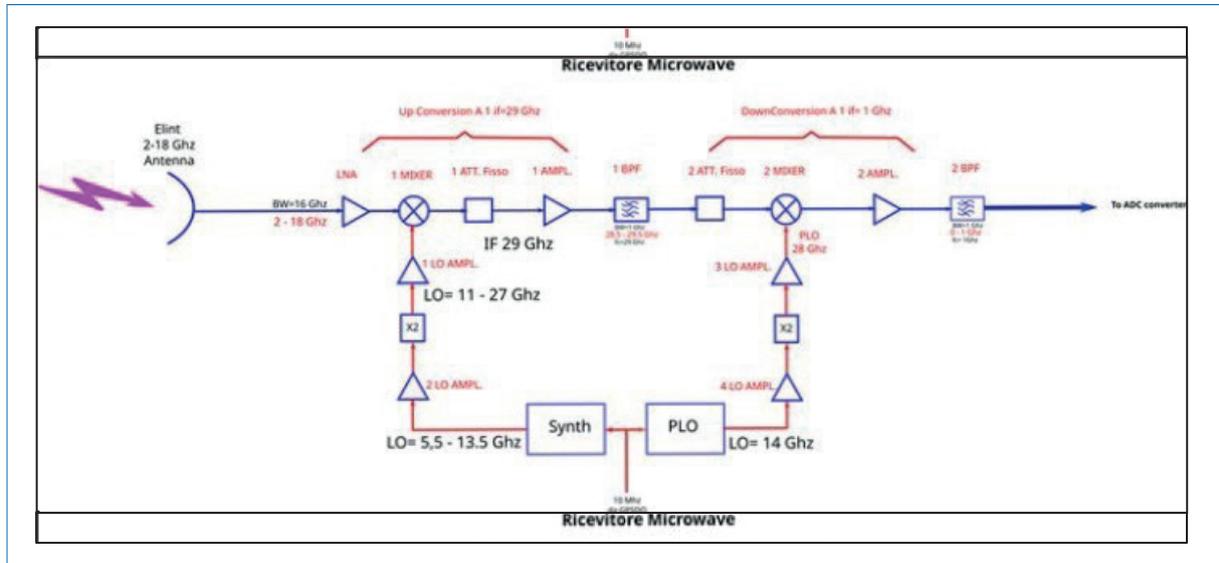


Figura 12 - Schema a blocchi ricevitore Microwave doppia conversione

2-18 GHz ad una frequenza più alta, in questo caso 29 GHz con BW di 1 GHz. Un opportuno filtro garantisce la eliminazione delle spurie prodotte dal processo di moltiplicazione del mixer.

La figura sopra mostra lo schema del progetto esecutivo della sezione conversione analogica del ricevitore.

Per realizzare questa conversione sono state progettate due linee di “Local Oscillators” uguali aventi in sequenza un amplificatore, un moltiplicatore x2

e un altro amplificatore. La moltiplicazione x2 permette di utilizzare un Synth per la prima up-conversione a range di frequenza 5,5 GHz ÷ 13,5 GHz ed un PLO a frequenza fissa di 14 GHz.

Le simulazioni di sistema mostrano un spurious free dynamic range (SFDR) ed un linear dynamic range (LDR) di circa 40.2 dB and 52.6 dB rispettivamente, una noise figure (NF) totale minore di 3,2 dB ed un guadagno di conversione flat di circa 28 dB (Figura 13,14 e 15).

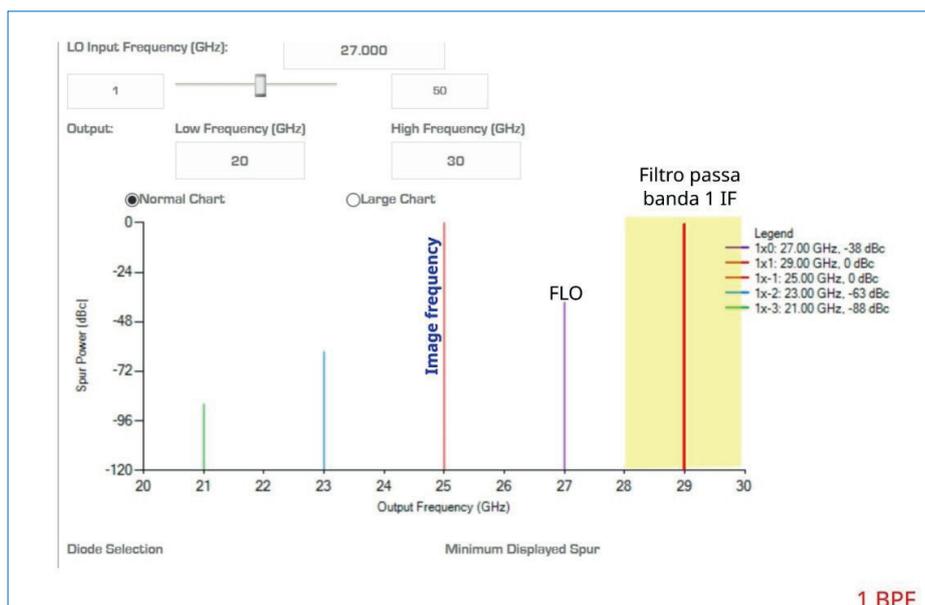


Figura 13 - Simulazione prodotti IMD prima conversione

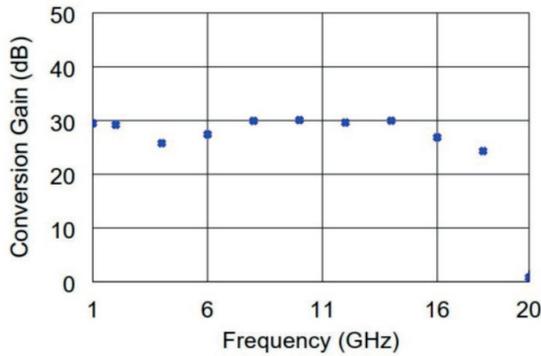


Figura 14 - Simulazione Guadagno ricevitore vs frequenza

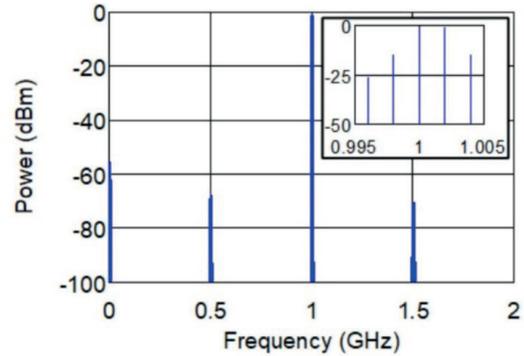


Figura 15 - Simulazione prodotti IMD seconda conversione

La sezione di conversione quindi riporta il segnale radio proveniente dalla antenna 2-18 GHz in segnale in banda base da 1 GHz, per poter successivamente essere convertita in campioni digitali dai convertitori A/D presenti nella unità digitale.

Ricordiamo che la frequenza di campionamento della unità digitale è di 3 GSPS, che permetterebbe quindi una campionatura di segnali fino a circa 1,5 GHz teorici di banda.

L'unità digitale riceve il segnale in banda 1 GHz dal ricevitore downconverter. L'unità digitale ha integrata la scheda della interfaccia RF in cui è presente il convertitore AD (modello AD 9208 o equivalentemente);

tale convertitore unitamente ai due DDC che generano i campioni per permettere agli algoritmi presenti sulla unità FPGA&Processing di operare correttamente.

Il modulo ADC scambia i dati con il modulo FPGA sul connettore di interfaccia FMCP+. Il modulo FPGA & Processing come è basato sul chip FPGA della Xilinx della famiglia XilinxZynqUltraScale+ MPSoC. Questa soluzione ad alta scala di integrazione permette di avere su un'unica scheda tutte le funzioni necessarie, riducendo gli spazi necessari, grazie alle nuove tecnologie basate su chip SoC (MPSoC: Multiple Processor System on Chip), RF-

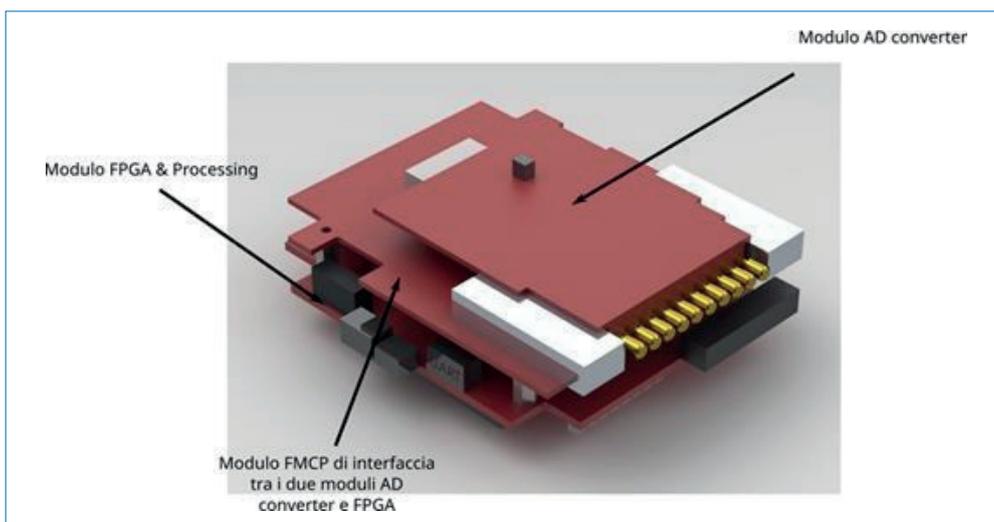


Figura 16 - Rendering 3D unità digitale del payload di ricezione

SoC ultrascale di nuova generazione della Xilinx. La dimensione della unità digitale è stata contenuta in circa 100 x 100 mm (Figura 16).

Nella figura 17 è riportato lo schema complessivo del ricevitore payload:



Figura 17 - Schema a blocchi complessivo del payload di ricezione segnali radar

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il Progetto ARAMIS permetterà il monitoraggio di vaste aree di interesse militare mediante una costellazione di satelliti LEO CubeSat (fino a 12U) proposti per mezzo dei sensori di bordo ed inoltre provvede a rilanciare i dati, mediante collegamenti ISL, sia verso i CubeSat della futura costellazione in banda Q, sia verso terra attraverso antenna UHF. Tali dati potranno quindi essere diffusi mediante le stazioni riceventi dei satelliti CubeSat proposti. Il servizio prescelto è orientato a delle piattaforme smallsat per attività di rilevazione segnali radar.

La tipologia e le correlate funzionalità del sistema proposto sono riferibili tanto ad ambiti applicativi militari quanto civili. Infatti, gli utilizzi di queste tipologie di sistemi in ambito civile, tipicamente, spaziano dalla sfera scientifica a quella commerciale; spiccano tra questi gli ambiti applicativi connessi alla osservazione della terra quali monitoraggio e mappature di fenomeni naturali quali deforestazione, inquinamento, desertificazione, rischio sismico etc. e gli ambiti applicativi commerciali quali telecomunicazioni, imaging satellitari (agricoltura, pesca, acquedotti e gestione delle acque, reti elettriche etc.). In questo caso specifico le capacità del payload di “Rilevazione Segnali Radar” imbarcato sui satelliti della futura costellazione ARAMIS possono

essere un valido contributo alla ricerca e localizzazione di emissioni RF interferenti le attività civili e scientifiche sul territorio italiano, ma anche di altri paesi con cui siano in essere (o di futura attuazione) programmi bi o multilaterali di collaborazione.

CONCLUSIONI

Italspazio durante la progettazione, sviluppo, realizzazione e test degli Engineering Model dei diversi payload ha confermato le scelte progettuali fatte per realizzare i vari item del sistema avendo chiaro che l’obiettivo finale sarebbe stato procedere nella fase tre del progetto per realizzare i satelliti CubeSat pronti per il lancio. Al fine di raggiungere l’obiettivo preposto, sono state identificate le parti che potranno essere confermate nello sviluppo e realizzazione del sistema pronto al volo e le parti che invece dovranno essere migliorate proprio a fronte del lavoro e dei test svolti anche avendo a disposizione nuove tecnologie per la miniaturizzazione delle varie funzioni.

In particolare, si confermano le scelte relative al payload di ricezione dei segnali radar, che durante i test ha offerto le prestazioni che erano obiettivo del progetto, per la parte del ricevitore microonde eterodina e per la parte unità digitale. Si confermano inoltre le scelte relative alle modalità del

controllo assetto del satellite ed alle modalità di comunicazioni per i link dati e telemetria.

Allo stesso tempo sono stati identificati i punti che dovranno essere oggetto di miglioramento progettuale durante la fase successiva quali la potenza/efficienza degli amplificatori finali di potenza dei payload di comunicazioni LEO-LEO e LEO-GEO

e il miglioramento degli assorbimenti dei vari componenti a cui dovranno essere associate le nuove tecniche/tecnologie di raffreddamento adatte alle dimensioni del CubeSat ed infine la ottimizzazione della distribuzione degli oscillatori locali necessari ai vari moduli.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>A/D</i>	Analog to Digital Converter)
<i>ARAMIS</i>	Advanced Radio Access for Military Solution
<i>ARM</i>	Advanced RISC Machine
<i>DDC</i>	Digital Down Converter
<i>F/D</i>	F è lunghezza focale e D è il diametro del riflettore
<i>FMC+</i>	Fixed-mobile convergence
<i>FPGA</i>	Field Programmable Gate Array
<i>GEO</i>	Geosynchronous equatorial orbit
<i>IMD</i>	IntermodulationDistortion
<i>IOV/IOD</i>	In-Orbit Demonstration and Validation
<i>ISL</i>	Inter Satellite Link
<i>LDR</i>	Linear dynamic range
<i>LEO</i>	Low-Earth Orbit
<i>MpSoc</i>	Multiple Processor System on Chip
<i>NF</i>	Noise figure
<i>PNRM</i>	Piano Nazionale Ricerca Militare
<i>RF</i>	Radiofrequenza
<i>SFDR</i>	Spurious free dynamic range
<i>UHF</i>	Ultra-high frequencies
<i>BW</i>	Bandwidth

PAROLE CHIAVE

Monitoraggio spettroeletrromagnetico e satellite.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2017.092
Ente responsabile del progetto:	c/o ITALSPAZIO s.r.l. (P.IVA/CF: 04246510871)
Città, Regione:	Sicilia
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. PAOLO VITA
Recapiti del responsabile del progetto:	Via San Pietro Clarenza (CT)
Recapito telefonico del responsabile del progetto	+39 329 6341112
E-mail del responsabile del progetto:	p.vita@italspazio.com

BIBLIOGRAFIA

- N. M. Kumari, S. Varughese, and P. Venkatesh Rao, “Miniaturized ultra-wideband printed dipole array for electronic warfare applications in unmanned aerial vehicle systems”, *Microw. Opt. Technol. Lett.*
- Abdullah, H. H.; Elboushi, A.; Gohar, A. E.; Abdallah, E. A. An Improved S-Band CubeSat Communication Subsystem Design and Implementation. *IEEE Access*, 2021, 9, 45123-45136, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3066464.
- Abulgasem, S.; Tubbal, F.; Raad, R.; Theoharis, P.I.; Liu, S.; Ali Khan, M.U. A Wideband Metal-Only Patch Antenna for CubeSat. *Electronics* 2021, 10, 50, doi: 10.3390/electronics10010050.
- Bhavsar, M.L.; Kumar, P.; Chaturvedi, I.; Srivastava, P.; Singh, D.K.; Bhattacharya, A. LTCC based multi chip modules at C-band and Ka-band for satellite payloads. In *Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference, Ahmedabad, India, 11–13 December 2017.*
- Bouwmeester, J; Guo, J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronaut.* 2010, 67, 854-862, doi: 10.1016/j.actaastro.2010.06.004
- Caddemi, A.; Cardillo, E.; Crupi, G. Comparative analysis of microwave low-noise amplifiers under laser illumination. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2021, 58, 2437–2443, doi: 10.1002/mop.30066.
- Caddemi, A.; Cardillo, E.; Crupi, Light activation of noise at microwave frequencies: a study on scaled gallium arsenide HEMT's. *IET Circuits, Devices Syst.* 2018, 12, 242-248, doi: 10.1049/iet-cds.2017.0290.
- Caddemi, A.; Cardillo, E.; Patanè, S.; Triolo, C. An accurate experimental investigation of an optical sensing microwave amplifier. *IEEE Sens. J.* 2018, 18, 9214–9221, doi: 10.1109/JSEN.2018.2872078.
- Cardillo, E.; Cananzi, R.; Vita, P.; Caddemi, A. Dual-Conversion Microwave Down Converter for Nanosatellite Electronic Warfare Systems. *Appl. Sci.* 2022, 12, 1524, doi: 10.3390/app12031524.
- Cardillo, E.; Li, C.; Caddemi, A. Embedded heating, ventilation, and air-conditioning control systems: From traditional technologies toward radar advanced sensing. *Rev. Sci. Instrum.* 2021, 92, 061501.
- Chen, Q.; Wang, Z.; Pedersen, G.F.; Shen, M. Joint Satellite-Transmitter and Ground-Receiver Digital PreDistortion for Active Phased Arrays in LEO Satellite Communications. *Remote Sens.* 2022, 14, 4319, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14174319>.
- Bannister, D.C.; Zelle, C.A.; Barnes, A.R. A 2–18 GHz wideband high dynamic range receiver MMIC. In *Proceedings of the IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, Seattle, WA, USA, 2–4 June 2002.*
- Edpuganti, A.; Khadkikar, V.; Moursi, M. S. E.; Zeineldin, H. A Novel Multiport Converter Interface for Solar Panels of CubeSat. *IEEE Trans. Power Electron.* 2022, 37, 629-643, doi: 10.1109/TPEL.2021.3098584.
- El Bakkali, M.; El Bekkali, M.; Gaba, G.S.; Guerrero, J.M.; Kansal, L.; Masud, M. Fully Integrated High Gain S-Band Triangular Slot Antenna for CubeSat Communications. *Electronics* 2021, 10, 156.
- Fernandez, L.; Sobrino, M.; Ruiz-de-Azua, J.A.; Calveras, A.; Camps, A. Design of a Deployable Helix Antenna at L-Band for a 1-Unit CubeSat: From Theoretical Analysis to Flight Model Results. *Sensors* 2022, 22, 3633, doi: 10.3390/s22103633.
- Finance, A.; Dufour, C.; Boutéraon, T.; Sarkissian, A.; Mangin, A.; Keckhut, P.; Meftah, M. In-Orbit Attitude Determination of the UVSQ-SAT CubeSat Using TRIAD and MEKF Methods. *Sensors* 2021, 21, 7361, doi: 10.3390/s21217361.
- G. Petrone; L. Mauro; S. Toderico; G. Calistrone; P. Vita, G. Nicolai; S. Coltellacci; C. Dionisio; P. Teofilatto; S. Carletta. ARAMIS - Cubesat ISL Project. S4 Symposium – Cubesat Workshop Zoom Webinar 26-29 April 2021.

- Giggenbach, D. Free-Space Optical Data Receivers with Avalanche Detectors for Satellite Downlinks Regarding Background Light. *Sensors* 2022, 22, 6773. ,doi: <https://doi.org/10.3390/s22186773>.
- Kovář, P.; Puričér, P.; Kovářová, K. Study of the Two-Line Element Accuracy by 1U CubeSat with a GPS Receiver. *Sensors* 2022, 22, 2902, doi: [10.3390/s22082902](https://doi.org/10.3390/s22082902).
- Lelekov, A. Estimation of the CubeSat's Available Energy for Free-Orientation Scenario. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2021, 36, 6-14, doi: [10.1109/MAES.2021.3089233](https://doi.org/10.1109/MAES.2021.3089233).
- Liu, S.; Theoharis, P.I.; Raad, R.; Tubbal, F.; Theoharis, A.; Iranmanesh, S.; Abulgasem, S.; Khan, M.U.A.; Matekovits, L. A Survey on CubeSat Missions and Their Antenna Designs. *Electronics* 2022, 11, 2021, doi: [10.3390/electronics11132021](https://doi.org/10.3390/electronics11132021).
- Lovascio, A.; D’Orazio, A.; Centonze, V. Characterization of a COTS-Based RF Receiver for Cubesat Applications. *Sensors* 2020, 20, 776, doi: [10.3390/s20030776](https://doi.org/10.3390/s20030776).
- Martínez-de-Rioja, E.; Martínez-de-Rioja, D.; López-Sáez, R.; Linares, I.; Encinar, J.A. High-Efficiency Polarizer Reflectarray Antennas for Data Transmission Links from a CubeSat. *Electronics* 2022, 11, 2021, doi: [10.3390/electronics11132021](https://doi.org/10.3390/electronics11132021).
- Morishita, Y.; Hanssen, R.F. Temporal decorrelation in L-, C-, and X-band satellite radar interferometry for pasture on drained peat soils. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2015, 53, 1096–1104, doi: [10.1109/TGRS.2014.2333814](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2333814).
- Nakayama, D.; Yamauchi, T.; Masui, H.; Kim, S.; Toyoda, K.; Malmadayalage, T.L.D.; Cho, M.; the BIRDS-4 Project Team. On-Orbit Experimental Result of a Non-Deployable 430-MHz-Band Antenna Using a 1U CubeSat Structure. *Electronics* 2022, 11, 1163, doi: [10.3390/electronics11071163](https://doi.org/10.3390/electronics11071163).
- Nanosatellite & CubeSat Database - Kulu, Erik. Available online: <https://www.nanosats.eu/> (accessed on 04 July 2022).
- P. Ghelfi et al., “An RF scanning receiver based on photonics for electronic warfare applications”, in Proc. European Radar Conference (EuRAD), 2015 Paris, France, pp. 197-200.
- P. Sharma, K.K. Sarma and N.E. Mastorakis “Artificial Intelligence aided electronic warfare systems – recent trends and evolving applications”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 224761-224780, Dec. 2020.
- Proc. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium. Digest, 2002, Seattle, WA, USA, pp. 147149.
- S. Salari, I. Kim, F. Chan and S. Rajan, “Blind compressive-sensing based electronic warfare receiver”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 53, no. 4, pp. 2014-2030, Aug. 2017.
- S. Toderico; G. Calistrone; P. Vita; G. Nicolai; S. Coltellacci; P. Teofilatto, S. Carletta. ARAMIS - Cubesat ISL Project. 4S Symposium ESA Vilamoura Portugal 16-22 May 2022.
- Seman, L.O.; Ribeiro, B.F.; Rigo, C.A.; Filho, E.M.; Camponogara, E.; Leonardi, R.; Bezerra, E.A. An EnergyAware Task Scheduling for Quality-of-Service Assurance in Constellations of Nanosatellites. *Sensors* 2022, 22, 3715, doi: [10.3390/s22103715](https://doi.org/10.3390/s22103715).
- Tings, B.; Pleskachevsky, A.; Velotto, D.; Jacobsen, S. Extension of ship wake detectability model for non-linear influences of parameters using satellite-based X-band synthetic aperture radar. *Remote Sens.* 2019, 11, 563, doi: [10.3390/rs11050563](https://doi.org/10.3390/rs11050563).
- Uzun, A.; Ghani, F.A.; Ahmadi Najafabadi, A.M.; Yenigün, H.; Tekin, İ. Indoor Positioning System Based on Global Positioning System Signals with Down- and Up-Converters in 433 MHz ISM Band. *Sensors* 2021, 21, 4338, doi: [10.3390/s21134338](https://doi.org/10.3390/s21134338).
- Y. Jeon, S. Bang “Front-end module of 18-40 GHz ultra-wideband receiver for Electronic Warfare system”, *J. Electromagn. Eng. Sci.*, vol. 18, no. 3, pp.188-198, Jul. 2018.
- Zou, L.; Dempster, A. G. Multiband Quadrature Bandpass Sampling. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 2022, 58, 2083-2092, doi: [10.1109/TAES.2021.3128870](https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3128870).

Il PNRM PBI-G12-EVO propone un'evoluzione dei giubbetti antiproiettile della famiglia PBI-G12. Il progetto è articolato su diversi temi dai quali sono stati sviluppati dei prototipi di TRL 6, ognuno dei quali apporta innovazioni su vari aspetti operativi, quali: miglioramento complessivo del comfort; incremento della modularità del sistema; evoluzione delle protezioni balistiche in termini di riduzione di peso ed estensione della protezione verso nuovi tipi di minacce; disponibilità di informazioni a supporto della gestione logistica. Grazie alla realizzazione dei prototipi, il progetto ha potuto quantificare sperimentalmente l'efficacia delle innovazioni proposte.

INTRODUZIONE

Tra le caratteristiche fondamentali per la capacità di protezione e mobilità del soldato, sono sicuramente tra le più rappresentative la protezione balistica e l'agilità di movimento quando si trasporta l'attrezzatura e l'equipaggiamento necessari alla missione.

La sempre crescente domanda di mobilità nei teatri di impiego è stata spesso associata alla richiesta di riduzione degli ingombri e dei pesi del giubbotto. Tale riduzione è da sempre in contrasto con l'elevato livello di protezione che la A.D. garantisce al proprio personale. Frutto di tale contrasto è la contrapposizione tra giubbetti di tipo Armour Carrier, più coprenti e dotati anche di protezione da schegge per l'intero torace, e giubbetti di tipo Plate Carrier, più snelli e dotati delle sole piastre rigide antero-posteriori e laterali per la protezione degli organi vitali.

Inoltre, la necessità di sostenere il supporto logistico a vita intera dei giubbetti richiede un efficace apporto di informazioni nella fase di verifica di efficienza periodica dei giubbetti. Il progetto propone dei sistemi sensoriali capaci di monitorare l'intera vita operativa delle protezioni balistiche.

L'impiego del personale delle FF.AA. per compiti eterogenei che spaziano da missioni in teatri operativi all'estero sino alla sicurezza urbana, richiede l'adeguamento delle minacce considerate, comprendendo sperimentazione su minacce balistiche reali effettivamente presenti sul campo, possibili minacce balistiche future e minacce non convenzionali quali lame, punte ed aghi.

Il PNRM PBI-G12-EVO quindi ha affrontato tutti gli aspetti sopracitati, consentendo una riduzione di peso a parità di area protetta. Inoltre il progetto apporta un incremento dell'ergonomia di sistema, attraverso opportuni accessori di sostegno alla mobilità, una ottimizzazione delle regolazioni di atteggiamento ed un dispositivo per il miglioramento del comfort termico.

PROBLEMA INDIVIDUATO - SOLUZIONI TECNOLOGICHE - METODOLOGIA

Essendo diversificati gli obiettivi del progetto, vengono di seguito illustrate separatamente le soluzioni tecnologiche e le metodologie di sviluppo e test proprie di ognuno dei prototipi realizzati

Sistema Modulare e di Regolazione Continua

Al fine di incrementare il livello di modularità del giubbotto è stato realizzato un sistema di aggancio e sgancio rapido che consente di aggiungere, al giubbotto nella configurazione Plate Carrier, degli elementi di protezione flessibili di livello IIIA che, fasciando l'intera superficie del tronco superiore, consentono di ottenere un giubbotto di tipo Armour Carrier.

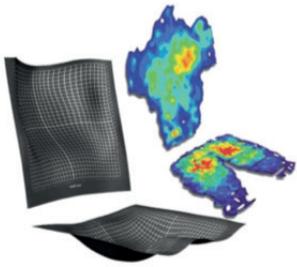


È stato sviluppato anche un sistema di fibbie e nastri che congiuntamente al sistema di sgancio di emergenza consente

una regolazione dell'attagliamento del giubbotto, in particolare degli spallacci a giubbotto già indossato.

G12-Porter

È un sistema di supporto lombare agganciabile al giubbotto che consente di trasferire il carico del giubbotto e dei suoi accessori sul bacino, anziché sulle spalle. Al fine di comprovare l'efficacia di tale sistema è stato sviluppato un innovativo sistema di misura indossabile realizzato in collaborazione con l'Università di Pisa.



Interfaccia Mech Legs

È un sistema che consente di interfacciare il sistema G12-Porter con il sistema Mech Legs. Il sistema Mech Legs è un esoscheletro passivo degli arti inferiori sviluppato dall'azienda MechLab, facente parte del Consorzio PBI, all'interno di un altro PNRM. Tale sistema complessivo consente di trasferire il carico del giubbotto e dei suoi accessori direttamente a terra anziché sulle spalle, migliorando la trasportabilità del sistema complessivo.



Protezioni Sensorizzate

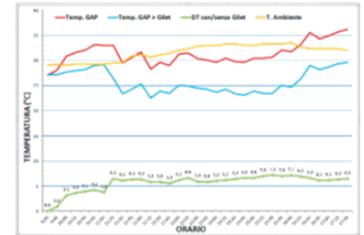


È un insieme di sensori per shock termo-meccanici e umidità, integrato nelle piastre balistiche e nelle protezioni flessibili. Tali sensori sono capaci di registrare dati per più di 5 anni senza la necessità di alcuna manutenzione. I dati registrati sono consultabili attraverso l'utilizzo di un APP Android. I dati registrati sono relativi a shock meccanici o termici che vanno oltre le normali condizioni di utilizzo delle piastre oppure infiltrazioni di acqua

nelle protezioni flessibili. Gli eventi misurati costituiscono potenziali elementi che potrebbero ridurre l'efficienza delle protezioni. Tali sensori possono quindi essere impiegati efficacemente nel corso di attività di controllo di efficienza.

Gilet Rinfrescante

È un gilet leggero indossabile sotto al giubbotto che attraverso la semplice immersione in acqua consente di ottenere una sensazione di fresco asciutto, misurata in un delta di 4-7°C rispetto alla temperatura ambiente, per la durata di 8 ore. Tale indumento sfrutta il principio dell'evaporazione termica e con un bassissimo impatto logistico può essere utilizzato numerose volte ottenendo un miglioramento del comfort operativo.



Protezioni evolute

Il tema dell'evoluzione è stato affrontato sia dal punto di vista dell'estensione del parco delle possibili minacce balistiche che dal punto di vista del peso.



Dal punto di vista delle minacce balistiche sono state sviluppate e provate diverse piastre di protezione, sia in configurazione stand alone che ICW, rispondenti a diversi livelli di protezione che vanno dal livello III e III+ sino al livello IV+ che considera proiettili perforanti con anima in tungsteno. Dal punto di vista del peso sono state sperimentate protezioni flessibili di livello IIIA ed antischeggia che, utilizzando in configurazioni innovative materiali già affidabilmente provati nel corso degli ultimi anni, consentono di realizzare una sensibile riduzione di peso. Sono state provate anche geometrie di piastre balistiche che consentono di uti-

lizzare una quantità inferiore di materiale balistico, consentendo un'ulteriore riduzione di peso. Complessivamente l'insieme delle potenziali riduzioni di peso è stato applicato ad un Giubbotto PBI-G12-IT, standard già in servizio, dimostrando una riduzione di peso del 10%.

Protezione Anti Lama

Sono state sviluppate protezioni balistiche che integrano la protezione anti lama prendendo a riferimento il livello K1 VPAM. È stato sviluppato anche un kit di protezione aggiuntivo applicabile a giubbetti già in servizio per ottenere la protezione anche da lama.

Modello Computazionale della Protezione Balistica

In collaborazione con l'Università di Cassino, è stato sviluppato un modello computazionale dell'attuale piastra del giubbotto PBI-G12-IT. Tale modello ha dimostrato un comportamento del tutto equivalente tra simulazione balistica e risultanze dei test balistici in poligono. In tal senso il modello potrebbe essere utilizzato in futuro per predire il comportamento di piastre evolute.

Potenziali utilizzi e ricadute applicative della tecnologia

Alcuni dei prototipi sviluppati e realizzati nel corso del progetto hanno già avuto efficacie e pratica

applicazione nello sviluppo del giubbotto PBI-G12-EVO recentemente entrato in servizio. Tra questi elementi innovativi introdotti in servizio, spiccano l'adozione del sistema di trasformazione da Plate Carrier ad Armour Carrier e l'estensione del parco di minacce balistiche testate. Altri elementi, che includono l'interfaccia con l'esoscheletro Mech Legs, il gilet rinfrescante, il kit anti lama e le piastre sensorizzate, risultano potenzialmente utili e possono essere oggetto di sperimentazione e successiva ingegnerizzazione industriale.

CONCLUSIONI

Il PNRM PBI-G12-EVO ha affrontato il tema dell'evoluzione del giubbotto con un approccio sistemico ed olistico, sviluppando un insieme di evoluzioni che consentono di incrementare efficacia e comfort del giubbotto antiproiettile, fornendo anche nuove metodologie di gestione che ne migliorino la gestione logistica "a vita intera". Il giubbotto PBI-G12-EVO e i suoi accessori consentono di fornire al soldato una protezione balistica adeguata, moderna, efficace che garantisca adeguata mobilità in attività fortemente cinetiche. La protezione balistica considerata risulta coerente con le attività operative sul campo. L'incremento del livello di modularità consente di armonizzare, con un solo prodotto, esigenze operative che indirizzino all'uso di giubbetti di tipo Armour Carrier piuttosto che di tipo Plate Carrier.

SIGLE ACRONIMI

<i>PNRM</i>	Piano Nazionale di Ricerca Militare
<i>TRL</i>	Technological Readiness Level
<i>ICW</i>	In Conjunction With
<i>FF.AA.</i>	Forze Armate
<i>A.D.</i>	Amministrazione Difesa

PAROLE CHIAVE

Materiali compositi, ceramiche mobilità, protezione, riduzione peso, scambio termico, ergonomia.

DATI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.161
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Consorzio PBI
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	dott. ing. Fabrizio PARMEGGIANI
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Torrevecchia, 12 00168 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0630343511
E-mail del responsabile del progetto:	fabrizio.parmeggiani@larimart.it

Il progetto zSpectrum mira a studiare la fattibilità di un sistema di misura distribuito per l'analisi dello spettro a banda larga e la localizzazione di emettitori RF (radio frequenza) mediante *Compressed Sensing* (CS).

Durante le fasi iniziali del programma di ricerca, sono state eseguite diverse simulazioni per valutare le prestazioni dello schema CS adottato, in termini di qualità della ricostruzione del segnale e accuratezza della posizione. Successivamente, sono stati selezionati componenti commerciali per l'implementazione del sistema dimostrativo costituito da quattro nodi di rilevamento RF e un centro di comando e controllo.

Presso l'Ufficio Tecnico Territoriale Armamenti Terrestri di Nettuno è stata condotta una campagna sperimentale dove sono stati rilevati e localizzati quattro trasmettitori funzionanti a più frequenze portanti con un errore di posizione dell'ordine di 1 m per rapporti di compressione fino a 10.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che i limiti di banda dei sistemi disponibili sul mercato e proposti nella letteratura scientifica a causa del collegamento *wireless* vengono superati grazie all'utilizzo di CS, che consente di ridurre di dieci volte la quantità di dati trasmessi. I progressi tecnologici offerti dal progetto aprono la possibilità di implementare sistemi di tracciamento passivo per applicazioni anti-drone e *jamming* reattivo.

INTRODUZIONE

Il monitoraggio dello spettro RF rappresenta un'attività di primaria importanza sia nelle applicazioni civili che militari. La proliferazione delle tecnologie RF a banda larga e la crescente domanda di servizi *wireless* hanno portato a un ambiente elettromagnetico sempre più complesso. Per garantire il corretto funzionamento delle varie reti di comunicazione radio, il monitoraggio dello spettro RF diventa un'attività molto importante. Tale attività è di primaria importanza anche per garantire la sicurezza di siti e infrastrutture, quali aeroporti, centrali elettriche, ambasciate, ecc. In questo caso è necessario rilevare, intercettare e localizzare gli emettitori RF, con l'obiettivo di riconoscerli e intraprendere immediate contromisure. Con l'aumento dei trasmettitori wireless che operano nella gamma di frequenza GHz, specialmente negli ambienti urbani, la copertura delle tradizionali apparecchiature di monitoraggio dello spettro RF non è più efficace. Pertanto, sono stati proposti sistemi distribuiti. Tuttavia, i vincoli nella larghezza di banda di trasmissione dei nodi di rilevamento po-

trebbero limitare la frequenza di campionamento e quindi la larghezza di banda di analisi. Pertanto, sebbene lo stadio di acquisizione dell'apparecchiatura possa osservare un'ampia banda, spesso il suo utilizzo è impedito dalla disponibilità di un data rate sufficiente per trasmettere i campioni acquisiti al centro di comando e controllo.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

È stato proposto il *Compressed Sensing* (CS) per ridurre il data rate dei sistemi *Internet of Things* per segnali che hanno una rappresentazione sparsa in un dominio specifico, cioè possono essere rappresentati da un vettore di pochi elementi significativi dopo una trasformazione matematica. I segnali acquisiti per monitorare una banda larga soddisfano questo requisito in quanto i segnali RF sono spesso concentrati in una banda stretta mentre la maggior parte della banda osservata è vuota in un tempo specifico.

Sfruttando questo concetto, il progetto ha implementato un sistema di misura distribuito basato su

CS, che permette di monitorare un'ampia larghezza di banda RF e localizzare contemporaneamente diversi emettitori operanti a diverse frequenze portanti.

Una delle tecniche CS più utilizzate e semplici da implementare in hardware per l'acquisizione dati è il *Non-Uniform Sampling* (NUS). Un sistema di acquisizione basato su NUS è costituito da un ADC in cui i campioni vengono acquisiti a tempi di campionamento selezionati in modo casuale da una griglia uniforme. Rispetto al comune campionamento uniforme, viene acquisito un insieme ridotto di campioni, risparmiando così spazio di archiviazione e larghezza di banda per la trasmissione al centro di comando e controllo.

Tuttavia, il segnale compresso non è comprensibile in quanto è simile al rumore e la ricostruzione del segnale è un'attività onerosa da eseguire nel centro di comando e controllo.

La proposta progettuale mirava ad implementare un prototipo capace di rilevamento e localizzazione passivo basato su nodi distribuiti utilizzando NUS. Il sistema è costituito da quattro o più nodi che rilevano simultaneamente lo spettro RF e inviano i dati compressi a un centro di comando e controllo. Nel centro di comando e controllo viene implementata la ricostruzione del segnale e viene mostrato lo spettro rilevato. Inoltre, per le frequenze portanti selezionate, vengono stimate le posizioni degli emettitori.

