



**Università
degli Studi
di Palermo**

Conferimento del titolo di
Dottore di ricerca
honoris causa in
**"Information and Communication
Technologies - ICT"**

a **Alfonso Farina**
Ingegnere elettronico

Palermo
Steri - Sala Magna
22 marzo 2024, ore 16



**Università
degli Studi
di Palermo**

Motivazione

Prof.ssa Ilenia Tinnirello

Professoressa ordinaria
Dipartimento di Ingegneria

Magnifico Rettore, Chiarissimi Colleghi, Cari Studenti, Signore e Signori,

sappiamo tutti quanto il ruolo dell'ICT (delle tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni, quali internet, il cloud, le reti cellulari, la robotica e più recentemente l'intelligenza artificiale) sia ormai strategico per il funzionamento della nostra società e della nostra economia, e come queste tecnologie abbiano contribuito alla profonda trasformazione del nostro modo di vivere e lavorare. La dipendenza vitale dalle infrastrutture ICT è diventata evidente durante l'emergenza covid-19, proprio perché grazie a queste infrastrutture siamo riusciti a mantenere molte delle nostre attività sociali e lavorative, migrandole dal mondo reale al mondo digitale.

Il **Dottorato in ICT** è per questo un programma di formazione fondamentale per lo sviluppo delle competenze necessarie per l'innovazione, per la trasformazione digitale e la preparazione di una ripresa verde e resiliente dell'economia, per la creazione di nuovi servizi capaci di trarre valore dai dati e rendere più sostenibile la gestione delle risorse in vari contesti applicativi, quali la medicina, il trasporto, l'energia, l'industria, la formazione.

A nome del Collegio del **Dottorato in ICT** del XXXVIII ciclo di cui sono Coordinatrice, sono quindi davvero onorata di proporre il conferimento del titolo di **Dottore di Ricerca in ICT** all'Ing. **Farina**, che nella sua attività professionale è stato un profondo innovatore, in grado di coniugare l'interesse per lo studio teorico e la progettazione di soluzioni allo stato dell'arte per le elaborazioni dei segnali, i sistemi elettronici, i controlli automatici, con la capacità di concepire applicazioni innovative basate sull'integrazione di queste soluzioni, con particolare riferimento alle applicazioni radaristiche.

La storia dello sviluppo delle tecnologie radar è profondamente legata alle attività di ricerca dell'Ing. **Farina**, che ha contribuito in modo significativo alla crescita delle capacità tecnologiche del nostro Paese. L'azienda **Selenia**, dove l'Ing. **Farina** ha lavorato per tanti anni come Direttore dell'unità di analisi dei sistemi integrati e come manager, è stata un centro di eccellenza mondiale per la produzione di impianti radar, sistemi di telecomunicazione di difesa e sistemi di controllo del traffico aereo. L'eredità di questi impianti è

stata raccolta da **Selex ES**, poi confluita in **Leonardo**, i cui radar per il controllo del traffico aereo sono oggi impiegati in oltre 150 paesi al mondo.

Le applicazioni dei radar moderni ci riguardano nella nostra quotidianità in modi non sempre evidenti. Le previsioni meteorologiche che consultiamo si basano sui dati raccolti da appositi radar terrestri e spaziali. I radar sono parte integrante delle nostre automobili e sono essenziali nelle missioni spaziali per rilevare e tracciare satelliti e detriti in orbita. I radar trovano applicazione anche in medicina o per la gestione delle emergenze. Le antenne utilizzate per la copertura delle **reti cellulari 5G e 6G** sono derivate dalle antenne a scansione elettronica utilizzate dai radar, senza considerare che le stesse reti cellulari integrano in maniera sempre più pervasiva capacità di comunicazione a capacità di 'sensing' ambientale (cioè capacità di rilevamento di ostacoli e persone).

Molte di queste applicazioni si basano sulle intuizioni e i contributi dell'Ing. **Farina**, che può vantare un *curriculum* e una autorevolezza riconosciuti a livello internazionale. Tra i molti contributi scientifici che potremmo citare, documentati da oltre 1.000 pubblicazioni e circa 20.000 citazioni, voglio ricordare tre lavori fondamentali, che hanno avuto un impatto significativo nella comunità scientifica sia in termini di realizzazione di nuovi sistemi di rilevamento, sia in termini di indirizzo per nuove attività di ricerca.

A poco più di dieci anni dalla laurea in Ingegneria Elettronica conseguita nel 1973 presso l'Università La Sapienza di Roma con una tesi di **controlli automatici sul filtro di Kalman** (di cui era relatore il prof. **Antonio Ruberti**), l'Ing. **Farina** ha utilizzato i risultati dei suoi studi per definire un sistema innovativo di tracciamento dei bersagli basato sull'approccio del **track while scan**, cioè della costruzione di tracce temporali delle posizioni dei bersagli da associare ad ogni oggetto rilevato, in modo da distinguerlo dagli altri. L'Ing. **Farina** ha proposto di utilizzare una stima innovativa della velocità radiale del bersaglio, legata alla misura della frequenza Doppler, per accelerare l'inizializzazione delle tracce, evitare lo scambio di tracce quando le traiettorie dei bersagli si avvicinano e ridurre il problema della generazione di false tracce. Nel lavoro viene utilizzato il **filtro di Kalman**, uno strumento molto elegante per modellare l'evoluzione di un sistema a partire dall'osservazione di misure rumorose, che ha sempre affascinato l'Ing. **Farina** per i suoi svariati campi di applicazione. L'applicazione di tecniche di filtraggio stocastico e generalizzazioni del filtro di Kalman hanno caratterizzato lungamente le attività di ricerca di **Alfonso Farina**, fino a fargli stringere un'amicizia anche personale con il suo inventore, il Professore **Rudolf Emil Kalman**.

Negli anni successivi, lo sviluppo della tecnologia phased array, di sistemi di antenne multiple coordinate in grado di effettuare una scansione dell'ambiente in modo completamente elettronico, senza muovere fisicamente le antenne, ha stimolato l'Ing. **Farina** a lavorare a nuovi algoritmi di elaborazione dei segnali basati anche sulla dimensione spaziale. La stessa dimensione spaziale è stata considerata per lo sviluppo di **radar ad apertura sintetica (SAR)**, cioè radar tipicamente installati sui aerei o satelliti che sfruttano il movimento per emulare il funzionamento di un sistema con una antenna più ampia e migliorare la risoluzione delle immagini ricostruite. L'Ing. **Farina** ha lavorato nella progettazione di algoritmi per compensare il movimento della piattaforma radar, nella simulazione del segnale **SAR** anche in modalità interferometrica, nella fusione di immagini ottenute da diverse frequenze portanti, alla realizzazione di un sistema miniaturizzato da installare a bordo di un veicolo pilotato da remoto.

L'Ing. **Farina** è anche considerato il padre del primo radar passivo italiano, basato cioè non su segnali appositamente trasmessi per il rilevamento, ma su segnali radio già presenti nell'ambiente, chiamati segnali di opportunità. L'idea anticipa i temi della sostenibilità dei sistemi ICT ed è dimostrata già nel 2004 con il primo sistema chiamato **AULOS**, basato sul riutilizzo dei segnali trasmessi per la **radio FM** e il **digital video broadcasting**. Anche in questo caso, l'impatto della nuova concezione di radar passivo e del concetto di reti di radar è stato molto più ampio dell'applicazione proposta: su questi temi si è recentemente sviluppata una attività scientifica molto intensa per molteplici applicazioni. Segnali di opportunità basati anche su reti **WiFi** o **5G** sono stati efficacemente utilizzati per rilevare la presenza di persone al di là di ostacoli, per riconoscere gesti o movimenti o persino per rilevare segnali vitali quali il respiro o il battito cardiaco.

Tantissimi altri sono i contributi alle tecniche di elaborazione dei segnali per algoritmi di fusione di dati raccolti da sensori multipli, lo sviluppo di radar cognitivi, il riconoscimento di tecniche di disturbo elettronico, che si devono all'Ing. **Farina**. Un aspetto davvero peculiare di tutta la sua attività è stato l'equilibrio perfetto tra accademia e l'industria, tra le collaborazioni con i colleghi di università italiane e straniere – davvero tantissimi – con cui ha lavorato ai fondamenti teorici, alle ottimizzazioni e alle valutazioni delle tecniche proposte, e lo sviluppo di progetti industriali per l'implementazione di sistemi basati sulle applicazioni dei risultati teorici. L'Ing. **Farina** ha anche insegnato tecniche radar all'**Università di Napoli Federico II** dal 1979 al 1985 ed è stato *Visiting Professor* presso centri di fama internazionale. In una intervista rilasciata al collega **Fulvio Gini** nel 2016 come testimonianza storica per l'Aerospace and Electronic Systems Society, l'Ing. **Alfonso Farina**

na ha dichiarato di essere orgoglioso per il modo in cui è riuscito a vendere la matematica alla base dei suoi algoritmi e a vederla operare in sistemi reali.

I risultati ottenuti dall'Ing. Farina dimostrano in modo esemplare la sua capacità di innovare e il raggiungimento degli obiettivi del nostro Dottorato in ICT

- i) l'acquisizione delle conoscenze propedeutiche allo sviluppo delle tematiche di ricerca con un approccio multidisciplinare;
- ii) la capacità di orientare ed organizzare la ricerca, tenendo conto dello stato dell'arte, delle prospettive e dei costi;
- iii) la capacità di sviluppare soluzioni innovative e l'acquisizione di metodologie per la validazione e l'analisi dei risultati delle ricerche;
- iv) la capacità di lavorare in una prospettiva internazionale. Per usare le parole dello stesso Ing. Farina *"innovare non è soltanto concepire qualcosa di nuovo, ma concepire qualcosa di nuovo i cui benefici perdurino nel tempo"*.

Per i succitati motivi, il Collegio che oggi rappresento è orgoglioso della proposta per il conferimento del titolo di **Dottore di Ricerca** all'Ing. Farina e sono lieta di invitare la commissione qui riunita ad approvare questo conferimento



Laudatio

Prof.ssa Patrizia Livreri

Professoressa Associata
Dipartimento di Ingegneria

Magnifico Rettore, Ill.mo Direttore, considero un grande onore e un vero privilegio avere avuto affidata la *laudatio* del conferimento del **Dottorato di Ricerca *honoris causa*** all'Ingegnere **Alfonso Farina**.

Il conferimento del **Dottorato di Ricerca *honoris causa*** nell'ordinamento universitario italiano è un atto straordinario, a firma del Ministro dell'Università, riservato a personalità che hanno raggiunto i più alti traguardi scientifici in una particolare area del sapere attraverso un impegno continuativo.

Alfonso Farina è nato a Petrella Salto, in provincia di Rieti, nel 1948, si è laureato in Ingegneria Elettronica nel 1973 presso l'Università Sapienza di Roma.

Nel 1974 entra in **Selenia**, azienda di **Finmeccanica** poi diventata **Selex ES**. Qui ha ricoperto il ruolo di direttore dell'unità di analisi dei sistemi integrati e poi di ingegnere capo della divisione sistemi di grandi aziende. Più recentemente, è stato Senior VP CTO dell'azienda e poi Senior Advisor del CTO. Dal 1979 al 1985 è stato anche professore "incaricato" di tecniche radar presso l'Università di Napoli.

È il Presidente della **Radar & Sensors Academy** di **Leonardo S.p.A. Divisione Elettro-nica, Italia**.

L'attività di **Alfonso Farina** abbraccia un'ampia gamma di argomenti nel settore dei radar e dei sensori. Il suo lavoro pionieristico su **track while scan**, ora ampiamente utilizzato in tutti i radar, è stato descritto in un set di due libri che per la loro diffusa rilevanza sono stati pubblicati anche con traduzioni in russo e cinese. Una sua pubblicazione più recente spiega anche idee e applicazioni sull'elaborazione adattiva del segnale radar. Ha inoltre collaborato ad un articolo sull'ECCM, invitato da **Merrill Skolnik**, nella seconda edizione del **Radar Handbook** (cap. 9) e nella terza edizione (cap. 24).

Insieme ad **Artenio Russo**, ha generalizzato i ben noti casi di fluttuazione del target di **Swerling**, essendo questi casi speciali. Insieme a **Sergio Barbarossa**, ha introdotto le

distribuzioni tempo-frequenza nell'analisi dei segnali radar ad apertura sintetica. I metodi sono utili, in particolare, per il rilevamento e l'imaging di oggetti in movimento sulla Terra, osservati da radar ad apertura sintetica aerei o spaziali. L'approccio è stato successivamente esteso ai sistemi multi-antenna, dando origine all'elaborazione spazio-tempo-frequenza. **È considerato il "padre" dei *passive radar industriali PCR italiani*.** Dal 2004 al 2014, ha guidato il team di ingegneri nell'ideazione, progettazione e implementazione di generazioni successive di sistemi radar PCL migliorati, ampiamente testati per diversi anni.