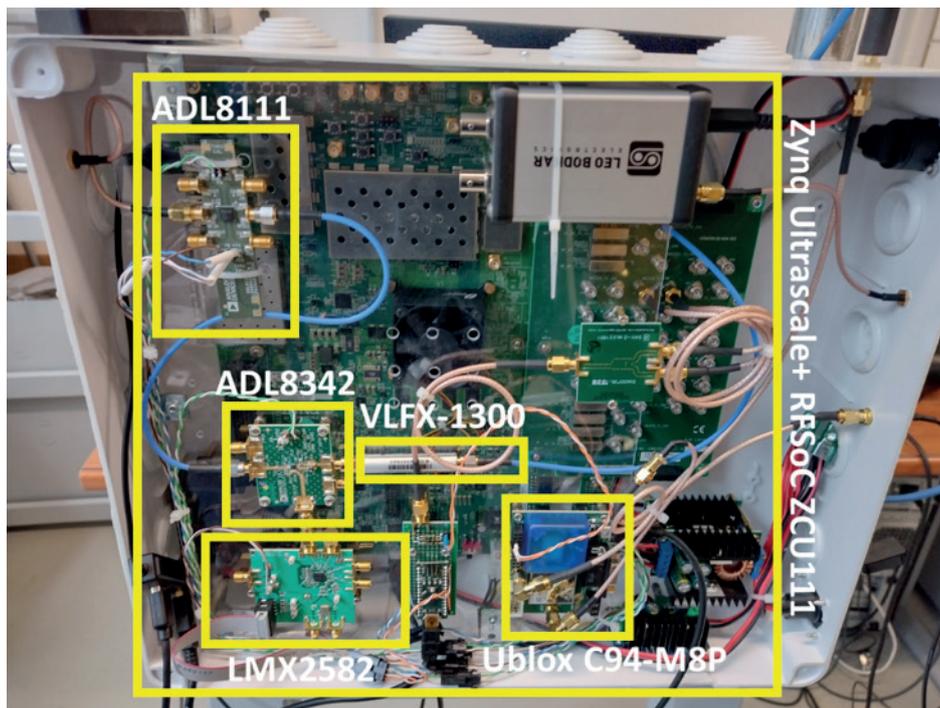


Figura 1 - Foto del nodo di acquisizione

METODOLOGIA

Un'immagine del nodo sviluppato è riportata in Figura 1. Dopo una conversione di frequenza verso il basso, l'ADC integrato nel *System-on-Chip RF* (RF-SOC) acquisisce sia il segnale proveniente dall'antenna OmniLOG che un segnale di sincronizzazione proveniente dal ricevitore GNSS, in modo

tale che venga memorizzato un record di campioni quando viene rilevato un fronte di salita del segnale di sincronizzazione.

La sincronizzazione GNSS consente a tutti i nodi di acquisire contemporaneamente e di valutare la differenza di tempo di arrivo (TDOA). Nella logica programmabile dell'RFSoC, i campioni ac-

quisiti vengono convertiti e filtrati in modo tale da rientrare nell'intervallo di frequenza specificato. Quindi, i campioni vengono compressi applicando NUS nella CPU dell'RFSOC e inviati al centro di comando e controllo.

Nel centro di comando e controllo, costituito da un server, si recuperano i segnali dai dati compressi e successivamente si ricavano le posizioni degli emettitori dalle misure di TDOA. L'intero sistema è stato collaudato presso l'Ufficio Tecnico Territoriale Armiamenti Terrestri di Nettuno.

Il sistema è stato configurato posizionando quattro nodi come illustrato nella Figura 2, mentre gli

emettitori sono stati posizionati nelle posizioni etichettate TX 1, TX 2, TX 3 e TX 4. L'emettitore è stato configurato per trasmettere segnale modulato *On-Off Keying* (OOK) al bit rate di cinque Mbit/s, secondo una sequenza di dati generata casualmente. In Figura 3 è riportato un esempio degli spettri RF e dei segnali demodulati acquisiti dai nodi. Nella Figura 4, la posizione stimata per TX 1, TX 2 e TX 3 è rappresentata considerando un rapporto di compressione, CR (ovvero il rapporto tra i campioni acquisiti e quelli compressi), di 8. Un errore di posizione massimo di 1,16 m per TX 1 è stato ottenuto contro un valore di 1,01 m senza compressione.

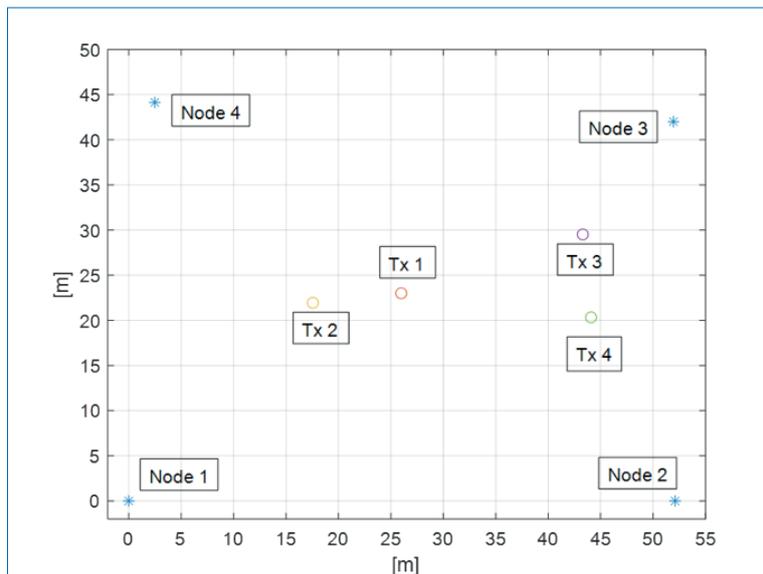


Figura 2 - Configurazione del setup del sistema durante le prove sul campo

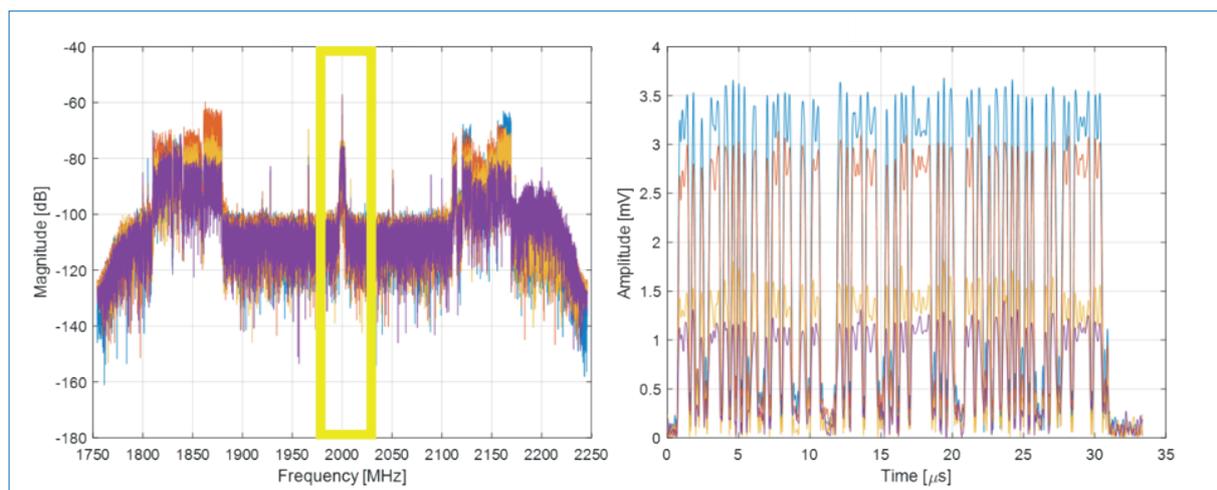


Figura 3 - Spettri e segnali demodulati acquisiti dai quattro nodi. Evidenziato in giallo il segnale trasmesso dall'emettitore in posizione Tx1 a 2 GHz.

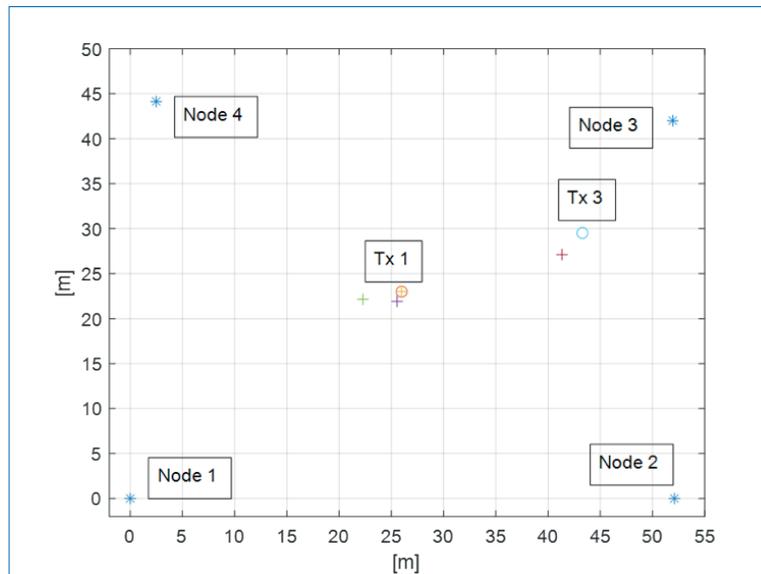


Figura 4 - risultati ottenuti in un test sul campo con due emettitori in posizione Tx1 e Tx3: i simboli + rappresentano le posizioni stimate con CR = 8 ed i simboli o rappresentano le posizioni di riferimento.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il sistema proposto è stato concepito per garantire la sicurezza di siti e infrastrutture critiche monitorando e tracciando in modo passivo gli emettitori RF ma il suo utilizzo può essere esteso a diverse applicazioni specifiche.

Gli UAV, ad esempio, sono stati utilizzati come dispositivi per penetrare in aree riservate. La tecnologia proposta può essere adottata come parte di un sistema anti-drone per l'identificazione e il tracciamento delle operazioni UAV.

Inoltre, un nodo può essere incorporato in un veicolo autonomo aereo o terrestre senza equipaggio per proteggere e monitorare i confini o i varchi di accesso di aree riservate. Un'altra applicazione interessante è relativa alle operazioni di ricerca e salvataggio in caso di emergenza per le conseguenze di un disastro naturale o umano. Il sistema proposto può essere integrato in uno sciame di UAV per l'identificazione di persone in difficoltà o intrappolate sotto le macerie.

Il jamming reattivo è una tecnica efficiente in cui un segnale di disturbo a una larghezza di banda

specificata viene trasmesso solo quando viene rilevato un emettitore. Un nodo del sistema proposto potrebbe essere utilizzato per analizzare un'elevata larghezza di banda RF in tempo reale, fornendo così un tempestivo feedback per il disturbo.

CONCLUSIONI

Il progetto zSpectrum si è concluso nel 2022 con la realizzazione di un dimostratore del sistema.

Le prestazioni del dimostratore tecnologico sono state valutate con una campagna sperimentale svolta presso l'Ufficio Tecnico Territoriale Armamenti Terrestri di Nettuno.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che il sistema è in grado di monitorare una larghezza di banda massima di 800 MHz entro un intervallo di frequenza di [600 MHz, 3,4 GHz] a una frequenza di aggiornamento minima di 100 ms.

Inoltre, con un fattore di compressione fino a 10, l'errore di posizione ottenuto è dell'ordine di 1 m. Ulteriore lavoro può essere focalizzato sull'aumento della larghezza di banda dell'analisi, utilizzando gli altri ADC incorporati nella scheda RFSOC, e riducendo la frequenza di aggiornamento implementan-

do la compressione sull'FPGA anziché sulla CPU. Poiché l'accuratezza della posizione ottenuta è principalmente influenzata dalla precisione temporale del ricevitore GNSS adottato (ovvero, presenta una deviazione standard di 10 ns), può essere mi-

gliorata considerando un GNSS con una precisione migliore. Inoltre, il prototipo del nodo potrebbe essere ottimizzato dal punto di vista del consumo energetico con l'obiettivo di ridurre le dimensioni della batteria.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>RF</i>	Radio Frequency
<i>CS</i>	Compressive Sampling
<i>CR</i>	Compression Ratio
<i>NUS</i>	Non-Uniform Sampling
<i>ADC</i>	Analog-to-Digital Converter
<i>GNSS</i>	Global Positioning System
<i>RFSOC</i>	Radio Frequency System-on-Chip
<i>CPU</i>	Central Processing Unit
<i>TDOA</i>	Time Difference of Arrival
<i>OOK</i>	On-Off Keying
<i>UAV</i>	Unmanned Aerial Vehicle
<i>FPGA</i>	Field Programmable Gate Array

PAROLE CHIAVE

Analisi ed acquisizione in banda larga, localizzazione RF, Compressed Sampling, Sistemi di misura distribuiti, misure TDOA.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.008
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Donexit
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Enrico Remondini
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Giacomo Peroni,452 00131 Roma
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	0645752720
E-mail del responsabile del progetto:	e.remondini@donexit.it

BIBLIOGRAFIA:

Articoli di rivista

E. Balestrieri, L. De Vito, F. Picariello and I. Tudosa, "A Method Exploiting Compressive Sampling for Localization of Radio Frequency Emitters" in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 5, pp. 2325-2334, May 2020.

Libri e altre monografie

P. Daponte L. De Vito F. Picariello S. Rapuano and I. Tudosa "Compressed sensing technologies and challenges for aerospace and defense RF source localization" Proc. 5th IEEE Int. Workshop Metrol. AeroSpace pp. 634-639 Jun. 2018.

S. Zorn R. Rose A. Goetz and R. Weigel "A novel technique for mobile phone localization for search and rescue applications" Proc. IEEE Int. Conf. Indoor Positioning Indoor Navigat. (IPIN) pp. 1-4 Sep. 2010.

F. Koochifar I. Guvenc and M. L. Sichitiu "Autonomous tracking of intermittent RF source using a UAV swarm" IEEE Access vol. 6 pp. 15884-15897 2018.

E. Balestrieri L. De Vito F. Picariello and I. Tudosa "Localization of radio emitters by wideband compressive sampling" Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. pp. 1-6 May 2019.

P. Daponte L. De Vito F. Picariello S. Rapuano and I. Tudosa "Assessment of analog-to-information converters based on non-uniform sampling for spectrum analysis" Proc. IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. pp. 1-6 May 2018.

L. De Vito, F. Picariello, S. Rapuano and I. Tudosa, "Compressive Sampling on RFSoc for Distributed Wideband RF Spectrum Measurements" 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2021, pp. 1-6.

E. Balestrieri, L. D. Vito, F. Picariello, S. Rapuano and I. Tudosa, "A TDoA-based Measurement Method for RF Emitters Localization by Exploiting Wideband Compressive Sampling" 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2020, pp. 1-6.

Obiettivo del progetto di ricerca “HEPROSYS – HERP *Electromagnetic Protection System*” è quello di definire e sviluppare possibili dispositivi di mitigazione all’esposizione elettromagnetica subita da un operatore a bordo di piattaforme veicolari militari. Grazie alla collaborazione tra LARIMART S.p.A., SAPIENZA UNIVERSITA’ DI ROMA e CE.POLI.SPE. (Centro POLifunzionale di SPERimentazione), la FASE 1 del progetto di ricerca si è focalizzata sulla comprensione e sulla caratterizzazione dello scenario elettromagnetico presente su un veicolo “tipo”, il VBM 8x8 Freccia, in dotazione alla Forza Armata. L’indagine condotta sperimentalmente ha permesso di individuare valori del SAR (*Specific Absorption Rate*) e del Campo Elettrico a bordo del mezzo. Sono state poi individuate possibili soluzioni hardware atte a ridurre l’esposizione elettromagnetica ed i rischi connessi per la salute degli operatori. In sintesi, la FASE 1 ha portato alla definizione di dettaglio dei problemi connessi all’esposizione ai campi elettromagnetici di significativa intensità a bordo delle piattaforme veicolari militari. Le attività hanno poi condotto allo sviluppo di soluzioni capaci di contribuire alla mitigazione dell’esposizione. La collaborazione tra LARIMART S.p.A., il comparto accademico e la Forza Armata ha portato alla pubblicazione di un paper scientifico dal titolo “*Numerical Evaluation of Human Body Near Field Exposure to a Vehicular Antenna for Military Applications*”.

INTRODUZIONE

Le onde elettromagnetiche interagiscono con la materia organica, ma quanto questa interazione possa essere dannosa per l’uomo è poco noto ed è un argomento di attuale ricerca. Esistono diversi studi e normative a riguardo, ma spesso si tratta di pubblicazioni non recenti, che non considerano l’attuale evoluzione tecnologica. Tale evoluzione infatti è stata molto più repentina di quanto non sia stato possibile studiare e capire l’effetto sia a breve che a lungo termine dell’esposizione dell’uomo ai campi elettromagnetici. Nel caso di campi di notevole entità, ovvero campi elettromagnetici con potenze elevate, risulta necessario approfondire gli aspetti riguardanti la possibile pericolosità dell’esposizione dell’uomo identificando i valori di soglia, ovvero quei valori per cui l’esposizione dell’uomo può ritenersi sicura. Nell’ambito del PNRM HEPROSYS, nel corso della FASE 1, sono state analizzate e definite le possibili soluzioni per contenere gli effetti nocivi e tutelare la salute del personale di bordo che può trovarsi ad operare in contesti elettromagneticamente molto “inquinati”. Dagli studi è emer-

sa la concreta opportunità di impiegare soluzioni schermanti innovative ed indossabili, capaci di ridurre l’esposizione ai campi elettromagnetici e con le quali si avrà la possibilità di proteggere la salute dell’operatore da effetti a breve e a lungo termine.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Lo studio della Fase 1 ha permesso di definire il livello di esposizione di un operatore quando indossa un elmetto protettivo (Casco CI-9/89 EVO già in dotazione presso la Forza Armata) e quando tale operatore è posto nelle vicinanze di sorgenti elettromagnetiche a bordo di piattaforme veicolari. L’esposizione è stata valutata sia sulla base delle campagne di misura effettuate dalla Forza Armata, sia sulla base di studi teorici e di simulazioni numeriche. In particolare:

- è stato valutato il livello di esposizione riscontrabile nei differenti scenari elettromagnetici considerati;
- è stato quantificato il livello di esposizione con simulazioni dosimetriche accurate;

- sono stati identificati dei dispositivi idonei per la protezione del personale e per la mitigazione dei livelli di esposizione;
- sono stati progettati e realizzati i dimostratori di livello TRL4.

I risultati emersi dalle simulazioni numeriche, eseguiti in banda HF, mostrano che l'elmetto in dotazione non introduce perturbazioni sensibili delle distribuzioni di Campo Elettrico e di SAR nell'o-

peratore che lo indossa. In particolare, i valori simulati di Campo Elettrico e SAR risultano sempre ampiamente al di sotto dei limiti previsti dalle normative. Si è comunque valutato l'effetto dell'inserimento nell'elmetto di materiale schermante ed è stato realizzato un dimostratore come richiesto dal PNRM. Le simulazioni numeriche hanno confermato l'effetto schermante del materiale introdotto. Infine, è stata valutata e sviluppata la possi-

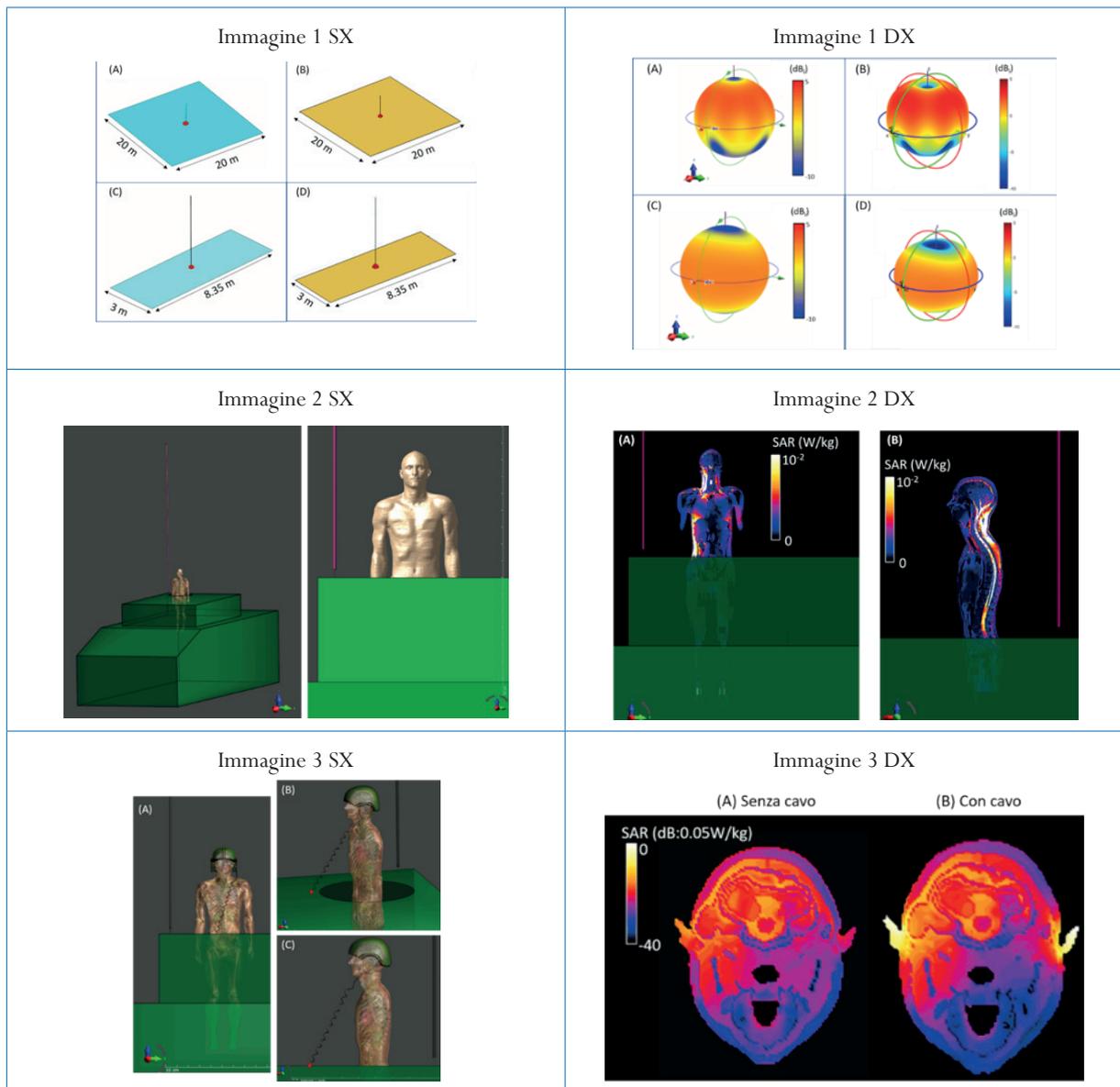


Figura 1 - Immagine 1 SX: Verifica del modello di antenna mediante confronto Sim4Life (FDTD) e AntennaToolBox, Matlab (MoM); Immagine 1 DX: Diagramma di radiazione tridimensionale (Direttività); Immagine 2 SX: Modello computazionale del veicolo con monopolo e modello virtuale di uomo inserito all'interno della botola; Immagine 2 DX: Distribuzione del campo elettrico indotto nel modello virtuale Duke; Immagine 3 SX: Modello di veicolo e uomo inserito all'interno della botola, con aggiunta del casco protettivo e del cavo di collegamento al sistema interfonico; Immagine 3 DX: Mappa del SAR sul piano XY passate per la nuca

bilità di connessione dell'elmetto e relativa cuffia audio interfonica tramite fibra ottica, eliminando qualsiasi effetto di accoppiamento del cavo di collegamento rispetto allo scenario elettromagnetico. Anche per quest'ultimo caso è stato progettato e realizzato un dimostratore.

METODOLOGIA

La metodologia applicata ha riguardato in prima istanza lo studio dello scenario elettromagnetico di riferimento in banda HF al fine di identificare possibili condizioni di esposizione che potessero risultare pericolose per l'uomo a bordo. È stato quindi individuato ed analizzato il setup delle sorgenti elettromagnetiche di un veicolo "VBM 8x8 Freccia" di riferimento per capire la possibile distribuzione del campo elettromagnetico nelle vicinanze delle postazioni "operatore in botola". Lo studio teorico è stato supportato da un intensivo set di simulazioni dosimetriche per valutare il SAR ed il Campo Elettrico. Si è partiti da un modello semplificato (sola antenna trasmittente) per arrivare ad uno scenario operativo più realistico (modello veicolo e modello di uomo) come mostrato nella Figura 1.

Una volta individuato lo scenario di riferimento, dopo aver dettagliatamente trovato il valore del SAR e la distribuzione del Campo Elettrico, si è passati alla fase progettuale e quindi alla realizzazione di dimostratori da laboratorio aventi lo scopo di proteggere l'operatore dall'esposizione ai campi elettromagnetici. In particolare sono stati realizzati due dimostratori:

1. Elmetto Schermato: si è partiti dall'attuale architettura del Casco CI-9/89 EVO (di seguito elmetto) in dotazione presso la Forza Armata e, dopo accurato studio e selezione di materiale schermante nelle bande di interesse, si è

arrivati a realizzare il dimostratore mostrato in Figura 2. L'architettura dell'elmetto è stata simulata numericamente per validarne gli aspetti di ulteriore abbassamento del SAR. È stato possibile dimostrare che la soluzione schermante consente di abbassare ulteriormente i livelli di esposizione al campo elettromagnetico assicurando quindi una significativa protezione all'operatore.



Figura 2 - Dimostratore da laboratorio Elmetto Schermato

2. Link Audio Ottico: è stato sviluppato un collegamento ottico dell'elmetto al sistema interfonico UIS-379/D (vedi dimostratore di figura 3). Per eliminare ogni possibile accoppiamento tra il campo elettromagnetico tipico dello scenario di riferimento ed il cavo di collegamento che può trovarsi, in particolari condizioni operative (per esempio uomo fuori botola), nelle vicinanze delle sorgenti elettromagnetiche.

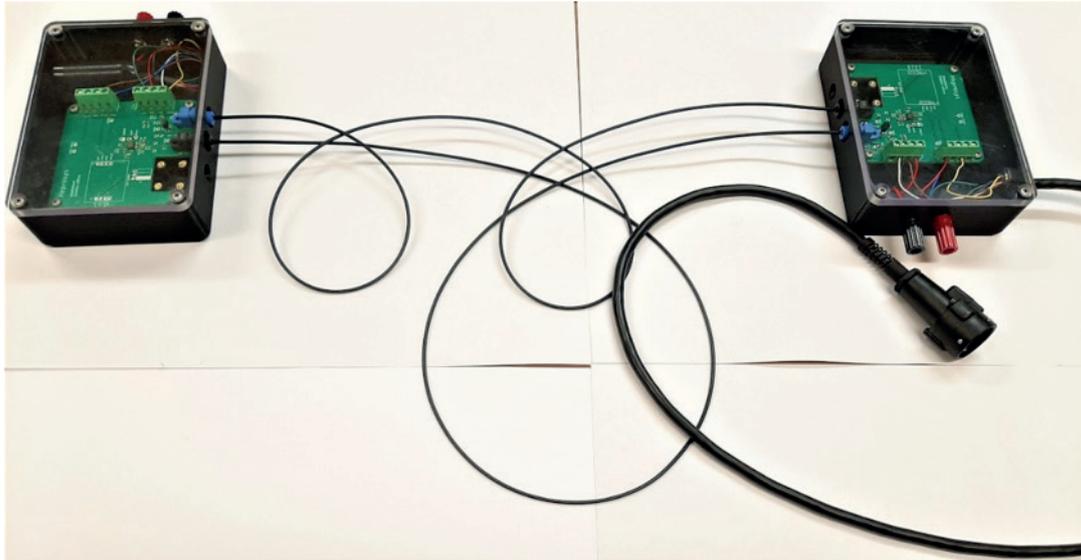


Figura 3 - Dimostratore da laboratorio collegamento Casco-UIS Ottico

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le attuali analisi di mercato nel settore militare dei prodotti/accessori/accorgimenti relativi alla protezione dalla esposizione a campi elettromagnetici del soldato sul veicolo che opera in scenari ad alta intensità, mostrano un trend crescente della domanda, che non trova adeguata risposta nell'offerta disponibile. I risvolti tecnologici del PNRM sono pertanto relativi alla possibilità di disporre di una soluzione (al netto delle necessarie successive attività di ingegnerizzazione ed industrializzazione del sistema pre-prototipico disponibile al termine della Fase 2), potenzialmente in grado di garantire un interessante posizionamento competitivo rispetto ai grandi player del settore e di trovare ampio spazio sia nel mercato di riferimento che, nell'ottica della dualità, nel mercato civile/professionale. Il programma di ricerca HEPROSYS ricade infatti ampiamente nella strategia aziendale di LARIMART S.p.A, anche in un'ottica di dualità delle soluzioni individuate rispetto al mercato civile, sempre più sensibile ai temi di inquinamento elettromagnetico e di eccessiva esposizione dell'essere umano a campi di intensità più o meno significativa nella vita di tutti i giorni.

CONCLUSIONI

L'enorme evoluzione delle comunicazioni che ha caratterizzato gli ultimi trent'anni nel mercato civile ha contribuito a guidare un'equivalente sviluppo in ambito militare. Lo sviluppo delle comunicazioni ha sostenuto il concetto, da sempre condiviso, che la supremazia informativa è una delle più importanti chiavi per la risoluzione dei conflitti. La disponibilità di grandi volumi di dati e la loro diffusione ha comportato il proliferare, a tutti i livelli, di sistemi di elaborazione e comunicazione radio. Tutto ciò ha contribuito alla creazione di uno spazio cibernetico in cui una enorme mole di dati viene continuamente diffusa ed elaborata, creando perciò un ambiente altamente pervaso da onde radio, che originano veri e propri fenomeni di inquinamento elettromagnetico. Il PNRM HEPROSYS si propone di riprodurre e analizzare lo scenario elettromagnetico all'interno di un veicolo militare digitalizzato in determinati contesti d'impiego allo scopo di sviluppare soluzioni tecnologiche efficaci a mitigare l'esposizione degli operatori di bordo.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>A.D.</i>	Amministrazione Difesa
<i>HERP</i>	Hazards of Electromagnetic radiation to personnel
<i>SIC</i>	Sistema individuale per il combattimento
<i>NEC</i>	Network Enabled Capabilities
<i>VBM</i>	Veicolo blindato medio

PAROLE CHIAVE

HERP, Protezione, Soldato, Radio-Frequenza, EMI, EMC, Vetronica, CIS

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a.2018.171
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto	LARIMART S.p.A.
Città, Regione:	Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Massimo Francone
Recapiti del responsabile del progetto:	via di Torrevicchia 12
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06303431 / +39 3666800699
E-mail del responsabile del progetto:	larimart@legalmail.it / massimo.francone@larimat.it

L'esigenza di migliorare l'efficienza delle attività di addestramento del personale dedicato alla manutenzione dei velivoli e del supporto alla manutenzione sul campo, assicurando al contempo un alto livello di qualità, è percepita in entrambi i settori dei velivoli militari e commerciali. I dati recentemente raccolti dal 10° RMV di Galatina evidenziano una dilatazione del periodo necessario per l'addestramento del personale tecnico dovuta alla difficoltà di conciliare le fasi d'aula con le fasi pratiche sul velivolo. Relativamente al supporto alla manutenzione e alla logistica, l'esigenza è quindi quella di efficientare i processi di manutenzione attraverso la riduzione dei tempi di intervento, la minimizzazione degli spostamenti delle risorse esperte e la registrazione automatica e sicura delle informazioni relative agli interventi.

La soluzione tecnologica proposta prevede l'utilizzo di tecnologie innovative in continua evoluzione: Realtà virtuale, aumentata e immersiva, Analytics e Blockchain (vedi conclusioni). ed è così articolata: ADDESTRAMENTO PRATICO ALLA MANUTENZIONE (Fig. 1). La soluzione rappresenta una sostanziale evoluzione degli odierni *Virtual Maintenance Trainer* (basati su desktop) in quanto, partendo dagli stessi dati (pubblicazioni tecniche, modelli CAD, etc.) e dalla stessa simulazione funzionale del velivolo, introduce tecnologie di realtà virtuale immersiva (es. Visore HTC Vive, engine grafici) e dispositivi aptici (es. guanti), generando un ambiente di training completamente virtuale e immersivo efficace e di facile fruizione con cui l'utente interagisce in modo realistico e naturale. Grazie a questa soluzione, che è parte della fase di addestramento pratico, lo studente, virtualmente inserito nell'ambiente manutentivo (*hangar*), è guidato nell'esecuzione *step-by-step* delle procedure manutentive, eventualmente con il supporto, anche remoto, di un istruttore che condivide lo stesso ambiente virtuale. Tutte le attività eseguite dallo studente sono tracciate e valutate in automatico dal sistema con possibilità di modifica della valutazione da parte dell'istruttore.

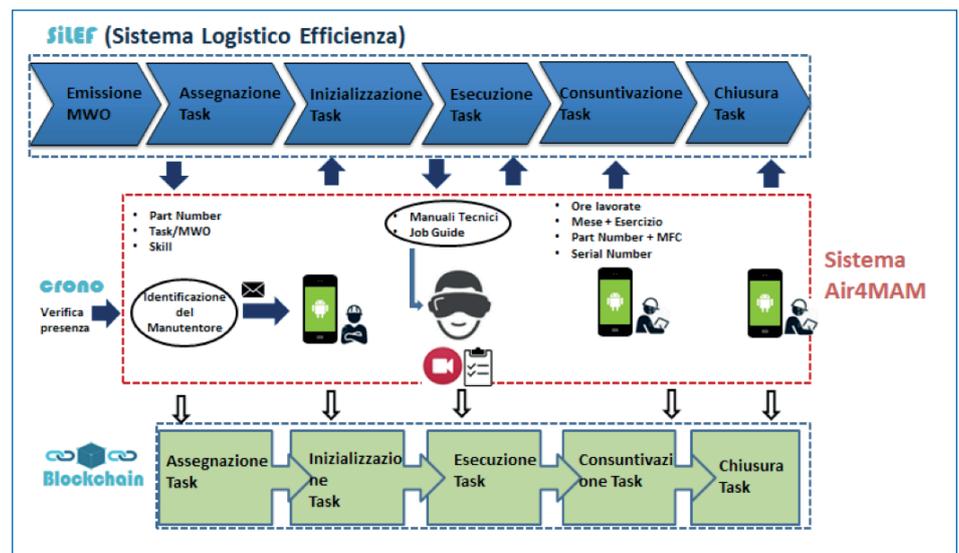


Figura 1

MANUTENZIONE DA REMOTO (Fig. 2). A fronte di un intervento di manutenzione, sulla base di informazioni diversificate, il sistema propone il modello di gestione più adeguato, che può prevedere il supporto da remoto di un tecnico più esperto e/o l'intervento di una ditta esterna. I tecnici possono essere allertati attraverso dispositivi mobile. Il tecnico che opera sul velivolo utilizza un visore per la realtà aumentata (es. *Hololens*) per ottenere informazioni di contesto (es. ciclo di manutenzione programmato, suggerimenti su cause guasto, dettagli componenti, disponibilità ricambi, registrazioni video, etc.).

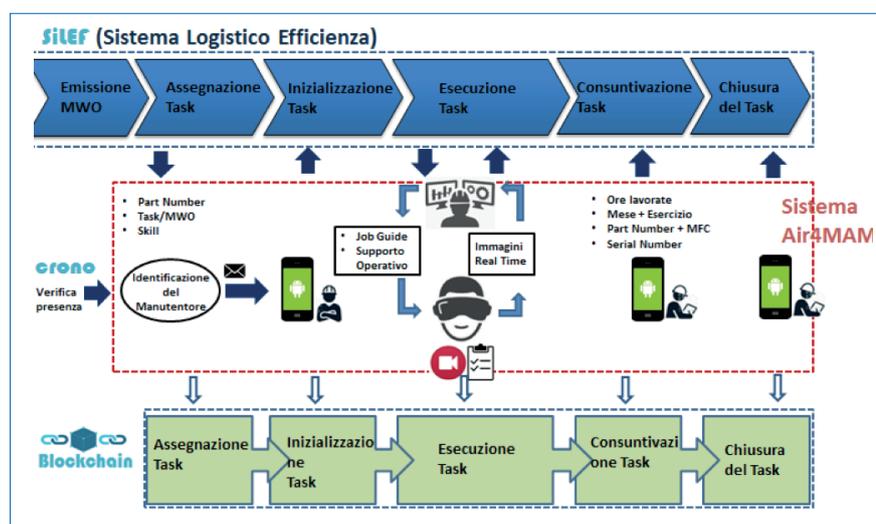


Figura 2

INTRODUZIONE

Lo scenario di riferimento identificato per questo progetto si configura nel migliorare la gestione e l'efficienza delle attività di addestramento del personale manutentivo e supporto alla manutenzione dei velivoli, sviluppando soluzioni innovative per i processi di 1) addestramento del personale manutentivo tramite sperimentazione di idonei strumenti di simulazione e realtà virtuale immersiva 2) supporto alla manutenzione remota con tecnologie di realtà aumentata, *analytics*, *blockchain* per l'efficiamento organizzativo, l'esecuzione e consuntivazione degli interventi.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Alla luce di quanto sopra descritto, sono stati sviluppati nuovi sistemi di: 1) *training*, che siano in grado di ridurre i costi dell'addestramento e i tem-

pi necessari agli allievi manutentori per raggiungere un adeguato livello di training pratico in termini di ampiezza delle nozioni nonché di maggiore facilità di acquisizione di competenze su un sistema complesso come un velivolo militare, riservando il velivolo reale solo per un sottoinsieme di task per i quali risulta irrinunciabile il contatto con il velivolo 2) supporto alla manutenzione di velivoli e apparati TLC, che consentano di a) selezionare il modello di gestione dell'intervento più appropriato (periferico/centralizzato/distribuito) in base a Analytics (ML, analisi predittive) su qualifiche/esperienze/disponibilità/localizzazione manutentori, tipo di intervento/equipment, assistenza specialistica fornitori b) garantire all'operatore informazioni immediate e circostanziate sulle attività da svolgere e sui componenti (schemi, etc) c) consentire a manutentori esperti di assistere l'operatore da remoto nell'esecuzione dell'intervento e ricer-

ca del guasto. Questi nuovi sistemi potranno essere applicati anche in contesti diversi, quali gli istituti di formazione, per consentire l'aggiornamento dei propri laboratori sostituendo, anche parzialmente, le componenti fisiche di velivoli o equipment.

METODOLOGIA

Il progetto intende sviluppare una soluzione integrata che, attraverso l'adozione di tecnologie informatiche avanzate, consenta di efficientare i processi di addestramento manutentivo e di supporto da remoto alla manutenzione operativa sul campo: 1) Il processo di addestramento del personale di manutenzione sarà supportato tramite l'individuazione e la sperimentazione degli strumenti più idonei di simulazione e realtà virtuale immersiva (opportunitamente individuati e sperimentati) rispondenti alle esigenze dell'addestramento manutentivo aeronautico, con attenzione agli aspetti di ergonomia e interfaccia uomo-macchina che ne possano significativamente condizionare l'efficacia. Saranno inoltre introdotte soluzioni basate su tecnologia Blockchain per l'autenticazione degli eventi formativi e su tecnologia Analytics per la valutazione dell'esito delle attività di addestramento in ottica di ottimizzazione di successivi momenti addestrativi. 2) Il processo di supporto alla manutenzione da remoto dei velivoli e degli equipment sarà supportato da tecnologie (*blockchain*, realtà virtuale aumentata, *analytics – Artificial Intelligence e Machine Learning*) che consentiranno l'efficientamento delle fasi di organizzazione degli interventi di manutenzione (pianificati o a guasto), di esecuzione degli interventi da remoto e di consuntivazione delle attività eseguite a chiusura dell'intervento. È prevista un'opportuna integrazione dei processi e la conseguente sperimentazione delle soluzioni realizzate sulla linea di prodotto del velivolo M346, oltre che (per il solo processo di manutenzione remota) su un equipment congiuntamente selezionato con AM. Il progetto prevede un coinvolgimento importante da parte del personale dell'Aeronautica Militare, in qualità di utente finale, in grado di

definire le esigenze di miglioramento dell'efficacia del training manutentivo e del supporto alla manutenzione da remoto.

POTENZIALI UTILIZZI, RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il mercato delle tecnologie digitali è dominato in Italia da molti player internazionali a fronte di pochi nazionali di grandi dimensioni; si prevede un rafforzamento delle aziende che saranno in grado di combinare competenze verticali con analisi, cloud e soluzioni mobili tra cui IoT evolution e con specializzazioni per settori: Business to Customer Business to Government, Business to Business, Industria 4.0, smart manufacturing. In tale contesto Leonardo ritiene di doversi posizionare quale player nazionale di riferimento per i mercati della Difesa, Pubblica Amministrazione e Industria. Le tecnologie di realtà aumentata e virtuale si stanno diffondendo in prodotti quali cellulari e tablet abilitando l'offerta al cliente di "esperienze sempre più multi-mediali". Questo mercato certamente svolgerà la funzione di traino per una rapida evoluzione della tecnologia di interesse per il progetto, essendo stimato da P&S Market Research, un tasso di sviluppo del 58,1% da qui al 2023. Con opportuno utilizzo delle tecnologie di cui sopra, il progetto prevede di ottenere un prototipo di sistema di training e di supporto in servizio alla manutenzione aeronautica con soluzioni in grado di superare le difficoltà nella riproduzione fedele e naturale delle azioni manutentive da parte dell'allievo e di fornire successivo supporto alla manutenzione da remoto ottimizzando così i costi in maniera ragguardevole. Tale sistema potrebbe inoltre essere facilmente offerto sul mercato a corredo dei sistemi "velivolo". In prospettiva futura, i risultati del progetto potrebbero consentire di valutare l'ampiamiento dell'offerta formativa della International Flight Training Academy, aggiungendo all'attuale portafoglio il training sulla manutenzione aeronautica, utilizzando sistemi sviluppati a seguito della sperimentazione descritta in questa proposta di progetto.

CONCLUSIONI

Tutte le tecnologie impiegate nel progetto nascono e si sviluppano nel mercato civile e cominciano a diffondersi anche in quello militare. In particolare le tecnologie analizzate sono già esistenti ma di interesse aeronautico/industriale e sono:

- Blockchain: teorizzata già dagli anni '90, è concretamente applicata a partire dal 2008 in ambito finanziario, con la moneta virtuale Bitcoin per la condivisione immutabile di transazioni economiche attualmente viene sperimentata per la gestione sicura dei dati.
- Analytics: se ne parla da decenni nel mercato civile, sebbene solo recentemente se ne sia compresa l'importanza, avviando di fatto un percorso di ottimizzazione dei processi guidati

dall'estrazione di informazioni di valore intrinsecamente presenti nei dati disponibili (data driven optimization).

- Sistemi di realtà aumentata, virtuale e immersiva: sono originariamente sviluppati per applicazioni civili, come l'entertainment, dagli anni '90 del secolo scorso. Subiscono una notevole maturazione dalla fine della prima decade degli anni '2000 principalmente grazie alle aziende di gaming. Negli ultimi 10 anni lo sviluppo si è esteso a settori diversi quali automotive, produttivo, medicale, museale, addestrativo, etc. Ispirandosi al settore automotive, Airbus ha sviluppato sistemi per la customizzazione della cabina per alcune classi di velivoli

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>RMV</i>	Reparto Manutenzione Volo
<i>CPU</i>	Central Processing Unit
<i>COTS</i>	Commercial off-the-shelf
<i>IFTA</i>	International Flight Training Academy
<i>TLC</i>	Telecomunicazioni
<i>HTC</i>	High Technology Computer

PAROLE CHIAVE

Realtà virtuale aumentata e immersiva, blockchain, analytics, A/C Maintenance, Training, Ergonomia

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2018.013
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (ARMAEREO)
Ente responsabile del progetto:	Raggruppamento Temporaneo di Imprese costituito dalla LEONARDO S.p.A. in qualità di mandataria, dall' Università del Salento Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione (UNI SALENTO), dalla M3S S.r.l. e dalla WIDERVERSE S.r.l.s.
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dotto.ssa Francesca Bontich
Recapiti del responsabile del progetto:	Strada Malanthero s.n.c. – 10072 Caselle Torinese (TO)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 011 9230 039
Email:	francesca.bontich@leonardo.com

Il progetto CeMiLAP2 propone lo sviluppo di tecnologie innovative per ottenere sorgenti laser ad alta efficienza e alta potenza utilizzando come mezzi attivi materiali ceramici microstrutturati di nuova concezione, in grado di ridurre gli effetti che ad alte densità di potenza limitano l'emissione laser.

Le sorgenti laser attualmente in commercio impiegano mezzi attivi costituiti da monocristalli che, soprattutto nei laser di alta potenza, sono soggetti a stress termici che generano distorsioni del fascio laser emesso e riducono l'efficienza di emissione.

Il progetto propone lo sviluppo di mezzi attivi innovativi formati da materiali ceramici microstrutturati di nuova concezione, meno soggetti a tali effetti termici, per il miglioramento delle prestazioni delle sorgenti laser a stato solido. Variando in modo controllato la composizione e il drogaggio all'interno del mezzo attivo è possibile infatti limitare gli effetti termici e termo-meccanici, incrementando i livelli di potenza massima e di efficienza raggiungibili.

L'obiettivo del progetto è lo sviluppo di tecniche di fabbricazione avanzate per la produzione di ceramici microstrutturati a base di YAG/Yb:YAG e codroganti, con distribuzione controllata della composizione su almeno due dimensioni spaziali (strutturazione 2-D). Al termine del progetto i prototipi verranno validati in un dimostratore laser di alta potenza ideato ad hoc.

INTRODUZIONE

Recentemente le applicazioni militari di sistemi laser di alta potenza hanno avuto un importante sviluppo, con un notevole incremento del TRL, sfociato nella realizzazione di numerosi dimostratori nell'ambito delle cosiddette armi ad energia diretta (*Directed Energy Weapons*, DEW), capaci di compiere azioni quali la distruzione di piccole imbarcazioni, di missili, proiettili di artiglieria, droni. A queste applicazioni si affiancano quelle più consolidate quali sistemi di guida laser per missili, rilevamento 3D per la individuazione e l'identificazione di veicoli, etc. I laser di alta potenza hanno molte applicazioni anche in ambiti industriali, in medicina e nella ricerca scientifica, tra cui spicca la ricerca sulla fusione nucleare per la produzione di energia.

Queste applicazioni utilizzano monocristalli come mezzi attivi per le sorgenti laser, che tuttavia presentano delle limitazioni sia a causa dei carichi termici generati nel mezzo attivo (che limitano la potenza in uscita), che per le difficoltà nella fabbricazione di

componenti di grandi dimensioni per applicazioni laser di alta potenza.

Per superare tali limiti tecnologici sono quindi necessari materiali laser innovativi, che permettano lo sviluppo di sorgenti laser più efficienti, compatte, e con caratteristiche di emissione ottimizzate per le diverse applicazioni. I ceramici laser microstrutturati sono tra i candidati più promettenti.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

I ceramici laser microstrutturati sono candidati per superare i limiti tecnologici dei monocristalli.

A livello internazionale, le ceramiche trasparenti a base di YAG (Y3Al5O12) hanno raggiunto livelli qualitativi analoghi ai monocristalli. I materiali ceramici uniformemente drogati con Yb (es. Yb:YAG) hanno dimostrato di essere molto efficaci per la realizzazione di sistemi laser a stato solido, pompati da laser a semiconduttore e con emissione nel vicino infrarosso ($\lambda=1030$ nm). Grazie al processo ce-

ramico vengono prodotti e commercializzati mezzi attivi con dimensioni maggiori di quelle ottenibili con i monocristalli, ed anche compositi contenenti zone uniformemente drogate con ioni diversi. Nonostante l'importanza strategica, la tecnologia è prevalentemente posseduta da Stati Uniti e Giappone: Konoshima Chemicals (Giappone) è l'unico fornitore commerciale di ceramiche trasparenti per applicazioni laser. Inoltre tale tecnologia presenta ancora delle limitazioni legate alla flessibilità del processo, che permette solo la realizzazione di strutture composite con architetture semplici.

La soluzione tecnologica proposta in CeMiLAP2 permette di colmare questo ritardo tecnologico rispetto alla concorrenza extraeuropea tramite una tecnologia innovativa di microstrutturazione in due dimensioni (2-D) di ceramiche a base di YAG. Variando in modo controllato la composizione e/o il drogaggio all'interno del materiale è possibile infatti gestire e limitare gli effetti termici e termo-meccanici che limitano i livelli di potenza massima e di efficienza raggiungibili.

Il controllo della distribuzione del drogante Yb (che assorbe la radiazione di pompa ed emette la radiazione laser) permette di controllare la distribuzione del carico termico all'interno del materiale attivo e di limitarne gli effetti indesiderati sulla potenza di emissione, mentre l'introduzione di altri droganti (ad es. Cr⁴⁺) permette di ottenere la soppressione dell'emissione laser parassita in direzioni indesiderate (fenomeno noto come Amplified Spontaneous Emission, ASE).

METODOLOGIA

Le attività del progetto CeMiLAP2 sono condotte in collaborazione dall'Istituto di Scienza, Sostenibilità e Tecnologia per lo Sviluppo dei Materiali Ceramici (CNR ISSMC, già ISTE) e l'Istituto Nazionale di Ottica (CNR INO). Il progetto è organizzato in tre fasi della durata di 12 mesi. Le attività svolte nella Fase 1 possono essere riassunte come segue.

a) Studio e progettazione del sistema laser e definizione delle strutture e composizioni relative

del mezzo attivo tramite simulazioni numeriche (emissione laser e stress termo meccanici).

- b) Messa a punto della strutturazione del sistema ceramico YAG-Yb:YAG in 1-D e 2-D sfruttando i risultati ottenuti nel PNRM CeMiLAP. Produzione di prototipi di piccole dimensioni di YAG-Yb:YAG con strutturazione semplificata (Figura 1).
- c) Studio e ottimizzazione del processo di fabbricazione di Cr:YAG con drogaggio uniforme, propedeutico alle Fasi 2 e 3.
- d) Caratterizzazione ottica, spettroscopica e test preliminari di emissione laser dei componenti prodotti.

Le attività che saranno svolte nella Fase 2 sono:

- e) Studio e messa a punto della strutturazione della distribuzione del drogante fino a 3-D. Studi della scalabilità dimensionale dei componenti e della diffusione dei droganti nei materiali.
- f) Caratterizzazione ottica e test di emissione laser dei componenti prodotti.
- g) Allestimento della versione preparatoria del dimostratore laser.
- h) Verifica del design della struttura del mezzo attivo e del sistema laser in base ai risultati sperimentali.

Le attività che saranno svolte nella Fase 3 sono:

- i) Produzione dei campioni strutturati sulla base del design finale.
- j) Caratterizzazione ottica e test laser di componenti prodotti.

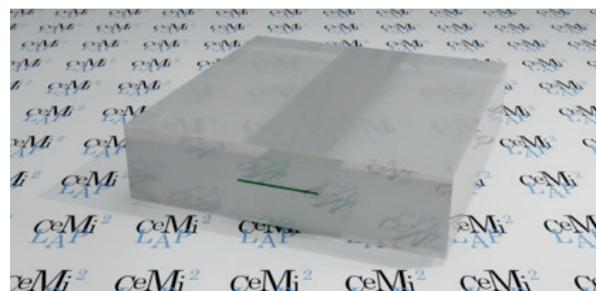


Figura 1 - Guida d'onda 0.5 mm larghezza, 7.4 mm lunghezza, spessore 140 micron, costituita da YAG non drogato e Yb:YAG

- k) Allestimento del dimostratore laser e caratterizzazione delle proprietà di emissione utilizzando i componenti strutturati.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La tecnologia proposta avrà ricadute nel settore militare ma anche nel settore civile. I risultati del progetto potranno essere sfruttati sia nelle industrie che per scopi di ricerca. Le applicazioni industriali dei laser ad alta potenza con emissione continua riguardano ad esempio le lavorazioni di materiali quali taglio, saldatura, trattamenti termici superficiali (es. tempra, ricottura). Tali applicazioni richiedono sistemi laser di elevata potenza (per ottenere elevate velocità di trattamento), alta qualità spaziale del fascio (per motivi di precisione nell'effettuazione dei trattamenti), efficienza energetica e non ultimo, per essere economicamente vantaggiosi, elevata affidabilità su lunghi periodi di funzionamento. Tali requisiti sono in larga parte sovrapponibili con quelli per la realizzazione di sistemi DEW. Non a caso, infatti, i dimostratori di sistemi DEW finora presentati in ambito internazionale sono basati sullo sviluppo ed integrazione di sistemi laser a stato solido inizialmente sviluppati per le applicazioni industriali menzionate sopra. Nella ricerca scientifica, i laser di alta potenza sono di interesse per studi fondamentali sull'interazione radiazione-materia, fisica del plasma, generazione di fasci di particelle, fusione nucleare con ignizione laser.

CONCLUSIONI

Lo scopo del progetto CeMiLAP2 è lo sviluppo di tecnologie laser innovative per sorgenti di elevata potenza di emissione, basate su mezzi attivi costituiti da materiali ceramici microstrutturati di nuova concezione.

Le attività della Fase 1 sopra menzionata sono sfociate nella fabbricazione di due tipologie di campioni:

- dimostratori trasparenti di Cr:YAG con drogaggio uniforme, diametro fino a 19 mm e spessore fino a 3.0 mm (Figura 2).



Figura 2 - Campione 0.5% Cr:YAG

- elementi attivi laser con strutturazione 2-D a guide d'onda rettangolare (Figura 3), in YAG/Yb-YAG, con trasmittanza fino al 74.5% (valore teorico atteso 83.5%). con le quali è stata ottenuta emissione laser fino a 14.4W di picco in modalità quasi continua.

I risultati ottenuti sono in linea con le specifiche di progetto e con le simulazioni numeriche. Le tecni-

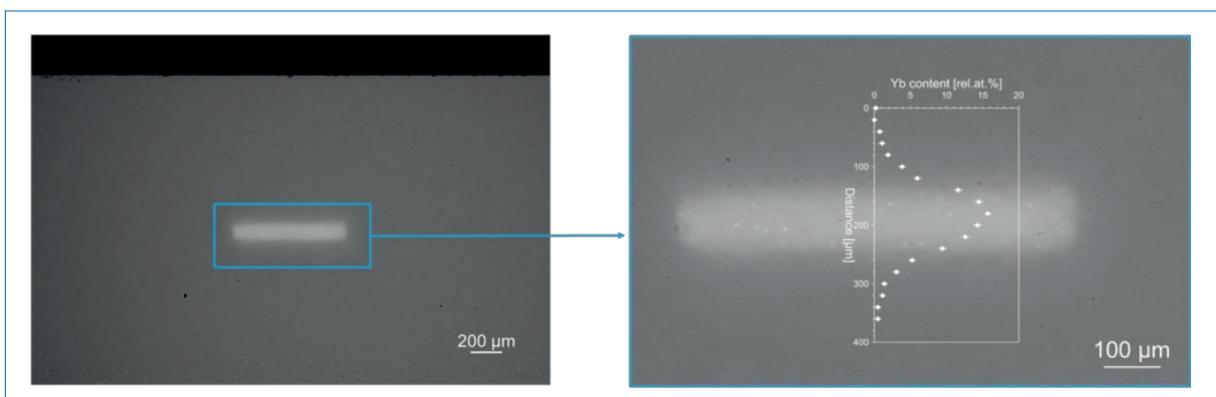


Figura 3 - Sezione trasversale perpendicolare alla guida d'onda di Yb:YAG in YAG non drogato; la striscia grigia chiara corrisponde alla regione drogata Yb. La sezione rettangolare della guida d'onda è ben visibile; larghezza è circa 0,65 mm. Non sono stati osservati difetti derivati dal processo stratificato

che di fabbricazione impiegate risultano adeguate alla fabbricazione di componenti ottici di struttura complessa, nonché alla scalatura di potenza prevista nelle fasi successive del progetto.

Per raggiungere l'obiettivo finale, è necessario proseguire con le Fasi 2 e 3, ove si aumenterà il

grado di complessità della microstrutturazione dei ceramici per giungere al reale superamento dei limiti intrinseci dei monocristalli ed ottenere quindi il beneficio desiderato per lo sviluppo di sorgenti laser ad alta efficienza e alta potenza.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

YAG	Yttrium Aluminium Garnet ($Y_3Al_5O_{12}$)
Yb:YAG	Yb-doped Yttrium Aluminium Garnet
Cr:YAG	Cr-doped Yttrium Aluminium Garnet
ASE	Amplified Spontaneous Emission
1-D	Monodimensionale
2-D	Bidimensionale

PAROLE CHIAVE

Ceramici trasparenti, drogaggio, laser di alta potenza, YAG, mezzo attivo, laser a stato solido, processo ceramico.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Recapiti amministrativi del progetto	a.2018.059
Numero scheda PNRM:	a.2018.059
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (AR-MAEREO)),
Ente responsabile del progetto:	CNR ISSMC (Consiglio nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze, Tecnologia e Sostenibilità per lo Sviluppo dei Materiali Ceramici)
Città, Regione:	Faenza, Emilia-Romagna
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Laura Esposito
Recapiti del responsabile del progetto:	via Granarolo 64, 48018 Faenza
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0546 699731
E-mail del responsabile del progetto:	laura.esposito@issmc.cnr.it

BIBLIOGRAFIA

- Obering, H. T. (2019). Directed energy weapons are real... and disruptive. *Prism*, 8(3), 36-47.
- Ahmed, S. A., Mohsin, M., & Ali, S. M. Z. (2021). Survey and technological analysis of laser and its defense applications. *Defence Technology*, 17(2), 583-592.
- Banerjee, S., Ertel, K., Mason, P. D., Phillips, P. J., De Vido, M., Smith, J. M., ... & Collier, J. L. (2015). DiPOLE: a 10 J, 10 Hz cryogenic gas cooled multi-slab nanosecond Yb:YAG laser. *Optics Express*, 23(15), 19542-19551.
- Nakamura, S., Yoshioka, H., Matsubara, Y., Ogawa, T., & Wada, S. (2008). Efficient tunable Yb:YAG ceramic laser. *Optics Communications*, 281(17), 4411-4414.
- Tian, F., Ikesue, A., & Li, J. (2021). Progress and perspectives on composite laser ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*. Volume 42, Issue 5, 2022, Pages 1833-1851,
- Hostaša, J., Piancastelli, A., Toci, G., Vannini, M., & Biasini, V. (2017). Transparent layered YAG ceramics with structured Yb doping produced via tape casting. *Optical Materials*, 65, 21-27.
- Ferrara, P., Ciofini, M., Esposito, L., Hostaša, J., Labate, L., Lapucci, A., ... & Gizzi, L. A. (2014). 3-D numerical simulation of Yb:YAG active slabs with longitudinal doping gradient for thermal load effects assessment. *Optics Express*, 22(5), 5375-5386.
- Yagi, H., Bisson, J. F., Ueda, K., & Yanagitani, T. (2006). Y₃Al₅O₁₂ ceramic absorbers for the suppression of parasitic oscillation in high-power Nd:YAG lasers. *Journal of luminescence*, 121(1), 88-94.
- Hostaša, J., Toci, G., Esposito, L., Patrizi, B., Vannini, M., Pirri, A., ... & Biasini, V. (2022, May). Planar and rectangular ceramic Yb:YAG laser waveguides. In *Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications III* (Vol. 12142, pp. 6-12). SPIE.

L'utilizzo dei sistemi aeromobili a pilotaggio remoto (SAPR) ad ala rotante avrà un impatto significativo sul settore aeronautico civile e militare, soprattutto in quelle applicazioni in cui è fondamentale il decollo e atterraggio verticale. Al momento, uno dei principali ostacoli per il conseguimento di una certificazione aeronautica dei sistemi aeromobili a pilotaggio remoto ad ala rotante è la limitata esperienza in scenari operativi di questo tipo di velivoli. Il progetto PNRM HERO ha come obiettivo l'integrazione e la valutazione di un dimostratore tecnologico SAPR ad ala rotante, progettato e realizzato dalla Leonardo S.p.A., negli scenari operativi di potenziale interesse per le Forze Armate nazionali con particolare riferimento alle operazioni da unità navale. Nell'ambito del progetto è stato sviluppato il sistema di decollo e atterraggio automatico, il SAPR è stato integrato a bordo delle unità navali incluse le operazioni di appontaggio e le operazioni sul ponte controllate a distanza, è stato sviluppato un simulatore di scenari operativi complessi e pianificazione delle missioni, è stato integrato un propulsore alimentato a Heavy-Fuel, è stato effettuato uno studio di integrazione del SAPR con mezzi pilotati convenzionali, è stata verificata l'integrità del sistema dal punto di vista EMC/EMI in prossimità di apparati emittenti con particolare riferimento alle unità navali. Infine è stata effettuata una verifica del sistema in ambienti operativi.



INTRODUZIONE

Le moderne operazioni aeronavali abbracciano uno spettro molto ampio di attività, che spazia da quelle più tradizionali (proiezione di capacità militari), ai compiti di antipirateria, contrasto alle attività terroristiche, controllo della legittimità dei traffici marittimi, alle iniziative di soccorso umanitario o supporto alla popolazione civile. Frequentemente, queste operazioni evolvono da una forma all'altra, costringendo le Unità Navali (UN) schierate a modificare postura operativa e modalità d'intervento con grande rapidità/fluidità. Le Marine Militari allo scopo di far fronte a questa natura diversificata e mutevole delle attività che sono chiamate a svolgere, intendono impiegare velivoli tipo APR (Aeromobili a Pilotaggio Remoto) imbarcati con il fine di incrementare l'efficacia e la sostenibilità delle operazioni grazie alla possibilità di espandere le capacità ISR degli assetti schierati in Teatro Operativo, sia in termini di ampiezza delle aree esplorate che di persistenza dei sensori, ridurre l'esposizione al rischio degli equipaggi di volo, incrementare la precisione d'ingaggio delle Forze Aeronavali, prevenendo/contenendo la possibilità di danni collaterali e aumentare la costo-efficacia dello Strumento aeronavale nell'ambito della Squadra Navale in relazione ai moderati costi di utilizzo orario degli assetti in questione.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

L'utilizzo dei sistemi aeromobili a pilotaggio remoto è ormai consolidato soprattutto in ambito militare ma anche in ambito civile. La maggior parte dei SAPR operativi nelle forze armate mondiali è ad ala fissa. L'utilizzo operativo dei SAPR ad ala rotante è invece ad oggi limitato a poche forze armate e a pochi modelli. In particolare l'utilizzo dei SAPR ad ala rotante è di interesse per le Marine Militari in quanto questi permettono le operazioni da unità navali senza la necessità di installare dispositivi di decollo e atterraggio sul ponte nave (ad esempio reti). Il motivo di questa limitata operatività di tali sistemi è la peculiarità dell'applicazione sia dal

punto di vista tecnologico (ad esempio la necessità di avere un sistema di decollo e atterraggio automatico dalla unità navale in movimento, incluso l'ancoraggio in sicurezza al ponte della nave), che dal punto di vista operativo (ad esempio l'utilizzo di carburanti di tipo heavy fuel che dal punto di vista ambientale (ad esempio l'ambiente salino). Con il progetto PNRM HERO sono state sviluppate le principali capacità tecnologiche che permettono di operare questi sistemi da unità navali.

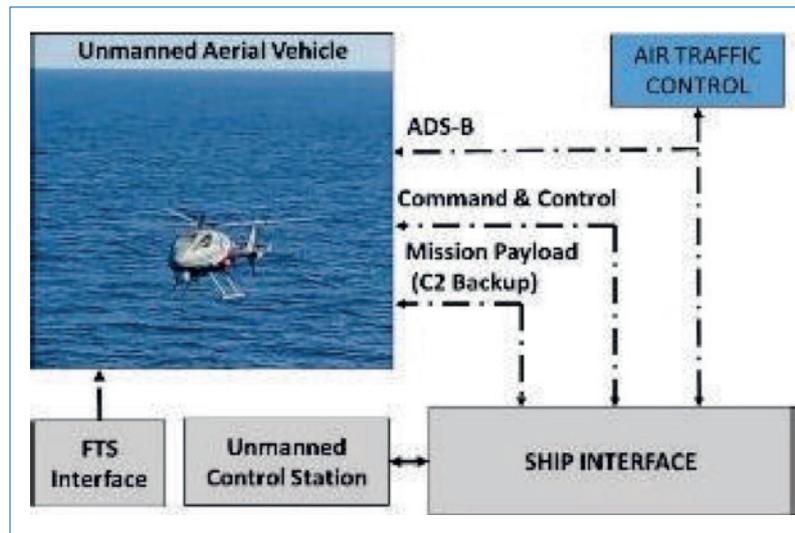
METODOLOGIA

Il progetto PNRM HERO è stato realizzato dalla ditta Leonardo S.p.A.

Nell'ambito delle due fasi del progetto le attività svolte sono state le seguenti:

- a) Realizzazione di un dimostratore tecnologico a pilotaggio remoto ad ala rotante usato come piattaforma di integrazione e validazione dei sistemi e delle soluzioni costruttive oggetto della ricerca.
- b) Ricerca di soluzioni costruttive dedicate ad incrementare l'affidabilità del dimostratore in ambienti operativi, in presenza di contaminanti (es. polveri, pioggia ecc.) e/o ambienti corrosivi (es. ambiente salino) con integrazione e test sul dimostratore di soluzioni ottimizzate per isolare e/o proteggere le parti sensibili del mezzo e garantirne l'operatività in un tale contesto.
- c) Ricerca di soluzioni ottimizzate in ambito EMC/EMI per garantire l'operatività del dimostratore in ambienti fortemente emissivi, con particolare riferimento all'uso da unità navale.
- d) Design, integrazione e test al banco e in volo di un sistema di alimentazione basato su Heavy Fuel;
- e) Ricerca di soluzioni costruttive dedicate all'installazione e l'operatività del dimostratore su unità navale, incluso lo sviluppo di un sistema di ancoraggio per garantire il bloccaggio del velivolo in seguito ad un appontaggio o nelle fasi immediatamente precedenti il decollo e lo svi-

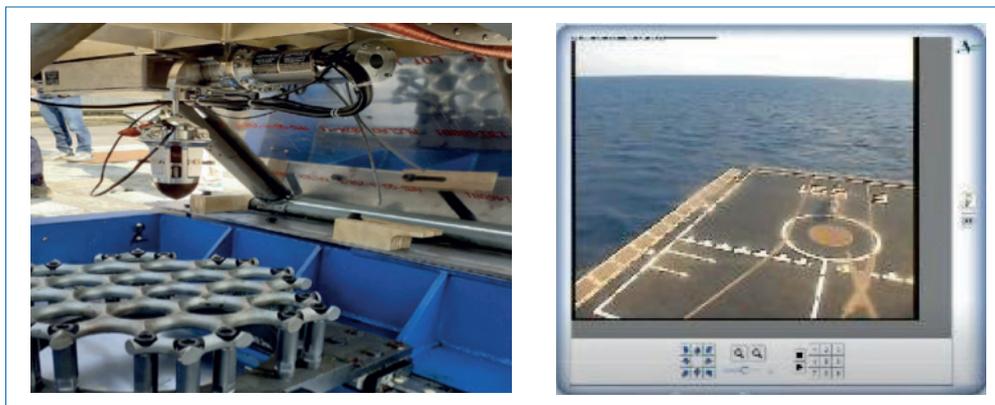
- luppo di un sistema di tracciamento delle antenne di bordo da piattaforma mobile
- f) Ricerca, realizzazione e test di un sistema di decollo ed atterraggio in modalità automatica da un mezzo in movimento.
- g) Sviluppo di un simulatore dedicato alla simulazione di scenari operativi complessi
- h) Studio di sistemi di integrazione con mezzi pilotati.
- i) Valutazione del dimostratore tecnologico e dei singoli sistemi, sviluppati nell'ambito del progetto, in scenari operativi navali mediante campagna di volo dedicata a simulare missioni di tipo ISR.



POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Lo stato di maturità del progetto al termine della Fase 2 conferma un livello TRL 7 - Dimostrazione di un prototipo di sistema in ambiente operativo. Infatti le capacità operative del dimostratore tecnologico sono state dimostrate attraverso una

campagna di test a terra e in volo in ambiente marittimo e in scenari operativi. Questo progetto ha permesso di sviluppare e validare le principali capacità tecnologiche che permettono di operare i sistemi aeromobili a pilotaggio remoto ad ala rotante da unità navali, aprendo la strada ad un loro esteso utilizzo.



CONCLUSIONI

Lo scopo del progetto PNRM HERO è l'integrazione e la valutazione di un dimostratore tecnologico di sistema aeromobile a pilotaggio remoto ad ala rotante negli scenari operativi di potenziale interesse per Forze Armate nazionali con particolare riferimento alle operazioni da unità navale. Nell'ambito delle due fasi del progetto è stato sviluppato il sistema di decollo e atterraggio automatico, il SAPR è stato integrato a bordo delle unità navali incluse le operazioni di appontaggio e le operazioni sul ponte controllate a distanza, è stato sviluppato un simulatore di scenari operativi complessi e pianificazione delle missioni, è stato integrato un propulsore alimentato a Heavy-Fuel, è stato effettuato uno studio di integrazione del SAPR con mezzi pi-

lotati convenzionali, è stata verificata l'integrità del sistema dal punto di vista EMC/EMI in prossimità di apparati emittenti con particolare riferimento alle unità navali. Infine è stata effettuata una verifica del sistema in ambienti operativi.

La chiusura del progetto ha portato alla luce l'opportunità di definire alcuni temi per possibili sviluppi di tecnologie future in ambito di sistemi unmanned ad ala rotante e in particolare:

- Propulsione ibrida (termico/elettrica)
- Rotore di coda elettrico
- Sistema di detect and avoid
- Sistema di atterraggio automatico in condizioni di emergenza (assenza di segnale GPS e/o datalink)
- Datalink satellitare

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>APR</i>	Aeromobile a Pilotaggio Remoto
<i>EMC</i>	Electro-Magnetic Compatibility
<i>EMI</i>	Electro-Magnetic Interference
<i>ISR</i>	Intelligence Surveillance Reconnaissance
<i>SAPR</i>	Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto
<i>UN</i>	Unità Navale

PAROLE CHIAVE

Aeromobile, Pilotaggio Remoto, Atterraggio, Decollo, Heavy Fuel, Appontaggio

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	n. a2013.138
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (ARMAEREO),
Ente responsabile del progetto:	Leonardo S.p.A.
Città, Regione:	Roma , Lazio Cascina Costa , Veneto
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing Luca D'Ambrosio, Responsabile Programma RUIAV
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Giovanni Agusta, 520, Cascina Costa, Varese, Italia
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 346 182 4362
E-mail del responsabile del progetto:	luca.dambrosio@leonardo.com

L'acronimo IED, *Improvised Explosive Device*, è ormai divenuto familiare nel lessico delle operazioni militari soprattutto di quelle definite come "asimmetriche", ovvero combattute fra forze regolari e forze guerrigliere e/o terroristiche. Una soluzione potenzialmente molto efficace è quella proposta con il programma MILDAR tramite l'utilizzo in modalità integrata di vari sensori e l'impiego di sistemi di elaborazione in grado di fondere assieme ed analizzare le informazioni acquisite per l'individuazione degli IED. Nella prima fase del progetto sono state condotte le attività di analisi e modellazione del sistema, definendone specifiche ed architettura, nonché realizzando prototipi iniziali da laboratorio, specificatamente per il sensore LIDAR, per consentire di valutare l'ipotesi iniziale di capacità di *mapping* e *detection* di IED. Nelle successive fasi del progetto sono stati realizzati prototipi via via più evoluti che hanno consentito la sperimentazione in volo della soluzione integrata del sistema su di un laboratorio volante appositamente attrezzato per valutare la capacità del sistema stesso.

Il progetto, nei limiti dei prototipi realizzati che richiedono ulteriori ingegnerizzazioni per adeguamento, ha fornito significativi risultati sulle prestazioni dei sensori sviluppati e delle tecniche di *mapping* e *detection* per la rivelazione di IED. E' stata quindi proposta un ulteriore progetto per l'affinamento della industrializzazione di questo prototipo che ne consenta l'impiego in modo non invasivo e compatibile con la piattaforma ospitante, ospitabile in POD standard ed interfacciabile con i sistemi di bordo.

INTRODUZIONE

Le tecniche di agguato IED, hanno caratterizzato i conflitti fin dalla seconda guerra mondiale; l'IRA ne ha fatto grande uso nella guerra dell'Irlanda del Nord, gli Hezbollah nella guerra del Libano, per arrivare poi alla guerra in Iraq; in Afghanistan gli agguati IED hanno causato il 35% dei morti e il 60% dei feriti delle forze americane. Conoscere, contrastare e prevenire gli attentati condotti con IED disseminati in particolare lungo le strade o nelle aree di passaggio o di sosta è divenuta pertanto una priorità per le truppe operanti nei vari teatri operativi. La soluzione proposta con il progetto MILDAR prevede l'utilizzo in modalità integrata di vari sensori operanti nel campo infrarosso, visivo e ultravioletto installati su piattaforme volanti pilotate o UAV (UnManned Air Vehicle), in grado di mappare il territorio sorvolato e di trasmettere i

dati rilevati ad una stazione di terra; ciò che i sensori devono rilevare sono gli stessi IED, se visibili, oppure le caratteristiche del terreno e le sue evoluzioni nel tempo se interrati. In particolare l'attività di ricerca del programma MILDAR è stata orientata allo sviluppo di un sensore LIDAR in grado di identificare oggetti al suolo dell'ordine dei 10 cm ed in grado di analizzare le emissioni di sostanze volatili dei potenziali IED, tramite tecniche LIF (Laser Induced Fluorescence).

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

L'obiettivo del progetto MILDAR è fornire un supporto efficace all'identificazione di potenziali IED in specifiche aree di interesse, attraverso l'utilizzo di un sistema articolato e integrato, in grado di elaborare e correlare i dati provenienti da più piatta-

forme co-operanti, a differenti quote e su differenti livelli di discriminazione, tramite l'uso di appropriati sensori tra di loro complementari. L'utilizzo sinergico di tali sensori e piattaforme è tra le caratteristiche principali ed innovative del Progetto MILDAR.

Sono stati quindi identificati tre livelli di impiego del sistema con relative piattaforme aeree e sensori, come descritto in Figura 1:

- Livello 1: velivolo ad ala alta operante tra 1000 ft e 5000 ft equipaggiato con sensore LIDAR
- Livello 2: UAV operante tra 300 ft e 1000 ft equipaggiato con sensore elettroottico ed infrarosso
- Livello 3: mini UAV operante fino a 300 ft equipaggiato con sensore ottico

La principale tecnologia utilizzata nell'ambito del programma è quella denominata LIDAR che rappresenta uno degli elementi innovativi del sistema MILDAR. In particolare, sono state utilizzate due tecniche specifiche altamente innovative nella loro combinazione: la tecnica laser-altimetrica e la tecnica di misura spettrometrica LIF. La prima consente di generare una mappatura ad alta risoluzione

del terreno e di riconoscere alterazioni misurabili dell'ambiente quali: presenza di smottamenti del terreno, residui da escavazioni, passaggio di pneumatici, tracce in genere, dislocazione di autovetture, contenitori, detriti in grado di nascondere un IED e/o materiali chimici pericolosi.

La seconda tecnica, basata sulla fluorescenza, permette mediante la generazione di un profilo fisico/chimico/biologico superficiale e limitatamente sub-superficiale, di rilevare tracce chimiche o biologiche potenzialmente riconducibili a elementi tipicamente presenti all'interno di un IED. Spesso, infatti, la natura degli ordigni determina perdite di contenuto che possono essere rilevate anche a grande distanza grazie all'impiego di sorgenti laser adeguate.

Altro elemento essenziale del sistema MILDAR è il sistema di archiviazione ed analisi dei dati acquisiti dai vari sensori che, grazie ad algoritmi di analisi dei flussi video rilevati dai diversi sensori ed all'automazione nella identificazione di potenziali minacce, costituisce un efficace supporto per gli operatori preposti alla analisi degli scenari operativi.

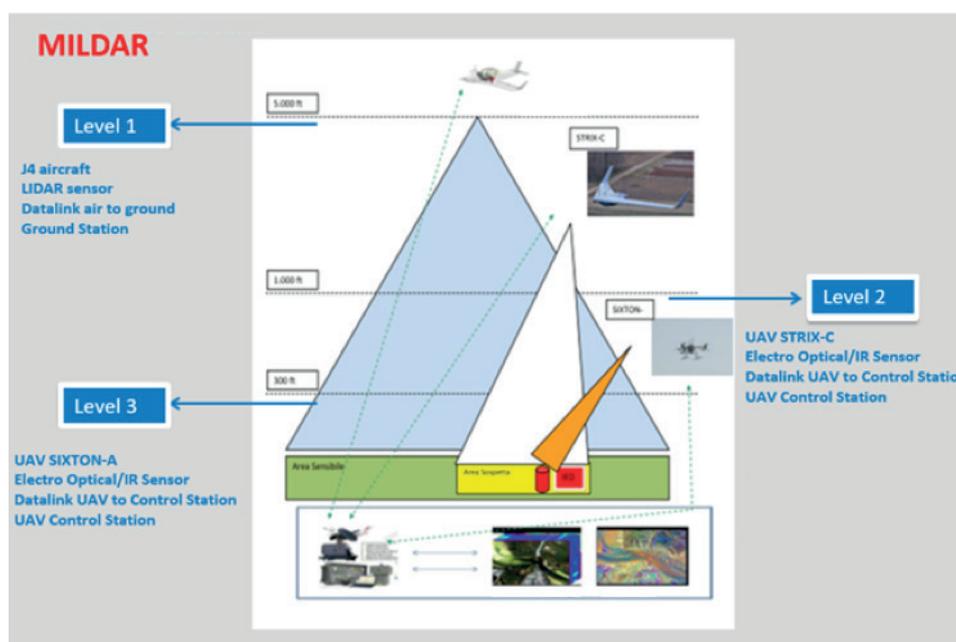


Figura 1 -Sistema di Sistemi MILDAR

METODOLOGIA

Il progetto MILDAR è stato realizzato dalle aziende LEAT SpA, ISOCOMP srl ed Alpi Aviation, appositamente organizzate in un Raggruppamento Temporaneo di Imprese. Il progetto è stato organizzato in tre fasi:

- la prima fase focalizzata sulla definizione delle specifiche e della architettura del sistema
- la seconda fase, suddivisa in 2 sottofasi, ha riguardato la realizzazione di prototipi di complessità crescente che hanno consentito di validare e valutare le ipotesi iniziali della attività di ricerca; in particolare nella fase 2A è stato realizzato un prototipo da laboratorio (Model A) del sensore

LIDAR che, operando a terra, ha consentito di dimostrare la capacità radar altimetrica del sensore e la capacità di individuare oggetti della dimensione di 10 cm dalla distanza di 3000 ft.