Insieme a **Hernandez e Ristic**, ha esteso la teoria e il calcolo del limite inferiore di **Cramer-Rao (PCRLB)** al caso realistico di probabilità di rilevamento inferiore a 1 e probabilità di falso allarme maggiore di 0, con applicazioni pratiche al tracciamento dei bersagli.

Insieme a **Luigi Chisci e Giorgio Battistelli** ha sviluppato il tracciamento di bersagli per sistemi radar.

Nell'ultimo decennio ha contribuito a sfruttare le sue competenze sull'elaborazione dei segnali a favore della sicurezza informatica dei sistemi integrati.

È stato organizzatore e **General Chair** della **Radar Conference IEEE-AESS 2008** tenutasi a Roma. Questa è stata la prima volta che una conferenza del genere si è tenuta al di fuori degli Stati Uniti dal suo inizio nel 1974.

Dal 2017 è presidente dell'**Italia Sezione Capitolo, IEEE AESS-10**.

Dal 2017 al 2020 ha fatto parte dell'**Editorial Board del IEEE Signal Processing Magazine**.

È Visiting Professor presso l'**University College di Londra** e la **Cranfield University** nel Regno Unito.

È attivo nella ricerca sui radar quantistici. Recentemente è stato editore associato di **IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine** per un numero speciale sul radar quantistico, pubblicato in due parti, insieme a **Marco Frasca e Bhashyam Balaji**.

Insieme a **Patrizia Livreri e David Vitali** ha pubblicato alcuni articoli scientifici sul radar quantistico a microonde basati sulla tecnologia **JTWPA** capace di far raggiungere le caratteristiche di long-range.

Farina è IEEE Fellow dal 2000 e International Fellow della Royal Academy of Engineering dal 2005, quest'ultima con la menzione *"Distinguibile per l'eccezionale e continua innovazione nello sviluppo di tecniche di elaborazione di dati e segnali radar e nell'applicazione di queste scoperte in sistemi pratici"*. Ha ricevuto il premio dalle mani del principe Filippo, duca di Edimburgo.

Dal 1997 è Fellow dello IET. Dal 2010 è anche Fellow di EURASIP. Dal 2020 è membro dell'Accademia Europea delle Scienze.

Da novembre 2020 è nominato "Académico Correspondiente de la Real Academia de Ingeniería de España".

Fa parte del Board of Governance della IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (2022-2024).

Fa parte dei Chairs dell'IEEE Aerospace and Electronic Systems Standing Committee come responsabile del "Member Service: HISTORY".

Ha vinto i seguenti premi:

Fred Nathanson Memorial Radar Award, 1987, con la motivazione: *Per lo sviluppo di tecniche di elaborazione dei dati radar*.

M. Barry Carlton Award della IEEE Aerospace and Electronic Systems Society nel 2001, 2003 e 2013. Questo premio riconosce il *miglior articolo pubblicato nell'IEEE Aerospace and Electronic Systems per l'anno in questione*.

Onorificenza di Maestro del Lavoro con la medaglia della "Stella al Merito del Lavoro" consegnatagli dal Presidente della Repubblica Italiana in *riconoscimento della sua eccezionale carriera professionale*, 2003.

Primo Premio per l'Innovazione Tecnologica del Gruppo Finmeccanica, 2004, team leader del team vincitore, conferito dal Ministro dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca Scientifica.

Premio annuale al successo tecnico del gruppo europeo 2006 da parte dell'EURASIP: per *"lo sviluppo e l'applicazione di tecniche di elaborazione adattiva del segnale nei sistemi radar pratici"*.

Medaglia IEEE Dennis J. Picard per le tecnologie e le applicazioni radar, 2010, con la motivazione: *Per contributi continui, innovativi, teorici e pratici ai sistemi radar e alle tecniche di elaborazione adattiva del segnale.*

Co-destinatario del Premio Oscar Masi per il radar “verde” AULOS da parte dell’Associazione Italiana per la Ricerca Industriale (AIRI) (2012).

Medaglia 2014 IET, con la motivazione: *Per contributi eccezionali alla progettazione di sistemi radar, all’elaborazione di segnali, dati e immagini e alla fusione dei dati.*

Premio IEEE Signal Processing Society Industrial Leader, 2017 (presentato nel 2018), con la motivazione: *Per i contributi all’elaborazione di array radar e alla leadership industriale.*

Presidente onorario dell’IEEE RadarConf 2020, Firenze.

Premio Christian Hülsmeier 2019 dell’Istituto tedesco di navigazione (DGON), con la motivazione: *In apprezzamento per il suo eccezionale contributo alla ricerca e alla formazione sui radar.*

Premio IEEE AEES Pioneer 2020, con la motivazione: *Per contributi pionieristici all’analisi, progettazione, sviluppo e sperimentazione di sistemi radar adattivi basati sul digitale.*

2023 Membro internazionale della National Academy of Engineering (NAE) degli Stati Uniti in riconoscimento di illustri contributi all’ingegneria: *Per i contributi allo sviluppo e all’implementazione di sistemi e tecnologia radar avanzati.*

2020-2024 Membro del comitato scientifico dell’IEEE Italy Chapter della Signal Processing Society.

Ad **Alfonso Farina** va tutta la riconoscenza della comunità accademica italiana per le sue intuizioni, per i suoi studi e i suoi sacrifici, che lo vedono protagonista della ricerca scientifica nel mondo, classificato nell’elenco del 2% dei migliori scienziati del mondo con più di mille pubblicazioni scientifiche, 12.978 citazioni e H-index pari a 58 (Scopus).

Ad **Alfonso Farina** va il ringraziamento da parte di tutto l'Ateneo di Palermo e del Dipartimento di Ingegneria, in particolare, per aver accettato il conferimento del **Dottorato di Ricerca *honoris causa*** in "**Information and Communication Technologies**".



**Università
degli Studi
di Palermo**

Lectio magistralis

Evolution
of Radar Systems.
A Professional
Journey

Evoluzione
dei Sistemi Radar.
Un percorso
professionale

Alfonso Farina

Ingegnere elettronico

È un grande onore per me essere oggi qui, in questa prestigiosa Università, per il conseguimento del titolo di **Dottore di Ricerca *honoris causa*** in ICT, **"Information, and Communication Technologies"**.

Vorrei ringraziare per questo straordinario riconoscimento, il prof. Massimo Midiri, Magnifico Rettore dell'Università di Palermo, il Senato Accademico, il Direttore del Dipartimento di Ingegneria prof. Antonino Valenza, il Coordinatore del Dottorato in ICT, prof.ssa Ilenia Tinnirello, e il Collegio dei Dottorati ICT.

Inoltre, il mio ringraziamento va alla prof.ssa Patrizia Livreri: a lei mi lega una lunga e proficua collaborazione scientifica e didattica.

Esprimo la mia gratitudine alla Dott.ssa Augusta Troccoli e alle colleghe del Cerimoniale.

Sono infine grato al Dott. Enrico Montaperto – Dirigente del Segretariato Generale – del Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) e al Ministro Sen. Anna Maria Bernini per aver approvato la nomina.

* * *

In questa giornata così importante per la mia vita professionale non posso non ricordare i momenti più significativi della mia vita privata, iniziando la mia presentazione con questa bellissima foto con i miei genitori¹ che mi hanno donato la vita, mi hanno amato ed aiutato generosamente e saggiamente a crescere.

Le *slides* sono in inglese, non poteva che essere così per gli argomenti tecnici (in verità un elenco non esaustivo) di cui mi sono occupato nella mia vita professionale. Tuttavia, le illustrerò in italiano.

¹ Slide 5-Lectio Magistralis completa.

Ecco il *riepilogo* di quanto illustrerò nella mia *Lectio Magistralis*. Il testo segue il corso della *Lectio Magistralis completa* (122 slides in totale):

- Prologo
- Panoramica della vita professionale
- Risultati tecnici
- *Tracking*, (in gergo tecnico, tracciamento)
- *Adaptivity* (adattività)
- Cognitività
- Radar "Verde"/Ecologico (cioè che non aumenta l'inquinamento e.m. (elettromagnetico) nell'ambiente in cui opera)
- WDD (*Waveform Diversity and Design*), gestione dello spettro e.m.
- STAP (*Space-Time Adaptive Processing*)
- SAR (*Synthetic-Aperture Radar*)
- Ruolo internazionale
- Cooperazione internazionale
- Attività editoriali
- Conferenze
- Collaborazioni con università, formazione continua e tutoraggio
- Accademia di Radar e Sensori (*Radar & Sensors Academy*)
- Premi
- Eredità culturale
- Accade nella Vita ("*Life happens*").

PROLOGO²

James Clerk Maxwell (1831-1879) fu il genio ispiratore di un'autentica rivoluzione scientifica, passando dalla meccanica newtoniana all'elettromagnetismo. Molti dei maggiori progressi tecnologici odierni sono dovuti a **Maxwell**, che creò la prima immagine fotografica a colori e sviluppò la teoria delle onde elettromagnetiche, che ha reso il telefono cellulare, la radio, **il Radar** e il GPS tutti possibili.

Recentemente, ho visitato la casa di Maxwell a Edimburgo. Ho letto ciò che scrisse **A. Einstein** sullo stipite della porta di ingresso della casa:

"... con **Maxwell** è finita un'epoca scientifica e ne è iniziata un'altra".

Notevole è anche la citazione di **Charles Coulson** (King's College di Londra, 1947):

"... la sua capacità di sviluppare modelli e matematica per modellare la realtà quando questo approccio era una novità". E, come sottolineò il fisico e matematico inglese **Sir James Hopwood Jeans** (1877-1946), "nelle sue mani l'elettricità per la prima volta divenne una scienza matematicamente esatta, e lo stesso si potrebbe dire di altre vaste aree della Fisica. In qualsiasi area abbia lavorato, ha introdotto innovazione"³.

Dopo l'articolo fondamentale: **J. C. Maxwell**, "*On Governors*"⁴, **Norbert Wiener**⁵ si è riferito a Maxwell come al padre della cibernetica.

La "*IEEE Milestone*"⁶: **Maxwell's Equations, 1860-1871**" recita come segue:

"Tra il 1860 e il 1871, nella casa di famiglia a Glenlair e al King's College di Londra, dove era professore di filosofia naturale, **James Clerk Maxwell** concepì e sviluppò la sua teoria

² Slide 7.

³ Citato in **SARKAR, T. P., SALAZAR-PALMA, M.** (2015). "Maxwell's Original Presentation of Electromagnetic Theory and Its Evolution", da Zhi Ning Chen (Ed.), *Handbook of Antenna Technologies*, Springer Science+Business Media, Singapore, 2015.

⁴ *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 16 (1867-1868), pp. 270-283.

⁵ (1894-1964) Matematico e statistico statunitense, considerato il padre della Cibernetica moderna.

⁶ Il "*Milestones Program*" è un'iniziativa del Comitato Storico dello IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), volta a riconoscere l'innovazione tecnologica e l'eccellenza a beneficio dell'umanità contenute in prodotti, servizi, articoli fondamentali e brevetti di assoluto rilievo (https://ieeemilestones.ethw.org/Main_Page).

unificata dell'elettricità, del magnetismo e della luce. Pietra angolare della fisica classica, la teoria dell'elettromagnetismo è riassunta in quattro equazioni chiave che oggi portano il suo nome. Le equazioni di Maxwell oggi sono alla base di tutte le moderne tecnologie dell'informazione e della comunicazione. Agosto 2009".

Il Radar⁷ è stato ed è tuttora uno dei maggiori successi dell'applicazione delle equazioni di J. C. Maxwell. L'invenzione del radar risale a C. Hulsmeyer (1904) e G. Marconi. La *Seconda Guerra Mondiale* fu un propulsore per la teoria, la tecnologia e i sistemi radar per un'ampia gamma di applicazioni, tra cui il controllo del traffico aereo e marittimo, le previsioni meteorologiche, le numerose applicazioni in campo civile (ad esempio, *ground penetrating radar*⁸, applicazioni per la medicina), e commerciale (ad esempio, *automotive*⁹, sorveglianza del traffico veicolare), la salute del pianeta, l'esplorazione extra planetaria e così via.