Nella fase 2B, sulla base dei risultati ottenuti nelle fasi precedenti, è stato sviluppato il prototipo Model B del sistema che ha compreso anche i sensori elettro-ottico ed infrarosso e l'allestimento di un laboratorio volante su cui i prototipi dei sensori sono stati installati.

In particolare il sensore LIDAR è stato opportunamente ingegnerizzato per l'impiego in volo: il layout e la scomposizione in sottosistemi sono descritti in Figura 2 e Figura 3.

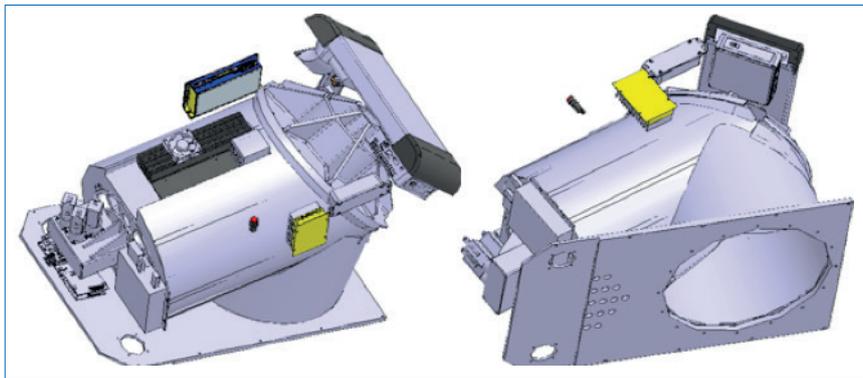


Figura 2 - Sensore LIDAR

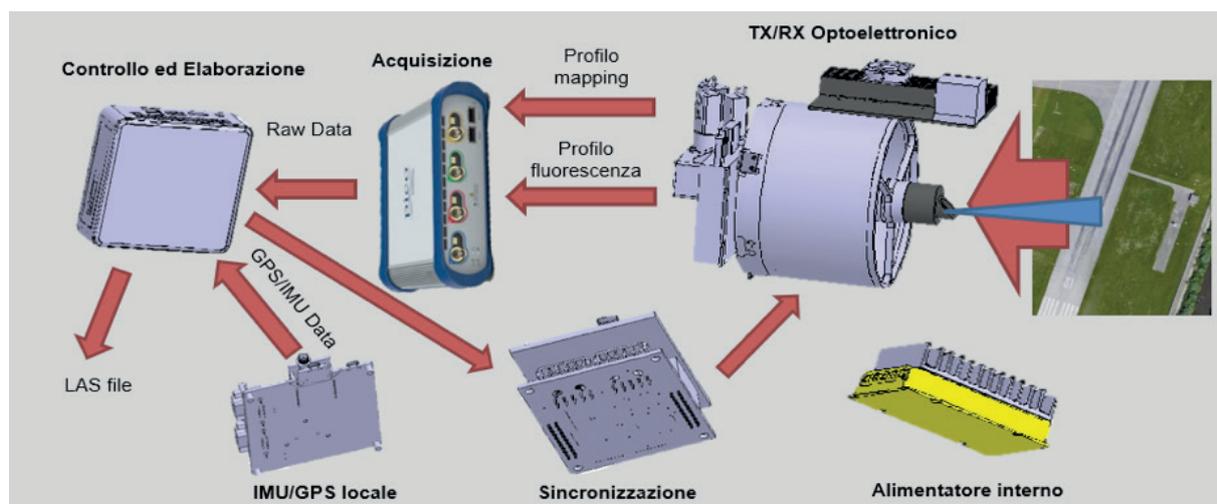


Figura 3 - Sottosistemi Sensore LIDAR

Inoltre, è stata sviluppata la stazione di Elaborazione, le cui capacità sono state rese disponibili in parte a terra ed in parte in volo, per supportare le capacità di “early warning”.

E’ stata quindi condotta una campagna di prove (Figura 4) in volo in cui le informazioni acquisite dai diversi sensori sono state centralizzate nella stazione di elaborazione, consentendo di fonderle assieme e verificare gli algoritmi di *change detection* ed *object detection* sviluppati. Questo ha permesso di verificare la capacità dei singoli sensori e del sistema nel suo complesso, di identificare modifiche al territorio sorvolato e di identificare oggetti al suolo con forme compatibili con quelle di un database di “minacce” opportunamente popolato. Nell’ambito di questa campagna di test è stato inoltre verificata

la capacità del sensore LIDAR di individuare, tramite analisi della fluorescenza, la presenza di emissioni di sostanze volatili riconducibili a possibili IED.

Nella Figura 5 è mostrata ad esempio la sequenza di elaborazione di immagini successive che evidenzia l’identificazione delle modifiche (*change detection*) tra immagini acquisite in momenti successivi. La Figura 6 evidenzia invece la capacità della stazione di elaborazione di supportare gli operatori nella individuazione di oggetti (da opportune librerie di riferimento) e di evidenziarli nelle immagini (e nei flussi video) acquisiti.

- La terza fase ha previsto invece la ingegnerizzazione del prototipo dei sottosistemi e la verifica del rispetto dei requisiti ambientali ed EMI per il loro impiego in volo.

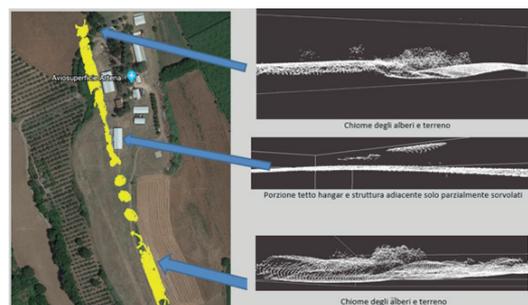


Figura 4 - Acquisizione LIDAR

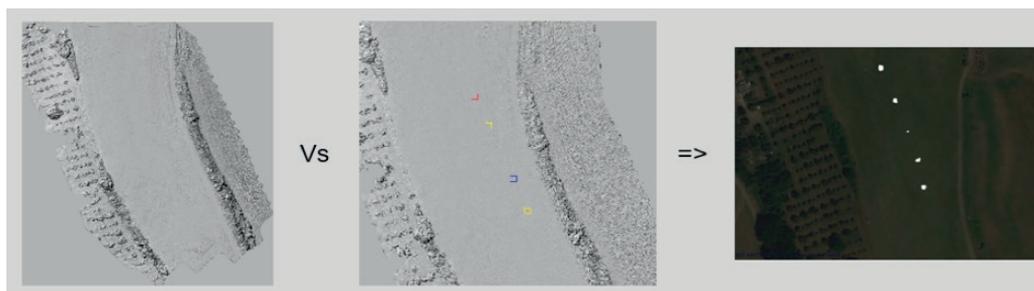


Figura 5 - Analisi tramite stazione di Elaborazione



Figura 6 - Object Detection

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Le ricadute tecnologiche e applicative del sistema MILDAR sono numerose, sia per quanto riguarda il sistema nel suo complesso che per i singoli sensori. Lo studio dell'impiego e della fusione di multi-sensori avrà altri impatti fondamentali nella visualizzazione integrata e aumentata dello scenario operativo, nell'analisi della linea di fuoco e nella pianificazione delle azioni sia militari sia di *Homeland Security* in area urbana.

Più in generale è lecito supporre che il numero di veicoli/velivoli autonomi o tradizionali che faranno uso di sistemi dedicati ma derivati dalla stessa tecnologia MILDAR di base, sia destinato ad aumentare con trend esponenziale.

Per quanto riguarda la tecnologia LIDAR è ormai universalmente riconosciuto come sia uno dei più efficaci sistemi di *Remote Sensing* e della fondamentale funzione di *Stand Off IED Detection*, in grado di fornire informazioni precise ed accurate ai sistemi *Augmented Reality* o di *Virtual Vision*. In particolare l'evoluzione più interessante è verso i sistemi FLASH LIDAR e cioè sistemi LIDAR in grado di rilevare un'intera area con un singolo impulso laser abbattendo drasticamente tempi e calcoli, requisito alla base della prossima generazione di UAS in grado di reagire autonomamente ed in tempo reale al riconoscimento di particolari condizioni. La componente di studio di algoritmi e gestione dell'IT per lo *storage* ed analisi di immagini avrà forti ricadute sullo sviluppo di prodotti destinati anche alla *Homeland Security* e più in generale al controllo del territorio per ogni scopo.

CONCLUSIONI

Lo scopo del progetto MILDAR è stato lo sviluppo di un sistema di sistemi per l'analisi del territorio sorvolato al fine di individuare eventuali IED, tramite l'analisi congiunta delle informazioni acquisite dai sensori operanti a diverse quote. In particolare il progetto ha portato allo sviluppo di un sensore LIDAR con capacità evolute per l'acquisizione radar altimetrica e per l'analisi della fluorescenza del territorio sorvolato. La necessità di fondere ed analizzare congiuntamente i dati eterogenei acquisiti dai diversi sensori ha portato inoltre allo sviluppo di un sistema di gestione dei dati e di loro analisi per individuare, tramite algoritmi di *change detection* ed *object detection*, possibili IED. Il progetto ha portato, principalmente per il sensore LIDAR, allo sviluppo di prototipi che per quanto evoluti richiedono una ulteriore ingegnerizzazione per un loro impiego operativo. Nelle campagne di test sono state infatti dimostrate le capacità di acquisizione e discriminazione di oggetti al suolo, anche di piccole dimensioni (fino a 10cm), da parte del sensore LIDAR operato fino a 3000ft di quota. Sono state apprezzate le prestazioni di sensori ottici ed infrarossi, già selezionati per l'impiego in forza armata. Il prototipo risultato del PNMR non ha però al momento le caratteristiche dimensionali, di peso e di forma per essere immediatamente utilizzato su più piattaforme aeree, o essere smontato o installato e reso operativo in tempi brevi in zone disagiate, prive di infrastrutture adeguate, con personale non specialistico; è stata quindi proposta un ulteriore progetto per l'affinamento della industrializzazione di questo prototipo che ne consente l'impiego in modo non invasivo e compatibile con la piattaforma ospitante, ospitabile in POD standard ed interfacciabile con i sistemi di bordo.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>FT</i>	Feet
<i>IED</i>	Improvised Explosive Device
<i>LIDAR</i>	Laser Imaging Detection and Ranging
<i>LIF</i>	Laser Induced Fluorescence
<i>UAV</i>	Unmanned Air Vehicle

PAROLE CHIAVE

IED, LIDAR, multi-sensore, analisi dello scenario, data fusion, *object detection*, *change detection*.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2011.202
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità (AR-MAEREO))
Ente responsabile del progetto:	LEAT SpA
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Claudio PICA
Recapiti del responsabile del progetto:	Via di Saponara 614, 00125 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 06 45686420
E-mail del responsabile del progetto:	c.pica@leat.it

Il progetto NAIS ha l'obiettivo di studiare l'applicazione di nuovi algoritmi avanzati di visione artificiale basati su "deep learning" per l'elaborazione dei dati forniti in tempo reale dai sensori di bordo impiegati su piccoli UAV. Vengono presi in considerazione quattro casi d'uso: rilevamento, classificazione e localizzazione del bersaglio, segmentazione stradale per la navigazione autonoma in zone "GNSS-denied", segmentazione del corpo umano e riconoscimento dell'azione umana. Tutti gli algoritmi sono stati sviluppati utilizzando metodi di elaborazione delle immagini all'avanguardia basati su reti neurali. Sono state effettuate campagne di acquisizione per raccogliere set di dati che caratterizzino gli scenari operativi tipici, replicando il punto di vista di uno sciame di UAV multi-rotore. Le prestazioni degli algoritmi mostrano alti livelli di accuratezza e velocità di inferenza. I risultati dimostrano il funzionamento degli algoritmi quando implementati su un dispositivo *embedded* commerciale alimentato da GPU (NVIDIA Jetson Xavier) montato a bordo di un quad-rotore personalizzato, aprendo la strada per implementare anche su UAV di portata maggiore un'autonomia operativa di alto livello.

INTRODUZIONE

Le recenti tendenze d'impiego di UAV in ambienti critici rende necessaria l'esplorazione di soluzioni basate su sciami di droni che sfruttino la crescente disponibilità di piccoli sistemi con architetture ad ala rotante e fissa. Questi nuovi strumenti consentono la pianificazione e l'esecuzione di nuovi tipi di missioni, potendo sfruttare una diversa configurazione di assetti tattici e l'incremento del flusso di dati reso disponibile dall'elevato numero di sensori. Tuttavia, in questa nuova impostazione ogni UAV dotato di particolare sensore di bordo, richiede che un operatore dedicato ne monitori continuamente l'attività. Ciò pone un importante limite alla scalabilità del sistema. Di contro, il dominio della visione artificiale ha subito una rivoluzione grazie alle innovazioni nel campo del *deep learning* (DL). Le prestazioni degli algoritmi hanno superato diversi limiti che lo stato dell'arte imponeva, consentendo di realizzare applicazioni che prima non erano possibili. Con il progetto NAIS si sono studiati nuovi algoritmi di visione artificiale basati su "deep learning" per l'elaborazione automatica dei dati forniti in tempo reale da sensori di bordo impiegati su piccoli UAV. Vengono presi in considerazione quattro casi d'uso: rilevamento, classificazione e localizza-

zione del bersaglio, segmentazione stradale per la navigazione autonoma, segmentazione del corpo umano e riconoscimento dell'azione umana.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Negli ultimi anni la ricerca sulla visione artificiale è progredita a un ritmo senza precedenti, principalmente grazie all'ascesa della tecnologia del *deep learning* e, in particolare, delle reti neurali convoluzionali (CNN). Le loro prestazioni nel contesto dell'elaborazione delle immagini le hanno rese la migliore soluzione tecnica disponibile. Con il progetto NAIS si sono studiate applicazioni specifiche. Si è dimostrata l'efficacia degli algoritmi per il rilevamento, la classificazione e la localizzazione di una classe di oggetti (persona), utilizzando immagini RGB acquisite da un drone che vola con la telecamera orientata verso il basso. È stato scelto questo scenario in quanto rappresentativo di situazioni in cui, ad esempio, vi è la necessità di rilevare un bersaglio e tracciarlo autonomamente in contesti di missioni di ricerca e soccorso o monitoraggio di aree critiche. Il modello per la segmentazione semantica è stato applicato in due diversi contesti. Il primo mira a distinguere percorsi stradali nelle im-

magini RGB acquisite da un drone in volo. Questa funzionalità può essere utilizzata per implementare la navigazione autonoma, particolarmente utile nelle zone senza GNSS, per costruire ad esempio un sistema in grado di seguire autonomamente una strada per operazioni di pattugliamento. La seconda applicazione della segmentazione semantica mirava a segmentare la silhouette umana in 19 diverse parti del corpo (come testa, capelli, braccia, gambe, busto, piedi) elaborando immagini RGB acquisite da un drone in volo con la telecamera orientata a -40 gradi. Il modello per il riconoscimento dell'azione umana è stato addestrato per classificare sei diverse azioni in sequenze di frame RGB acquisite da un drone che vola con la telecamera orientata verso il basso (-90 gradi). Le azioni classificate sono state: stare fermi, camminare, correre, accovacciarsi, mirare e lanciare. Questa funzione può essere utilizzata, ad esempio, nelle applicazioni di monitoraggio di aree affollate per identificare automaticamente comportamenti minacciosi.

METODOLOGIA

È stato identificato un modello per ciascuno dei quattro casi d'uso: YOLOv3 per il rilevamento, la classificazione e la localizzazione degli oggetti, DDRNet per i due scenari di segmentazione (segmentazione stradale e segmentazione del corpo umano) e Two-stream ConvNet per il riconoscimento dell'azione umana. Tutti gli algoritmi sono stati personalizzati per gestire facilmente diversi tipi di input, supportando immagini RGB e in scala di grigi nello spettro visibile, immagini in scala di grigi nello spettro infrarosso e immagini acquisite da telecamere multispettrali o iperspettrali. Questi sviluppi hanno anche tenuto conto dell'hardware specifico utilizzato per applicazione *on board* e della necessità di inferenza quasi in tempo reale. I quattro casi d'uso considerati nel progetto NAIS

con l'obiettivo di dimostrare la loro applicazione a bordo di un drone multirottore hanno rappresentato una sfida significativa. Infatti, mentre un numero rilevante di set di dati di immagini per il training degli algoritmi è disponibile per molte applicazioni, solo alcune di esse presentano il punto di vista aereo molto particolare, necessario nel nostro caso. Per questo motivo, si sono condotte sul campo una serie di campagne di acquisizione con l'obiettivo di costruire il set di dati personalizzato necessario per l'addestramento degli algoritmi. La figura 1 mostra il *payload* personalizzato per l'implementazione *on-board*. La Figura 2 mostra campioni utilizzati rispettivamente per il rilevamento di oggetti, la segmentazione e il riconoscimento di azioni. Come ulteriore direzione di ricerca abbiamo anche sfruttate le potenzialità di Unreal Engine per creare set di dati sintetici con

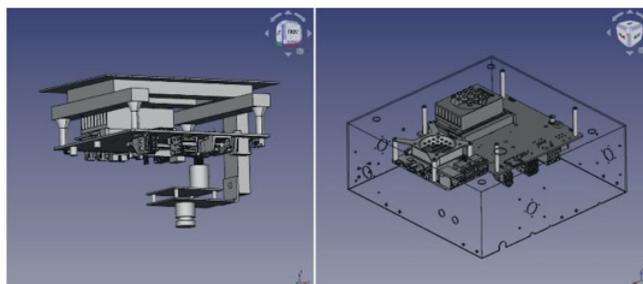


Figura 1 - Progettazione personalizzata del supporto di NVIDIA Jetson per l'implementazione a bordo di un drone multirottore

caratteristiche simili a quelli utilizzati per i quattro casi d'uso considerati e per testare virtualmente gli algoritmi e la loro integrazione con le dinamiche di navigazione del drone. La Figura 3 mostra l'applicazione dell'algoritmo di rilevamento degli oggetti in uno scenario virtuale. Fare un uso corretto di questi motori consente di bypassare la fase di etichettatura, sfruttando la conoscenza della composizione dell'ambiente virtuale sottostante la scena *renderizzata*, automatizzando completamente la generazione del *dataset*.



Figura 2 - Campioni del set di dati utilizzato per lo scenario di rilevamento, classificazione e localizzazione di oggetti, scenari di segmentazione stradale e segmentazione del corpo umano, scenario di riconoscimento dell'azione umana e strumento di annotazione utilizzato per il rilevamento di oggetti e il riconoscimento dell'azione



Figura 3 - Applicazione dell'algoritmo di rilevamento degli oggetti in uno scenario virtuale generato con Unreal Engine

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Tutti gli algoritmi sono stati implementati utilizzando *framework di deep learning* all'avanguardia (TensorFlow / Pytorch). Per accelerare la messa a punto e la sperimentazione degli iper-parametri, il training degli algoritmi è stato effettuato su un computer desktop alimentato da una GPU NVIDIA RTX 3090. I vincoli di implementazione hanno guidato lo sviluppo fin dall'inizio, quindi i modelli sono stati progettati per essere facilmente portabili su dispositivi integrati basati su GPU. Algoritmi addestrati sono stati implementati sulla scheda NVIDIA Jetson Xavier, che è particolarmente adatta per essere integrata a bordo di UAV, grazie al peso e al consumo

energetico ridotti, nonché alle interfacce hardware e software molto flessibili. Per massimizzare le prestazioni, sono state adottate aritmetiche a precisione ridotta sfruttando lo strumento NVIDIA TensorRT. In Figura 4 è mostrato il prototipo finale assemblato e pronto per essere usato per i test con un opto-elicottero in configurazione quad-x.



Figura 4 - Intelligent Payload schierato a bordo di un drone multirotore

La tecnologia adottata e le scelte implementative sono state guidate dall'obiettivo di creare una libreria software in grado di gestire diversi tipi di dati in input e di fornire output che contengano informazioni astratte e di alto livello estratte dai *frames*.

CONCLUSIONI

Con il progetto NAIS si è dimostrato come è possibile impiegare gli algoritmi di visione artificiale basati sul *deep learning*, sviluppati addestrati e implementati su un NVIDIA Jetson Xavier integrata a bordo di un piccolo drone multi-rotore. Tutti i modelli selezionati sono stati scelti per garantire un'ampia applicabilità, favorendo l'integrazione più semplice possibile in termini sia di sorgenti di input che di utilizzatori a valle, anche di terze parti.

La tecnologia adottata e le scelte implementative sono state guidate dall'obiettivo di creare una libreria software in grado di gestire diversi tipi di dati in input e di fornire output che contengano informazioni astratte e di alto livello estratte dai *frames*. I risultati presentati dimostrano il successo nell'applicazione di algoritmi di visione artificiale all'avanguardia basati su *deep learning* per l'elaborazione di dati forniti da sensori quasi in tempo reale installati a bordo di droni multirotore. Le prestazioni ottenute hanno dimostrato che questo approccio può essere molto promettente per perseguire la scalabilità nelle applicazioni UAV con sciame cooperanti e queste funzionalità possono essere applicate direttamente nell'abilitazione di sistemi completamente autonomi.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>UAV</i>	Unmanned Aerial Vehicle
<i>GPU</i>	Graphics Processing Unit
<i>CNN</i>	Convolutional Neural Networks
<i>RGB</i>	Red – Green- Blue standard video

PAROLE CHIAVE

Computer vision, object detection classification and localization, semantic segmentation, human action recognition, UAV.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.053
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Aeronautici e per l'Aeronavigabilità
Ente responsabile del progetto:	Nurjana Technologies
Città, Regione:	Elmas (CA), Sardegna
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Ing. Pietro Andronico
Recapiti del responsabile del progetto:	Via M. Betti, 27/29, 00967 Elmas (CA)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 00240924
E-mail del responsabile del progetto:	pietro.andronico@nurjanatech.com

BIBLIOGRAFIA

Badrinarayanan, V., Kendall, A., Cipolla, R., 2017. Segnet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 39, 2481–2495.

Bochkovskiy, A., Wang, C.Y., Liao, H.Y.M., 2020. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. *arXiv e-prints*, arXiv:2004.10934arXiv:2004.10934.

Chen, L.C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., Yuille, A.L., 2014. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs. *arXiv e-prints*, arXiv:1412.7062arXiv:1412.7062.

Chen, L.C., Papandreou, G., Kokkinos, I., Murphy, K., Yuille, A.L., 2018a.

Deeplab: Semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 40, 834–848. doi:10.1109/TPAMI.2017.2699184.

Chen, L.C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., Adam, H., 2018b. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation, in: Ferrari, V., Hebert, M., Sminchisescu, C., Weiss, Y. (Eds.), *Computer Vision – ECCV 2018*, Springer International Publishing, Cham. pp. 833–851.

Chen, W., Gong, X., Liu, X., Zhang, Q., Li, Y., Wang, Z., 2020b. Fasterseg: Searching for faster real-time semantic segmentation, in: *International Conference on Learning Representations*. URL: <https://openreview.net/forum?id=BJgqQ6NYvB>.

Diba, A., Sharma, V., Gool, L.V., 2017. Deep temporal linear encoding networks. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1541–1550.

Chen, W., Gong, X., Liu, X., Zhang, Q., Li, Y., Wang, Z., 2020b. Fasterseg: Searching for faster real-time semantic segmentation, in: *International Conference on Learning Representations*. URL: <https://openreview.net/forum?id=BJgqQ6NYvB>.

Diba, A., Sharma, V., Gool, L.V., 2017. Deep temporal linear encoding networks. *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 1541–1550.

I recenti sviluppi nelle tecnologie quantistiche, in particolare dei computer quantistici, costituiscono una spada di Damocle sulla crittografia moderna: quella che sembrava essere solo una minaccia remota dalla metà del 2007 è una realtà con la D-Wave, che ha presentato il primo prototipo di calcolatore quantistico funzionante, e con gli sviluppi odierni di IBM, Google e Microsoft. Se gli elaboratori quantistici minacciano di far crollare la Crittografia moderna, o almeno quella basata sugli algoritmi asimmetrici, la Crittografia Quantistica, nella sua accezione di *Quantum Key Distribution* (QKD) si propone di salvarne almeno una parte offrendo un nuovo modo di generare e scambiare le chiavi segrete da usare. Gli obiettivi del progetto Qucryptnet sono stati finalizzati allo sviluppo delle tecnologie in grado di migliorare le prestazioni dei dispositivi di QKD. Lo studio ha comportato la progettazione e la realizzazione, sia delle componenti fondamentali, come apparati di generazione e rivelazione di stati quantistici, sia delle componenti architettoniche per garantire l'estensione delle distanze e l'interconnessione tra reti, mediante *Device Independent Quantum Key Distribution* e *quantum repeater*, sia l'utilizzo di comunicazione in fibra e *free space* mediante nuovi stati quantistici e nuovi protocolli.

INTRODUZIONE

La *Quantum Key Distribution* (QKD) è un protocollo per generare e scambiare in assoluta sicurezza delle chiavi segrete tra due corrispondenti per usi crittografici, mediante particelle elementari e sfruttando le leggi della Meccanica Quantistica". La QKD fu proposta circa 40 anni fa e i suoi fondamenti sono il principio di indeterminazione di Heisenberg e il teorema del no-cloning. La QKD offre un nuovo modo per risolvere il problema della generazione e distribuzione delle chiavi segrete. La Crittografia Classica risolve questo problema con l'utilizzo degli algoritmi Asimmetrici, i quali tuttavia sono a più rischio di un attacco da parte di elaboratori quantistici (algoritmo di Shor). Tuttavia, se gli elaboratori quantistici minacciano di far crollare la Crittografia moderna, o almeno quella basata sugli algoritmi asimmetrici, la QKD si propone di salvarne almeno una parte offrendo un nuovo modo di generare e scambiare le chiavi segrete da usare e, se integrata con i sistemi classici a chiavi simmetriche, potrebbe essere utilizzata nei prodotti attuali di Cifra Militare e Civile, in prima istanza su aree metropolitane e successivamente, con l'aumento delle distanze rag-

giungibili dai canali quantistici, su scala nazionale e mondiale. La tecnologia rientra sicuramente nel quadro della protezione delle Critical National Infrastructures (CNI).

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE⁽⁷⁾

Oggi giorno l'attuale generazione di standard crittografici va rivista alla luce dell'era dell'informatica quantistica. Lo "speed-up" quantico, sebbene non renda obsolete tutte le tecnologie crittografiche, può avere l'effetto di richiedere dimensioni maggiori della chiave, come nel caso di AES. Per ovviare a tutti i limiti delle CNI in termini di prestazioni e resilienza, sono stati individuati quattro problemi fondamentali:

- 1) miglioramento delle sorgenti a singolo fotone o a stati entangled, in grado di operare a temperature ambiente, con elevata efficienza e in grado di garantire l'estensione dei protocolli esistenti;
- 2) aumento la distanza di distribuzione delle chiavi crittografiche, risolvendo il problema dei nodi "trusted" nella cosiddetta distribuzione hop-by-hop;

- 3) superamento dei limiti della non idealità di sorgenti e rivelatori reali;
- 4) Garantire la resilienza delle reti mediante canali quantistici in free space con relativi vettori di comunicazione quantistica.

Per risolvere questi problemi, rispettivamente,

- si sono studiate ed implementate Sorgenti a singolo fotone su materiali come il diamante e il Carburo di Silicio (SiC), e sono state ottimizzate sorgenti basati su fenomeni di parametric down conversion in materiali non lineari;
- si è progettata una rete estesa di QKD con un'architettura in grado di evitare nodi ripetitori *trusted*
- si è sviluppata un'architettura di Device Independent QKD in grado di superare i limiti imposti dalla non idealità di sorgenti e rivelatori;
- si sono progettate nanostrutture in grado di produrre sistemi quantistici multidimensionali per comunicazioni ottiche in free space.

METODOLOGIA

Lo sviluppo e la progettazione di nuove sorgenti quantistiche hanno seguito tre filoni. Il primo filone si è basato sullo studio delle *Nitrogen Vacancy* (NV) in diamante e in SiC. Le NV sono un eccezionale sistema fisico simile a un sistema atomico ma posizionato in una struttura estremamente stabile ed imperturbabile, come noto essere il diamante. Tra i vari sistemi fisici a stato solido, le sue peculiarità risiedono nella sua estrema resistenza, nella trasparenza ottica su una banda che va dall'UV all'infrarosso, e nella possibilità di controllare otticamente gli stati fisici dello spin elettronico di un singolo centro di colore attraverso effetto Zeeman, particolare per il loro utilizzo come sorgenti a singolo fotone. Sono stati individuati tre diversi tipi di emettitori ed è stata confermata l'emissione di fotoni anti-bunched da interferometria *Hanbury Brown-Twiss*. Le misurazioni non hanno mostrato alcuna evidenza di blinking su una scala temporale variabile da 100 μ s a diversi minuti e l'emissione è rimasta stabile per ore sotto eccitazione laser con-

tinua. Il secondo filone si è concretizzato nella modellizzata una sorgente parametrica in guida d'onda ridge su piattaforma in Niobato di Litio. È stata effettuata un'accurata analisi modale in regime di pompaggio impulsato, ottimizzando il profilo del fascio di pompa e dimensionando opportunamente la guida in funzione del drogaggio del Niobato di Litio. Sono state successivamente realizzate due sorgenti accoppiate in fibra in grado di emettere fotoni gemelli in configurazione collineare a frequenza d'onda Telecom. Queste sorgenti sono state utilizzate in un interferometro quantistico innovativo per il controllo della coalescenza di stati *entangled*. Il terzo filone ha sviluppato una sorgente di stati entangled integrata su piattaforma in Fosforo di Indio in grado di generare stati *entangled* a singoli fotone (Fig.1).

Per risolvere il problema dell'estensione delle distanze, è stata progettata e realizzata una rete in

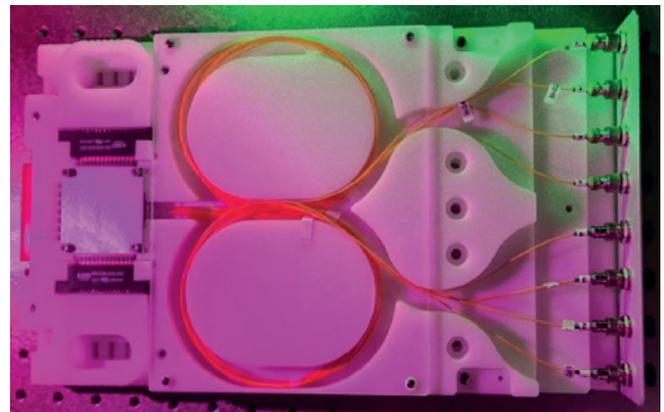


Figura 1 - Sorgente di Stati Entangled a Singolo Fotone. La sorgente è stata sviluppata su piattaforma di Fosforo di Indio connessa mediante fibre ottiche a quattro porte di input e quattro porte di output. Il sistema interferometrico può essere connesso esternamente ad laser attenuato che genera un weak coherence state, o ana sorgente basata su spontaneous parametric down conversion realizzata su guide non lineari. Le porte di output possono essere accoppiate a un network in fibra ottica per la distribuzione di chiavi quantistiche.

configurazione gerarchica, in grado di generare e distribuire chiavi crittografiche con tutti gli utenti abilitati. L'architettura proposta trova un immediato utilizzo nella protezione delle Infrastrutture Critiche Nazionali (CNI) che si basano sempre di più su strutture informatizzate di comunicazione: vi è la necessità non solo di proteggere con i sistemi

di cifratura le cosiddette Reti a Massima Sicurezza, ma anche a garantire la loro interoperabilità, mantenendone una struttura gerarchica. E' stato implementato il concetto di *Federation Agent*, l'elemento cioè che garantisce la connessione tra reti differenti: si comporta come un Ripetitore Quantistico che permette la comunicazione sicura tra ogni utente abilitato della prima rete ed ogni utente abilitato della seconda rete (configurazione any-to-any) su distanze di centinaia di km ($\approx 200\text{Km}$) (Fig.2). Si è inoltre acquisita la tecnologia della nuova classe di detector a superconduzione in grado di operare su lunghezza d'onda Telecom con elevata efficienza quantica ($>70\%$) e banda superiore (1GHz). L'estensione a canali in free space ha visto l'introduzione di sistemi quantistici multidimensionali mediante vortici ottici. I vortici ottici sono delle

singularità di fase puntiformi intorno alle quali la fase si avvolge creando una struttura con fronti d'onda elicoidali. Nel progetto sono state realizzate strutture a matrice metallica in grado di controllare il fronte di fase di un fascio Gaussiano in input. La funzionalità è stata dimostrata generando diverse tipologie di fasci di *Laquerre-Gauss* (Fig.3). Sperimentalmente sono stati creati *cat-state* (stati di gatto di *Schroedinger*), utilizzando come grado di libertà il momento orbitale angolare, con risultati sperimentali in ottimo accordo con le previsioni teoriche. Sono state realizzate anche nano-strutture per la generazione e il controllo di stati particolari di vortice in polarizzazione. Gli esperimenti hanno confermato l'accordo con le previsioni teoriche e aperto la possibilità di utilizzi di protocolli innovativi.

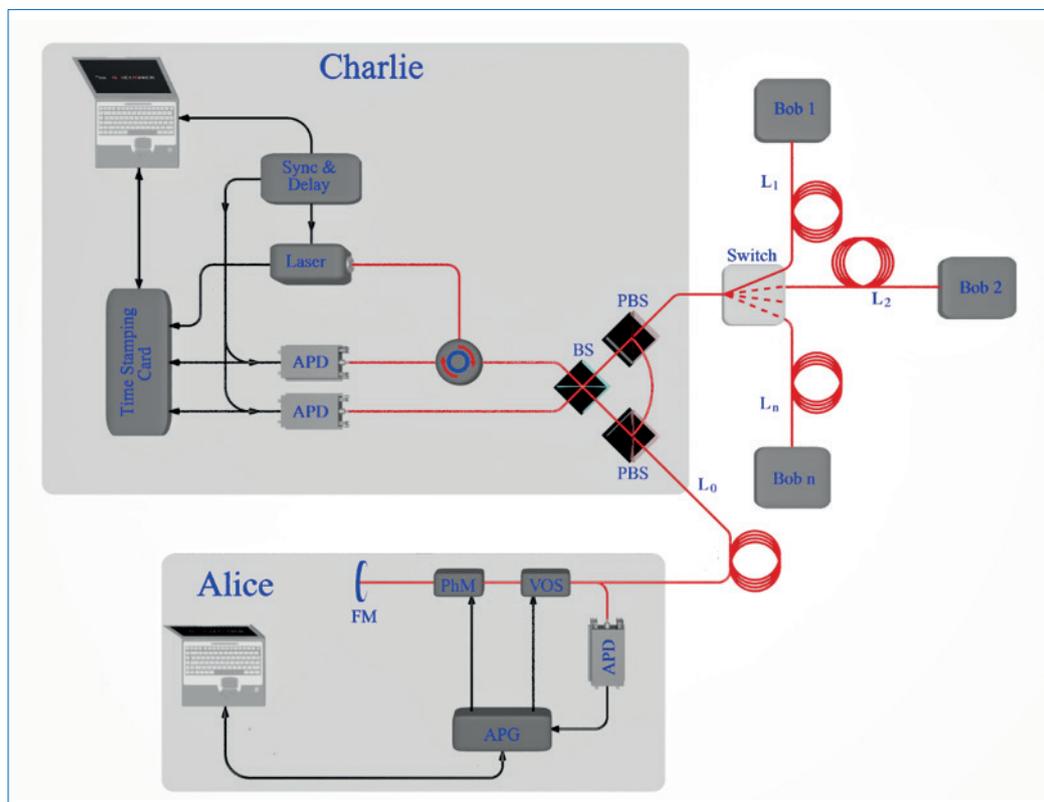


Figura 2 - Schema di Device Independent QKD. La configurazione ottica che lega Charlie, Alice e Bob è equivalente ad un interferometro di Sagnac. Charlie (il server) possiede sia gli apparati di misura (Single Photon Detector Module -SCPM-, Time Stamping Card), sia la sorgente laser, isolata da un circolatore ottico. Alice e Bob possiedono gli apparati per il controllo e il monitoraggio della potenza ottica degli stati coerenti attenuati inviati da Charlie (Variable Optical Switch -VOS- e Avalanche Photo Detector -APD-), egli apparati per la codifica in fase necessaria per la QKD (Phase Modulator - PhM- e Arbitrary Pulse Generator -APG-).

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La natura e la tipologia delle tecnologie che costituiscono l'infrastruttura delle comunicazioni e dell'informazione hanno registrato una notevole evoluzione. Il numero e la natura dei dispositivi di accesso a tale infrastruttura si sono moltiplicati e differenziati per conglomerare i terminali di accesso fissi, senza fili e mobili, e gli accessi tramite collegamenti "permanent" sono in aumento. Ne consegue che la natura, il volume e il carattere sensibile dell'informazione scambiata sono aumentati in modo sostanziale. Con la loro accresciuta connettività, i sistemi e reti d'informazione sono ormai esposti a un aumento del numero di minacce e a una maggiore gamma di vulnerabilità: emergono quindi nuovi problemi di sicurezza. Questo ha condotto ad una più elevata consapevolezza delle esigenze di protezione dei dati da ogni violazione, di garanzia di autenticità per gli stessi e di protezione dei sistemi dagli attacchi provenienti dalla rete. L'utilizzo della tecnologia proposta permette di realizzare una *Quantum Safe Network* basata sia sul paradigma della *Quantum Key Distribution*. Le soluzioni studiate permettono di superare le limitazioni dei precedenti sistemi di QKD e permettono di rafforzare la sicurezza delle comunicazioni e la salvaguardia dei dati nelle Reti a Massima Sicurezza esistenti, sia Militari che Civili. L'utilizzo della DI-QKD permette altresì l'interoperabilità delle Reti a Massima Sicurezza grazie al Federation Agent, che non è un nodo *trusted*, ma si configura come sistema di ripetizione quantistica che non in grado di avere informazioni sulle chiavi crittografiche.