Ulteriori applicazioni del radar, sono indicate nella *slide* seguente dedotta dalla presentazione del *plenary speech*: A. Farina (speaker) and L. Timmoneri, "*Radar Technology*

RADAR TURNS INTO A VERY LARGE CUSTOMER/CONSUMER SPACE

Technology scaling has changed everything → Moore's law (IEEE Milestone: Moore's Law, 1965, date dedicated 2018/08/15) → Radar on a chip!

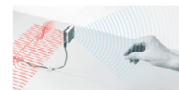
Radar technology is entering our every day life:

- Health, (low power technology at mm-wave. Bio-radiolocation is its remote and contactless nature, respiratory, sleep-apnea, touch-free vital sign monitoring & finding people under building debris, etc. Check social distancing, <https://en.wikipedia.org/wiki/Bioradiolocation>)
- BreathID: Radar's New Role in Biometrics (IEEE Systems Magazine, December 2021.
- Automotive for autonomous driving, railway radar,
- Ecology,
- Safety (Cars, bicycles, trains, ships ...),
- Monitoring (Civil infrastructure, Through wall measurement, bridges, pipes, lines, subsurface, traffic,...),
- Distributed Surveillance (banks, schools, smart cities, airports, body scanning,...),
- Industrial Measurements,
- **Personal radar torch.**
- Micro UAV sensors.

Consumer Radar-Challenges: small cheap antennas, low power circuitry, 'opportunistic' radar techniques, combined signal processing –waveform diversity techniques, information processing, networked radar techniques, mixed active-passive techniques.

Low power radar offers innovative human-machine interfaces *capable of sensing sophisticated 3D gestures*. There is a potential for a *second revolution of human-machine interfaces* following the widespread move to *touch-screen* technologies about two decades ago. **Exploitation of micro-Doppler phenomenon.**

© 2021 Leonardo - Società per azioni



After Google Soli

⁷ Slide 8.

⁸ Il *Ground Penetrating Radar* (GPR) è una metodologia per applicazioni geofisiche che usa impulsi Radar per ottenere immagini subsuperficiali. Una rilevante applicazione umanitaria di questa tecnologia è il rilevatore di mine.

⁹ Già adottato dai professionisti della multimiliardaria industria dei radar per l'*automotive* commerciale, "il Radar MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) ha i suoi vantaggi. Fondamentalmente fornisce una risoluzione angolare migliore, a parità di consumo di potenza, utilizzo di hardware e numero di antenne." Wim Van Thillo (IMEC), 2016.



and Sustainability. How to conjugate innovation and social duties", IEEE Radar Conf. 22, March 2022, New York City.

IL RACCONTO DELLA MIA VITA PROFESSIONALE CON PARTICOLARE RIGUARDO ALLE ATTIVITÀ DI R&D¹⁰ DEI SISTEMI RADAR

"The devil is in the details"¹¹: una nota frase che esprime l'idea che qualunque cosa si faccia dovrebbe essere fatta accuratamente; cioè, i dettagli sono importanti. Nessuna eccezione per i sistemi Radar.

A questo proposito, verranno, di seguito, illustrate alcune esperienze legate alla mia vita professionale. È quindi necessaria la padronanza dei molteplici aspetti del radar, delle forme d'onda e dei sistemi radar integrati, per citarne solo alcuni.

Il lavoro di ingegneria viene svolto per mitigare e compensare le fonti di errore – mai assenti – per raggiungere e mantenere durante tutta la vita di servizio le specifiche di sistema concordate con il Cliente.

La **Figura 1.a** illustra uno schema a blocchi di un moderno sistema radar. L'antenna è in generale un moderno *phased array* del tipo *Digital Array Radar (DAR)*, Il *Radar Mana-*

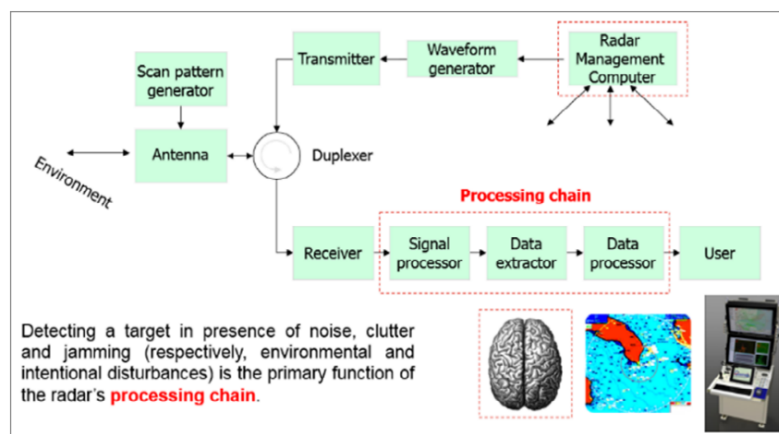


Figura 1.a: Schema di principio di un sistema Radar.

¹⁰ R&D: Research & Development.

¹¹ Slide 9.

gement Computer è il cervello dell'intero sistema. Il compito dell'ingegnere è di trovare soluzioni che limitino e mitighino le problematiche, algoritmiche e di sistema ("The devil is in the details", cioè ovunque).

La **Figura 1.b** mostra le misure che il radar effettua, ed il campo di frequenze e.m. (**Figura 1.c**) in cui opera in relazione al tipo di applicazioni. È anche importante notare che la realizzazione di un sistema Radar coinvolge un ampio spettro di tecnologie abilitanti, che richiedono la collaborazione di una rete di esperti sui numerosi stati dell'arte.

- Radar observables:**

 - Target range
 - Target angles (azimuth & elevation)
 - Target size (radar cross section)
 - Target speed (Doppler)
 - Target features (imaging)

Figura 1.b: Tipologia di misure effettuate dal Radar.

Radar Frequency Bands		
IEEE Band Designation	Frequency Range	Typical Usage
HF	3-30 MHz	Over the horizon surveillance (ionospheric propagation); long range and low resolution
VHF	50-330 MHz	Long-range (line of sight) surveillance, foliage penetration (FOPEN), counter-stealth, ground penetrating; low/medium resolution
UHF	300-1,000 MHz	Long-range surveillance, FOPEN; low/medium resolution
L	1-2 GHz	Long-range surveillance, long-range air traffic control; medium resolution and small weather effects
S	2-4 GHz	Moderate-range surveillance, terminal air traffic control, long-range weather observation, airborne early warning (AEW); moderate weather effects in heavy precipitation
C	4-8 GHz	Long-range tracking, weather observation, weapon location, long-range tracking; increased weather effects in light/medium rain
X	8-12 GHz	Short-range tracking, missile guidance, mapping marine radar, airborne intercept, battlefield surveillance, weapon location; reduced to short range operation in rain
K _u	12-18 GHz	High resolution mapping, satellite altimetry, man-portable/unmanned air vehicle (UAV) radar; short range due to water vapor absorption
K	18-27 GHz	police radar; very limited use due to high water vapor absorption
K _a	27-40 GHz	Short-range very high resolution mapping, airport surveillance; short range due to water vapor absorption
V	40-75 GHz	Scientific remote sensing, high water vapor absorption
W	75-110 GHz	Automobile cruise control (77 GHz), missile seekers, very high resolution imaging (94 GHz), high water vapor absorption elsewhere in band
mm	110-300 GHz	experimental; limited to short range due to high water vapor absorption

Figura 1.c: Bande di frequenze del Radar.

UNA PASSIONE GIOVANILE PER L'INGEGNERIA E LA RICERCA¹²

“La conquista dello spazio mi ha appassionato per la missilistica” e mi ha condotto ad un interesse precoce per l'ingegneria e la ricerca. Pubblicai il mio primo “articoletto” il 31 dicembre 1964, sulla rivista **“Oltre il Cielo: Missili e Razzi. Federazione Missilistica Europea”**. Avevo 16 anni.

A 17 anni riuscii – con la collaborazione dell'Aeronautica Militare a lanciare con successo, presso il Poligono di Furbara – vicino Roma, il razzo che avevo progettato e costruito con un gruppo di amici. All'epoca utilizzai “audacemente” la matematica e la meccanica razionale che avrei poi studiato nel triennio dell'ingegneria.

Pochi anni dopo¹³ (6 Giugno 1973) mi laureai in Ingegneria Elettronica presso l'Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, con **Antonio Ruberti**^{14, 15}, Professore di Controlli Automatici – scienziato di fama internazionale, Rettore dell'università di Roma, fondatore del ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica, Commissario Europeo per la Ricerca e lo Sviluppo Tecnologico.

La discussione della tesi riguardava il **Filtro di Kalman**¹⁶ (KF, *Kalman Filter*), un argomento che è tuttora presente in alcune delle mie attività di ricerca e sviluppo.

Alla tesi assistettero tanti amici, e la mia bellissima fidanzata **Franca**, che sarebbe poi divenuta mia moglie, condividendo 40 anni di vita insieme. Stavo svolgendo contemporaneamente il mio Servizio Militare come allievo ufficiale dell'Aeronautica Militare Italiana (alla Scuola presso le Cascine a Firenze). La fotografia in alto a destra (nella *slide* 11) mi ritrae al termine del giuramento di fedeltà alla Repubblica Italiana quando stavo per lasciare la Scuola con mio padre, mia madre e Franca.

¹² Slide 10.

¹³ Slide 11.

¹⁴ Noto, con commozione, che una delle lettere che ho ricevuto, per il conferimento odierno, mostra che i locali MUR sono presso “Largo Antonio Ruberti 1”.

¹⁵ https://www.treccani.it/enciclopedia/antonio-ruberti_%28Dizionario-Biografico%29/

¹⁶ **A. FARINA**, “July 27, 2016: Celebrating the professional life of Professor Rudolf Emil KALMAN”. *IEEE Systems Magazine of AESS News & Information*, Dec. 2016, Vol. 31, No. 12, pp. 47-49.

Immediatamente dopo, nel 1974 venni assunto in **Selenia S.p.A.**, un'Azienda tuttora *leader* (**Leonardo Company**¹⁷, con 54.000 dipendenti in tutto il mondo) nella tecnologia e nei sistemi aerospaziali.

Fin dall'inizio mi sono occupato di argomenti tecnici avanzati, dovendo quindi lavorare molto su riviste scientifiche **IEEE**¹⁸ e **IET**¹⁹, **Transactions AESS**²⁰, **Signal Processing**, **Atti di conferenze radar** e molte altre fonti scientifiche reperibili nella Biblioteca Aziendale molto attrezzata e ricca. All'epoca non c'era la possibilità della ricerca *on line* delle fonti...

Ho, inoltre, avuto la fortuna di avere grandi maestri e colleghi che hanno avuto fiducia in me e con cui ho collaborato per anni con nuove idee per concepire e realizzare nuovi sistemi per le applicazioni aerospaziali.

UNO SGUARDO SINTETICO: LA MIA VITA PROFESSIONALE, DA SELENIA A... LEONARDO Company

1974-1988: (Senior) Research Engineer, Department of System Analysis, Selenia.
1979-1985: Professor of Radar Techniques at University of Naples "Federico II," Italy.
1988-1992: Director "Synthetic Aperture Radar Laboratory" (LABSAR).
1988-2003: Manager of the System Analysis Unit and Director of Cooperation with National Universities and Research Centers.
2003-2005: Scientific Director of CTO of Alenia Marconi Systems.
2005-2009: Coordinator of R&D activities for Analysis of Integrated Systems within the Finmeccanica Group.
2005-2011: Director of Analysis of Integrated Systems and V. P. of Selex Sistemi Integrati.
2011-2012: Director of Engineering of Large Systems and Vice President of Selex ES.
2012-2013: Chief Technology Officer and Senior V. P. of Selex Sistemi Integrati.
2013-2014: Senior Advisor to CTO at Selex ES (retired).
2014-to date: Consultant Electronics Division, Leonardo Company.
October 2021-to date: President of Radar & Sensors Academy of Electronics Division of Leonardo Company.
2023-to date: President of Academy for Underwater Sensors & Systems of Electronics Division of Leonardo Company.

Figura 2: *Tabella sintetica del mio percorso professionale*²¹.

¹⁷ https://www.leonardo.com/it/home?utm_medium=paidsearch&utm_source=google_search&utm_campaign=7zIKON&gclid=EAlalQobChMtoHj8NnBgwMV4YloCR2YhQmjEAAYASAAEgJnnPD_BwE

¹⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Institute_of_Electrical_and_Electronics_Engineers

¹⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Institution_of_Engineering_and_Technology

²⁰ AESS: Aerospace and Electronic Systems Society. <https://ieee-aess.org/>

²¹ Slide 12.



Ulteriori dettagli si possono trovare nell'intervista: "*A Conversation with a Friend: A. Farina - Interviewer: Fulvio Gini*", IEEE AES Systems Magazine, June 2016, pp. 41-49, ed anche in altre interviste che ho rilasciato e registrazioni video disponibili (nella sezione "External links") su https://en.wikipedia.org/wiki/Alfonso_Farina.

Entriamo ora in qualche dettaglio dei risultati tecnici che ho ottenuto nei seguenti campi²²:

- *Tracking*,
- *Adaptivity*,
- *Cognitività*,
- *Radar Verde*,
- *WDD (Waveform Diversity and Design)*, gestione dello spettro e.m.,
- *STAP (Space Time Adaptive Processing)*,
- *SAR (Synthetic-Aperture Radar)*.

TARGET TRACKING²³

Quando venni assunto in Selenia, il cosiddetto "filtro di tracciamento *alfa-beta*" adattivo era ben consolidato e adottato con successo in una serie di sistemi pratici: ad esempio, per garantire il traffico sicuro in ambiente marittimo anche di grosse navi che avevano una lenta capacità di manovrare per effetto della loro notevole stazza. Era quindi necessario prevedere con grande anticipo il tipo di manovre eventualmente da eseguire, e di conseguenza tracciarle in modo adeguato.

"Fresco di studi" e con l'entusiasmo di progettare e vedere realizzati nuovi sistemi e con maggiori campi di applicazione, ho concepito – insieme ad altri valenti colleghi – un nuovo concetto di "***Radar Data Processing (RDP)***" basato su algoritmi di tracciamento adattivi con il filtraggio di Kalman per sfruttare anche la misurazione dello scostamento Doppler (la variazione di frequenza legata alla velocità radiale dell'oggetto in movimento

²² Slide 13.

²³ Slide 14.

rispetto al Radar), in aggiunta alle usuali misure di distanza ed angolo) in un Radar *pulse-Doppler*, sia per il tracciamento mono-radar che MultiRadar (MRT: *Multi-Radar Tracking*).

I benefici pratici erano:

- Stabilizzazione rapida della traccia del mobile,
- Evitare lo scambio di traccia (*track swapping*) in zone affollate di bersagli,
- Mitigare la nascita di false tracce, ecc.

Questi nuovi risultati sono stati pubblicati su prestigiosissime riviste internazionali (alcune mostrate nella *slide* 14).

Questi nuovi concetti di sistema sono stati messi poi in pratica. Una delle prime combinazioni di algoritmi IMM (*Interactive Multiple Model*) e MHT (*Multiple Hypothesis Tracking*) è stata impiegata per eseguire efficacemente il *tracking multi-target* di veicoli aerei. L'IMM a stato variabile (VS-IMM) è stato impiegato per l'A-SMGCS (*Advanced Surface Movement Guidance and Control System*), un sistema avanzato di guida e controllo del movimento di oggetti (aerei, macchine, autobus, etc.) sul sedime aeroportuale.

Le foto mostrate nella *slide* 15 illustrano come il sistema di controllo del traffico aereo MultiRadar – messo a punto negli anni '80 del secolo scorso non solo nella nostra nazione ma anche in altre – diventando quindi anche un successo commerciale – sia tutt'oggi operativo, in una versione ammodernata.

Le nostre intuizioni, i rigorosi sviluppi matematici e gli sviluppi pratici sono stati oggetto del primo libro mai pubblicato sul tema: *Radar Data Processing* (Vol. 1 e Vol. 2), con il compianto amico e brillantissimo collega, l'ing. Flavio Alessandro Studer. Eravamo nel 1985-1986. I due volumi ebbero un tale successo da essere pubblicati in UK e poi in USA (dall'editore John Wiley & Sons) ed infine tradotti in russo e cinese. Il libro ha **585** citazioni su Google Scholar, al 19 febbraio 2024²⁴.

Il passo successivo²⁵ fu la ricerca di algoritmi in grado di gestire modelli di misura di sensori e stati di *target* con dinamiche non lineari, nonché funzioni di densità di probabi-

²⁴ Slide 16.

²⁵ Slide 17.



lità (PDF: *Probability Density Function*) non gaussiane di rumori forzanti e sorgenti di rumore di misura.

Inoltre, si doveva operare in un'ampia varietà di ambienti (sorveglianza delle frontiere con oggetti di superficie lenti e veloci con movimento irregolare, ad esempio, *move-stop-move*, traiettorie balistiche, *sea skimming*, ecc.) e utilizzando nuove fonti di dati (IR, SAR, E/O *Radar Data Processing*²⁶, ecc.).

È stato quindi necessario ricorrere alla tecnica del *Particle Filtering* (PF). La collaborazione con il Dr. Branko Ristic (DSTO, Defence Science and Technology Organization, Australia) è stata utile in diversi casi di studio. Una pubblicazione particolarmente importante è: A. Farina, B. Ristic, D. Benvenuti, "*Tracking a ballistic target: comparison of several non linear filters*", *IEEE Trans on AES*, Vol. 38, issue no. 3, July 2002, pp. 854-867. L'articolo ha **519** citazioni su Google Scholar, al 19 febbraio 2024 (slide 17).

Questi risultati sono stati riconosciuti a livello aziendale e con premi, come ad esempio:

- "*Anti-Tactical Ballistic Missile function for Fixed Air Defence Radar (FADR) system. Having demonstrated positive business benefits, given AMS a competitive edge, or helped AMS achieve its objectives*", presented by: M. Grossi (CEO), C. Richardson (Deputy CEO), (slide 17).
- *Best Paper Award* dalla ISIF (International Society of Information Fusion). Fusion Conference 2005.

Il PF oggi ha trovato applicazioni anche in altri sistemi operativi come il radar PCL (*Passive Coherent Location*) Aulos®, di cui parlerò in seguito.

METRICS FOR TRACKING FILTERS: PCRLB (Posterior Cramer-Rao Lower Bound)²⁷

Come ingegneri siamo portati **a misurare tutto il possibile**. Requisito comune nei problemi di stima e filtraggio è prevedere e/o valutare l'entità dell'errore e la capacità di mitigarlo.

²⁶ InfraRosso, *Synthetic-Aperture Radar*, Elettro-Ottico.

²⁷ Slide 18.

Il problema è complicato in quanto i modelli di sistema e di misurazione sono generalmente non lineari con alcune incertezze intrinseche.

Una volta costruito uno stimatore candidato, la valutazione delle prestazioni degli errori è solitamente eseguita mediante simulazioni Monte Carlo. La valutazione serve a definire la qualità dello stimatore confrontando il suo errore effettivo con la previsione teorica.

La domanda fondamentale nella progettazione degli algoritmi è ***“Possiamo fare meglio?”***

Di notevole importanza è trovare un limite teorico all'entità dell'errore e confrontarlo con la prestazione di vari stimatori candidati subottimali. Il Prof. H. L. Van Trees ha introdotto per la prima volta il concetto di limite di **Cramer-Rao** (CRB, ***Cramer-Rao Bound***) per parametri casuali.

Il limite di **Cramer-Rao** afferma che la varianza di qualsiasi stimatore ***unbiased*** (“non polarizzato”, converge, in media, alla quantità da stimare) è almeno pari all'inverso dell'informazione di **Fisher**.

L'informazione di **Fisher** è un modo per misurare la quantità di informazioni che una variabile casuale osservabile trasferisce su un parametro sconosciuto o una variabile casuale. Le prestazioni di qualunque stimatore sono quindi indissolubilmente legate all'informazione disponibile o, equivalentemente, al suo inverso, cioè all'incertezza.

Nella stima/filtraggio di sistemi dinamici stocastici, è stato recentemente introdotto un nuovo metodo ricorsivo di CRB posteriore (o Bayesiano) (**PCRLB, *Posterior Cramer-Rao Lower Bound***) come valido strumento per la valutazione degli algoritmi di stima, la previsione delle prestazioni, la progettazione del sistema e la gestione delle sue risorse hardware e di calcolo.

Questo risultato è stato possibile grazie alla derivazione di un'equazione ricorsiva calcolata per la matrice d'informazione di **Fisher** (***Fisher Information Matrix***, FIM), che gioca un ruolo fondamentale nel calcolo della PCRLB.

Se il sistema e i modelli di misurazione sono lineari, con rumore gaussiano additivo, il **filtro di Kalman** è lo stimatore con l'errore quadratico medio minimo, ottenendo il limite

del PCRLB! L'equazione differenziale di Riccati²⁸ fornisce la matrice di covarianza dello stato stimato.

Nel caso del filtraggio non lineare, insieme a **Branko Ristic** (AU) e **Marcel Hernandez** (UK), abbiamo applicato la tecnica ricorsiva PCRLB in alcuni importanti esempi pratici:

- Tracciamento di un singolo bersaglio in un ambiente realistico, in cui possono verificarsi sia rilevamenti mancati ($P_d < 1$)²⁹ che falsi allarmi ($P_{fa} > 0$)³⁰. Questo caso è descritto nell'articolo (primo nel suo genere, probabilmente): **M. Hernandez, A. Farina, B. Ristic**, "A PCRLB for tracking in cluttered environments: measurement sequence conditioning approach", *IEEE TAES*, Vol. 42, issue 2, April 2006, pp. 680-704. La *slide* 20 illustra la complessità e la completezza del calcolo effettuato e la sua validità in notevoli casi pratici/operativi.
- La procedura di PRCLB è stata adottata anche per la gestione di reti di sensori integrati, in particolare sistemi multi-sensore come le reti di localizzazione coerente passiva (quindi con trasmettitori e ricevitori di opportunità variamente dislocati) (*slide* 21). A tal proposito, nelle *slides* 21 e 22 è riportato un esempio pratico relativo ad un aereo che attraversa un confine.

Le due zone hanno tipologie e disposizione di sensori differenti. Quindi il sistema di sorveglianza deve scegliere – istante per istante – la coppia trasmettitore-ricevitore che consenta di ottenere una traccia "smooth" dell'aereo in volo. Tale problema è stato risolto come mostra la figura (a destra della *slide* 22) dell'errore di stima che è più "smooth" rispetto agli altri casi.

Il picco nel termine σ_p (figura a sinistra della *slide* 22) è dovuto all'effetto della defocalizzazione della BAF (*Bistatic Ambiguity Function*), allorquando la traiettoria dell'aereo attraversa la *baseline* che connette un trasmettitore con un ricevitore.

²⁸ https://it.wikipedia.org/wiki/Jacopo_Riccati. Voce di Wikipedia relativa al Conte Jacopo Francesco Riccati (1676-1754), matematico italiano ricordato per alcune equazioni differenziali non lineari che portano il suo nome.

²⁹ *Detection probability* minore di 1.

³⁰ *False Alarm probability* maggiore di 0.

La selezione di un nuovo trasmettitore consente quindi di mitigare istante per istante questa de-focalizzazione della BAF lungo il percorso del bersaglio.

Il passo successivo è mettere insieme più sensori anche eterogenei³¹.

TRACKING MULTISENORE: VANTAGGI DELLA FUSIONE DELLE INFORMAZIONI

Così facendo, cerchiamo di imitare la Natura, ad esempio un felino a caccia di una preda (*Figura 3*).

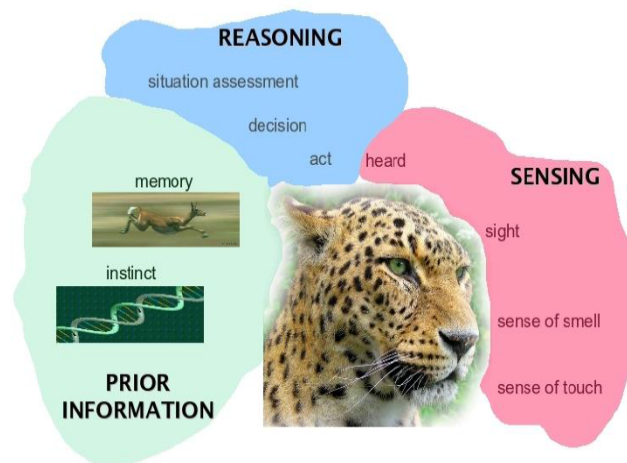


Figura 3: La fusione dei dati multi-sensore viene naturalmente eseguita da animali ed esseri umani per valutare con maggiore precisione l'ambiente circostante e identificare minacce o cibo, migliorando così in definitiva le loro possibilità di sopravvivenza (slide 23).