CONCLUSIONI

Nel progetto QuCryptnet si sono affrontate tutte le attuali limitazioni, in termini di prestazioni e resilienza, che gravano sui dispositivi di QKD sinora

in commercio. Lo studio di sorgenti innovative, lo sviluppo di un'architettura di rete, la possibilità di utilizzo sia della comunicazione in fibra sia dei collegamenti in free-space, l'utilizzo di *entanglement* a singolo fotone, costituiscono un passo avanti per la realizzazione di QUANTUM SAFE NETWORK, in grado di essere robuste sia rispetto al *quantum hacking* che al *classical hacking*. La tecnologia sviluppata

- è in grado di raggiungere le distanze ottimali tra nodi adiacenti (in termini di funzioni di costo e di fattori di merito);
- è pratica ed economica: può garantire un servizio a basso costo, e in grado di operare sulle reti ottiche esistenti e future;
- salvaguarda o mitiga le vulnerabilità dell'infrastruttura di informazioni critiche;
- può quindi soddisfare i principali requisiti di sicurezza delle reti di comunicazione quali
 - disponibilità;
 - autenticazione dell'origine dati;
 - controllo di accesso;
 - riservatezza dei dati;
 - integrità dei dati.

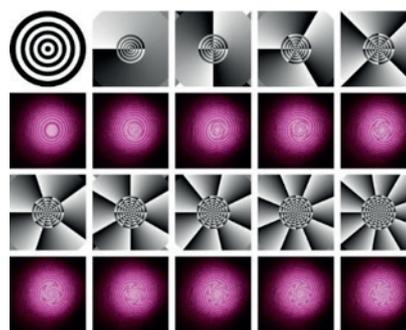


Figura 3 - Esempio di "alfabeto quantistico" multidimensionale ottenuto sfruttando stati di vortice luminosi generati mediante l'utilizzo di dispositivi nanostrutturati. Ciascuna immagini in bianco e nero rappresenta la struttura di fase che viene convertita sul dispositivo nel fascio ottico corrispondente (immagine sottostante), di cui viene rappresentato il comportamento in fase grazie ad una misura interferometrica.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>QKD</i>	Quantum Key Distribution
<i>CNI</i>	Critical National Infrastructure
<i>SiC</i>	Carburo di Silicio
<i>UV</i>	UltraViolet
<i>DI-QKD</i>	Device Independent - QKD

PAROLE CHIAVE

Quantum Cryptography, Quantum Key Distribution, Entanglement, Single Photon Source, non-linear optics.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2010.143
Amministrazione appaltante:	Direzione Informatica, Telematica e Tecnologie Avanzate (TELEDIFE)
Ente responsabile del progetto:	Electronic Division Leonardo S.p.A.
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Prof. Fabio Antonio Bovino
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Tiburtina, km12,400, 00131 Roma (RM)- Dipt. SBAI SAPIENZA Università di Roma, Via Antonio Scarpa 14/16. 00161 Roma (RM)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 3926339576
E-mail del responsabile del progetto:	fabio.bovino@leonardo.com ; fabioantonio.bovino@uniroma1.it

BIBLIOGRAFIA

Articoli di rivista

- [1]. F A Bovino (2019) "Intrasytem entanglement generator and unambiguous Bell states discriminator on chip"; In Special Sessions: Emerging Quantum Signal Processing Paradigms ICASSP 2019, Brighton UK (15-17 May 2019) IEEE CONFERENCE PUBLICATION.
- [2]. Fabio Antonio Bovino (2015) "Device Independent Quantum Key Distribution: A Practical System"; In: Proceedings SEDA 2014 the 3rd international conference in software engineering for defence applications Rome, Italy. September 22-23, 2014.
- [3]. A Benedetti, A Veroli, C Sibilìa, F A Bovino (2015) "Accurate Numerical Procedure for Fast Evaluation of the Irradiation Diagram From Scatterers in The Optical and IR Domain"; In: Proceedings SEDA 2014 the 3rd international conference in software engineering for defence applications Rome, Italy. September 22-23, 2014 .
- [4]. Concita Sibilìa, Alessandro Belardini, Fabio Antonio Bovino (2014) "On Nonlinear Optical Properties of Chiral Materials"; In: 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Graz, Austria, July 6-10, 2014 1-4 IEEE CONFERENCE PUBLICATION.

- [5]. Fabio Antonio Bovino, Andrea Veroli, Alessio Benedetti, Concita Sibilìa (2014) "Controllable Optical Beam By Means of nanopatterned plasmonics device" In: Photonics Technologies, 2014 Fotonica AEIT Italian Conference on 1-3 IEEE ISBN 978-8-8872-3718-4.
- [6]. F Bovino, A Benedetti, A Veroli, C Sibilìa (2014) "On the controllable optical beam direction by means of nanopatterned plasmonics device" Proc. SPIE 9126, Nanophotonics V, 91260X (May 2, 2014).
- [7]. Fabio Antonio Bovino, Matteo Braccini, Maurizio Giardina, Concita Sibilìa (2011) "Orbital Angular Momentum in Noncollinear Second Harmonic Generation by off-axis vortex beams" JOSA B 28: 11. 2806--2811 October.
- [8]. Fabio Antonio Bovino, Matteo Braccini, Mario Bertolotti, Concita Sibilìa (2011) "Management of the Orbital Angular Momentum of Vortex Beams in a Quadratic Nonlinear Interaction" Optics Communications 284: Issue10-11. 2587-2593 May.
- [9]. Fabio Antonio Bovino, Matteo Braccini, Maurizio Giardina, Concita Sibilìa (2011) "Orbital Angular Momentum in Noncollinear Second Harmonic Generation by off-axis vortex beams" JOSA B 28: 11. 2806--2811 October.
- [10]. Fabio Antonio Bovino, Matteo Braccini, Mario Bertolotti, Concita Sibilìa (2011) "Management of the Orbital Angular Momentum of Vortex Beams in a Quadratic Nonlinear Interaction" Optics Communications 284: Issue10-11. 2587-2593 May.

Libri e altre monografie

- [1]. M Bertolotti, F Bovino, C Sibilìa (2015) Quantum State Engineering: Generation of Single and Pairs of Photons Chapter 1 Edited by: Edited by E. Wolf. 1-117 ELSEVIER 60: Progress in Optics isbn: ISBN: 978-0-12-802284-9.
- [2]. Fabio Antonio Bovino (2014) Capitolo X: Introduzione alla Crittografia Quantistica In: Optoelettronica e Fotonica Edited by: ARACNE editrice S.r.l. isbn:978-88-548-7453-4.
- [3]. Fabio Antonio Bovino, Maria Cristina Larciprete, Concita Sibilìa, Maurizio Giardina, Gyorgy Varo, Csilla Gergely (2012) "Nonlinear Ellipsometry by Second Harmonic Generation" In: Nonlinear Optics Edited by: Dr. Natalia Kamanina. InTech isbn:978-953-51-0131-4.
- [4]. Fabio A Bovino, Matteo Braccini, Concita Sibilìa, Mario Bertolotti (2011) "Twin Photons Generation in an Integrated Photonic Crystal Structure" In: Selected Topics in Photonic Crystals and Metamaterials Edited by: A. Andreone, A. Cusano, A. Cutolo, V. Galdi. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. isbn:13 978-981-4355-18-6 10 981-4355-18-6.

Brevetti

- [1]. Fabio Antonio Bovino (2016) (EP3109803) "Structure and method for processing quantum information".
- [2]. Fabio Antonio Bovino (2015) (EP14712035 - US2015365230A1) "Quantum Cryptographic Key Distribution System Including Two Peripheral Devices and an Optical Source".
- [3]. Fabio Antonio Bovino (2015) (EP2798770 - US20150003824) "Method and system for estimating the noise of a two-photon entangled state".
- [4]. Fabio Antonio Bovino (2013) (EP2543957) "Interferometer and method for controlling the coalescence of a pair of photons".

- [5]. Fabio Antonio Bovino (2013) (EP2555466) "System for distributing cryptographic keys".
- [6]. Fabio Antonio Bovino, Matteo Braccini, Alessio Benedetti (2013) (EP2551714 - US20130038932) "Plasmonic plate for generating optical vortices".
- [7]. Fabio Antonio Bovino, Matteo Braccini (2013) (EP2551715 -US20130027774) "Height-adjustable phase plate for generating optical vortices".

Il progetto EMArIS è una delle azioni messe in atto dalla Difesa al fine di accrescere l'ergonomia del soldato appiedato e la sua capacità di portare a termine i propri compiti trasportando il proprio equipaggiamento.

È stata realizzata una struttura esoscheletrica passiva e modulare, in grado di ridurre l'impatto che il trasporto prolungato di equipaggiamenti pesanti può avere sulla struttura muscolo scheletrica del soldato e, contemporaneamente, di aumentarne le prestazioni a livello di capacità di carico e mobilità.

La struttura esoscheletrica realizzata ha dimostrato di poter scaricare a terra una parte significativa del carico trasportato dal soldato, alleviando lo sforzo sul sistema muscolo scheletrico dell'utilizzatore, senza penalizzare comfort e mobilità. L'utilizzo di tecnopolimeri ha permesso di ottenere un peso ridotto e facilità di produzione con costi relativamente contenuti.

Il sistema di regolazioni e l'attagliamentamento su tre misure permettono un adattamento della struttura alla maggior parte dei modelli biometrici e a tutti i percentili del personale militare. I risultati ottenuti dal sistema risultano ai vertici prestazionali nei confronti dei suoi omologhi a livello internazionale in termini di mobilità, adattabilità biometrica, pesi, semplicità ed economicità di produzione e capacità di carico. Il sistema rispetta inoltre tutte le specifiche previste dalla NATO in ambito di sviluppo esoscheletrico (*Integration of the Exoskeleton in the Battlefield*).

INTRODUZIONE

L'analisi del ruolo del soldato appiedato nel *battle-space* presente e futuro deve sempre considerare l'equilibrio tra l'integrazione di tecnologia critica ed equipaggiamenti da un lato e la costante valutazione del relativo carico posto sul soldato dall'altro. Il soldato appiedato necessita di poter trasportare il carico del proprio equipaggiamento, con conseguente incremento del fattore di rischio di infortuni al sistema muscolo scheletrico e all'apparato nervoso che controlla le articolazioni, senza tralasciare una comprensibile riduzione dell'agilità e forti stati di affaticamento.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Lo sviluppo di una struttura esoscheletrica leggera e confortevole ha l'obiettivo di scaricare le spalle del soldato dai carichi sostenuti (giubbotto antiproiettile, arma, equipaggiamenti) e di ridurre infortuni e affaticamenti, al costo di un adattamento alla struttura esoscheletrica, di una marginale limitazione della libertà di movimento e di un effettivo

aumento di peso complessivo del soldato in assetto. La stessa struttura permetterebbe inoltre un aumento delle capacità di trasporto generale e la capacità di trasportare equipaggiamenti specifici più pesanti con lo scopo di accrescere la capacità offensiva del soldato appiedato.

METODOLOGIA

L'analisi dello stato dell'arte ha evidenziato un'immaturità generale del settore e molteplici approcci al problema.

Ognuno di questi approcci presenta limiti sostanziali all'impiego militare della tecnologia: complessità e delicatezza del sistema, bassa efficienza, problematiche di adattabilità nell'attagliamentamento, pesi e ingombri inapplicabili e costi non proporzionati ai benefici apportati. La soluzione proposta da Mech Lab si caratterizza per un sistema di regolazione che ha permesso di ricoprire tutto il range biometrico militare con sole 3 taglie, la scelta di un materiale che permette una produzione veloce ed economica e una struttura risulta che risulta difficile da danneggiare e facile da mantenere.

I prototipi realizzati sono inoltre conformi ai MMR (*Minimum Military Requirements*) NATO definiti durante il progetto IEB (*Integration of the Exoskeleton in the Battlefield*).

Un accurato studio cinematico e biometrico delle articolazioni umane incrociato coi dati antropometrici presenti nella norma ISO 7250-1:2011 e con alcuni modelli di riferimento ha permesso di progettare un sistema esoscheletrico ergonomico ed adattabile Figura 1. L'esoscheletro è inoltre provvisto di un sistema di innesto per i moduli superiori, di prossimo sviluppo.

I prototipi finali sono stati sottoposti sia a una serie di test in laboratorio con una pedana baropodometrica, Figura 2 in grado di rilevare le percentuali di peso scaricate a terra dall'esoscheletro senza interessare il corpo dell'utilizzatore, sia a una serie di test operativi riguardanti il comfort e la libertà di movimento. Figura 3.



Figura 1 - Copertura di tutti i percentili del personale militare



Figura 3 - Esoscheletro in ambiente rilevante

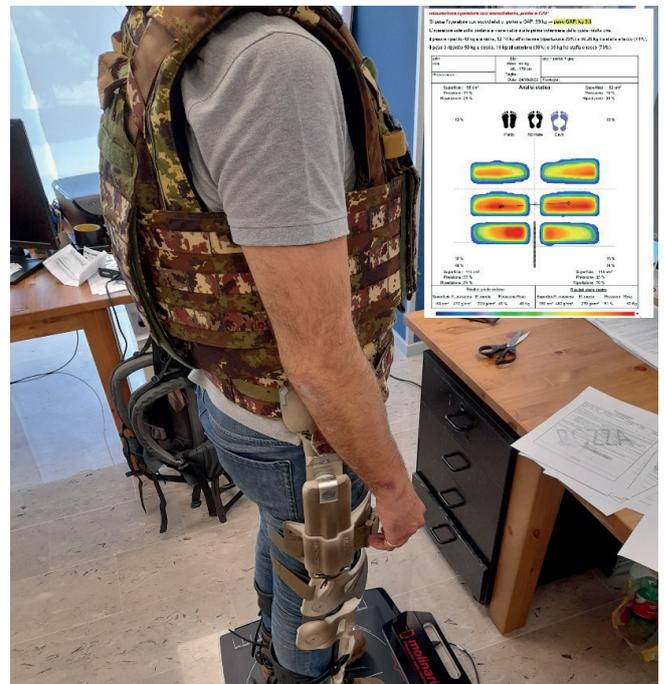


Figura 2 - Test di scarico a terra con pedana baropodometrica

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Mobilità, Sopravvivenza e Letalità sono da sempre cruciali nella valutazione delle dotazioni individuali. In quest'ottica l'esoscheletro permette di incrementare le prestazioni del soldato, aumentando ciò che può essere speso in ognuna di queste tre aree. Questo progetto si caratterizza per la possibilità di avere applicazioni non solo in campo militare ma anche in quello civile. L'esoscheletro, in tutte le sue componenti, potrà supportare nello svolgimento di attività gravose in vari ambiti del mondo civile, quali ad esempio il supporto al personale di soccorso (es. protezione civile, soccorso alpino, vigili del fuoco) nel trasporto dei propri equipaggiamenti, consentendo di rispondere agilmente e con maggiore autonomia al mutare delle condizio-

ni dell'intervento. La capacità di sollevare e manipolare carichi pesanti potrebbe inoltre rendere gli esoscheletri ideali per ridurre i rischi professionali. Magazzini, cantieri navali ed edili potrebbero introdurli per lavori che comportano lo spostamento di oggetti pesanti. Infine, l'esoscheletro EMARIS sarebbe una ottima base tecnologica per lo sviluppo di esoscheletri alimentati e/o passivi per la riabilitazione e il supporto al veterano.

CONCLUSIONI

Allo stato attuale di sviluppo l'Esoscheletro Arti Inferiori ha dimostrato la capacità di scaricare a terra il 70% del carico trasportato in fase statica. Il sistema è inoltre facilmente disassemblabile in componenti monomateriale e quindi facilmente riciclabile.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>AD</i>	Amministrazione Difesa
<i>EMARIS</i>	Esoscheletro Modulare Arti Inferiori e Superiori
<i>MMR</i>	Minimum Military Requirements
<i>NATO</i>	North Atlantic Treaty Organization

PAROLE CHIAVE

Esoscheletro, equipaggiamento, carico, armamento, trasporto, pesi, fanteria, sistema muscolo scheletrico, salute.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	a2019.012
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri
Ente responsabile del progetto:	Mech Lab S.R.L.
Città, Regione:	Prato, Toscana
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Sig. Maurizio CASTRATI
Recapiti del responsabile del progetto:	Viale della Repubblica, 296, 59100 Prato (PO)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0574580765
E-mail del responsabile del progetto:	m.castrati@mechlab.eu

BIBLIOGRAFIA

Libri e altre monografie

Irving P. Herman. *Physics of the Human: A Physical View of Physiology*. 2nd ed. Berlino: Springer; 2016.
David A. Winter. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2002.

Altro materiale pubblicato

ISO 7250-1:2016. *Basic human body measurements for technological design - Part 1: Body measurement definitions and landmarks*.

ISO 7250-1:2011. *Basic human body measurements for technological design - Part 2: Statistical summaries of body measurements from populations*.

Materiale elettronico

Ten. Valerio Racciatti. *Sistemi esoscheletrici amplificatori di forza indossabili da esseri umani*. Tesi di Laurea. ANNO ACCADEMICO 2017/2018.

Disponibile all'indirizzo: <https://webthesis.biblio.polito.it/9385/1/tesi.pdf>

L'obiettivo del progetto *6-channel scanning EW receiver based on integrated photonics* (esaSCAN) è lo studio e lo sviluppo del dimostratore di un ricevitore per applicazioni EW (*Electronic Warfare*). Il ricevitore è del tipo a scansione e l'elemento innovativo è nella conversione di frequenza che utilizza tecnologia fotonica integrata. La banda operativa va da 0,5 a 40GHz e con 6 canali si può implementare la misura di goniometria fino a 6 antenne. Tutto questo mantenendo limitati volume, peso e potenza assorbita così da poter installare il ricevitore anche su piattaforme come i droni.

In questo modo è possibile mantenere i ricevitori EW al passo con le minacce più moderne.

La ricerca si sviluppa su due temi: da un lato l'introduzione della fotonica integrata che consente di contenere dimensioni e peso, dall'altro arricchire l'ottica integrata con nuove funzioni di trattamento dei segnali RF per sostituire la tradizionale componentistica a microonde con dispositivi fotonici.

Laddove sia necessario ricorrere alla componentistica elettronica, (es. campionamento e processing), questa sarà appositamente progettata per operare in simbiosi con la parte fotonica.

Ad oggi sono identificate due possibili architetture, queste differiscono per la generazione degli OL ottici e saranno implementate entrambe per valutare quale sia la migliore.

INTRODUZIONE

I ricevitori per guerra elettronica (*Electronic Warfare*, EW) rilevano i radar ostili e le comunicazioni nemiche, ne indicano la direzione e ne identificano la firma elettromagnetica contribuendo alla *situation awareness*.

Si prevede che questi ricevitori, per il prossimo futuro, debbano coprire la gamma di frequenze 0,5-40GHz con elevata sensibilità (-80dBm), dinamica (40dB) e banda istantanea (>1 GHz). Tutto questo mantenendo la molteplicità di antenne e canali richiesta dalla goniometria.

Il progetto esaSCAN, utilizzando tecnologie fotoniche, consente la radicale innovazione architettonica di un ricevitore EW supereterodina, soddisfacendo i requisiti sopra elencati. Questo approccio, grazie alla sua applicabilità su piattaforme senza equipaggio, consente un controllo pervasivo dello spettro, e garantisce la supremazia spettrale necessaria per la sicurezza dei cittadini.

Tra le valenze militari va sottolineata la riduzione di ingombri, pesi e dissipazione termica, migliora-

menti necessari per l'installazione su piattaforme ad alta mobilità (droni). La tecnologia permette inoltre una copertura di banda larghissima con tempo di scansione ridotto per l'individuazione di minacce di nuova generazione e non standard utilizzate per by-passare i sistemi attuali come i droni telecomandati a breve distanza per attacchi terroristici in luoghi sensibili e le minacce dei missili a guida ad alta precisione in banda millimetrica.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

A livello architettonico, le soluzioni proposte in esaSCAN si pongono in alternativa ai ricevitori sintonizzabili a campionamento diretto che campionano il segnale RF e lo elaborano digitalmente. Questi ultimi infatti presentano limitazioni dovute ai convertitori analogico digitale capaci di acquisire segnali fino a 18 GHz contro i 40 GHz ed oltre raggiungibili con esaSCAN. A livello tecnologico, la fotonica applicata alle microonde (*microwave photonics*) consente numerosi vantaggi:

- I) la riduzione di dimensioni e peso dei cavi per il trasferimento dei segnali, e conseguente migliore installabilità;
- II) la possibilità di remotizzare i sensori rispetto al ricevitore, in virtù della bassissima attenuazione della fibra ottica (fino a 0,2 - 0,22 dB/km), superando le limitazioni di distanza presente sui sistemi navali;
- III) la sicurezza contro l'intercettazione del segnale;
- IV) una migliore robustezza alle interferenze elettromagnetiche (EMI) subite o indotte.
- V) l'immunità ai fenomeni naturali indotti indirettamente da fulmini.

Inoltre, l'uso di tecnologie di integrazione fotonica consente una grandissima riduzione di ingombri e peso del ricevitore stesso, ottenendo larghezza di banda, stabilità, velocità di sintonia e capacità di integrazione adatte per l'implementazione di ricevitori EW di futura generazione, aprendone l'installazione anche su droni. Il progetto presenta i seguenti aspetti tecnologici innovativi:

- I) il filtro ottico *anti-aliasing* è particolarmente sfidante, e verrà realizzato grazie alle più recenti tecniche presentate (anche dai proponenti) nella letteratura tecnico-scientifica;
- II) l'integrazione fotonica dell'intero sistema di ricezione è sfidante per la complessità totale

del progetto, che richiede l'interfacciamento di numerose funzioni e sottosistemi, la cui combinazione deve comunque garantire elevate prestazioni.

METODOLOGIA

In merito alle tecnologie, l'uso della fotonica integrata è la componente più innovativa del presente progetto.

I benefici dell'uso della fotonica nel ricevitore EW sono stati valutati nel corso di precedenti studi condotti da ELT e dal CNIT [Ref. 4], [Ref. 5], [Ref. 6] e [Ref. 7]. La doppia conversione RF-ottica-IF consente di sfruttare la larghissima banda di frequenza della componentistica fotonica per implementare un ricevitore a scansione che copra l'intero range 0,5-40 GHz con prestazioni pressoché costanti.

Il recente sviluppo delle tecnologie di integrazione fotonica aggiunge ai vantaggi riportati sopra una considerevole riduzione di ingombri e pesi, non altrimenti riducibili con le tecnologie a radiofrequenza tradizionali (Figura 1).

Lo sviluppo prevede l'utilizzo delle principali piattaforme tecnologiche di integrazione fotonica (SOI, SiN, InP, LNOI), ciascuna delle quali sarà utilizzata per la funzionalità ad essa più appropriata, come ad esempio InP per la modulazione e l'am-



Figura 1 - Soluzione low SWaP necessaria per nuove piattaforme: Fighter 6th gen e UAV

plificazione, SiN per il filtraggio, etc..

Ne risulta che, al fine di ottimizzare le prestazioni dell'intero ricevitore, è necessario utilizzare più di una piattaforma tecnologica di integrazione fotonica.

In Figura 2 è illustrata una delle maschere sviluppate nella fase 1 del progetto [Ref. 2] e [Ref. 3] e che saranno fabbricate in fonderia e caratterizzate nella seconda fase in corso.

Il primo chip in SiN è disegnato all'interno di un'a-

rea di 32mm x 8 mm, mentre il chip di InP ha dimensioni di 8 mm x 12 mm.

Nel progetto sono state inoltre considerate le più recenti tecniche di *packaging* dei sottosistemi fotonici. In particolare, merita di essere citata qui l'alternativa tra il *packaging* di ciascun chip fotonico monolitico singolarmente, e il *packaging* di un assieme ibrido in cui più chip di materiale diverso vengono assemblati ed inscatolati in un sistema unico più complesso ma più compatto.

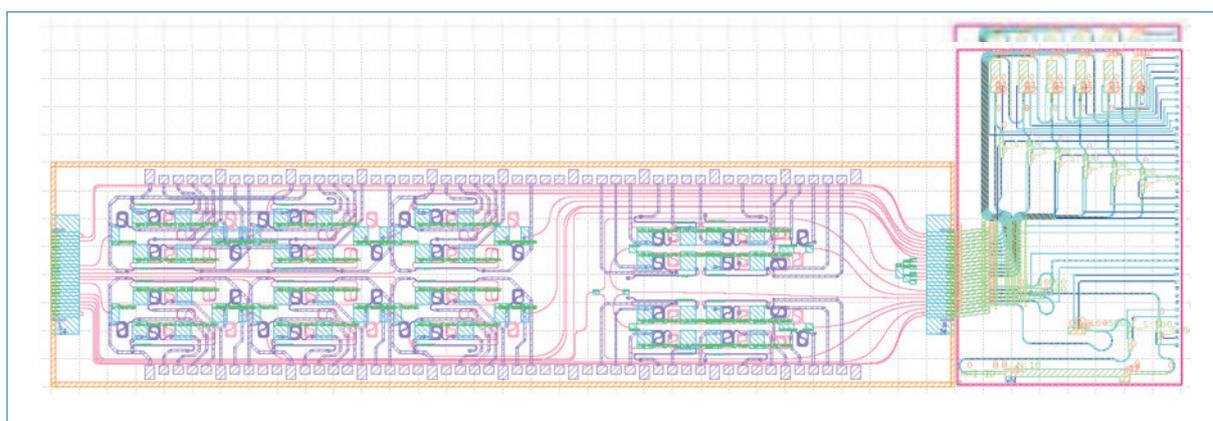


Figura 2 - Maschera utilizzata per la fabbricazione dei due PIC progettati

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Mediante il progetto in corso ELT ha possibilità di produrre sistemi EW di nuova generazione competitivi sul mercato che potranno essere applicati sia in campo navale che avionico, e sia per piattaforme manned che unmanned. Attraverso la collaborazione con il laboratorio CNIT di Pisa sono in acquisizione competenze sulla tecnologia fotonica a microonde (*MicroWave Photonics, MWP*) integrata con possibilità di utilizzo per differenti applicazioni sia nel campo civile che militare. D'altro canto, il PNTLab del CNIT aumenterà sensibilmente le proprie competenze nel campo della fotonica integrata per le microonde, rafforzando la propria posizione di eccellenza nello scenario della ricerca applicata a livello internazionale. L'avanzamento tecnologico nel campo della fotonica integrata per le microonde può trovare applicazione nell'ambito del *cognitive radio* nelle comunicazioni di prossima

generazione e nel campo medicale della biofotonica.

Il progetto avrà quindi ricadute importanti nell'aumentare le competenze dei proponenti – e del sistema Paese – nelle tecnologie fotoniche per le microonde. È lecito aspettarsi che il progetto avrà ricadute molto promettenti anche sui futuri prodotti che Elettronica potrà commercializzare. Infatti, la soluzione implementata in esaSCAN potrà essere applicata sia in campo navale che avionico, e sia per piattaforme *manned* che *unmanned*. Il vantaggio competitivo che si potrà avere una volta che l'utilizzo di tali tecnologie sarà industrializzato e consolidato da Elettronica permetterà alla Società di mantenere una *leadership* indiscussa nel settore EW sia in ambito europeo che mondiale, e di garantire quindi un livello di vendite crescenti ed una occupazione in espansione, e di conseguenza un possibile vantaggio economico e strategico per il Paese.

CONCLUSIONI

Il programma di ricerca esaSCAN in corso è di fondamentale importanza per ELT che, al fine di rimanere competitiva nel mercato EW, deve rendere i ricevitori di guerra elettronica sempre più compatti ed installabili su piattaforme UAV e *Fighter* di sesta generazione. Inoltre, le tecnologie di *microwave photonics* permetteranno di poter integrare in un unico ricevitore anche la copertura della banda Ka e quindi contrastare anche le nuove minacce emer-

genti in questo range di frequenze. Per il PNTLab del CNIT, la ricerca e lo sviluppo di tecnologie di fotonica integrata per applicazioni a microonde rappresenta uno dei principali obiettivi scientifici e tecnologici. Lo sviluppo di esaSCAN ricade quindi appieno nella propria *road map*. Inoltre, i risultati ottenuti in esaSCAN potranno generare nuove ricerche in campi applicativi e tecnologici affini, quali i radar (sia militari che civili), le comunicazioni *wireless*, la biofotonica, etc.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>CNIT:</i>	Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni
<i>ELT:</i>	Elettronica S.p.A.
<i>esaSCAN:</i>	6-channel SCANning EW receiver based on integrated photonics
<i>EW:</i>	Electronic Warfare (Guerra Elettronica)
<i>InP:</i>	Indium Phosphide
<i>LNOI:</i>	Lithium Niobate On Insulator
<i>MWP:</i>	MicroWave Photonics
<i>PNRM:</i>	Piano Nazionale della Ricerca Militare
<i>PNTLab:</i>	Photonic Networks&Technologies Nat'l Lab
<i>SiN:</i>	Silicon Nitrate
<i>SOI:</i>	Silicon On Insulator
<i>UAV:</i>	Unmanned Aerial Vehicle
<i>EMI:</i>	Electro Magnetic Interferences

PAROLE CHIAVE

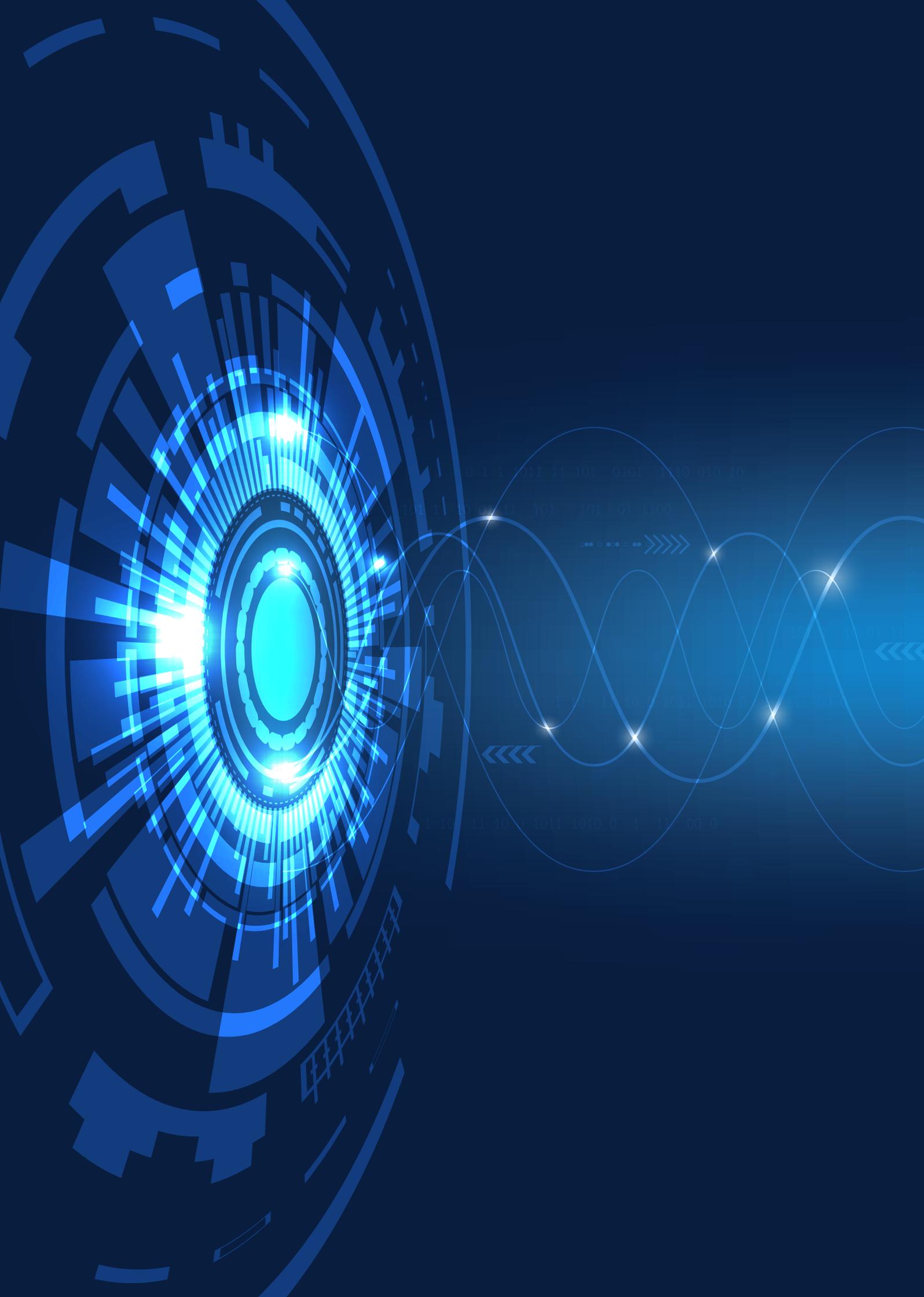
Integrated microwave photonics, RF spectrum sensing, coherent detection, Directional of Arrival, Electronic Warfare

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

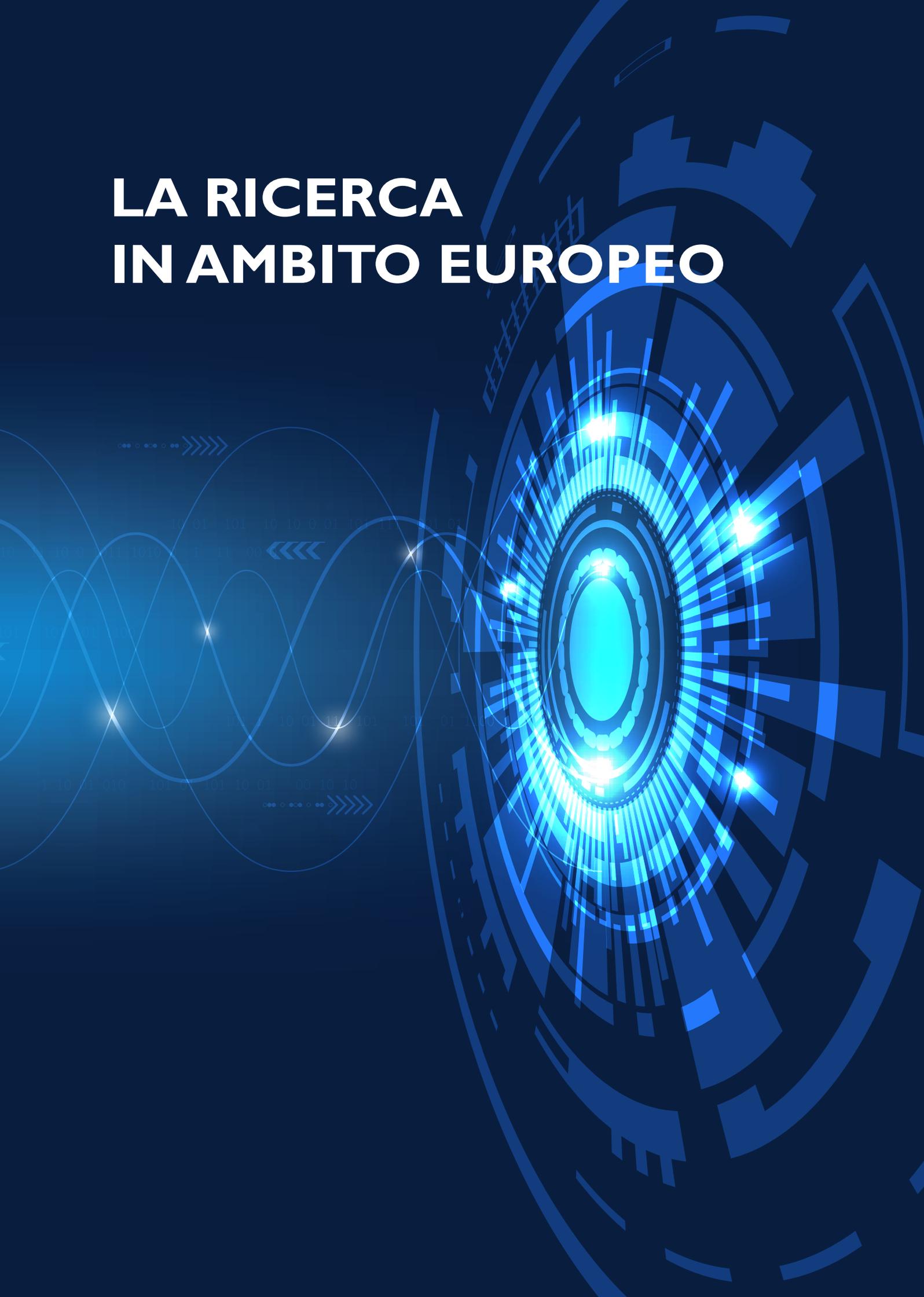
Elettronica S.p.A.	
Indirizzo:	Via Tiburtina Valeria
Numero civico:	Km 13,700
CAP:	00131
Città:	Roma
Provincia:	RM
Telefono:	+39 06 41541
Fax:	+39 06 4154923
E-mail:	elettronica@pec.elt.it
Sito web:	http://www.elt-roma.com
Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni	
Indirizzo:	Viale G.P. Usberti
Numero civico:	181/A
CAP:	43124
Città:	Parma
Provincia:	PR
Telefono:	0521 905757
Fax:	0521 905753
E-mail:	cnit@pec.it
Sito web:	https://www.cnit.it/

BIBLIOGRAFIA

- [Ref. 1] Contratto in forma di scrittura privata a seguito di procedura negoziata senza pubblicazione di un bando di gara, per la realizzazione di un “6-channel SCANning EW receiver based on integrated photonics – esaSCAN”. – Piano Nazionale della Ricerca Militare – PNRM a2019.071. Fase 1 e 2 di 3; REPUBBLICA ITALIANA - MINISTERO DELLA DIFESA - SEGRETARIATO GENERALE DELLA DIFESA E DIREZIONE NAZIONALE DEGLI ARMAMENTI - DIREZIONE DEGLI ARMAMENTI TERRESTRI; Cod. pr. TER/062/20/0407; CIG: ZBE2DA958B Rep. n° 37 del 21.12.2020.
- [Ref. 2] Definizione delle specifiche e analisi delle piattaforme tecnologiche E0208197 01; Fornitura Fase 1 Rata 1 del PNRM a2019.071 denominato “6-channel SCANning EW receiver based on integrated photonics – esaSCAN” [Ref. 1].
- [Ref. 3] Rapporto di progetto dei sottosistemi fotonici integrati E0217431 01; Fornitura Fase 1 Rata 2 del PNRM a2019.071 denominato “6-channel SCANning EW receiver based on integrated photonics – esaSCAN” [Ref. 1].
- [Ref. 4] A Direct-Conversion RF Scanning Receiver based on Photonics; Daniel Onori, Francesco Laghezza, Filippo Scotti, Marco Bartocci, Antonio Zaccaron, Antonio Tafuto, Antonella Bogoni, Alessandro Albertoni, Paolo Ghelfi; 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS).
- [Ref. 5] A Photonically Enabled Compact 0.5–28.5 GHz RF Scanning Receiver Daniel Onori, Filippo Scotti, Francesco Laghezza, Marco Bartocci, Antonio Zaccaron, Antonio Tafuto; Alessandro Albertoni, Antonella Bogoni and Paolo Ghelfi; Journal Of Lighthwave Technology, Vol. 36, NO. 10, May 15, 2018.
- [Ref. 6] Technical Report “RAPPORTO DI PROGETTO DI GAP ANALYSIS RF OPTICAL SCANNER” E0167818 01.
- [Ref. 7] A 0-40 GHz RF Tunable Receiver Based on Photonic Direct Conversion and Digital Feed-Forward Lasers Noise Cancellation” D. Onori, P. Ghelfi, J. Azana A. Bogoni Journal Of Lighthwave Technology Vol. 36, NO.. 19, October 1, 2018.
- [Ref. 8] Y. Fan, A. van Rees, P. J. M. van der Slot, J. Mak, R. M. Oldenbeuving, M. Hoekman, D. Geskus, C. G. H. Roeloffzen, and K.-J. Boller, “Hybrid integrated InP-Si₃N₄ diode laser with a 40-Hz intrinsic linewidth,” *Opt. Express*, OE, vol. 28, no. 15, pp. 21713–21728, Jul. 2020, doi: 10.1364/OE.398906.
- [Ref. 9] C. Porzi, G. J. Sharp, M. Sorel and A. Bogoni, "Silicon Photonics High-Order Distributed Feedback Resonators Filters," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 56, no. 1, pp. 1-9, Feb. 2020, Art no. 6500109, doi: 10.1109/JQE.2019.2960560.
- [Ref. 10] Y. Zhang et al., "Experimental Demonstration of Single Sideband Modulation Utilizing Monolithic Integrated Injection Locked DFB Laser," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 7, pp. 1809-1816, 1 April 1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2959796.
- [Ref. 11] C. Pandolfi, M. Bartocci, G. Gabrielli, et al; “Compact Wideband Downconverter Module for Electronic Warfare Applications”, Proceedings of the 6th European Radar Conference (EuRAD), 30 September 2009.