A tale proposito, sono state concepite le seguenti **architetture di sistemi multi-sensore**³²:

- **Centralizzata:** tutte le osservazioni di tutti i radar/sensori sono inviate al livello centrale per l'elaborazione dei dati.
- **Decentralizzata:** le osservazioni sono elaborate localmente per formare tracce a livello radar/sensore; le tracce locali sono inviate e combinate nel livello centrale.

³¹ Slide 23.

³² Slide 24.

- **Ibrida**: solo le osservazioni selezionate (*gated*) vengono inviate all'aggiornamento della traccia di livello centrale.
- **Auto-organizzata**: i sensori si scambiano informazioni tra loro e aggiornano le loro stime sulla base delle informazioni ricevute. Non esiste quindi un sistema principale, né un livello centrale.

Ecco alcune questioni pratiche da affrontare e risolvere con opportuni criteri ingegneristici:

- Necessità di un accurato allineamento dei sensori (nel tempo e nello spazio e anche nella fase se si cerca di fare la fusione a livello di "*detections*");
- Necessità di collegamenti dati con una rete di comunicazione adeguata in larghezza di banda e necessità di infrastrutture per sostenere il sistema integrato;
- Necessità di compressione dei dati se la banda non è sufficientemente larga;
- Se ci sono ritardi di trasmissione essi potrebbero comportare dati fuori sequenza;
- I sensori da integrare potrebbero avere segnali di uscita con forme diverse e potenzialmente incompatibili.

La scelta di un'architettura di fusione è solitamente un compromesso tra prestazioni e limiti pratici. (*The devil is in the details!*).

Di seguito si riportano solo due fra i numerosi sistemi di R&D affrontati³³.

- **Gruppo di Lavoro Finmeccanica sull'Analisi dei Sistemi Integrati per la Sicurezza Nazionale**, SELEX Sistemi Integrati, Controllo delle frontiere: sintesi dei risultati della collaborazione tra le società del gruppo Finmeccanica, Roma (Italia), giugno 2006. Anche questo lavoro che ha coinvolto esperti delle Aziende del Gruppo Finmeccanica, è stato ampiamente documentato, presentato al *top management* del Gruppo e premiato (*slide 25*).
- Un altro caso di studio piuttosto importante ha riguardato la messa a punto ed il test su dati di alta qualità, di un sistema di *multi-sensor tracking* (1996, in am-

³³ Slide 25.

bito NATO, NAPMA, BOEING). Si è trattato di “fondere/combinare” dati radar, dati IFF³⁴, dati ESM³⁵, dati da sistemi di comunicazioni ed ulteriori informazioni. (slide 26).

A questo proposito sono stati pubblicati due importanti articoli che affrontano un problema tecnico tuttora assai dibattuto e tecnologicamente sfidante sia per **applicazioni aerospaziali** che per sistemi che operano sotto la superficie del mare:

- **A. Farina**, “*Target tracking with bearings-only measurements*”. Signal Processing, Vol. 78, no. 1, October 1999, pp. 81-88.
- G. Oliva, **A. Farina**, and R. Setola, “*Intelligence-Aware Batch Processing for TMA with Bearings-Only Measurements*”, pp. 23, pubblicato nella rivista *Sensors* come parte della *Special Issue* intitolata “*Advances in Angle-Only Filtering and Tracking in Two and Three Dimensions*”.

Concludiamo questo argomento con una tabella di **errori del sistema di data fusion**, e quindi **un budget da mitigare** (“*devil in the details*”). È un “cantiere” sempre aperto, con lavori in corso che tendono al risultato ottimale concordato con il Cliente (slide 27).

L'ADATTIVITÀ PER L'ELABORAZIONE DEL SEGNALE RADAR³⁶

È un tema innovativo nato nell'ambito R&D. In questo caso particolare la ricerca e lo sviluppo hanno prodotto e continuano a produrre vantaggi commerciali a livello internazionale. È certamente una storia di successo che ha portato al prestigiosissimo premio: “*2004 Finmeccanica Innovation Award for Electronic Counter Counter Measure (ECCM) applied to EMPAR (European Multifunctional Phased Array Radar)*”.

Quanto segue è tratto dalla pubblicazione in inglese: **A. Farina**, L. Timmoneri, “*Adaptivity for radar signal processing: when research and business development join in a successful story*”, Histelcon 2023, Special session on “Radar History”, 12 September 2023, Florence.

³⁴ IFF: Identification Friend or Foe.

³⁵ ESM: Electronic Support Measurement.

³⁶ Slide 28



L'introduzione del *phased array* nel 1905 è dovuta al premio Nobel Karl Braun. Da allora l'elaborazione dei segnali forniti da schiere di antenne (*arrays*) ha compiuto significativi progressi. L'epoca degli *array* adattivi è stata inaugurata da Jack Capon e dal suo articolo fondamentale del 1969³⁷.

Nel 1966, un rapporto tecnico intitolato "*Phased Array Selenia. Design, Realization and First Results*" fu pubblicato dal Prof. E. Mosca, oggi Professore Emerito di controlli automatici all'Università di Firenze. Si trattava di un *array* di tipo *monopulse* per Radar di inseguimento, con i parametri indicati in *Figura 4*.



Figura 4: Il primo *phased array* di Selenia (1966) (slide 29).

Questo è stato il precursore di una lunga e variegata famiglia di Radar a *phased-arrays* che si è evoluta in oltre 50 anni. Per citarne alcuni: *phased-array* tridimensionali, fissi, mobili, terrestri, navali, a varie frequenze operative (bande S, C, X, L), conformi, planari, a più facce per coprire l'intero emisfero, etc.

Oggi il Radar *Phased-Array* – cosiddetto *fully digital* – è basato su una molteplicità di radiatori sulla superficie dell'antenna (figure a destra della *slide*). Ciascun radiatore è dotato di un proprio *Transmitter/Receiver Module* (TRM) – in pratica un piccolo radar (di alta tecnologia: *Gallium Arsenide*, *Gallium Nitride*, ADC, DAC, *Timing*, oscillatori a bassis-

³⁷ <https://www.semanticscholar.org/paper/High-resolution-frequency-wavenumber-spectrum-Capon/d9ca156e63d069ece4d8253f5106254d1424f46e>

simo *phase noise*, etc). I segnali ricevuti sono immediatamente trasformati in un flusso di bit ed inviati tramite fibra ottica ad un calcolatore per l'elaborazione.

Le prestazioni operative che si ottengono sono la multifunzionalità mediante la generazione opportuna di più fasci di radiazione simultanei, la mitigazione con alte prestazioni di interferenze naturali (riverberazione dall'ambiente: *clutter* in gergo tecnico) e intenzionali (*jammers*).

Inoltre, storicamente, c'è da ricordare un articolo pubblicato nel 1979 sulla Rivista Tecnica Selenia dal titolo: "*General purpose control system for multifunction phased array radar*", che contribuì allo sviluppo dell'allora "scheduler" dell'EMPAR (*European Multifunction Phased Array Radar*), progenitore di calcolatori per gestire in modo efficace le molte funzioni radar eseguite nel tempo tenendo conto delle condizioni operative dinamiche e delle risorse radar (tempo radar e potenza) e di calcolo.

Nel dettaglio, il sistema di **Figura 4** fu il precursore di una famiglia di *phased array*. Nel 1980 avevamo Radar con *array* 2D di antenne a riflettore e trasmettitori con tubi ad onda progressiva (TWT, *Traveling Wave Tube*). Nel 1990 seguirono i Radar 3D, grazie all'uso di fasci multipli a frequenze diverse trasmessi dalla stessa antenna planare.

Dal 1991 al 1995 ci furono sviluppi fondamentali nella tecnologia dei *phased array* che portarono al radar a scansione elettronica in banda C EMPAR, che rese anche possibile "guardare attraverso" le contromisure elettroniche del nemico. L'EMPAR (**Figura 5 e 6**) è un radar multifunzione con *array* a scansione elettronica del fascio. Fu progettato per essere il principale sistema radar a bordo di navi di dimensioni medie e grandi. Il radar è in grado di effettuare coperture volumetriche complete, rilevare bersagli di superficie e a bassa quota, inseguire bersagli multipli, e trasmettere informazioni per guidare la reazione difensiva (<https://en.wikipedia.org/wiki/EMPAR>).

L'integrazione del *beamforming* adattivo digitale (A-DBF) rese l'EMPAR pienamente operativo anche in presenza di interferenza elettromagnetica (*jammers*), grazie ad una nuova metodologia di elaborazione dei dati e ad un *phased array* migliorato che permetteva la soppressione adattiva dei *jammers*. Queste innovazioni furono testate nel *Phase I EMPAR*, installato nel sito di Pratica di Mare nel periodo 1997-2000 e successivamente integrato nel *Phase II EMPAR*.

L'innovazione proveniva dal progetto, simulazione, sviluppo e test sul campo di algoritmi di elaborazione del segnale, ed incluse il progetto e l'integrazione di un *network* di

antenne capaci di generare fasci multipli. Il progetto, innovativo sia dal punto di vista algoritmico che elettrico e meccanico, consentì di raggiungere le specifiche di prestazione richieste dalla Fase II del programma PAAMS (Principal Anti Air Missile System)-FSAF (Famille des systèmes Surface-Air Futurs). I PAAMS sono nuovi sistemi d'arma capaci di reazioni auto-difensive agili e rapide, oltre alla difesa locale e navale per la fregata italo-francese Horizon e il *destroyer* britannico Type 45 <https://www.occar.int/programmes/fsaf>).

Grazie all'*upgrading* legato all'implementazione di tecniche ECCM (*Electronic Counter-Counter Measures*), EMPAR fu in grado di rilevare la presenza di bersagli e stimare la loro direzione d'arrivo tramite la soppressione di interferenze intenzionali (come, ad esempio, il *jamming* sul lobo principale e sui lobi laterali del *pattern* di radiazione) e il *clutter*. Rispetto ai radar delle precedenti generazioni, l'antenna aveva una migliore funzionalità (un maggiore numero di fasci per la funzione ECCM) e compattezza (riduzione del volume del 50% e del peso del 20%) senza alcuna degradazione della *performance* (guadagno, direttività, livello dei lobi laterali, capacità di scansione elettronica).



Figura 4: EMPAR installato a bordo della nave italiana "Carabiniere" (slide 34).



Figura 5: EMPAR installato a bordo della nave italiana "Cavour" (slide 34).

Fra il 1995 e il 2005 il lavoro si concentrò sullo sviluppo del primo *array* attivo a scansione elettronica (**Active Electronically Scanned Array, AESA**) in banda L, con capacità di difesa da missili balistici. Successivamente fu lanciata sul mercato la famiglia moderna dei radar KRONOS. Subito dopo, dal 2006 al 2015 furono sviluppati *array* AESA scalabili, in banda C, con semiconduttori all'Arseniuro di Gallio (GaAs).

La famiglia KRONOS crebbe ulteriormente, ed è attualmente il fiore all'occhiello di **Leonardo**, oltre che un grande successo commerciale. Dal 2015, grazie a programmi supportati dalla Marina Militare Italiana, l'obiettivo principale è stato lo sviluppo del radar KRONOS *Dual-Band* che integra l'AESA KRONOS QUAD a 4 quadranti fissi, in banda C e tecnologia al Nitrato di Gallio (GaN), con l'AESA KRONOS STARFIRE in banda X.

L'ultimo arrivato della famiglia KRONOS è il POWERSHIELD in banda L, il primo dei *Digital Array Radars* che costituisce il punto più alto dell'attuale tecnologia radar. La nuova portaelicotteri italiana "*Landing Helicopter Dock (LHD) Trieste*" è equipaggiata col Kronos Powershield³⁸ (*Figura 7*).

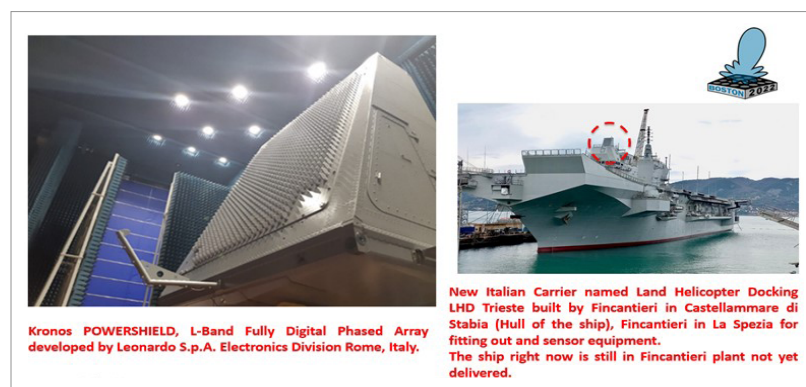


Figura 7: Kronos POWERSHIELD durante i test in campo vicino (Near Field) e installato a bordo della portaelicotteri "Trieste", costruita da Fincantieri a Castellammare di Stabia (scafo) e da Fincantieri a La Spezia (allestimento ed equipaggiamento della sensoristica) (slide 41).

³⁸ <https://electronics.leonardo.com/en/products/kronos-power-shield>

ADATTIVITÀ DEI PHASED ARRAY RADARS: UNA STORIA NELLA STORIA

Un *array* adattivo di N elementi (*Figura 8*) combina l'insieme degli N echi ricevuti dagli elementi stessi in modo che il segnale output:

- Aumenti la potenza ricevuta lungo la direzione d'arrivo del bersaglio (*Direction of Arrival, DoA*), allineando N vettori di segnale, ciascuno rappresentante (nel piano complesso) l'eco radar moltiplicato il suo corrispondente fattore di peso;
- Fornisca un nullo molto marcato lungo la DoA del *jammer* (chiudendo un poligono di N vettori di segnale);
- Riduca il livello dei lobi laterali dell'*array* in tutte le altre direzioni, minimizzando la lunghezza del risultante della combinazione lineare degli N vettori d'eco ricevuti).

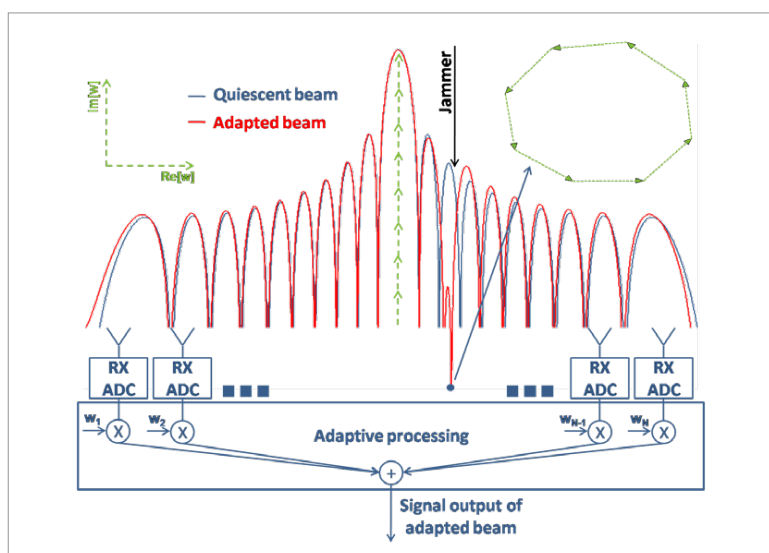


Figura 8: Principio di funzionamento di un array adattivo di antenne. RX: ricevitore, ADC: convertitore analogico-digitale, w_i : i -mo coefficiente (peso) adattivo (numero complesso) (slide 31).

Per richiamare l'introduzione della cancellazione adattiva applicata al Radar dobbiamo tornare al 1975³⁹ e ad un programma di sviluppo dei sistemi radar mostrato nel-

³⁹ Vedi slide 32, a sinistra.

la **Figura 9** a sinistra. Si trattava di un programma congiunto in collaborazione con un'azienda statunitense. Il sottosistema d'antenna consisteva in un'antenna principale e tre antenne aggiuntive a basso guadagno e fascio largo, usate per la cancellazione dei lobi laterali (*Side Lobe Cancelling, SLC*).

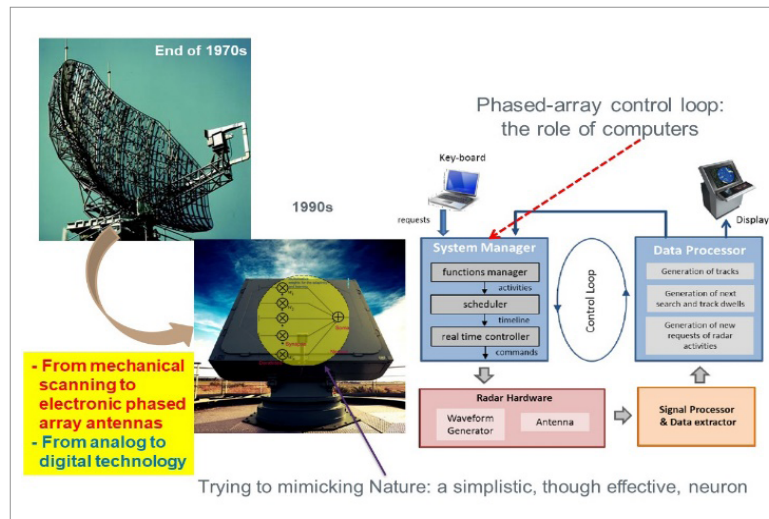


Figura 9: Evoluzione delle tecnologie: verso il radar "fully digital" e i phased array adattivi (slide 33).

A quel tempo la storia della cancellazione adattiva era agli albori. Fu affrontato e risolto il caso più semplice... ma che permise di comprendere il meccanismo adattivo: il *Single Sidelobe Canceler (SSLC)* (cioè una sola antenna ausiliaria) con tecnologia analogica. Fu descritto il suo principio di funzionamento, calcolate le prestazioni relative e pubblicato un articolo su *IEEE Transactions on AESS* nel 1977. Uno dei primi a quell'epoca.

La ricerca continuò e poi motivò la formalizzazione di una intera teoria culminata in un libro di testo⁴⁰ dove si descrivono – fra l'altro – già strutture di calcolo digitali e parallele per garantire l'adattività in real-time.

⁴⁰ A. FARINA, "Antenna Based Signal Processing Techniques for Radar Systems". Artech House, Inc., Norwood (MA), USA, 1992.

Negli anni la ricerca si è arricchita di una significativa esperienza pratica e di *benchmarking* con il collega ing. Luca Timmoneri e numerosi altri colleghi di varie specialità, che si è conclusa con una soluzione adeguata che è stata poi validata con successo sul campo.

Come già accennato, un traguardo significativo è il sistema di cancellazione adattiva del radar EMPAR, capace di cancellare simultaneamente sorgenti continue di *jamming* catturate dal lobo principale e dai lobi laterali, oltre al “*blanking*” dei lobi laterali (*Side Lobe Blanking, SLB*), per contrastare sorgenti impulsive di *jamming*. L'obiettivo è ottenere una rilevazione affidabile di bersagli immersi in *jamming* e *clutter* molto grandi, e stimare la DoA del bersaglio in queste impegnative condizioni operative (*Figura 9 e 10*).

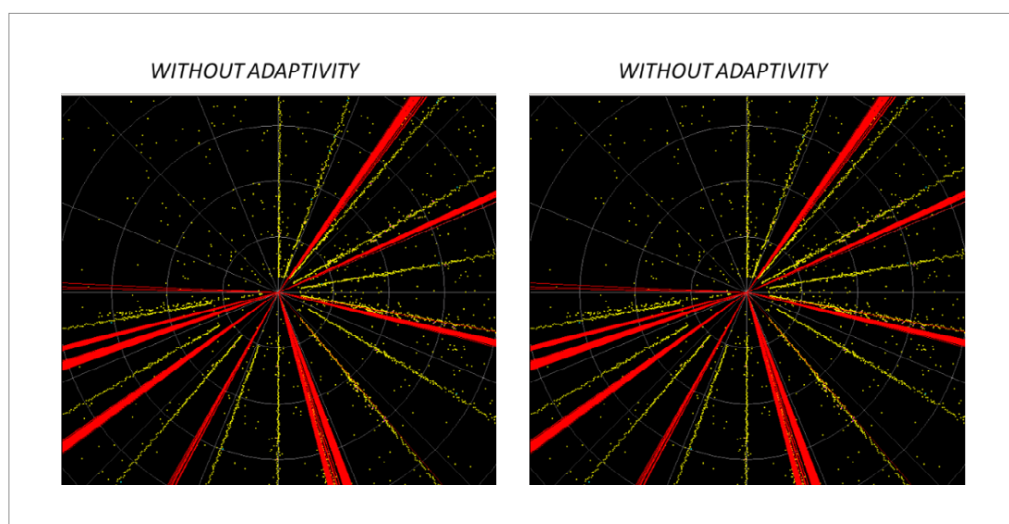


Figura 10: Adattività nei phased array. Schermate con e senza adattività al jamming (slide 40).

SVILUPPI IN CORSO - LA COGNITIVITÀ

La storia del Radar adattivo si evolve con l'integrazione di un sistema basato sulla conoscenza (*Knowledge Based System, KBS*) che utilizza dati come quelli forniti dai sistemi informativi territoriali (SIT, o GIS, *Geographic Information System*), e la conoscenza *a priori* della superficie terrestre monitorata.

In letteratura è riportata una dimostrazione della notevole *performance* in termini di CFAR (*Constant False Alarm Rate*) su dati acquisiti in tempo reale.⁴¹

L'evoluzione continua con il "Radar cognitivo", una tecnologia concepita dal Prof. S. Haykin (della McMaster University, Canada) e dal Dr. J. Guerri (USA) e descritta anche nel recente libro: A. Farina, A. De Maio, S. Haykin, (Editors), *The impact of Cognition on Radar Technology*, Scitech Publishing, an Imprint of the IET Publisher, 2017.

Inoltre, la cognitività è in grado di gestire la risorsa spettrale (Spectrum Engineering Management) per una pacifica coesistenza di altri utenti che la utilizzano.⁴²

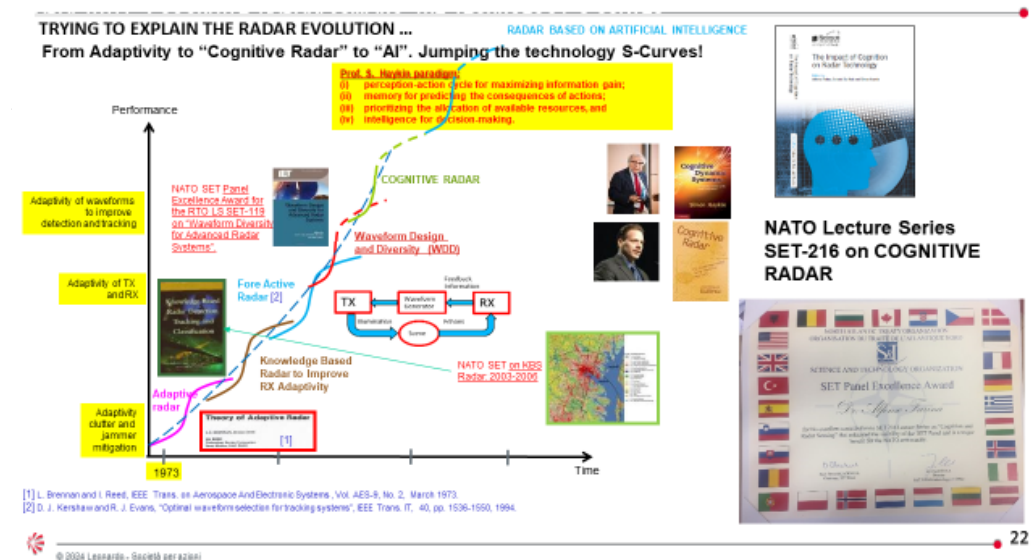


Figura 11: Radar intelligenti: dal radar adattivo al cognitivo. Le "curve ad S" della tecnologia (slides 47-48).

L'evoluzione tecnologica è rappresentata da sequenze di curve a forma di "S", tra loro concatenate, che partono dal Radar adattivo verso il Radar di tipo *knowledge-based*,

⁴¹ C. T. CAPRARO, G. T. CAPRARO, A. DE MAIO, A. FARINA, M. WICKS, "Demonstration of Knowledge-Aided Space-Time Adaptive Processing using Measured Airborne Data", *IEEE Proceedings on Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 153, no. 6, Oct. 2006, pp. 487-494.

⁴² Slides 47 e 48.

continuando con il Radar “che guarda in avanti” (*fore-active*, o *forward-looking radar*), con la diversità delle forme d’onda e il loro progetto, fino al Radar cognitivo.

Tornando al “diavolo nei dettagli”, li riassumiamo nella seguente tabella (*Figura 12*).