LA RICERCA IN AMBITO EUROPEO



INTRODUZIONE

Nell'ambito della cooperazione europea l'Italia sostiene fattivamente i progetti di ricerca tecnologica cooperativi in seno all'Agenzia Europea per la Di-

fesa. Di seguito si presentano i risultati di alcuni progetti di ricerca ritenuti esemplificativi delle attività di ricerca tecnologica cooperativa europea:

- progetto di ricerca "*Advance Light Ballistic Protections*" (**ALBA**).
- progetto di ricerca "*European Detonation Code*" (**EDC**).
- progetto di ricerca "*Quantum Laser-based Multi-parametric Portable Sensor*" (**QLAMPS**).

Il Progetto ALBA ha riguardato lo studio e lo sviluppo di soluzioni di protezione balistica di livello K6 (STANAG 4569) da applicare a veicoli corazzati medi e leggeri. Il progetto ha ricoperto quattro aree di ricerca principali: 1. Analisi dello stato attuale dei veicoli corazzati medi e leggeri e delle relative protezioni balistiche disponibili sul mercato corrispondenti al livello K6. 2. Studio delle interazioni delle minacce K6 con i singoli materiali e con le soluzioni multistrato della protezione. Sviluppo del modello numerico delle minacce K6 per simulare le loro interazioni con la corazza. 3. Sviluppo di sistemi di protezione balistica K6 con buone prestazioni balistiche, favorevole rapporto costo-prestazione e sostenibile rapporto peso-costi di produzione. Ciò ha incluso l'analisi sui vantaggi dell'utilizzo di diversi materiali avanzati e sulla loro combinazioni multistrato. 4. Prove balistiche su materiali avanzati per la loro caratterizzazione e sulle soluzioni di protezione studiate. Sviluppo complessivo del sistema di protezione K6 da applicare ai mezzi corazzati medi e leggeri. Test balistici complessi per confermare la funzionalità e la validità del sistema di protezione finale.

Questo progetto è stato gestito e finanziato dall'Italia e dalla Repubblica Ceca nell'ambito del Progetto n° B-1458-GEM1-GP dell'Agenzia Europea della Difesa. Il Consorzio Industriale era composto da: Leonardo Electronics, Business Unit Sistemi di Difesa (IT), Vojenský výzkumný ústav, s.p. (CZ) e Bogges, spol. s ro (CZ).

INTRODUZIONE

Lo studio della balistica terminale è un campo ampio e diversificato. Implica la penetrazione fisica di un'ampia classe di materiali da parte di un'ampia classe di proiettili. Alcuni proiettili hanno meccanismi di penetrazione basati su velocità ed energie elevate, altri sulla capacità di focalizzare una grande quantità di energia su un punto molto piccolo del bersaglio. Il modo tradizionale per arrestare le minacce perforanti è l'utilizzo di protezioni metalliche monolitiche (in acciaio o alluminio). Questi sistemi sono ben conosciuti e possono essere facilmente adattati a qualsiasi veicolo nuovo in fase di sviluppo. Per contrastare efficacemente le minacce moderne a dardo lungo (*long rod*), che nel corso degli anni stanno diventando sempre più perforanti, adottando protezioni monolitiche tradizionali, sono necessari spessori/pesi sempre più importanti. Per la minaccia più perforante del livello K6 (30 mm APFSDS), è necessaria l'adozione di una soluzione

di protezione avanzata, leggera e multicomponente. Due kit specifici di protezione sono stati studiati e sviluppati ad hoc per:

- Mock-Up torre ALBA, il design è stato ispirato da soluzioni esistenti del produttore Leonardo, utilizzando gli angoli evolutivi dalle soluzioni in servizio con armatura base del guscio in lega leggera di alluminio (24 ÷ 35 mm di AA5059-H136);
- Mock-up veicolo ALBA, il design è stato ispirato dall'attuale tendenza di sviluppo delle piattaforme di classe media con armatura base dello scafo in acciaio (25 ÷ 30 mm di acciaio durezza 440 HBW).

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Le soluzioni balistiche sviluppate nel progetto ALBA sono elencate nella Tabella 1 e vengono confrontate in termini di peso con l'acciaio balistico RHA mo-

nolitico in grado di arrestare con successo la minaccia di riferimento. L'efficienza balistica delle soluzioni è definita come il rapporto tra la densità areale di acciaio RHA necessario a fermare la minaccia e la

densità areale della soluzione balistica considerata; tutte le soluzioni balistiche sviluppate sono state in grado di arrestare con successo le minacce K6 ma presentato una moderata efficienza balistica.

	AREE PRINCIPALI	30mm APFSDS-T NATO [°]	DENITÀ AREALE [kg/m ²]	DENITÀ AREALE RHA [kg/m ²]	EFFICIENZA BALISTICA
Soluzione 1	1T	46	547	678	1.24
	3T	50			
	4T	56			
Soluzione 2	2T	67	327	369	1.17
Soluzione 3	7T	NO	267	-	-
Soluzione 4	6T	60	486	488	1.00
Soluzione 5	5T	78	306	203	0.66

Tabella 1 - Soluzioni ALBA finali di protezione balistica.

Infatti, nel corso del programma si sono privilegiate soluzioni balistiche che presentavano il più alto livello di confidenza. Per questo le soluzioni finali non tengono conto del contributo della corazza base (scafo/guscio) e dei pannelli anti-scheggia interni al veicolo/torre, in quanto le corazze aggiuntive (AoA) da sole sono in grado di arrestare completamente le minacce di riferimento. Le densità areali delle configurazioni finali di protezione sono compatibili con l'installazione su veicoli cingolati, ma risultano critiche per il carico utile disponibile per i veicoli corazzati ruotati leggeri. È possibile risparmiare una notevole quantità di peso ottimizzando ulteriormente lo spessore degli strati delle corazze aggiuntive (AoA) in modo tale che l'armatura base e i pannelli anti-scheggia contribuiscano attivamente a fermare la minaccia. Il peso complessivo del kit di protezione ALBA per una torretta in servizio è stimato in circa 3,8 tonnellate. Tale peso può essere appunto ridotto di centinaia di chilogrammi, ottimisticamente fino a 3 tonnellate, seguendo un approccio meno conservativo che tenga conto del contributo alla protezione dell'armatura base del guscio e dei pannelli anti-scheggia interni.

METODOLOGIA

Le soluzioni di protezione sono state progettate e ottimizzate grazie alla messa a punto del modello matematico del fenomeno fisico d'impatto e la continua iterazione tra i risultati dell'attività sperimentale (prove balistiche su bersagli ingegnerizzati rappresentativi) e quelli delle simulazioni numeriche in scala locale. I risultati del modello numerico sono stati confrontati con i risultati dei test balistici nelle aree principali (MA), inclusi colpi multipli (*multi-hit*) e nelle aree deboli strutturali (SWA) dei sistemi di corazza (Figura 1). Il parametro chiave che descrive la capacità del materiale di resistere all'energia del colpo multiplo è l'area di distorsione/rottura (*bulging*) del materiale dopo l'impatto dei proiettili. Soprattutto i materiali ceramici sono caratterizzati da un'ampia area rottura/frammentazione dopo l'impatto del proiettile che limita notevolmente la loro capacità di resistere a colpi multipli (Figura 2). Le simulazioni numeriche finali in scala globale del dimostratore hanno confermato la validità e l'accuratezza del modello numerico sviluppato (Figura 3). Le indagini sono state basate su un approccio numerico ibrido esplicito-impli-

cito in cui i risultati espliciti su scala locale sono stati utilizzati per ridurre il tempo computazionale dell'evento su scala globale, consentendo l'es-

ecuzione di analisi dinamiche complete su veicolo/torre su scala temporale altrimenti impossibile con modelli a elementi finiti convenzionali.

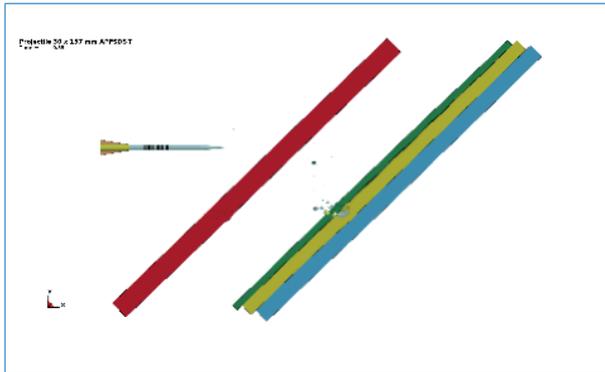


Figura 1 - Simulazione d'impatto multi-hit in un'area principale (MA) su scala locale.

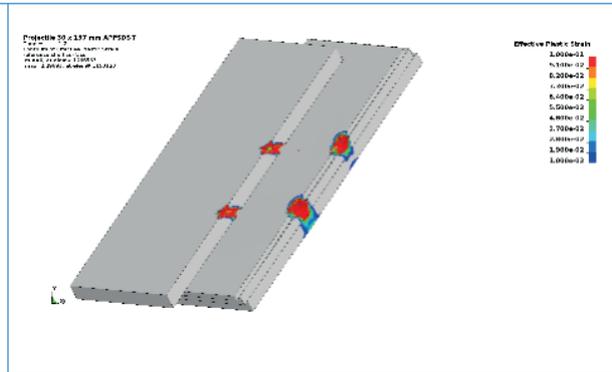


Figura 2 - Perforazioni multi-hit delle corazzе aggiuntive (AoA) e penetrazioni residue dell'armatura base ricavate dall'attività di simulazione numerica.

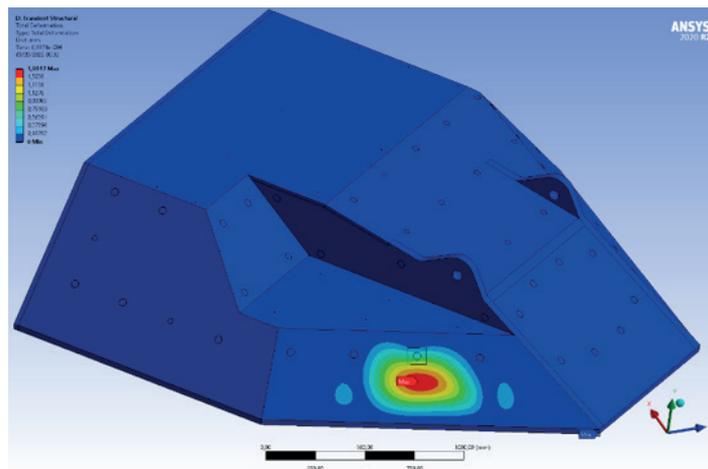


Figura 3 - Simulazione su scala globale del modello completo.



Figura 4 - Dimostratore ALBA al termine della campagna di test a fuoco.

Le Protezioni Balistiche Avanzate Leggere finali sono state quindi costruite e installate su un mock-up di torre reale e sono stati realizzati bersagli ingegnerizzati rappresentativi del veicolo. I test finali sui dimostratori sono stati eseguiti nel poligono di Polička (CZ), in conformità alle procedure AEP-55 Volume 1 e STANAG 4569. Le protezioni balisti-

che sono state in grado di resistere a colpi multipli nelle aree principali (MA) e a colpi singoli nelle aree deboli strutturali (SWA). Nel test dimostrativo finale sono stati sparati in totale 32 colpi (Figura 4). I risultati dei test balistici hanno confermato la validità del concetto di armatura sviluppato nel progetto ALBA.



Funzionario EDA (Giuseppe D'aquino), IT PAMG (Michele Tronci), CZ PAMG (Pavel Mañas) e Team del consorzio ALBA al termine della dimostrazione finale al poligono di Polička.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

La competenza trasversale a tutte le priorità di modernizzazione dei veicoli da combattimento di nuova generazione è l'alleggerimento per le capacità di combattimento ravvicinato nelle varianti con equipaggio, senza equipaggio e opzionalmente con equipaggio e per la capacità di combattere e vincere contro qualsiasi nemico. I principi base e la scienza dell'alleggerimento sono fondamentali per garantire che il veicolo:

- sia agile, veloce, più facilmente trasportabile e letale.
- abbia capacità di *overmatch* per condurre operazioni decentralizzate, distribuite e integrate.
- Utilizzi capacità autonome (complete o abilitate autonomamente), intelligenza artificiale e teaming con e senza equipaggio per una competenza decisiva in caso di *overmatch*.

- disponga di limitata tracciatura durante le operazioni di dislocamento, occupazione e sostegno.

CONCLUSIONI

Il progetto ALBA ha dimostrato la capacità di sviluppare corazze aggiuntive avanzate (AoA) da applicare ai veicoli corazzati medi in grado di sconfiggere sia minacce da 30mm perforanti che frammenti di granata d'artiglieria da 155mm (FSP) secondo il livello K6 STANAG 4569. Nonostante i limiti di budget del progetto non abbiano permesso di portare a completo compimento il processo di qualifica NATO dei dimostratori tecnologici secondo la procedura AEP-55 Volume 1, i risultati sono stati comunque molto soddisfacenti. Le soluzioni sviluppate sono risultate economiche, basate prevalentemente su acciaio, facilmente assemblabili e montabili su torri/veicoli già esistenti e pronte all'uso nei moderni teatri di battaglia (TRL 4 iniziale - TRL 8

finale). Il modello numerico sviluppato consente di adattare/scalare con elevato livello di confidenza le soluzioni di Protezione Balistiche Avanzate Leggere ad altre torri e piattaforme veicolari.

La proposta di *follow-up* del presente progetto è lo studio di "moduli intelligenti" che siano "traboc-

chetti" efficaci contro le minacce perforanti a dardo lungo (*long rod*) in grado di ridurre e limitare il peso del kit di protezione totale per poter essere installato principalmente su veicoli corazzati ruotati leggeri. L'obiettivo è raggiungere un'efficienza balistica di 1,5.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI⁽⁷⁾

<i>AEP</i>	Allied Engineering Publication
<i>AoA</i>	Add-on Armour
<i>APFSDS</i>	Armour Piercing Fin Stabilised Discarding Sabot
<i>FSP</i>	Fragment Simulating Projectile
<i>MA</i>	Main Area
<i>RHA</i>	Rolled Homogenous Armour
<i>STANAG</i>	STANDARDIZATION NATO AGREEMENT
<i>SWA</i>	Structural Weak Area
<i>TRL</i>	Technology Readiness Level

PAROLE CHIAVE

Protezione balistica, simulazione d'impatto, soluzione multistrato, compositi, minaccia a dardo lungo, armatura leggera.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero EDA Cat B:	B-1458-GEM1-GP
Amministrazione appaltante:	Direzione degli Armamenti Terrestri (TERRARM).
Ente responsabile del progetto:	Leonardo S.p.A.
Città, Regione:	La Spezia, Liguria
Titolo e nome del responsabile del progetto:	PhD Alessio BASSANO
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Valdilocchi, 15, 19126 La Spezia (SP)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0187 583113
E-mail del responsabile del progetto:	alessio.bassano@leonardo.com

BIBLIOGRAFIA

Protection levels for occupants of armoured vehicles, STANAG 4569 EDITION 3, May 2014.

Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles - kinetic energy and artillery threat, AEP - 55, VOLUME 1 EDITION C, April 2014.

La detonazione consiste in una sequenza di reazioni chimiche esotermiche caratterizzate da una rapida propagazione e dall'istantaneo incremento di pressione e temperatura del sistema. Tali reazioni avvengono nella cosiddetta zona di detonazione che si muove nella parte non reagita dell'esplosivo alla caratteristica velocità di detonazione. A seguito di questo passaggio, l'esplosivo viene trasformato in prodotti solidi, liquidi o gassosi ad elevata temperatura e pressione ed è generata l'onda d'urto.

Il progetto EDA cat.B EUDETCODE ha l'obiettivo di sviluppare un codice termochimico che permetta di prevedere le caratteristiche della detonazione degli esplosivi. Il codice, modulare, sarà costituito da tre principali blocchi: un solutore, in grado di risolvere le equazioni termodinamiche attraverso la minimizzazione dell'energia libera di Helmotz, una raccolta di equazioni di stato di reagenti e prodotti ed un database contenente i coefficienti delle equazioni di stato e le costanti termodinamiche. Le prestazioni del codice, in termini di velocità di detonazione, pressione di detonazione e espansione, saranno infine validate attraverso la misura sperimentale di velocità di detonazione, pressione di detonazione e espansione.

L'obiettivo finale del progetto consiste nella messa a punto di uno strumento software all'avanguardia capace di prevedere con accuratezza le caratteristiche chimico-fisiche dei materiali energetici durante la loro detonazione.

INTRODUZIONE

Il progetto EUDETCODE consiste nello sviluppo di un codice di calcolo capace di prevedere le prestazioni di esplosivi e propellenti in maniera accurata. Questo tipo di codice non è attualmente disponibile sul mercato europeo: per progettare teste in guerra, propellenti e sistemi balistici, occorre affidarsi a versioni obsolete del codice CHEETAH, sviluppato al *Lawrence Livermore National Laboratory* e *US eyes only* nelle sue versioni più recenti, o ad altri codici proprietari poco performanti.

In Europa, esistono competenze frammentate nel campo della computazione numerica per prevedere le prestazioni di materiali energetici. Alcuni stati membri, supportati da aziende o enti di ricerca nazionali, hanno sviluppato propri codici di detonazione che tuttavia rispondono solo parzialmente alle esigenze dell'industria. In Italia, le conoscenze in questo settore sono poco mature; il progetto EUDETCODE mira alla nascita di una rete di competenze tra FF.AA, industria e Università finalizzata alla maturazione di questa tecnologia.

L'obiettivo a breve termine di EUDETCODE consiste nella realizzazione di un codice di calcolo, in versione beta, attraverso l'applicazione di nuovi modelli di calcolo e sperimentalmente validato. Nel lungo periodo, sarà creata una piattaforma computazionale che sosterrà la difesa europea e la base industriale nel settore dei materiali energetici.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

Gli attuali codici di detonazione si basano sul modello di Zeldovich-von Neumann-Döring (ZND) e sull'ipotesi di Chapman-Jouguet (CJ), e assumono l'equilibrio chimico in uno stato stazionario. I reagenti e i prodotti sono descritti da funzioni di stato e da equazioni di stato (EOS) che descrivono il comportamento delle specie chimiche coinvolte nella detonazione alle alte temperature e pressioni che si generano nella zona di reazione.

La maggior parte dei programmi utilizza l'equazione di stato di Becker-Kistiakowski-Wilson (BKW EOS) per i prodotti di reazione gassosi; altri, più

avanzati, utilizzano una versione modificata della BKW EOS, l'Exp 6 EOS o la Jacobs-Cowperthwaite-Zwisler EOS. Il codice di detonazione più avanzato è CHEETAH 9.0 che può essere utilizzato da operatori europei, soltanto sotto licenza del governo statunitense. In Europa sono stati realizzati altri codici, meno performanti del CHEETAH, i cui risultati di possono essere usati però come riferimento e rappresentano lo stato dell'arte dei codici termochimici per la detonazione.

EUDETCODE potrà gestire diverse equazioni di stato e permettere all'operatore la selezione dell'equazione di stato più appropriata per descrivere il fenomeno di detonazione in esame. La capacità del software di passare facilmente da un'equazione di stato all'altra rappresenta un miglioramento significativo rispetto a tutti i codici esistenti. Inoltre, sarà in grado di trattare esplosivi non ideali, utilizzando dei risolutori versatili e moderni basati su metodi numerici precisi, stabili ed efficienti per l'ottimizzazione. EUDETCODE sarà interfacciato con un database contenenti i parametri di input di

esplosivi e delle altre sostanze coinvolti nella detonazione. La funzione principale del codice sarà la determinazione della velocità di detonazione nel punto CJ, ovvero la velocità dell'onda d'urto. Inoltre, il software potrà prevedere la concentrazione dei prodotti risultanti dalla reazione chimica e le variabili termodinamiche nell'espansione isoentropica che si verifica dopo il punto CJ.

METODOLOGIA

In questa sezione è descritto il modello matematico alla base del codice termochimico EUDETCODE. Esso sarà implementato in linguaggio C++ ed utilizzato per prevedere la dinamica di detonazioni stazionarie. La ricerca, svolta finora, può essere suddivisa in due aree: lo sviluppo della teoria che descrive il problema e la sua risoluzione numerica. Per simulare il comportamento termochimico dei prodotti della detonazione è necessario definire una EOS; nel presente lavoro è stata utilizzata la BKW (Becker-Kistiakowsky-Wilson), ma in futuro l'operatore potrà scegliere in un database di diverse EOS.

$$p = \frac{\rho RT}{W_{mix}} \cdot Z(\rho, T, x_{i,eq})$$

$$Z = 1 + \chi e^{\beta\chi} \quad \chi = \frac{\rho\kappa \sum k_i x_{i,eq}}{W_{mix}(T + \theta)^\alpha}$$

L'*explosion state* contiene l'espressione dell'energia libera di Helmholtz in funzione della composizione chimica a volume e temperatura fissati:

$$A = A^{id} + D_{p,A}$$

$$A^{id} = \sum_i n_i(\mu_i - RT) \quad D_{p,A} = \frac{RT}{W_{mix}} \int_0^p \frac{Z-1}{\rho} d\rho$$

Minimizzando l'energia libera di Helmholtz, si ottiene la composizione chimica all'equilibrio in funzione della temperatura e si può definire la Hugoniot dei prodotti:

$$H: \quad e(T, n_{eq}(T)) - e_0 - \frac{1}{2}(p(T) + p_0)(v_0 - v) = 0$$

$$e = e^{id} + D_{p,e}$$

$$e^{id} = A^{id} + TS^{id} \quad e_{p,e} = \frac{RT^2}{W_{mix}} \int_0^p \frac{1}{\rho} \frac{\partial Z}{\partial T} \Big|_\rho d\rho$$

Si procede a risolvere rispetto alla temperatura T l'equazione non lineare H, per ogni volume specifico ottenendo la costruzione della curva Hugoniot nel piano pressione-volume.

Il secondo modulo del codice è basato sulla teoria Chapman-Jouguet. E' possibile esprimere la velocità dell'onda d'urto in funzione del volume specifico della miscela invertendo la relazione della retta di Rayleigh:

$$D(v) = \sqrt{\frac{p_H(v) - p_0}{\rho_0^2(v_0 - v)}}$$

dove l'andamento della pressione in funzione del

volume specifico è stato ottenuto interpolando i precedenti risultati. Si procede con un metodo di minimizzazione per trovare il valore di D che rende le curve tangenti (Figura 1). Il codice infatti utilizza una combinazione di tecniche numeriche, tra cui l'approssimazione con spline, l'algoritmo del punto interno e il metodo di Brent, insieme alla dinamica dei gas ideali per modellare il comportamento delle onde di detonazione, in particolare i loro profili di velocità e pressione.

Infine, l'ultimo modulo presente, "isoentropic expansion", descrive l'espansione dei prodotti dopo il punto CJ sotto l'ipotesi di trasformazione isoentropica (Figura 2).

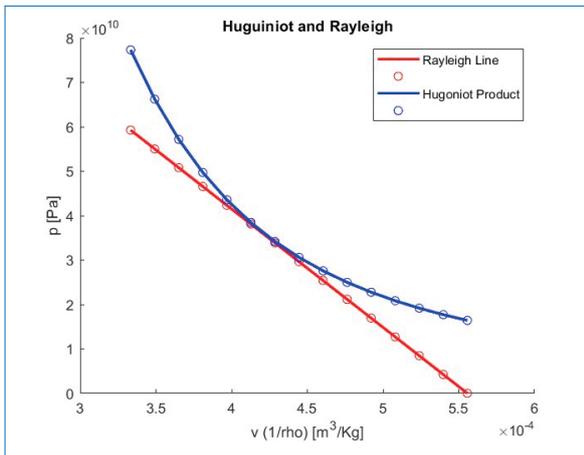


Figura 1 - Andamento della Hugoniot dei prodotti (blu) e retta di Rayleigh (rosso) per RDX

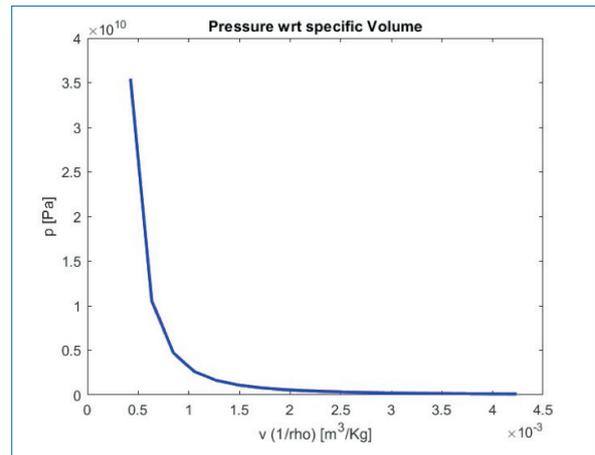


Figura 2 - Andamento dell'espansione isoentropica dei prodotti dell'RDX a partire dal punto CJ

RDX Density	Variable	Experimental Point	Our Code	Relative Error
$\rho_0 = 1000 \frac{Kg}{m^3}$	$D_{cj} [m/s]$	6128	6069	0,9%
	$T_{cj} [K]$	3600	3344	7,6%
	γ	2,48	2,62	5,7%
$\rho_0 = 1800 \frac{Kg}{m^3}$	$D_{cj} [m/s]$	8754	9105	4,0%
	$T_{cj} [K]$	2587	1827	7,1%
	γ	2,98	3,12	4,6%

Tabella 1 - Confronto tra codice e risultati sperimentali per RDX per diversi valori di densità

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

Il settore della difesa è il principale beneficiario dell'utilizzo dei codici di detonazione: infatti, grazie a tali strumenti, i progettisti possono simulare e prevedere le prestazioni di teste in guerra, missili, propulsori e sistemi di lancio. In particolare, i codici di detonazione sono utilizzati nella progettazione di esplosivi ad alta energia e propellenti, permettendo di determinare con estrema accuratezza i parametri chiave che influenzano le prestazioni degli esplosivi, come la velocità, la pressione e la temperatura raggiunte nella zona di detonazione. In generale, l'utilizzo dei codici di detonazione contribuisce anche ad una maggiore sicurezza e affidabilità nell'utilizzo di esplosivi ad alta energia e propellenti, permettendo di progettare e sviluppare nuovi prodotti che rispondono pienamente alle esigenze del settore della difesa.

EUDETCODE contribuirà a rafforzare la base industriale e tecnologica della difesa europea e migliorare la competenza europea nello sviluppo di futuri missili e munizioni. Infatti sarà sviluppato uno strumento software per prevedere con precisione le prestazioni dei materiali energetici e verranno eseguiti test sperimentali rilevanti per verificarne l'accuratezza. L'obiettivo finale è quello di fornire uno strumento software all'avanguardia che permetta alla comunità europea della difesa di mantenere la sua autonomia strategica.

CONCLUSIONI

L'attività di modellazione descritta nel presente articolo si inquadra nel progetto EUDETCODE, finalizzato allo sviluppo di un codice in grado di prevedere le principali caratteristiche della detonazione di materiali energetici. Infatti, l'uso di questi codici è diventato sempre più diffuso nell'ambito della ricerca e dello sviluppo di esplosivi ad alta energia e propellenti. Tali codici consentono di simulare e prevedere le prestazioni degli esplosivi e dei propellenti, nonché di progettare teste in guerra, sistemi di propulsione e di lancio, valutarne le loro prestazioni e di eseguire studi di letalità sui materiali energetici. Tuttavia, la scelta dell'equazione di stato più adatta per descrivere il fenomeno di combustione/detonazione rimane un problema aperto e continua a rappresentare una sfida per i ricercatori. Inoltre, è importante che i codici di detonazione siano in grado di interfacciarsi con altri codici e risolvere gli effetti dipendenti dal tempo, al fine di garantire la loro longevità e crescita a lungo termine. In futuro, la ricerca su questi codici si concentrerà sulla migliore descrizione del fenomeno di combustione/detonazione e sull'implementazione di nuove funzionalità e capacità che rispondano alle esigenze della comunità scientifica e della difesa.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

A	Energia libera di Helmholtz
A^{id}	Energia libera di Helmholtz per gas ideale
BKW	Equazione di Becker-Kistiakowsky-Wilson
CJ	Punto di Chapman-Jouguet
D	Velocità di detonazione
D_{cj}	Velocità di detonazione nel punto CJ
$D_{p,A}$	Departure function dell'energia libera di Helmholtz
$D_{p,e}$	Departure function dell'energia interna
e	Energia interna del sistema
e^{id}	Energia interna ideale del sistema
e_0	Energia interna dell'esplosivo in condizioni standard
EDA	European Defence Agency
EOS	Equazione di Stato
$EUDETCODE$	Codice Europeo di Detonazione
$FFAA$	Forze Armate
n_i	Numero di moli della specie chimica -iesima
P_H	Pressione ottenuta dalla Hugoniot dei prodotti
P_0	Pressione di riferimento
P	Pressione
R	Costante dei gas universale
RDX	Ciclotrimetilenotrinitrammina
S^{id}	Entropia ideale del sistema
T	Temperatura
T_{cj}	Temperatura del sistema nel punto CJ
US	Stati Uniti d'America
v_0	Volume specifico di riferimento dell'esplosivo
W_{mix}	Massa molare della miscela
Z	Fattore di comprimibilità
ZND	Modello di Zeldovich-von Neumann-Döring
α, β, θ, k	Coefficienti della BKW
k_i	Covolume molare della specie chimica -iesima
μ_i	Potenziale chimico della specie chimica -iesima
ρ	Densità
ρ_0	Densità dell'esplosivo in condizioni standard
X_i	Frazione molare della specie chimica -iesima

PAROLE CHIAVE

EUDETCODE, detonazione, codice di detonazione, equazione di stato, letalità, esplosivi, materiali energetici

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero scheda PNRM:	EDA cat. B.PRJ.RT.878
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri(22)
Ente responsabile del progetto:	MBDA Italia S.p.A.
Città, Regione:	Roma, Lazio
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dott. Ugo Barbieri
Recapiti del responsabile del progetto:	Via Valdilocchi, 15, 19126 La Spezia (SP)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 01871578925
E-mail del responsabile del progetto:	ugo.barbieri@mbda.it

BIBLIOGRAFIA

Articoli di rivista

G. Baudin and R. Serradeill, Review of Jones-Wilkins-Lee equation of state, EPJ Web of Conferences 10, 00021 (2010).

W. A. Trzcinski, Central European Journal of Energetic Materials, Numerical Analysis of the Deflagration to Detonation Transition in Primary Explosives 9(1), 17-38 (2012).

C. A. Handley, B. D. Lambourn, N. J. Whitworth, H. R. James, and W. J. Belfield, Understanding the shock and detonation response of high explosives at the continuum and meso scales, Applied Physics Reviews 5, 011303 (2018).

Steven B Segletes, An Examination of the JWL Equation of State, Weapons and Materials Research Directorate, US Army Research Lab ARL-TR-8403 (2018.)

C. M. Tarver, Jones-Wilkins-Lee (JWL) Reaction Product Equations of State for Overdriven PETN Detonation Waves, AIP Conference Proceedings 2272, 030031 (2020).

Libri e altre monografie

Charles L. Mader, Numerical Modeling of Explosives and Propellants (2008).

B. Zel'dovich and Yu. P. Raizer, Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena. Vol.I and Vol. II (2002).

Applications of Kinetic Modelling, volume 37 of book series "Comprehensive Chemical Kinetics, Edited by R.G. Compton, G. Hancock (1999).

Altro materiale pubblicato

Modular software for modelling the ideal detonation of explosives, Mathematical Engineering in Industry, T.L. Freeman, I. Gladwell, M.J. Braithwaite, W.B. Brown, P.M. Lynch and I.B. Barker , 1991).

La possibilità di una tempestiva ed efficace valutazione dei pericoli svolge un ruolo fondamentale nella prevenzione degli attacchi. Un'analisi completa dei pericoli deve considerare contemporaneamente diversi fattori di minaccia: campi magnetici derivanti dalla presenza di materiali e dispositivi illeciti, radiazioni ionizzanti, sostanze chimiche e agenti biologici. Questi fattori possono causare danni diretti a persone, veicoli o costruzioni, segnalare la presenza di armi chimiche o nucleari, indicare siti ad alto rischio e potenziali attacchi imminenti che possono essere contrastati o prevenuti, se correttamente e tempestivamente identificati.

Il progetto Q-LAMPS - *Quantum LAser-based Multi-parametric Portable Sensors* - mira a migliorare le capacità di sorveglianza e protezione sia in scenari militari che in aree civili sensibili. Il progetto, strutturato come collaborazione tra istituti di ricerca e aziende italiane e polacche guidate dal CNR, svilupperà gli elementi tecnologici di una nuova piattaforma di sensori multiparametrici che sfrutta lo stato dell'arte dell'ottica, della fisica quantistica e dell'intelligenza artificiale, per fornire una valutazione rapida e precisa di pericoli di diversa natura.

Le soluzioni individuate consentiranno lo sviluppo di tecnologie quantistiche per la rivelazione in grado di superare i limiti dei sistemi attualmente disponibili per analisi sul campo, in termini di sensibilità, specificità e capacità di controllo.

INTRODUZIONE

La proliferazione di rischi legati ad armi di distruzione di massa di natura fisica, chimica, biologica e nucleare acuisce l'urgenza di sviluppare strumenti efficaci per la mitigazione e prevenzione dei rischi. La tecnologia del futuro dovrà necessariamente soddisfare la richiesta di sensori multiparametrici portatili, integrati o integrabili su un'unica piattaforma, in grado di misurare simultaneamente diverse quantità con tempi di risposta brevi ed elevata sensibilità.

I campi dell'ottica e della fisica quantistica, combinati con l'intelligenza artificiale (AI) e il machine learning (ML), sono oggi in grado di fornire soluzioni a questo problema. Tecnologie quantistiche basate su centri di colore *Nitrogen-Vacancy* (NV) in diamante sono integrabili e consentono di misurare campi magnetici con alta precisione; sensori ottici basati sui laser medio-infrarossi permettono di rilevare gas tossici o esplosivi in tracce; sensori in fibra ottica possono rivelare radiazioni ionizzanti;

sensori compatti basati sulla fluorescenza indotta dal laser (LIF) possono rilevare agenti biologici; schemi di intelligenza artificiale classici e quantistici permettono una rapida elaborazione dei dati e identificazione dei rischi.

Queste tecnologie possono produrre reti di sensori quantistici e ottici in grado di mappare il territorio, localizzare possibili fonti di rischio e prevenire gli attacchi, in ambienti militari e aree civili sensibili.

PROBLEMA INDIVIDUATO E SOLUZIONI TECNOLOGICHE

I sensori attualmente disponibili in commercio presentano varie limitazioni: in primo luogo, sono molto specifici e misurano solo alcuni dei parametri legati ai potenziali pericoli; in secondo luogo, sono spesso poco sensibili. I sensori elettronici portatili utilizzati per rivelare sostanze chimiche volatili, ad esempio, presentano una scarsa sensibilità e selettività nelle specie molecolari, con conseguenti rischi di falsi allarmi. I sensori più diffusi per rivelazione

di campi magnetici DC o AC a bassa frequenza (sensori fluxgate) hanno alti costi, alti consumi, sono ingombranti e sensibili a derive termiche. I sensori attualmente usati per rivelare radiazioni ionizzanti presentano effetti di saturazione e/o basse soglie di danneggiamento, sono sensibili ad interferenze elettromagnetiche (es. camere di ionizzazione), e possono richiedere alte tensioni (es. rivelatori a scintillazione) che ne limitano possibili integrazioni in reti di sensori per operazioni sul campo.

Il progetto Q-LAMPS mira a sviluppare gli elementi tecnologici di una nuova piattaforma per rivelazione multiparametrica che sfrutta lo stato dell'arte dell'ottica e della fisica quantistica, capace di fornire una valutazione precisa e accurata di pericoli di molteplice natura. Una parola chiave del progetto è adattabilità, perseguita con un approccio modulare che adatta i sistemi ai diversi requisiti e scenari. I sensori ottici e quantistici sviluppati nei laboratori CNR-INO di Sesto Fiorentino consentiranno di misurare campi magnetici a livello del nanoTesla e di rilevare gas tossici o esplosivi in concentrazioni inferiori alle parti per miliardo in volume. La tecnologia in fibra sviluppata nei laboratori CNR-INO di Napoli consentirà di rilevare radiazioni ionizzanti nell'intervallo 100-1000 Gy con sensori molto compatti. Il sensore laser sviluppato presso il MUTIOE di Varsavia consentirà la rilevazione in remoto

di aerosol biologici. Le aziende partner (le italiane FlySight e ppqSense, le polacche Kenbit e CRW Telesystem-Mesko) forniranno componenti chiave e svilupperanno soluzioni per la raccolta, l'integrazione e l'analisi dei dati.

METODOLOGIA

Il sensore quantistico per la misura di campi magnetici si basa sui centri di colore NV in diamanti. I centri NV sono difetti quantistici fluorescenti nel cristallo di diamante (Figura 1a). Il loro stato quantistico viene determinato con misure di fotoluminescenza: qualsiasi campo magnetico che perturbi lo spin del centro di colore può così essere misurato con un'elevata risoluzione spazio-temporale. Si possono raggiungere sensibilità fino a ~ 100 nT/Hz^{1/2}, con risoluzioni spaziali inferiore a 1 mm.