Environment	- clutter sources (remove before estimate jamming otherwise SLC steers null in the main beam where clutter is strong) - excessive number of interference sources as compared to the number of available auxiliary channels - multipath
Antenna	- limited gain margin between auxiliary and main antenna sidelobes - antenna rotation motion - non zero distance between phase centres of main and auxiliary antennas - rotary joint - radome
Receiver	- cables, collecting signals from the array of antennas, with not perfectly equal lengths - receiver bandwidth - mismatch (phase and amplitude) between receiving channels - noise, non-linear effects, intermodulations, temperature drifts, etc in the receivers
Digital Signal Processing	- sampling methods (Base band, IF, RF) - I & Q imbalance - limited number of A/D bits, sample/hold jitter, DC offset - limited number of processing bits - limited number of samples to estimated the interference covariance matrix - processing architecture

Figura 12: Alcune tra le principali cause limitanti per la cancellazione adattiva del jamming, che sono state mitigate con successo nei sistemi radar operativi (slides 49).

ADATTIVITÀ NEI RADAR: ESEMPI DI COOPERAZIONI INTERNAZIONALI

Una collaborazione di grande importanza è stata quella con il Ph.D. G. A. Fabrizio (DSTO, Australia). La collaborazione è stata molto produttiva, e si è concretizzata nell’applicazione dell’adattività a dati acquisiti *live* da un radar OHTR (*Over-The-Horizon Radar*) e da un Radar HFSWR (*High-Frequency Surface Wave Radar*) (slide 42). In quell’epoca fu pubblicato un importante articolo: G. Fabrizio, A. Farina,, M. Turley, “*Spatial Adaptive Subspace Detection in OTH Radar*”, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, October 2003, vol. 39, no. 4, pp. 1407-1428.

L’articolo ha ricevuto il “*M. Barry Carlton best paper award for 2003*” della rivista *IEEE-TAES*. (slide 42).

Il *signal processing* adattivo si è rivelato utile anche per altri sistemi come lo STAP (*Space-Time Adaptive Processing*), il SAR, e il PCL (AULOS®)⁴³.

⁴³ Slides 50, 51 e 52.

Altri Programmi Internazionali (1996-1999)⁴⁴: MEADS (*Medium Extended Air Defense System*), che ha meritato un altro premio aziendale (*Figura 13*).



Figura 13: Attestato di premiazione dell'MD Award 2003.

IL RADAR VERDE (GREEN RADAR), a sostegno della GREEN ECONOMY⁴⁵

Un'applicazione di successo dei *phased array* circolari è la localizzazione coerente passiva (PCL, *Passive Coherent Location*). Il Radar PCL è un sensore multi-statico che opera senza un trasmettitore dedicato, evitando così ulteriore inquinamento elettromagnetico, e riducendo l'impatto ambientale. Il PCL utilizza i cosiddetti "trasmettitori commerciali di opportunità", come la radio commerciale in modulazione di frequenza (FM), i sistemi di diffusione digitale (*Digital Audio Broadcast*, DAB), di diffusione digitale di segnali video terrestri (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial*, DVB-T), telefonia cellulare, ed altri.

⁴⁴ Slides 43 e 44.

⁴⁵ Slides 50, 51 e 52.

EVOLUZIONE DELLA FAMIGLIA DEI RADAR: 2005-2015

AULOS® è una famiglia di radar passivi FM e DVB-T sviluppati da **Leonardo S.p.A.** AULOS® è un sensore *dual-use* per l'utilizzo da parte di Clienti dei settori Difesa e Sicurezza, che ha capacità di sorveglianza aerea e marittima, e coadiuva i sistemi Radar attivi convenzionali.

Nelle applicazioni civili, AULOS® risponde alle preoccupazioni della popolazione riguardo all'inquinamento elettromagnetico, tanto da poter operare anche in aree urbane. Nelle applicazioni di difesa, offre il decisivo vantaggio di operare in modalità "covert" (slide 50). Il sistema trova utili applicazioni anche in ambito del controllo del traffico aereo, nella rilevazione e nell'inseguimento di mini-droni, nell'analisi e nella previsione delle condizioni meteorologiche per mitigare gli effetti del cambiamento climatico.

La **Figura 14** illustra due *array* circolari concentrici che operano a due differenti frequenze portanti, nella banda FM e DVB-T. L'utilizzo di due portanti differenti fornisce un'ottima copertura in termini di *range* ed una buona risoluzione.

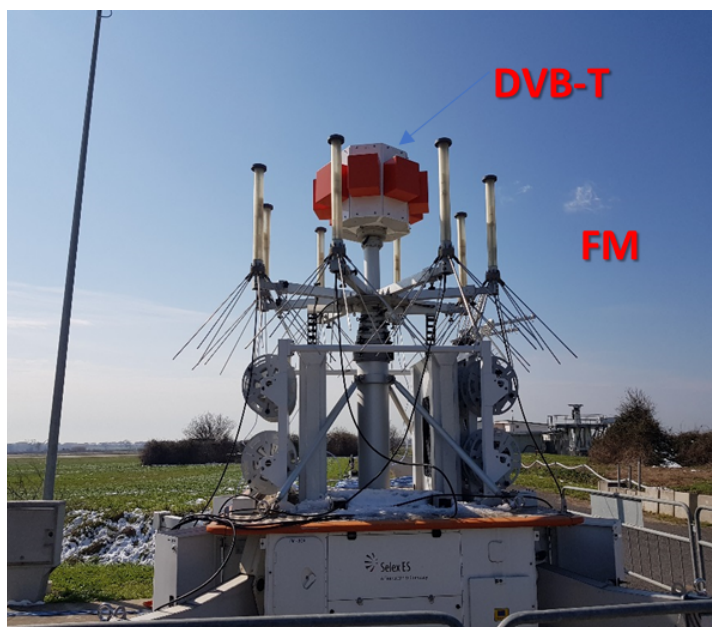


Figura 14: AULOS® con due *phased array* circolari (slides 50).

Infine, il PCL satellitare (*spaceborne*) è in linea con i nuovi sviluppi della *space economy*. Ad esempio, segnali di opportunità possono essere i segnali emessi dai satelliti delle costellazioni GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Un video che spiega in dettaglio il PCL AULOS® è stato registrato dalla IEEE TV ed è reperibile al link⁴⁶ <https://ieeetv.ieee.org/conference-highlights/green-radar-state-of-art-theory-practice-and-way-ahead>. Si tratta di **A. Farina**, conferenza plenaria "*Green radar state of art: theory, practice and way ahead*", ICASSP (*Int. Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*) 2014, Firenze, 8 maggio 2014.

STRUMENTI INGEGNERISTICI PER LA GESTIONE DELLO SPETTRO E.M.⁴⁷: MOTIVAZIONI

Il Green Radar conduce al tema dell'ingegneria per la gestione dello spettro e.m. che è ormai una "commodity".

Le motivazioni sono le seguenti:

La coesistenza tra sistemi Radar e di telecomunicazione sta attualmente diventando uno degli argomenti di ricerca rilevanti sia nelle comunità dei radar che in quelle delle comunicazioni. Considerazioni elettromagnetiche di base, come una buona penetrazione del fogliame e una bassa attenuazione della perdita del segnale e.m. lungo il percorso di propagazione, spingono alcuni sistemi di comunicazione e Radar a coesistere nella stessa banda di frequenza (ad esempio VHF e UHF).

Una possibile soluzione risiede nella progettazione della forma d'onda radar per posizionare dei nulli nello spettro del segnale emesso ottimizzando al tempo stesso le prestazioni del Radar⁴⁸.

⁴⁶ Slide 51.

⁴⁷ Slides 53-58.

⁴⁸ Anche in questo caso abbiamo disseminato quanto avevamo studiato e realizzato tenendo una lunga serie di lezioni per il SET (*Sensor and Electronic Technologies*) della NATO. Abbiamo ricevuto il "*Panel Excellence Award for the Research and Technology Organisation Lecture Series Set-119*" on "*Waveform Diversity for Advanced Radar Systems*", (2008-2010).



FORME D'ONDA RADAR PER LA "COESISTENZA SPETTRALE"

Formalmente il problema di ottimizzazione, non convessa, è mostrato in *Figura 15*.

$$\mathcal{P} \begin{cases} \max & \text{SINR} \\ \text{s.t.} & \text{spectral constraints} \\ & \text{similarity-like constraint} \\ & \text{energy constraint} \end{cases}$$

Figura 15: Il progetto della forma d'onda può essere formulato in termini di problema di ottimizzazione (slides 50).

- **Obiettivo:** ottimizzare le prestazioni del radar nella fase di *detection* (rilevazione, o deteazione).
- **Vincoli spettrali:** è necessario assicurare la coesistenza, in termini di occupazione spettrale (banda), fra sistemi radar e di telecomunicazioni.
- **Vincoli di similitudine ed energetici:** si riflettono nel controllo di alcune rilevanti caratteristiche delle forme d'onda radar.

La coesistenza spettrale è assicurata posizionando delle "*notches*" nello spettro della forma d'onda sintetizzata la cui profondità individuale è impostata in fase di progettazione per controllare la quantità di interferenza iniettata dal radar in ciascun intervallo di frequenza condiviso.

Recentemente è stato pubblicato il libro: Guolong Cui, A. De Maio, **A. Farina**, Jian Li, *Radar Waveform Design based on Optimization Theory*, IET, Scitech, 2020.

Questo libro fornisce una panoramica della sintesi delle forme d'onda radar ottenute come risultato di processi di ottimizzazione computazionale e copre i campi di applicazione più impegnativi. Il libro bilancia un punto di vista pratico con un approccio matematico rigoroso, corroborato da una ricchezza di casi di studio numerici e da alcuni esperimenti reali. Inoltre, ha un approccio interdisciplinare perché sfrutta la fertilizzazione incrociata con le recenti ricerche e scoperte nella teoria dell'ottimizzazione.

WAVEFORM DIVERSITY. I SEGNALI SONAR DI UN PIPISTRELLO - IMITARE LA NATURA COL RADAR ⁴⁹

In questo caso, è stato considerato un evento di tipo “Predatore-Preda”, simile a quello che fa un pipistrello che tenta di catturare un insetto (eco-localizzazione col suono emesso dalla sua bocca, e ricezione degli echi dalle sue orecchie). Il pipistrello, lungo la traiettoria di cattura, adatta la forma d'onda acustica trasmessa (si tratta in realtà di un *chirp* non lineare) e migliora la possibilità di cattura aumentando l'accuratezza sui valori di distanza e di scostamento Doppler che ha la capacità di misurare.

Il caso di studio del rendez-vous ⁵⁰ è stato affrontato e risolto sfruttando un punto di vista originale.

Viene descritta un'applicazione della cognitività al caso di filtraggio stocastico e controllo ottimo per una applicazione di *rendez-vous*, ovvero di predatore-preda.

Nel 1960 il Professor **Rudolf E. Kalman** pubblica il famoso articolo sul filtro che porta il suo nome. Nell'articolo, Kalman mostra anche l'esempio più noto di dualità fra stima e controllo che è valido solo per l'ipotesi LQG (*Linear Quadratic Gaussian*).

In questo caso, il controllo di guida ottimo è proporzionale alla stima ottima (ottenuta con il filtraggio stocastico) della traiettoria relativa fra predatore e preda.

Questo è un risultato importante ed è praticamente l'unico descrivibile in forma chiusa secondo la teoria del controllo ottimo di **Hamilton-Jacobi-Bellman**. Questo principio di dualità/separazione è stato esteso anche alla forma d'onda trasmessa dall'inseguitore. Il metodo è descritto nell'articolo: **A. Benavoli, A. Balleri, A. Farina**, “*Joint Waveform and Guidance Control Optimization for Target Rendezvous*”, in *IEEE Transactions on Signal Processing*, August 15, 2019, Vol. 67, Issue 16, pp. 4357-4369.

Si dimostra che il principio di dualità/separazione si applica anche al caso della forma d'onda trasmessa dall'inseguitore. Quindi, è possibile trovare analiticamente la soluzione

⁴⁹ Slide 59

⁵⁰ Slides 60 e 61.



congiunta ottimale. È un contributo originale rispetto allo stato dell'arte dove i due compiti venivano effettuati separatamente.

Nel caso di studio, l'inseguitore è un aereo dotato di radar Doppler a impulsi, l'inseguito è un altro aereo. L'inseguitore trasmette una sequenza di segnali modulati linearmemente in frequenza (cosiddetti chirp, con inviluppo gaussiano) su 20 istanti successivi corrispondenti alla durata del rendez-vous.

Durante la traiettoria il Radar adatta la pendenza del *chirp* (gestendo la risoluzione Doppler e quella temporale) cognitivamente per ottenere il *rendez-vous*. Questa strategia è ottimale e funziona meglio di altre strategie esistenti (**Figura 16**).