Il sensore di radiazioni ionizzanti si basa su segmenti con reticoli di Bragg in fibra (FBG), caratterizzati da una modulazione periodica dell'indice di rifrazione (Figura 1b). La radiazione ionizzante che colpisce il segmento FBG produce variazioni dell'indice di rifrazione misurabili con laser telecom accoppiati in fibra. Questo sensore passivo puro è totalmente insensibile al rumore elettromagnetico di fondo e ad interferenze di altre apparecchiature, quindi ideale per l'integrazione in sistemi più complessi.

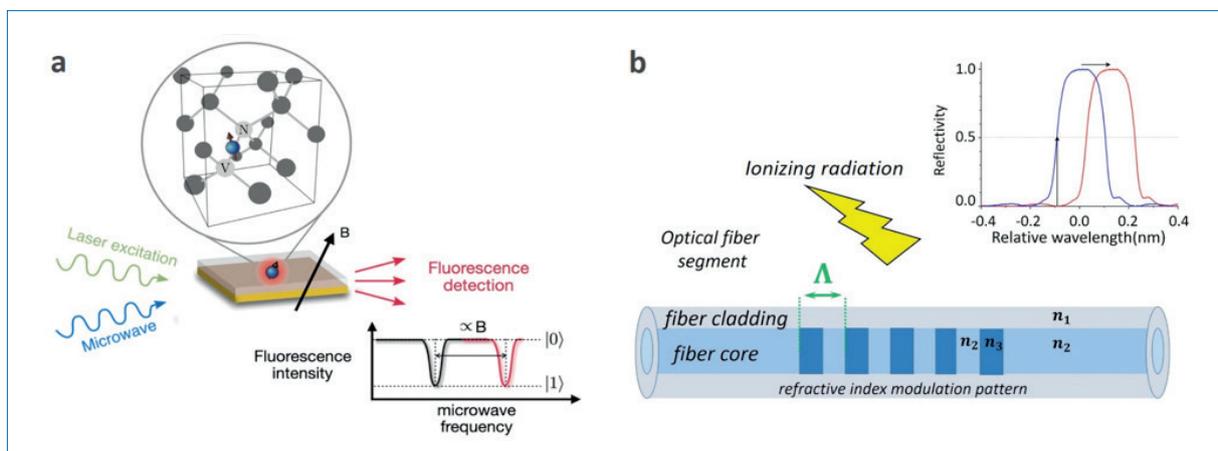


Figura 1 - Principio di funzionamento del sensore quantistico per la misura di campi magnetici basato su centri di colore in diamante (a) e del sensore in fibra per la misura di radiazioni ionizzanti (b). I grafici mostrati in figura sono esemplificativi dei processi si misura. In figura, B indica il campo magnetico, Λ indica il periodo del reticolo di Bragg e n l'indice di rifrazione del materiale.

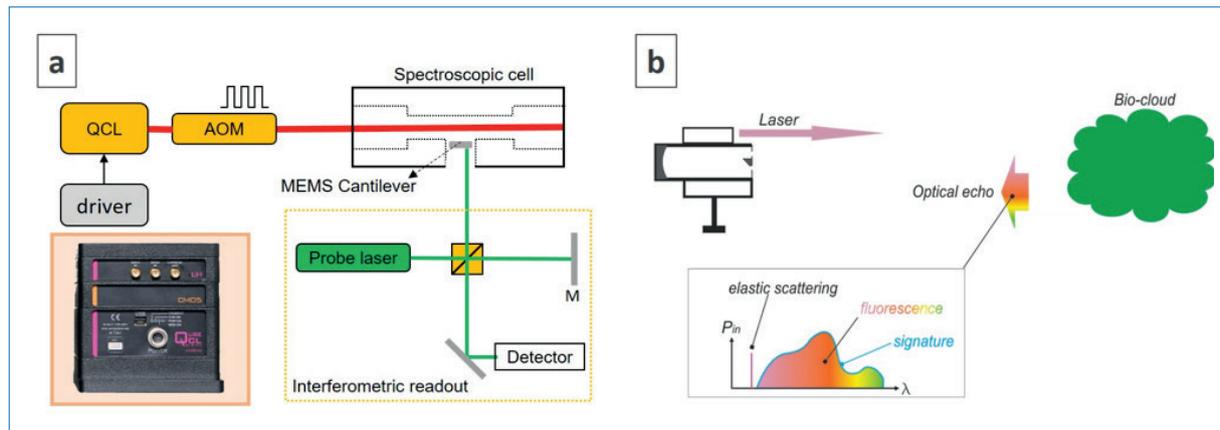


Figura 2 - Schema del sensore ottico per la rivelazione di gas tossici o esplosivi in tracce (a) e del sensore LIDAR per rivelazione remota di bio-aerosol (b). MEMS: micro-electro-machine system; M: specchio. Nel riquadro in basso a sinistra della figura (a) è mostrata un'immagine dell'elettronica di controllo dei laser sviluppata da ppqSense.

Sono due le soluzioni proposte per il rilevamento di composti volatili in aria. Un sensore ottico basato sulla tecnica fotoacustica combinata con risonatori acustici e ottici rileverà gas tossici ed esplosivi con concentrazioni inferiori alla parte per miliardo in volume. Componenti chiave sono un laser nel medio infrarosso per l'eccitazione delle molecole e un *cantilever* MEMS utilizzato come trasduttore per la misura della concentrazione del gas (Figura 2a). Il secondo è un LIDAR basato su tecniche LIF e depolarizzazione (Figura 2b), dotato di laser di alta qualità e algoritmi avanzati per l'analisi dei dati. Il sensore consentirà di rilevare a distanza i bio-aerosol entro un raggio di 10 km.

Infine, una piattaforma per l'analisi e la comunicazione dei segnali, potenziata con schemi di AI classici e quantistici e algoritmi di ML, consentirà la futura integrazione delle tecnologie sviluppate in un'unica piattaforma per rivelazione multiparametrica.

POTENZIALI UTILIZZI E RICADUTE APPLICATIVE DELLA TECNOLOGIA

L'ampia gamma di applicazioni può portare diverse aziende ad investire nella ricerca e sviluppo dei sensori proposti nel progetto. Si individuano due

direzioni commerciali principali: (I) sensori compatti e a basso costo ad ampia diffusione per il settore civile, (II) sensori avanzati per installazione in ambienti industriali e militari rilevanti, comprese aree ad alta concentrazione abitativa e zone militari strategiche.

Un impulso significativo può venire dall'esigenza di controllo delle emissioni inquinanti elettromagnetiche e chimiche, anche alla luce delle richieste di contenimento e contrasto del riscaldamento climatico globale. Il controllo della qualità dell'aria nei luoghi di lavoro e nelle aree urbane richiede sensori affidabili e compatti, che sono solo parzialmente disponibili sul mercato. Il magnetometro può trovare applicazione nelle indagini geologiche e geotecniche, nell'industria petrolifera ed energetica, nell'ingegneria civile e aerospaziale. I sistemi in fibra ottica sono particolarmente adatti alla realizzazione di dispositivi compatti e integrati, intrinsecamente orientati all'implementazione di reti di sensori per controllo remoto. Dosimetri in fibra sono già stati esplorati con successo per la rilevazione di radiazioni a basse dosi in campo medico. Essendo basati su tecnologie già presenti sul mercato delle telecomunicazioni, tali sistemi garantiscono anche alte qualità e bassi costi di produzione.

CONCLUSIONI

Il progetto Q-LAMPS sfrutta lo stato dell'arte dei sensori ottici, dei sensori quantistici e dell'intelligenza artificiale, con l'obiettivo di creare gli elementi costitutivi di una piattaforma integrata per rilevazione multiparametrica. I sensori sviluppati consentiranno di rilevare, simultaneamente, fattori di minaccia di natura diversa come campi magnetici dovuti a materiali e dispositivi illeciti, radiazioni ionizzanti, sostanze chimiche e agenti biologici. Uno dei vantaggi della tecnologia sviluppata è la sua adattabilità a diversi scenari, dal monitoraggio di aree militari (o civili) strategiche

alla mappatura dei rischi in aree coinvolte in operazioni sul campo.

Il progetto riunisce una rete europea di istituti di ricerca e aziende che collaborano allo sviluppo di tecnologie avanzate ottiche e quantistiche, con un approccio che le rende adattabili a una varietà di scenari e ambienti. Sebbene sia stato pensato specificamente per rispondere alla domanda di soluzioni tecnologiche per la rivelazione di rischi in aree militari sensibili e nelle operazioni sul campo, il progetto è altamente rilevante anche per lo sviluppo scientifico e l'avanzamento delle conoscenze nel campo strategico delle tecnologie quantistiche.

SIGLE, ACRONIMI, SIMBOLI ED ABBREVIAZIONI

<i>AC</i>	Alternating Current
<i>AI</i>	Artificial Intelligence
<i>CNR</i>	Consiglio Nazionale delle Ricerche
<i>CNR-INO</i>	Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto Nazionale di Ottica
<i>DC</i>	Direct Current
<i>EU</i>	European Union
<i>FBG</i>	Fiber Bragg Grating
<i>LIDAR</i>	Light Detection and Ranging
<i>LIF</i>	Laser Induced Fluorescence
<i>MEMS</i>	Micro Electro-Mechanical Systems
<i>MUT-IOE</i>	Military University of Technology - Institute of Optoelectronics
<i>NV</i>	Nitrogen-Vacancy
<i>Q-LAMPS</i>	Quantum LAsEr-based Multi-parametric Portable Sensors
<i>R&D</i>	Research and Development

PAROLE CHIAVE

Tecnologie quantistiche, sensori multiparametrici, intelligenza artificiale, misura di campi magnetici, rivelazione di gas in tracce, misura di radiazioni ionizzanti, rivelazione di composti biologici volatili, rivelazione di vapori di esplosivi.

RECAPITI AMMINISTRATIVI DEL PROGETTO

Numero del Progetto:	EDA B-PRJ-RT-989
Amministrazione appaltante:	Direzione Informatica, Telematica e Tecnologie Avanzate (TELEDIFE)
Ente responsabile del progetto:	Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR
Città, Regione:	Firenze, Toscana
Titolo e nome del responsabile del progetto:	Dr.ssa Nicole FABBRI
Recapiti del responsabile del progetto:	Via N. Carrara 1, 50019 Sesto Fiorentino (FI)
Recapito telefonico del responsabile del progetto:	+39 0554572469
E-mail del responsabile del progetto:	nicole.fabbri@ino.cnr.it

BIBLIOGRAFIA

Jensen K, Kehayias P, Budker D. Magnetometry with Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond. In: Grosz, A., Haji-Sheikh, M., Mukhopadhyay, S. (eds) High Sensitivity Magnetometers. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Springer, Cham. 2017, vol 19, 553–576. Doi:10.1007/978-3-319-34070-8_18.

Hernández-Gómez S, Fabbri N. Quantum Control for Nanoscale Spectroscopy With Diamond Nitrogen-Vacancy Centers: A Short Review. *Front. Phys.* 2021, 8, 610868 1-8. Doi:10.3389/fphy.2020.610868.

Wang Z, Wang Q, Zhang H, Borri S, Galli I, Sampaolo A, Patimisco P, Spagnolo V L, De Natale P, Ren W. Doubly resonant sub-ppt photoacoustic gas detection with eight decades dynamic range. *Photoacoustics* 2022, 27, 100387. DOI: 10.1016/j.pacs.2022.100387.

Viola R, Liberatore N, Luciani D, Mengali S. Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy for Detection of Improvised Explosive Devices and Precursors. *Advances in Optical Technologies* 2016, 2016, 5757361. DOI: 10.1155/2016/5757361.

Mann M, Rao A S, Sharma C. Remote mid IR Photoacoustic Spectroscopy for the detection of explosive materials. *Chem. Phys. Lett.* 2021, 765, 138231. DOI:10.1016/j.cplett.2020.138231.

Wojtanowski J, Zygmunt M, Muzal M, Knysak P, Młodzianko A, Gawlikowski A, Drozd T, Kopczyński K, Mierczyk Z, Kaszczuk M, Traczyk M, Gietka A, Piotrowski W, Jakubaszek M, Ostrowski R. Performance verification of a LIF-LIDAR technique for stand-off detection and classification of biological agents. *Optics & Laser Technology* 2015, 67, 25–32. DOI:10.1016/j.optlastec.2014.08.013.

Wojtanowski J, Zygmunt M, Kopczyński K, Muzal M, Knysak P, Młodzianko A. Optical stand-off detection of biological and chemical hazards — Prospects and concerns. *IEEE 2018 Baltic URSI Symposium (URSI)*, 100-105. DOI:10.23919/URSI.2018.8406751.

Avino S, D'Avino V, Giorgini A, Pacelli R, Liuzzi R, Cella L, De Natale P, Gagliardi G. Detecting ionizing radiation with optical fibers down to biomedical doses. *Applied Physics Letters* 2013, 103(18), 184102. DOI: 10.1063/1.4826934.

Avino S, D'Avino V, Giorgini A, Pacelli R, Liuzzi R, Cella L, De Natale P, Gagliardi G. Ionizing radiation detectors based on Ge-doped optical fibers inserted in resonant cavities. *Sensors* 2015, 15(2), 4242-4252. DOI: 10.3390/s150204242.

0 1 1 1011 11 101 0101 1110 010 10

0 01 11 101 101 01 1100



10 01 101 10 10 0 01 101 111 0

1 10 11 10 0 111 1010 0 1 11 00



101 1 10 01 11 101 101 01 1100



1 10 11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0

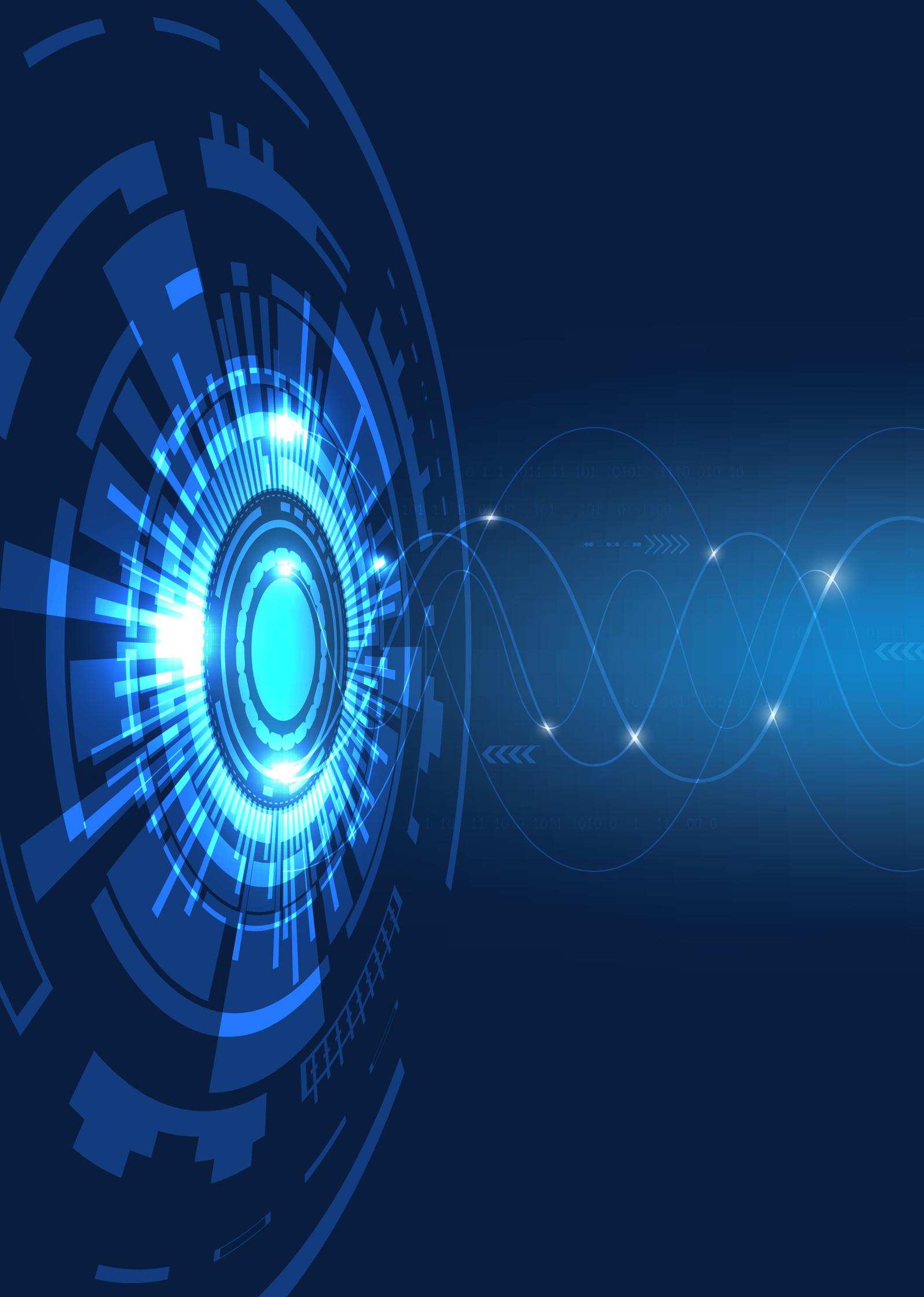


101 1 10 01 11 101 101

1 10 01 010 101 01 101 10 01 00 10 10



11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0



LA RICERCA IN AMBITO NATO EXTRA-EUROPEO



INTRODUZIONE

Nell'alveo della cooperazione bilaterale – multilaterale in ambito NATO ed extra-Europeo l'Italia ha in essere, da ormai diversi anni, una proficua attività di cooperazione tecnologica.

Tra i progetti di ricerca ritenuti esemplificativi di tale attività di ricerca per il comparto Difesa e sicurezza si evidenzia il progetto “*Conical grid space structures with embedded fiber optic sensing capability (GRID)*”

INTRODUZIONE

Il progetto GRID è stato sviluppato nell'ambito della cooperazione tecnologica bilaterale tra i Ministeri della Difesa italiano ed israeliano (PA n. ISR-ITA-2019/02). Il progetto è stato intrapreso dal Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA) in *partnership* con Israel Aerospace Industries (IAI) con l'obiettivo di dimostrare la fattibilità ed il funzionamento di un sistema di *sensing* meccanico e termico, basato sull'impiego di fibre ottiche, integrato all'interno di una struttura Grid in materiale composito. Il progetto è incentrato sul design, realizzazione e test di un Dimostratore tecnologico finale caratterizzato da due temi essenziali di ricerca:

- È costituito da una struttura a guscio in fibra di carbonio, con architettura Grid, di forma tronco-conica di medie dimensioni, ad altissima efficienza strutturale, e riferibile ad un *cone adapter per payload*/sistemi satellitari. L'architettura Grid in composito è difatti destinata

principalmente ad applicazioni spaziali, in cui il design a mass minima è dominato da meccanismi di instabilità locali e globali sotto gli elevati carichi di compressione che caratterizzano la fase di lancio.

- È munito di un sistema integrato di *sensing* per la lettura delle deformazioni e/o della temperatura, basato sull'impiego di fibre ottiche (FOS) con reticoli di Bragg (FBG), inserito all'interno delle *rib* della struttura Grid durante il processo di deposizione delle fibre di carbonio. Numerosi sono i benefici insiti nella natura di un tale sistema di *sensing* rispetto alle controparti convenzionali, tra cui: la leggerezza dei cablaggi, insensibilità ad interferenze elettromagnetiche, bassa richiesta di potenza per sensore.

Il prospetto seguente sintetizza la ripartizione delle attività tra i due *partner* di progetto che sarà meglio chiarita di seguito.



MOTIVAZIONI

L'obiettivo di ridurre la massa di componenti primari di velivoli aerospaziali, migliorandone l'efficienza strutturale, rappresenta una sfida sempre attuale nel settore aerospaziale. Per questo motivo, le architetture progettuali, i materiali impiegati ed i processi realizzativi sono costantemente in evoluzione per esplorare e conseguire ottimizzazioni di massa a costi bassi. Le strutture Grid in materiale composito possono essere più leggere ed economiche delle controparti tradizionali attualmente

in volo. Le strutture Grid sono di solito impiegate in forma di gusci cilindrici o tronco-conici e sono formate da un sistema regolare di *rib* elicoidali e circolari disposti in modo tale da massimizzare la resistenza alle instabilità del guscio sotto l'azione di carichi primari di compressione e flessione tipici delle applicazioni aerospaziali. La struttura può essere munita o meno di un sottile *skin* esterno. Le *rib* sono elementi unidirezionali realizzati con fasci continui di fibre di carbonio e, per tale ragione, enfatizzano le proprietà meccaniche

del materiale composito privilegiando quelle della fibra. Le varie configurazioni strutturali Grid richiedono l'utilizzo di metodi di ottimizzazione per esplorare le possibili soluzioni ed individuare quelle più efficienti in relazione ai requisiti di progetto specifici. Le prime strutture Grid venivano fabbricate impiegando macchine di *Filament Winding* unitamente a fibre di carbonio localmente impregnate di resina fluida (*wet winding*); attualmente sono in via di sviluppo celle robotizzate più sofisticate che alimentano processi di deposizione automatizzata di fibre secche o, all'opposto, di fibre pre-impregnate, con differenze sostanziali tra i due processi anche in termini di investimento iniziale.

Il monitoraggio di un satellite è essenziale per ogni missione di successo nello spazio. Una varietà di sensori è richiesta per fornire informazioni critiche sullo stato di salute del componente, a partire dalla fabbricazione, durante i test di qualifica, e per tutta la vita operativa fino alla sua dismissione. Lo spazio è un ambiente estremamente severo per ogni sistema sensoristico essendo caratterizzato da microgravità, vuoto, radiazioni, ampie escursioni termiche, vibrazioni meccaniche e *shock* durante la fase di lancio. Inoltre, molte strutture progettate per lo spazio sono caratterizzate da requisiti di elevata stabilità dimensionale e pertanto la loro rigidità e forma sono importanti e dovrebbero essere monitorati. I sistemi FOS sono considerati in applicazioni aerospaziali per molteplici vantaggi in grado di superare i sistemi convenzionali. Tali vantaggi includono: insensibilità ad interferenze elettromagnetiche, nessun innesco di scariche elettrostatiche, leggerezza e flessibilità dei cablaggi, bassa richiesta di potenza per sensore, elevato rapporto segnale rumore (elevate accuratezza di misura), interrogazione da remoto, e potenzialità di essere inglobati e protetti all'interno di strutture in composito, traendo da questa opportunità maggiori probabilità di sopravvivenza all'ambiente esterno. In questo scenario, lo studio di una struttura Grid in composito ad elevata efficienza, integrata con un sistema di monitoraggio FOS efficace e “perma-

nente”, rappresenta un argomento di rilievo per la ricerca aerospaziale.

BACKGROUND TECNICO

Il processo di manifattura del Dimostratore Grid in composito è basato su una tecnica di avvolgimento robotizzato di fibre di carbonio secche denominata *Parallel Winding*, seguito da infusione di resina liquida (LRI) con sacco a vuoto e cura in forno, di cui il CIRA è da vari anni promotore con uno specifico brevetto tecnologico (per la fase di avvolgimento, in particolare) oltre che con numerose pubblicazioni inerenti tanto gli aspetti realizzativi quanto quelli progettuali più in generale. Vale la pena menzionare, per il recente passato, la progettazione e realizzazione del prototipo dell'Interstadio 2/3 con architettura Grid in composito, sviluppato per Avio e destinato al lanciatore VEGA-C.

La conoscenza sulle fibre ottiche, la loro selezione, installazione ed utilizzo unitamente a strutture in composito è principalmente del *partner* IAI, sebbene non in accoppiamento con il processo di infusione quale quello prospettato dal CIRA. D'altra parte, IAI detiene estese competenze sulla progettazione, analisi e test di strutture in composito in generale, ma non specificamente di tipo Grid.

La ripartizione delle attività di progetto è stata dunque individuata con il criterio di efficientare le rispettive competenze e di favorire uno scambio proficuo di *know-how* tra i due partner. In breve:

- CIRA ha sviluppato e curato tutti gli aspetti legati alla progettazione ottimale, modellazione ed analisi preliminare del Dimostratore conico Grid, alla selezione dei materiali compositi e loro caratterizzazione in termini di parametri di processo e proprietà meccaniche essenziali, alla produzione di articoli di prova intermedi per verifiche preliminari sulla fattibilità delle FOS integrate, alla tecnologia realizzativa e dimensionamento delle attrezzature a corredo, nonché alla realizzazione del Dimostratore con il nuovo sistema robotizzato disponibile al CIRA.
- IAI ha sviluppato e curato tutti gli aspetti lega-

ti ai requisiti del Dimostratore, alla selezione delle FOS e definizione della procedura di inserimento all'interno delle rib della struttura Grid, alla produzione e test di articoli di prova intermedi, all'approvvigionamento delle attrezzature di processo tramite un fornitore esterno, al design e produzione di flange ed interfacce necessarie alla campagna di test meccanici sul Dimostratore, ed infine alla conduzione dei test presso gli stabilimenti di IAI e validazione dei risultati sperimentali.

PROBLEMA AFFRONTATO E SOLUZIONE TECNOLOGICA

Il progetto GRID mira a due obiettivi principali:

- 1) Dimostrare la fattibilità e l'impiego di un sistema di *sensing*, basato su fibre ottiche e sensori FBG, integrato all'interno delle *rib* di una struttura in composito Grid realizzata con fibra secca di carbonio, *RoboticWinding* ed infusione di resina. Lo scopo è quello di conseguire, in prospettiva, un sistema di *health monitoring* efficace e "permanente", in quanto in larga parte protetto dalle sollecitazioni ambientali spesso gravose, essendo inserito all'interno di *rib* in composito con spessore relativamente elevato.
 - In tal caso, a fronte dei benefici promessi dal sistema FOS integrato, la sfida tecnologica è costituita proprio dalla sopravvivenza del sistema stesso alle varie fasi del processo di manifattura della struttura Grid, che includono: avvolgimento della prima metà della preforma secca in fibra di carbonio, installazione delle FOS ed interfacce, avvolgimento della seconda metà della preforma, allestimento del sacco a vuoto, infusione di resina, cura in forno (o autoclave), sformatura del componente, rifinitura.
- 2) Valutare l'efficienza strutturale e l'effettiva *performance* di una struttura Grid ottimizzata, in relazione a soluzioni in composito consolidate, quali quelle basate su sandwich o laminati solidi.
 - In tal caso, i requisiti del Dimostratore Grid

in termini di geometria, carichi dimensionanti (12 t a carico limite), rigidità, target di massa (8.2 kg) sono stati definiti a inizio progetto in uno specifico report, unitamente ad una soluzione di riferimento in composito, individuando, come obiettivo primario della struttura Grid, un significativo risparmio di peso del 20%.

- Per quanto attiene la performance effettiva del Dimostratore, la sfida in tal caso era quella di allestire un *set-up* di prova piuttosto articolato, in grado di valutare le proprietà di rigidità e di resistenza del Dimostratore, fino a carico di rottura, e di acquisire le letture di deformazioni tanto dagli estensimetri convenzionali quanto dal sistema di fibre ottiche integrate.

METODOLOGIA E RISULTATI CONSEGUITI

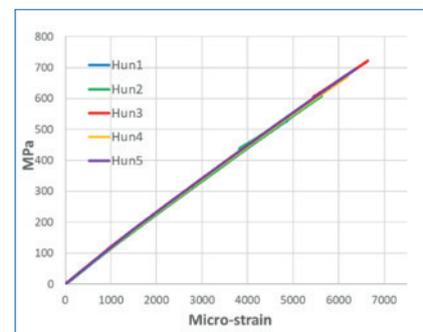
Sviluppi iniziali

Lo sviluppo tecnologico iniziale ha incluso la caratterizzazione delle proprietà meccaniche essenziali delle *rib* ed una dimostrazione di fattibilità preliminare del sistema FOS integrato. Entrambi i temi sono stati affrontati con l'ausilio di pannelli *ortho-grid* ottenuti per infusione. Questi pannelli sono formati da due *rib* principali longitudinali interlacciate da alcune *rib* trasversali e presentano, su piccola scala, alcune similitudini essenziali con il processo di manifattura in scala reale del Dimostratore. Pertanto, le proprietà meccaniche di base ottenute dai provini estratti da tali *rib* sono rappresentative del processo finale e supportano in modo appropriato la fase di selezione del materiale composito. In particolare, sono state testate tre differenti resine unitamente a fibre di carbonio con modulo intermedio (IM). A valle di questa campagna di sperimentazione è stata selezionata per il Dimostratore Grid la resina epossidica Huntsman LY556 per le buone proprietà meccaniche ed i parametri di processo legati all'infusione altrettanto favorevoli. Inoltre, per ciascuna resina candidata, sono

stati introdotti e testati provini addizionali contenenti difetti artificiali. Questi difetti erano inseriti al centro delle *rib* in modo da simulare la presenza di rivestimenti in Teflon che tipicamente ricoprono le fibre ottiche. L'esito di tale verifica è stata una certa insensibilità della resistenza a compressione

delle *rib* rispetto alla massima grandezza di "difetti" introdotti dalle FOS.

L'altro aspetto importante affrontato in questa fase sperimentale è stata l'elaborazione di articoli di prova utili a valutare: 1) l'efficacia della procedura di inserimento delle FOS e relative interfacce, 2)



Pannello ortho-grid ed esempio di caratterizzazione meccanica di provini rib

l'impatto sul processo di infusione e sui dettagli per la preparazione del sacco a vuoto, 3) il funzionamento delle FOS integrate sia come sensori termici che di deformazione.

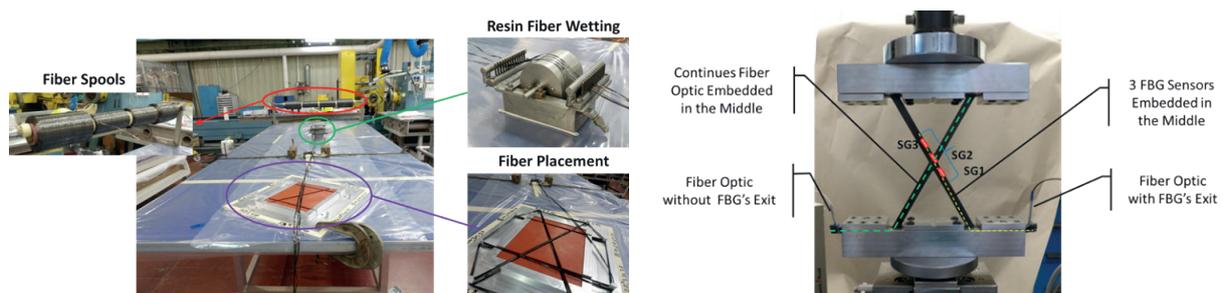
I primi test case sono stati sviluppati da IAI in forma di unità triangolari rappresentativi di una generica struttura Grid. Tali articoli sono stati testati a tensione e compressione impiegando fibre ottiche sia con sensori continui che discreti, facendo propendere la scelta su quest'ultima tipologia. Tutta-

via, l'approccio realizzativo qui impiegato era l'impregnazione locale di resina.

Sulla base di questa esperienza, il CIRA ha prodotto e testato un pannello ortho-grid finale con FOS integrate come caso rappresentativo dell'effettivo processo realizzativo, ottenendo così una dimostrazione preliminare di fattibilità.

Design a massa minima del Dimostratore

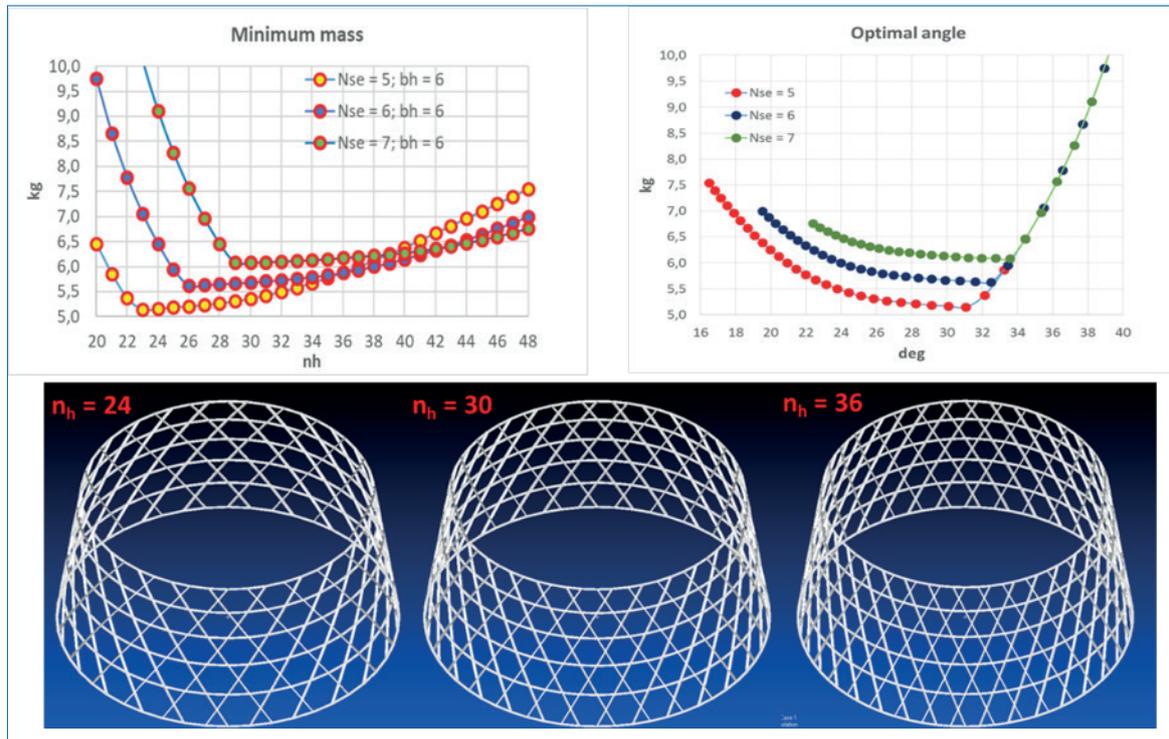
Il progetto a massa minima del Dimostratore Grid



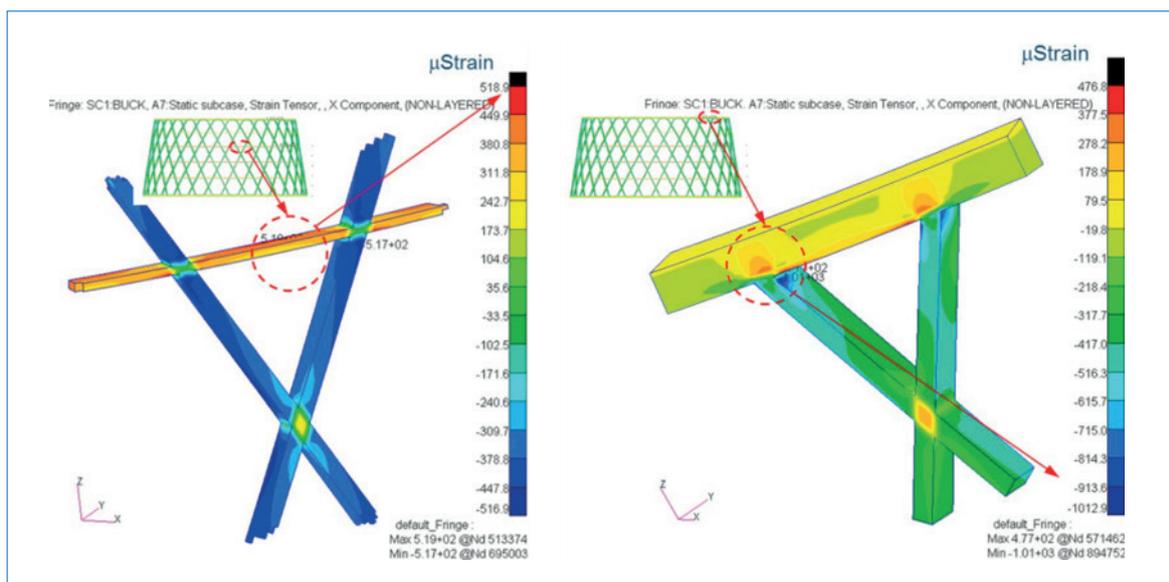
Realizzazione e test di unità triangolari con FOS integrate

è stato affrontato con l'ausilio di un metodo semi-analitico che fa parte del *background* del CIRA. Tale metodo include la formulazione approssimata della massa della struttura Grid conica e delle principali proprietà meccaniche globali che caratterizzano ciascuna configurazione (rigidezza, resistenza, instabili-

tà). Tale formulazione viene elaborata da una *routine* di ottimizzazione basata su un algoritmo commerciale di minimizzazione vincolata in cui la funzione obiettivo è rappresentata dalla massa della struttura Grid. Nelle figure seguenti sono proposti alcuni passi relativi alla fase di ricerca della configurazione



Alcuni passi della fase di design del Dimostratore conico Grid



Esempio di analisi agli elementi finiti del Dimostratore Grid

ottimale ed alla successiva fase di analisi agli elementi finiti. Con questo approccio, è stata infine individuata una soluzione particolarmente leggera dal peso di appena 7.2 kg, ossia 1.0 kg in meno del target di massa. Tale soluzione (configurazione centrale in figura) è caratterizzata da 30+30 rib elicoidali, 5 sezioni circonferenziali e specifiche sezioni delle *rib*.

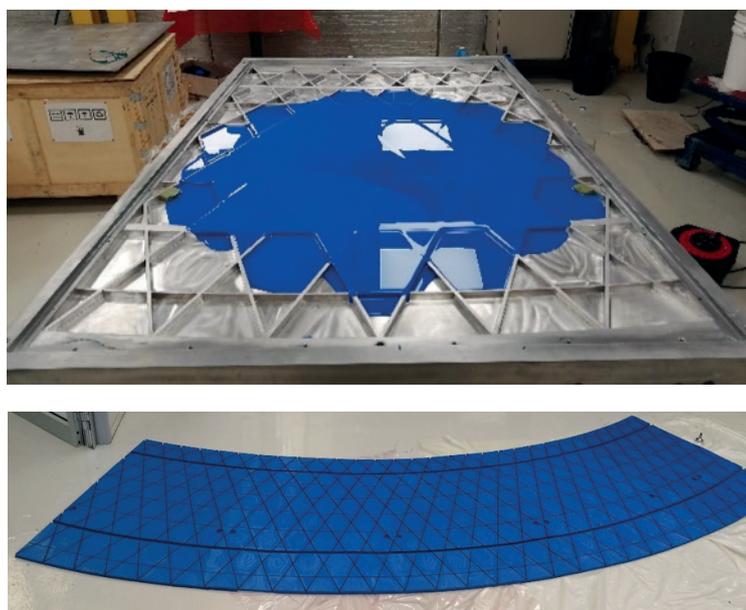
A partire dall'identificazione di tutte le caratteristiche del Dimostratore, sono state emesse le specifiche di manifattura e costruiti i modelli CAD delle attrezzature, con particolare attenzione alle parti che sono strettamente legate allo specifico design della struttura Grid, ovvero: il mandrino conico per l'avvolgimento robotizzato, munito di specifici punti di aggancio, e lo stampo per formare i settori del tappeto di gomma da installare sul mandrino.

Realizzazione del Dimostratore

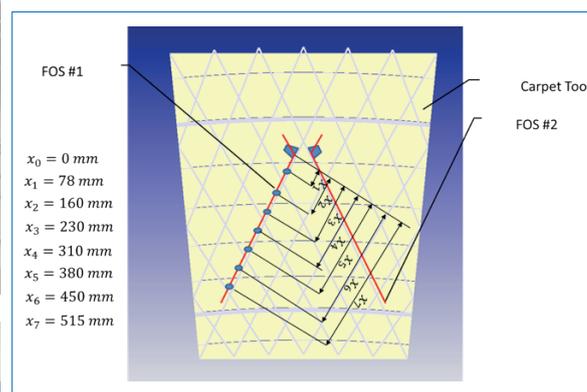
La realizzazione del Dimostratore Grid con FOS integrate è stata efficacemente svolta dal CIRA. Il processo complessivamente sviluppato è economico, efficiente e versatile, e sostituisce l'approccio

Wet Filament Winding che presenta difficoltà operative e normative legate all'impiego di resina allo stato liquido. La figura seguente mostra una fase relativa alla produzione dei tappeti di gomma da allestire sul mandrino. Cinque lotti di gomma silicica liquida sono stati colati nel settore di stampo che riproduce lo schema delle *rib*. Nello stampo erano presenti alcuni inserti in posizioni specifiche utili a ricavare le cavità del tappeto dove disporre le interfacce per l'inserimento delle fibre ottiche. Un unico tappeto di gomma è stato infine assemblato ed installato sul mandrino conico.

In questo progetto è stato adottato per la prima volta il nuovo impianto di cella robotizzata disponibile al CIRA che consiste di posizionatore, robot e cantra. Dopo un'intensa fase di allestimento dell'intera cella, di messa a punto della strategia di avvolgimento e di affinamenti successivi delle specifiche traiettorie di deposizione, la nuova cella è in grado di deporre un singolo strato della preforma secca in fibra di carbonio del Dimostratore in soli 20 minuti (la preforma include 28 strati).



Stampo per la colata dei tappeti di gomma e tappeto completo



Schema del sistema FOS e posizione degli FBG lungo specifiche rib elicoidali

L'approccio ad “avvolgimento parallelo” consente di interlacciare contemporaneamente le *rib* elicoidali e circonferenziali che normalmente definiscono una struttura Grid, assicurando la realizzazione di una preforma regolare in cui i fasci di fibre sono uniformemente distribuiti lungo le *rib* ed attraverso le loro intersezioni.

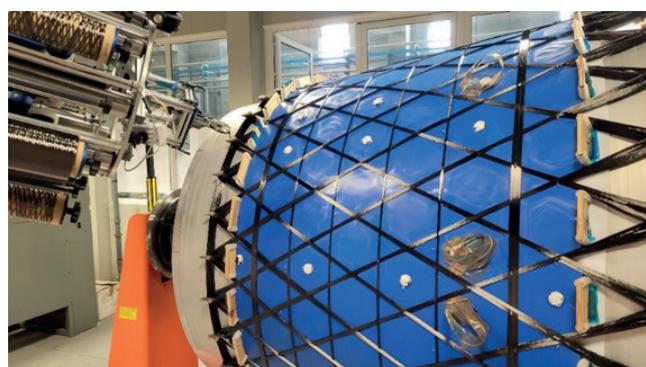


Nuova cella robotizzata per “avvolgimento parallelo” della preforma secca in fibra di carbonio

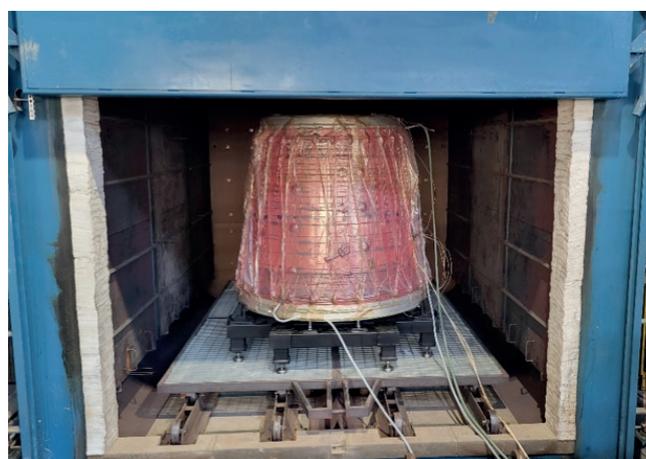
La dimostrazione di fattibilità di un sistema FOS integrato all'interno delle *rib* di una struttura Grid in scala reale è stata pienamente conseguita. Dopo la deposizione di metà spessore delle *rib* della preforma secca, secondo quanto pianificato, 10 fibre ottiche, ciascuna contenute 7 sensori FBG, sono state inserite in altrettante *rib* elicoidali al fine di ottenere una copertura adeguata di sensori per la campagna di test del Dimostratore. Le fibre ottiche sono state deposte manualmente previo l'inserimento di specifiche interfacce concepite come morsetti al fine di garantire una connessione solida tra la *rib* e la fibra ottica nella zona di ingresso: una leggera azione di taglio sarebbe infatti fatale per l'integrità della fibra stessa. Una volta installate tutte le interfacce nelle rispettive cavità del tappeto di gomma ed incollate le fibre ottiche alle fibre di carbonio sottostanti, la deposizione della preforma secca è nuovamente ripresa fino al completamento, in modo da inglobare i sensori a metà dello spessore delle *rib*. A valle dell'intero processo di manifattura, soltanto una fibra ottica è risultata danneggiata. Tuttavia, è stato necessario rimuovere meccanicamente la resina solida che si era annidata

nei connettori, nonostante tutte le misure adottate per evitare questo inconveniente. Il corretto funzionamento di tutti i sensori disponibili è stato successivamente accertato.

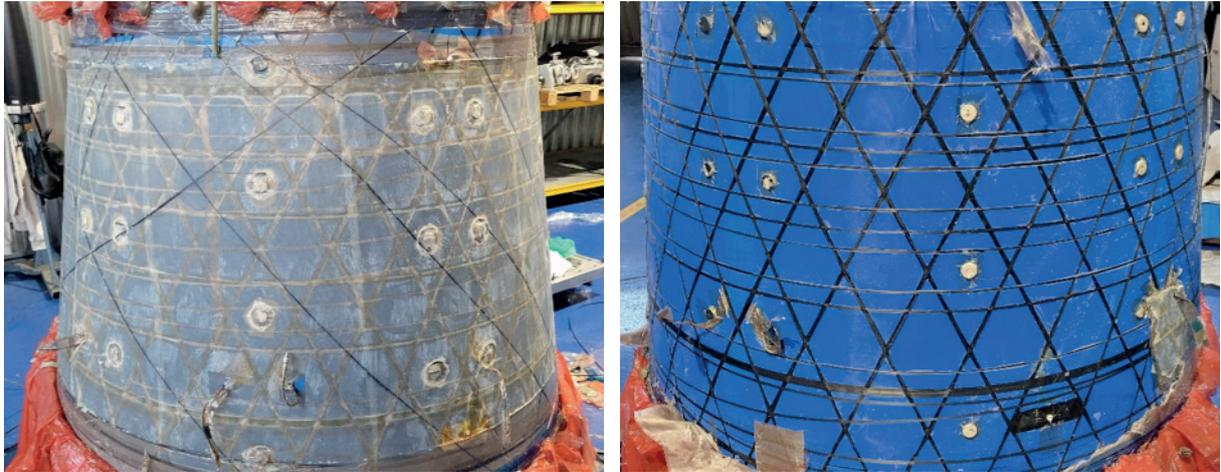
Il risultato finale è stata la produzione di un Dimostratore Grid di elevata qualità, perfettamente infuso, con dimensioni geometriche nominali e munita del sistema FOS integrato e funzionante. Il Dimostratore è stato infine spedito a Tel Aviv per la conduzione della campagna di test.



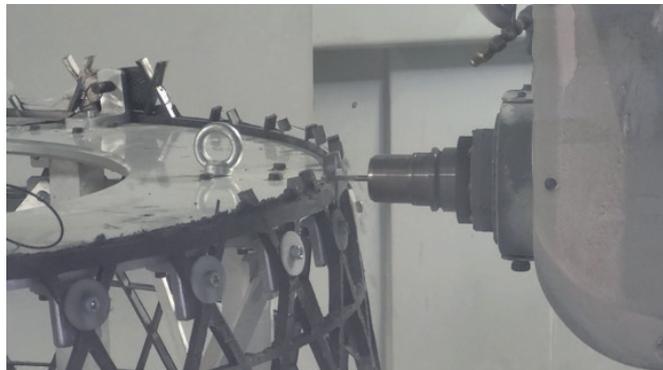
Fase finale dell'avvolgimento della preforma secca del Dimostratore



Infusione e cura in forno



Rimozione dei materiali di consumo dopo la cura



Estrazione e rifinitura del Dimostratore



Dimostratore Grid con sistema FOS integrato

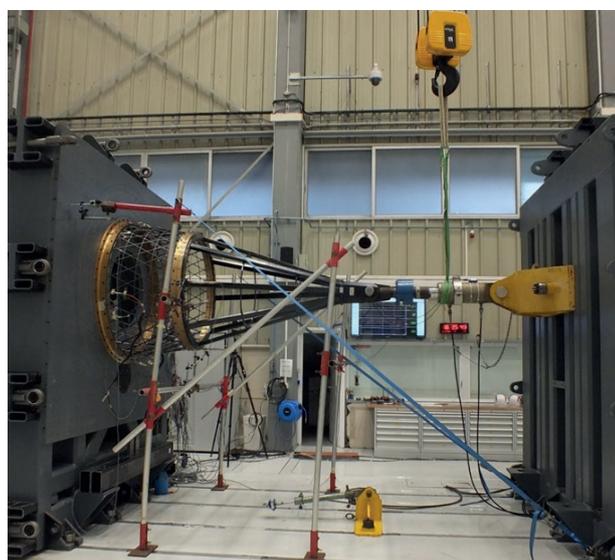
Campagna di test sul Dimostratore

La parte conclusiva del progetto è stata finalizzata alla campagna di test con l'obiettivo di valutare la *performance* attesa del Dimostratore in relazione ai requisiti prescritti ed al funzionamento del sistema FOS integrato. Questo compito è stato efficacemente svolto da IAI. La campagna di test era basata su un allestimento piuttosto complesso che includeva: trasduttori di spostamento per le misure di rigidità assiale e flessionale, numero-

si estensimetri, telecamera ad alta velocità, ed il sistema di acquisizione dei dati di deformazione forniti dalle FOS. Due pistoni idraulici sono stati impiegati per trasmettere la forza di compressione assiale e quella laterale: la prima, finalizzata alla valutazione della resistenza a compressione, la seconda per la valutazione della rigidità flessionale del Dimostratore. Tutti i test previsti sono stati superati con successo, come sintetizzato nella tabella seguente.

Exp.	Name	Load	Remarks
1	Compression LL	12 Tons Axial	Successful
2	Bending at 180°	800 Kg Vertical	Successful
3	Bending at 0°	800 Kg Vertical	Successful
4	Compression UL	24 Tons Axial	Successful
5	Failure Load	TBD	80 Tons

Matrice di test eseguita sul Dimostratore

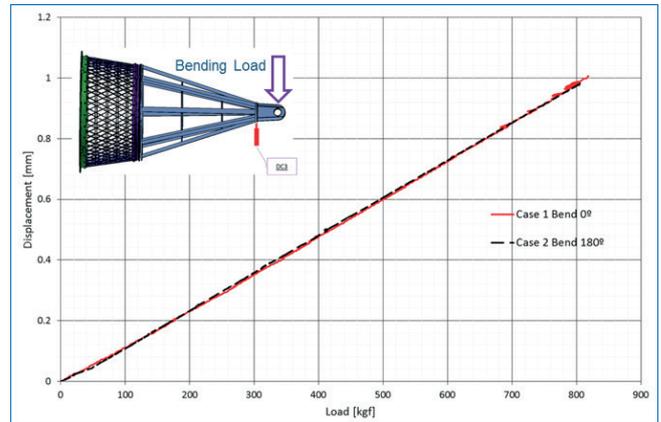


Impianto di prova per compressione assiale e flessione

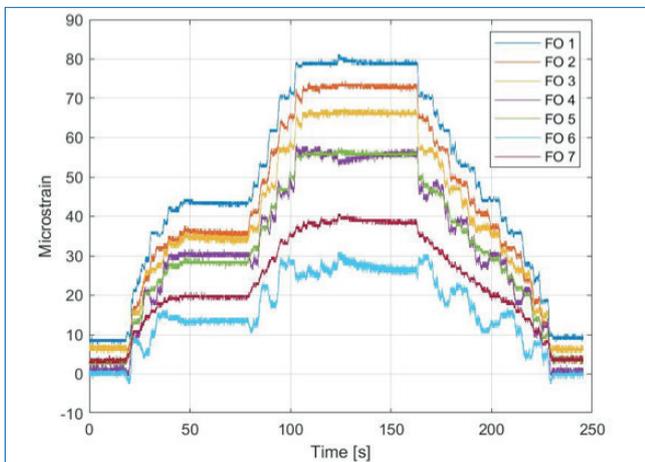
Una notevole quantità di dati è stata registrata durante la campagna di test dal sistema FOS, dagli estensimetri e dai trasduttori di spostamento. Questi dati di deformazione sembrano in linea generale ben correlati con le simulazioni agli elementi finiti. Si osserva una deviazione tra i valori durante i test di compressione, che viene amplifica-

ta in corrispondenza della fase finale a spostamenti non lineari. I sensori FBG sono infatti posizionati sull'asse neutro delle *rib*, laddove gli estensimetri sono incollati sulla faccia interna delle *rib* e pertanto ne registrano anche i contributi di deformazione flessionale. I *plot* seguenti mostrano solo alcuni esempi dei risultati sperimentali: 1) il comporta-

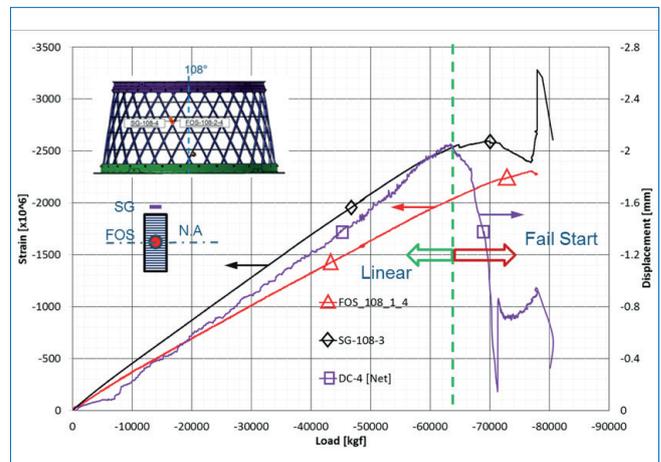
mento lineare nel test di rigidità a flessione con lo spostamento in punta pari ad 1.0 mm (20% in meno del massimo valore prescritto), 2) il gradiente di deformazione lungo una specifica *rib* elicoidale registrato dalla fibra ottica durante lo stesso test, 3) l'insorgere di un comportamento non lineare dell'articolo di prova durante il test di compressione finale, che anticipa la rottura catastrofica a 78 t. Alcuni fotogrammi della telecamera ad alta velocità mostrano la rottura catastrofica catturata in un lasso di tempo di pochi centesimi di secondo e che si manifesta in un modo di instabilità globale.



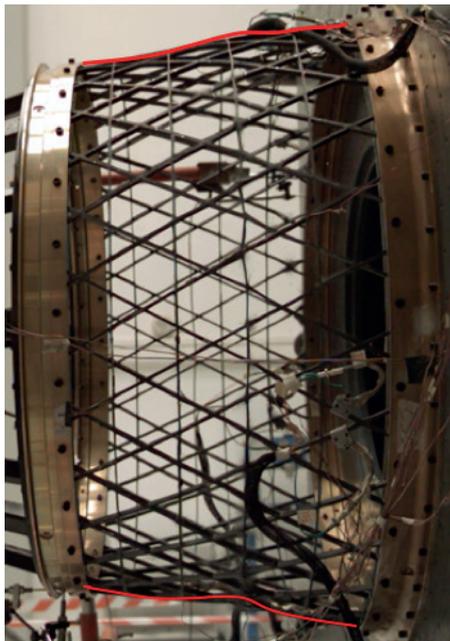
Spostamento in funzione del carico trasversale durante la prova di rigidità a flessione



Esempio di andamento di deformazioni lette dalle FOS durante la prova a flessione



Comportamento strutturale non lineare a partire da 65 t



Rottura catastrofica del Dimostratore a 80 t

POTENZIALI APPLICAZIONI TECNOLOGICHE

Inglobare un Sistema FOS all'interno di una struttura Grid fornisce molti benefici, tra cui: la valutazione del campo di deformazione interna che si sviluppa durante la campagna di test di qualifica di un nuovo componente, il monitoraggio dello stato di salute dello stesso componente durante la sua vita operativa, in relazione alle varie sollecitazioni prodotte dall'ambiente esterno (es., vibrazioni, impatti). Inoltre, molte strutture progettate per lo spazio sono soggette a requisiti di stabilità dimensionale che potrebbero essere controllati per mezzo di una rete di sensori termici opportunamente distribuita. Infine, un sistema FOS per la lettura della temperatura potrebbe essere adottato durante la fase di cura del componente come controllo qualità e/o ottimizzazione del processo di manifattura. Complessivamente, l'uso duale dei sensori FBG rende il sistema FOS adatto alla mappatura di deformazione e temperatura di strutture particolarmente critiche e pregiate durante tutte le fasi principali, dalla produzione alla vita operativa fino alla dismissione. Tale mappatura è utile per la determinazione di deformazioni strutturali, per il rilevamento di vibrazioni, per l'individuazione e la classificazione di impatti di micro-meteoriti, per la validazione del sistema di gestione termico del satellite.

CONCLUSIONI E PROSPETTIVA

Il Dimostratore in carbonio pesa 7.2 kg, cioè 1 kg in meno del target di massa indicato dai requisiti di progetto. Questo risultato, alla luce dell'eccellente esito sperimentale, certifica l'importante risparmio di peso del 30% rispetto alla soluzione di riferimento in materiale composito. Inoltre, dal momento che la capacità di carico è stata molto alta ed i requisiti di rigidità sono stati pienamente raggiunti con un margine positivo del 20% circa, una riduzione di massa di simile entità potrebbe essere ulteriormente conseguita su una versione affinata del Dimostratore, potendo arrivare ad un risparmio massimo del 40%. Il carico di rottura di 80 t,

unitamente alla geometria e peso della struttura pongono questo articolo di prova ai primi posti di un'ideale classifica di efficienze strutturali.

La fattibilità e l'impiego di un Sistema FOS inglobato nelle *rib* è stato dimostrato con successo. La procedura di inserimento e le interfacce progettate da IAI per la protezione del sistema hanno ben funzionato da un punto di vista meccanico e di installazione, assicurando le fibre ottiche nella corretta posizione ed i sensori al centro dei segmenti di *rib* elicoidali. Le informazioni prodotte dalle fibre ottiche durante la campagna di test meccanici, unitamente ai sensori convenzionali, sono state utili a comprendere il comportamento strutturale del componente. Anche l'uso delle FOS come sensori termici è stato dimostrato registrando la complessa storia termica che si sviluppa all'interno di una tipica *rib* di una struttura Grid durante il ciclo di cura. Inoltre, le FOS integrate nelle *rib*, che sono elementi relativamente robusti, sono maggiormente protette dalle sollecitazioni prodotte dall'ambiente esterno, con un conseguente aumento della probabilità di sopravvivenza del sistema durante la vita operativa del componente. Tuttavia, a fronte di questi benefici, la sfida dal punto di vista realizzativo consiste nel gestire la maggiore complicazione derivante dall'inserimento delle FOS e nel garantire la sopravvivenza del sistema stesso alle varie fasi del processo di avvolgimento ed infusione. Come sperimentato in questo progetto, la permeazione capillare della resina liquida attraverso sottili intercapedini, che erano supposte ben sigillate ed a prova di resina, è molto difficile da evitare. Questa circostanza, tuttavia, non è esiziale ai fini del corretto funzionamento dei sensori.

In conclusione, il progetto GRID ha espresso con successo la maggior parte delle potenzialità insite nei concetti proposti. Tutti gli insegnamenti tratti ed i possibili miglioramenti/affinamenti in termini di design, realizzazione e procedura di inserimento delle fibre ottiche possono essere inquadrati come attività di sviluppo a carattere industriale piuttosto che di ricerca.

In una prospettiva più generale, il concetto delle strutture Grid in composito potrebbe evolvere verso forme maggiormente complesse, come gusci a doppia curvatura, anche non assial-simmetrici, puntando a sezioni di fusoliera di velivoli aerospaziali, ad esempio, oppure potrebbe subire un radicale cambio di paradigma tecnologico attraverso l'adozione

di materiali a matrice ceramica, pensando ad applicazioni per velivoli di rientro (protezioni termiche) o a strutture termicamente stabili per *payload* ottici, ad esempio. A ogni modo, è chiaro che il TRL di partenza in questo nuovo scenario sarebbe più basso ed i benefici potenziali in termini di risparmio di massa dovrebbero essere verificati di caso in caso.

ACRONIMI

GRID	Conical Grid Space Structures with Embedded Fiber Optic Sensing Capability
CAD	Computer Aided Design
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic
FE	Finite-element
FOS	Fiber Optic Sensor/Sensing
FBG	Fiber Bragg Grating
IM	Intermediate Modulus
TRL	Technology Readiness Level

PAROLE CHIAVE

Struttura Grid, fibra ottica, efficienza strutturale e monitoraggio, avvolgimento robotizzato

RECAPITI AMMINISTRATIVI

Progetto bilaterale Italia/Israele:	PA n. ISR-ITA-2019/02 GRID
Amministrazione appaltante:	Direzione Armamenti Terrestri (DAT)
Ente responsabile del progetto:	CIRA – Centro Italiano Ricerche Aerospaziali, Via Maiorise, 81043, Capua (CE)
Responsabile progetto:	Dr. Giovanni Totaro
Ufficio:	+39 0823623039
E-mail:	g.totaro@cira.it

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Totaro, "Flexural, torsional, and axial global stiffness properties of anisogrid lattice conical shells in composite material". *Composite Structures*, Vol. 153, pp 738-745, 2016.
- [2] G. Totaro, P. Spena, G. Giusto, F. De Nicola, S. Kiryenko, S. Das, "Highly efficient CFRP anisogrid lattice structures for central tubes of medium-class satellites: Design, manufacturing, and performance", *Composite Structures*, Vol. 258, 113368, 2021.
- [3] F. De Nicola, G. Totaro, G. Giusto, P. Spena, "An efficient and scalable manufacturing method for CFRP lattice structures for satellite central tube and large deployable antenna boom applications", *CEAS Space Journal*, Vol. 15, Issue 1, 183-202, 2023.
- [4] Zallo, A., Grilli, A., De Nicola, F., Totaro, G., Giusto, G., Spena, P., Di Caprio, F., Mespoulet, S. "General overview of grid technology design for Vega-C interstage 2/3". In: Proc. 15th ECSSMET, Noordwijk, The Netherlands, 2018.

0 1 1 1011 11 101 0101 1110 010 10

0 01 11 101 101 01 1100



10 01 101 10 10 0 01 101 111 0

1 10 11 10 0 111 1010 0 1 11 00



101 1 10 01 11 101 101 01 1100



1 10 11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0

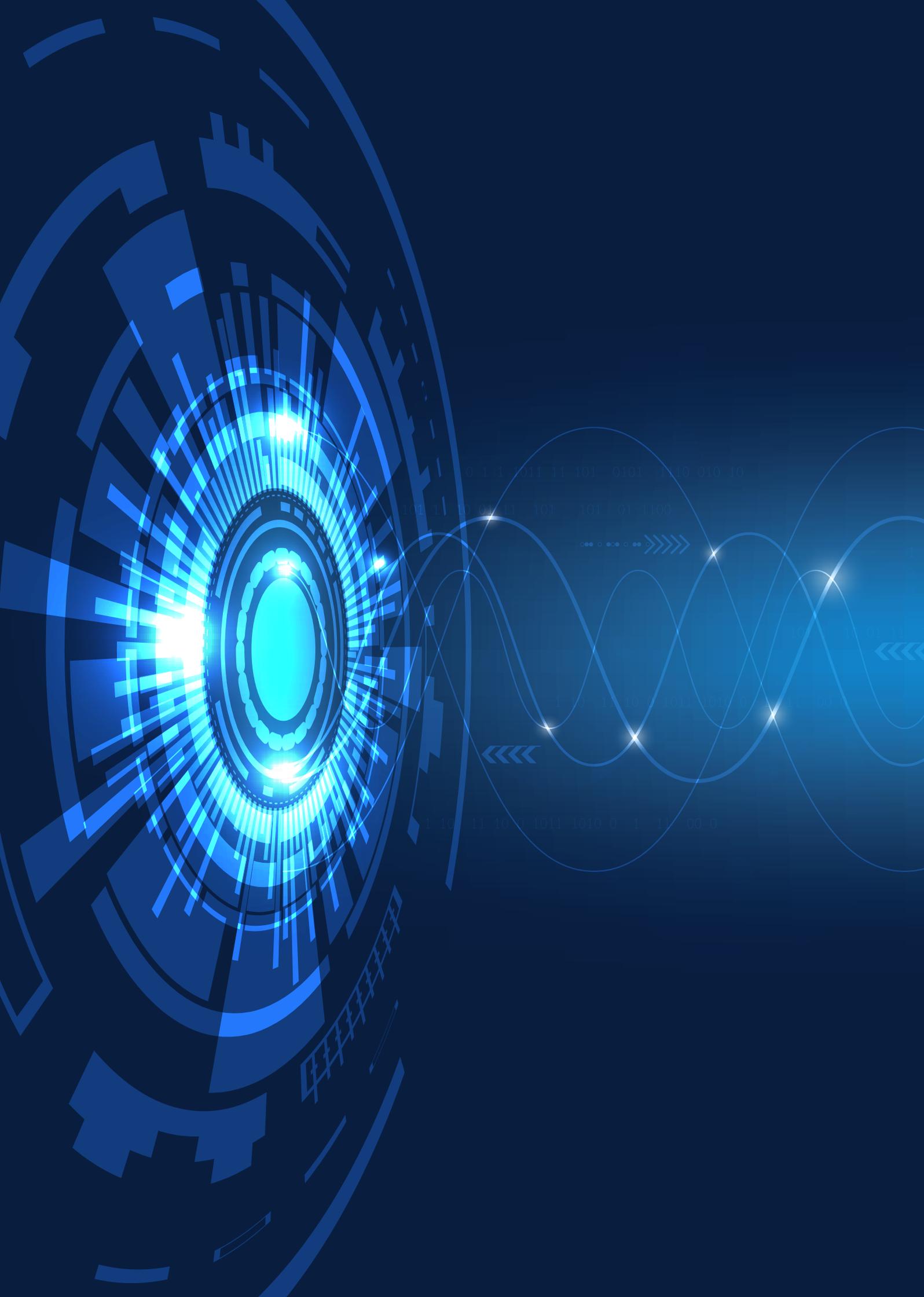


101 1 10 01 11 101 101

1 10 01 010 101 01 101 10 01 00 10 10



11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0



STATISTICHE



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 accademico, at-

tività di ricerca tecnologica dei Centri di Test della Difesa e programmi internazionali (multilaterali e bilaterali) riferita all'anno 2022 è riportata in tabella 1.

Tipologia	n. fasi successive di progetti in corso	n. nuovi progetti
PNRM	61	21
EDA	1	4
Accordi Quadro	0	2
Centri di Test	3	4
BI-MULTILATERALI	3	3

Tabella 1 - Ripartizione dei mandati effettuati nel 2022.

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 2022 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:

- cluster 1: Tecnologie innovative di *Intelligence Surveillance Reconnaissance* (ISR) e distribuzione informazioni, per mezzo di innovativi sistemi di Comando e Controllo;
- cluster 2: Sistemi autonomi, *artificial intelligence, navigation safety and security* e relativa sensoristica, sistemi autonomi di armamento;
- cluster 3: Tecnologie Satellitari;
- cluster 4: *Cyber security, Crittografia e Big Data analysis*;

- cluster 5: Potenziamento capacità e protezione del soldato/supporto al veterano;
- cluster 6: Tecnologia per la Difesa – Sensori, dispositivi, sistemi d'arma, munizionamento e materiali innovativi;
- cluster 7: Tecnologie per la sostenibilità, la resilienza energetica e le infrastrutture.

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 (cluster)	% finanziamento	Numero progetti
Tecnologie innovative di Intelligence Surveillance Reconnaissance (ISR) e distribuzione informazioni, per mezzo di innovativi sistemi di Comando e Controllo.	23,8%	5
Sistemi autonomi, artificial intelligence, navigation safety and security e relativa sensoristica, sistemi autonomi di armamento.	19,0%	4
Tecnologie Satellitari.	19,0%	4
Cyber security, Crittografia e Big Data Analysis.	14,3%	3
Potenziamento capacità e protezione del soldato/supporto al veterano.	9,5%	2
Tecnologia per la Difesa – Sensori, dispositivi, sistemi d’arma, munizionamento e materiali innovativi.	14,3%	3
Tecnologie per la sostenibilità, la resilienza energetica e le infrastrutture.	0,0%	0
TOTALE	100%	21

Tabella 2 - Ripartizione dei nuovi progetti nazionali avviati nel 2022 rispetto ai cluster capacitivi/ tecnologici prioritari indicati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa.

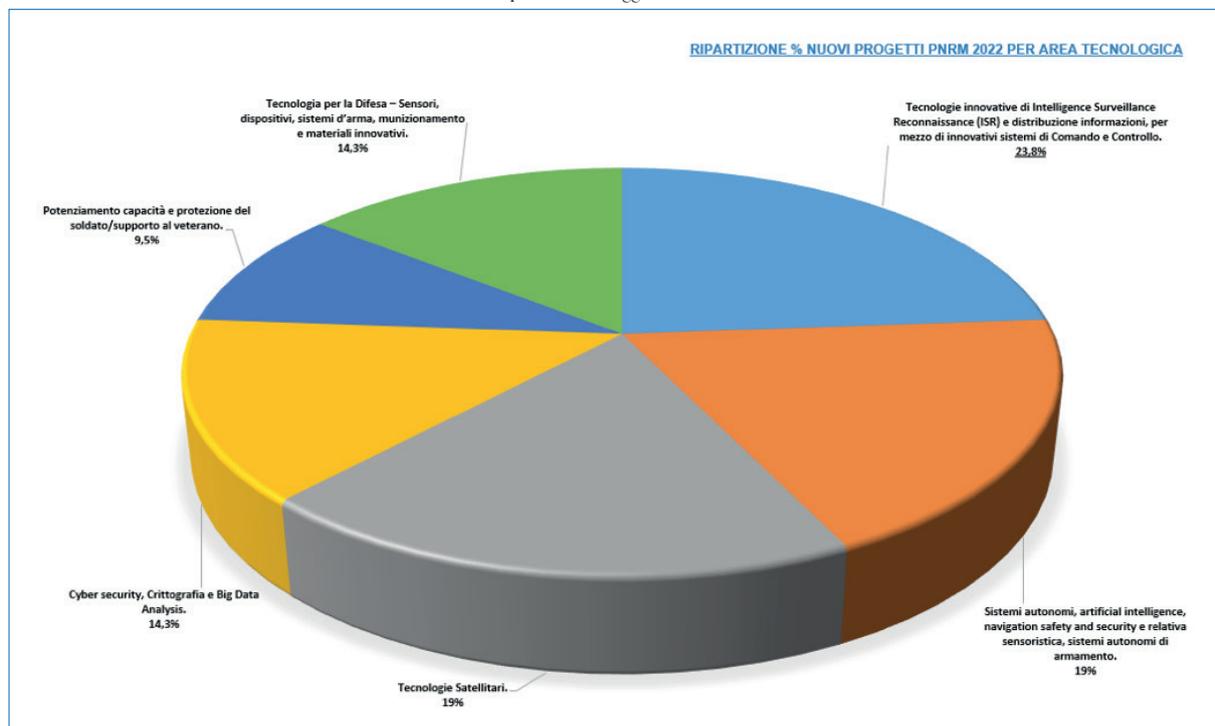


Figura 1 - Ripartizione dei nuovi progetti nazionali avviati nel 2022 rispetto ai cluster capacitivi/ tecnologici prioritari indicati dal Capo di Stato Maggiore della Difesa.

0 1 1 1011 11 101 0101 1110 010 10

0 01 11 101 101 01 1100



10 01 101 10 10 0 01 101 111 8

1 10 11 10 0 1011 1010 0 1 11 00



101 1 10 01 11 101 101 01 1100



1 10 11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0



101 1 10 01 11 101 101

1 10 01 010 101 0 101 10 01 00 10 10



11 10 0 1011 1010 0 1 11 00 0

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 OfThe 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

COORDINAMENTO EDITORIALE

Ufficio Generale del Segretario Generale e Direttore Nazionale degli Armamenti

Servizio Pubblica Informazione

Email: spi@sgd.difesa.it

PROGETTO E COORDINAMENTO GENERALE

V Reparto - Innovazione Tecnologica

Email: r5segreteria@sgd.difesa.it

SUPERVISIONE E COORDINAMENTO TECNICO-SCIENTIFICO

Ten.Col. GArn Giuliano CIOCCOLO

C.F. Andrea BERTAGNA

Ten.Col. Marco Armando IANNUZZI

COMITATO SCIENTIFICO DI REDAZIONE

C.V. [AN] Francesco A. MARCHETTI

Col. Ing. Marco AGABITI

Ten.Col. ing. Giuseppe NIFOSI

Magg.ing. Francesco CORSO

Ten.Col. Emiliano CAPPELLO

Ten.Col. Marco Armando IANNUZZI

C.F. Andrea BERTAGNA

Ten.Col. GArn Giuliano CIOCCOLO

SEGRETERIA DI REDAZIONE

Magg.ing. Antonio GULIZIA

Cap. Bruno DI PALMA

1°LGT Marco BONANNI

Ass.Amm. Rosanna AGRESTI

LGT Nicola LA NEVE

Serg.Mag. Salvatore TORRE

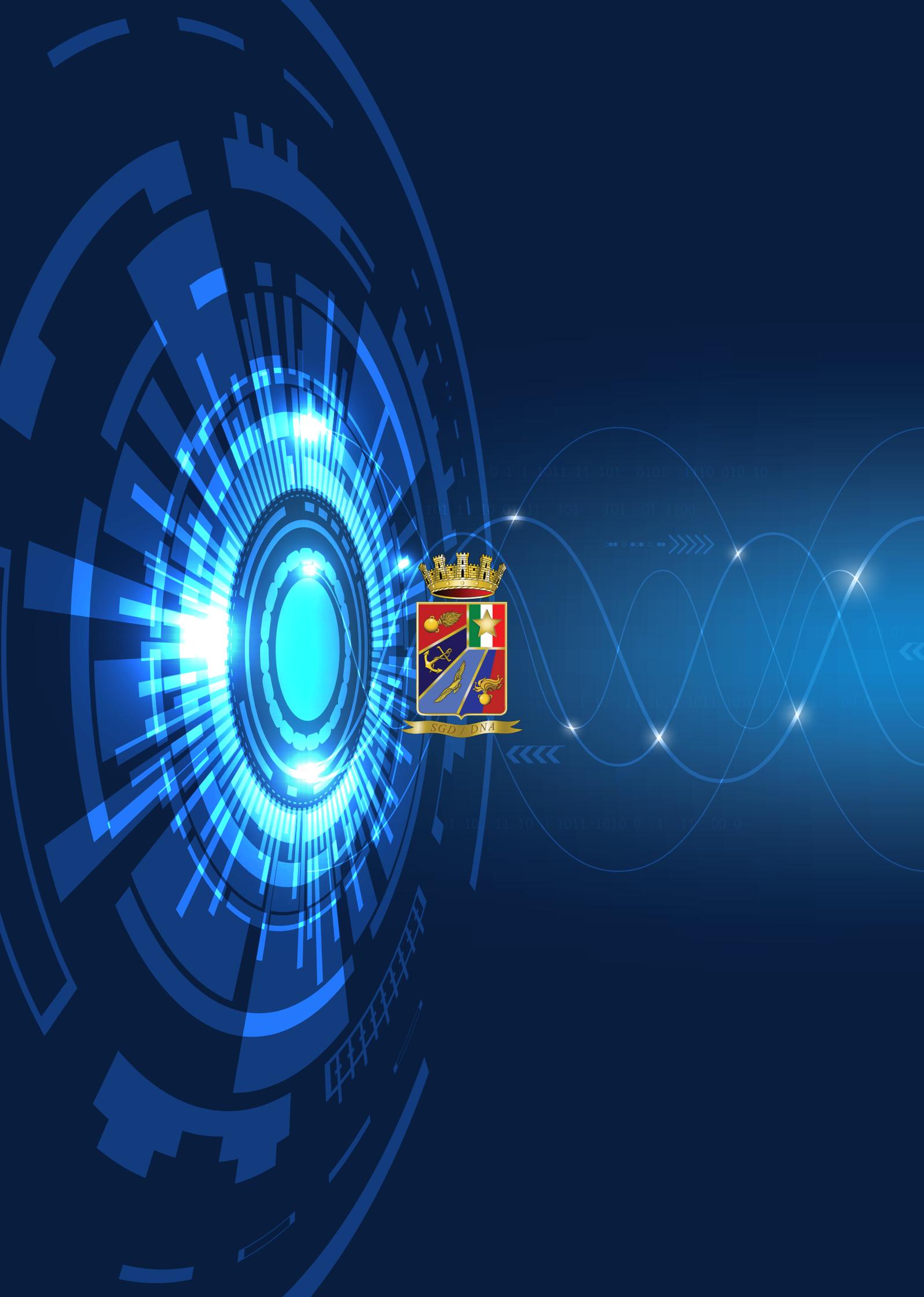
Ass.Amm. Alessandra SCOTTI

GRAFICA E STAMPA STAMPA

Tiburtini S.r.l.

GRAFICA • IMPAGINAZIONE • STAMPA

TIBURTINI 
CARATTERE TIPOGRAFICO



SGD DNA

0 1 1 011 11 101 0101 110 010 10

101 11 0 01 11 101 101 01 1100



1 10 10 10 101 101 0 1 10 10



1 10 11 10 1 1011 1010 0 1 11 00 0