Nel caso in cui l'inseguitore cerca di "scappare", poiché la soluzione ottimale della forma d'onda e il problema della guida non possono essere calcolati analiticamente in forma chiusa, si ricorre al "**Model Predictive Control**" (cosiddetto "*receding horizon control*") che è stato descritto in altri articoli.

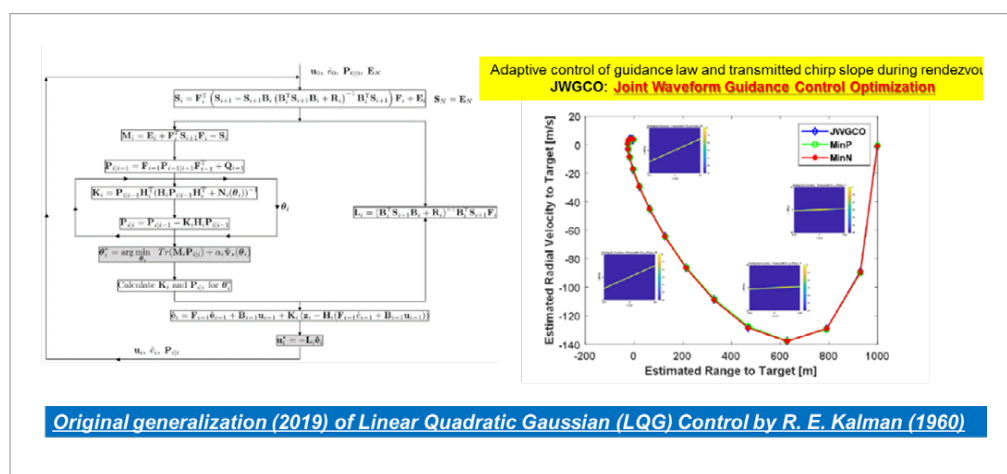


Figura 16: Imitare la natura: aspetti cognitivi nel radar per un rendez-vous tracking (slides 61).

SPACE-TIME ADAPTIVE PROCESSING (STAP) PER IL RADAR: SCOPI OPERATIVI ED IMPLEMENTAZIONE⁵¹.

STAP: La *Timeline* che ho intrapreso⁵²

1988: Fruttuosa collaborazione con il prof. S. Barbarossa (Università "La Sapienza") che ha completato il suo Dottorato di Ricerca (Ph.D.) da novembre 1987 ad agosto 1988, all'ERIM (USA), un'azienda leader nel settore R&D sul SAR⁵³.

1991-1993: Esperto tecnico dell'azienda e leader di proposte tecnico-scientifiche all'industria Grumman (USA). **Awarded R&D contract**, sponsorizzato da Mr. C. J. Draghi, Direttore della *Avionics Design, Aircraft System Division*. Preparazione e presentazione di rapporti tecnici in diversi *meetings* tenutosi a Roma e nelle *facilities* della Grumman a Bethpage, Long Island, NY. Argomento di ricerca e sviluppo: "*Real time algorithms for space-time adaptive processing for airborne radar*".⁵⁴

1992: Il primo *processing* "in casa" di dati reali STAP è descritto nell'articolo A. Farina, L. Timmoneri, "Space-time processing for AEW radar". *Proc. of IEEE International Conference on Radar 92*, Brighton (UK), 12-13 Oct. 1992, pp. 312-315.

1993-1995: Il Dr. M. Skolnik (Supervisore Radar all'NRL) ci ha fornito dati *live* da elaborare insieme al suo *team*. Il relativo articolo scientifico è stato presentato alla *International Conference on Radar, Washington D. C. (USA)*, 8-11 maggio 1995.⁵⁵

1994: Formulazione di una Teoria e di applicazioni pratiche di algoritmi STAP su architetture di *parallel processing* (in particolare, decomposizione QR ricorsiva e rotazioni di Givens, con implementazioni su una *test-board* CORDIC 2*2 e su diversi *supercomputers* disponibili in Italia, ad esempio al CNUCE di Pisa e all'IRECE di Napoli) per consentire l'inversione di matrici di covarianza delle interferenze di grandi dimensioni e mal condizionate, ottenute dallo STAP con N elementi radianti, ciascuno trasmet-

⁵¹ Slides 62-74.

⁵² Slide 63.

⁵³ Slide 70.

⁵⁴ Slide 64.

⁵⁵ Slides 65 e 66.



tente M impulsi coerenti, necessari per la rilevazione di bersagli e la formazione di immagini.

1995-2003-oggi: Questi risultati hanno avuto un notevole riconoscimento ed apprezzamento in UK, NRL (USA), MIT-LL (USA) e nella comunità R&D NATO RTO. Numerose e molto seguite **presentazioni a congressi e tutorials** (Washington DC, 1995; Edinburgh (UK), 1997; London, 1998; IEEE Radar Conference, Boston, MA, 1999; Edinburgh, Radar 2002; IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 2003 col Prof. P. Lombardo, etc.)⁵⁶. **Pubblicazioni e capitoli di libri** sono stati grandemente apprezzati dalla comunità radar internazionale.

2000: B. Billingsley (MIT-LL) mi ha fornito dati radar calibrati della cosiddetta Fase 1 per la cancellazione del *clutter* e la rilevazione di bersagli → **Barry Carlton, Best paper award for 2001.**

2006-2013: A. Aubry, A. De Maio, **A. Farina**, M. Wicks, "Knowledge-Aided (potentially cognitive) Transmit Signal and Receive Filter Design in Signal-Dependent Clutter", *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 49, no. 1 January 2013, pp. 93-117. → **Barry Carlton, Best paper award for 2013, premio ricevuto nell'aprile 2018 (slide 69).**⁵⁷

2021: L. Pallotta, **A. Farina**, G. Giunta, S. T. Smith, "Phase-Only Space-Time Adaptive Processing", *IEEE Access*, Volume 9, Nov. 2021, pp. 147250-147263.⁵⁸

Oggi: STAP SAR e NCTR⁵⁹ (la *slide* 71 mostra i sistemi attualmente operativi).

SYNTHETIC APERTURE RADAR

Il SAR è un Radar a microonde aviotrasportato o spaziale per il *mapping* ad alta risoluzione del *backscatter* elettromagnetico delle superfici sorvolate. Ha il vantaggio di fare il telerilevamento ogni tempo, cioè anche di notte e attraverso le nuvole.

⁵⁶ Vedi anche *slide* 74.

⁵⁷ *Slides* 67, 68 e 69.

⁵⁸ *Slides* 72 e 73.

⁵⁹ NCTR: *Non-Cooperative Target Recognition*.

Ecco alcuni traguardi raggiunti durante gli anni.

1985: Primo programma finanziato dall'iniziativa ESPRIT-1, EC R&D: grande successo di cooperazione tra le principali industrie europee ed alcune università (*slide 75*). Eravamo i leader di una cooperazione che coinvolse le più importanti industrie europee e università. Il programma che fu finanziato con successo si chiamava **ARTS-IP** (*Adaptive Real Time Strategies for Image Processing: a case study for satellite data*), e utilizzava immagini SAR per il monitoraggio per l'agricoltura (vigneti, ulivi, etc).

1992: Istituzione dell'iniziativa LABSAR Alenia (*slide 76*).

1999: Missione tandem SAR Interferometrico - *European Remote Sensing (ERS)* Satellite 1 & 2 (*slide 77, Figura 17*).

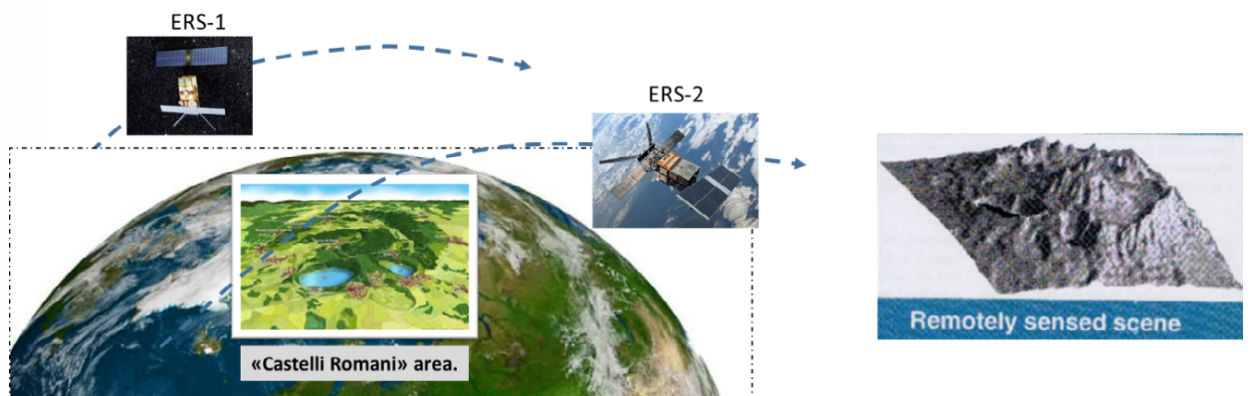


Figura 17: Costruzione dell'immagine tridimensionale dell'area dei Castelli Romani⁶⁰ con i due laghi di Albano e Nemi, generati presumibilmente dall'impatto di un meteorite avvenuti milioni di anni fa (*slides 77*)⁶¹.

⁶⁰ <https://www.visitcastelliromani.it/>

⁶¹ M. DE FAZIO, S. ESPOSITO, F. VINELLI, "Experimental activities on ERS-1 reference data set", ERS-1 Fringe Interferometry Working Group, Frascati, 12 October, 1992.

Fusione di immagini SAR: applicazione di modelli di Markov multirisoluzione⁶²

La fusione di immagini SAR fornite da diversi sensori installati su differenti piattaforme, aeree e satellitari, ed operanti a varie frequenze e con varie risoluzioni, è un rilevante problema tecnico con notevoli applicazioni pratiche. I modelli multirisoluzione di Markov sono stati applicati su dati *live* acquisiti in tempo reale, fondendo immagini SAR in multipolarizzazione, multifrequenza e multirisoluzione attraverso un filtro di Kalman multiscala (*Multiscale Kalman Filter*, MKF) e le trasformate *wavelet*. Per le immagini la frequenza della ricorsività non è il tempo come nel caso di sequenze unidimensionali temporali, ma la scala (da bassa risoluzione = tutta l'immagine, ad alta risoluzione = il pixel). Ciascun caso di studio presenta anche i risultati ottenuti dalle tecniche proposte applicate a dati reali.

L'articolo collegato a queste ricerche (G. Simone, [A. Farina](#), F.C. Morabito, S.B. Serpico, L. Bruzzone, *"Image fusion techniques for remote sensing applications"*, *Information fusion* 3 (1), 3-15) è il secondo articolo più citato nella mia pagina *Google Scholar*, con **551** citazioni al 19 febbraio 2024.

Con questo ho completato la descrizione di alcuni dei risultati tecnici da me raggiunti nel vasto campo della ricerca e sviluppo sui sistemi radar.

⁶² Slides 78-81.

RUOLO INTERNAZIONALE

Si riassumono ora brevemente le seguenti ulteriori attività:

- Ruolo internazionale (descritto nella *slide* 82).
- Cooperazione internazionale (a livello IEEE- AESS, *slide* 83).
- Cooperazione internazionale (Partecipazione a *working teams* internazionali con la NATO (*slide* 84).
- Ulteriori cooperazioni internazionali (*slide* 85).
- Cooperazione internazionale (Partecipazione e Presidenza di *working teams* internazionali in Programmi EU⁶³: un esempio nella *slide* 86).
- Attività editoriali (*editor* di *Special Issues* di riviste scientifiche e tecniche) (*slide* 87).
- Conferenze (ad *EURAD 2014* a Roma, il Prof **R. Evans** (AU) mi avvicina a scienziati del calibro di Kolmogorov e Kalman... troppo generoso!) (*slide* 88)
- Conferenze: **A. Farina** è stato organizzatore e *General Chairman* del Congresso Internazionale *2008 IEEE-AESS Radar Conference* tenutosi a Roma. Questa è stata la prima volta, dalla prima edizione nel 1974, che questo congresso si è svolto al di fuori degli Stati Uniti. Il congresso ha registrato un enorme numero di presenze: 650 da 45 nazioni (*slides* 89-91).
- Conferenze: **A. Farina** è stato *Executive Chair* del Congresso Internazionale *FUSION 2006*, Firenze (*slides* 92-93).
- Conferenze: *Honorary Chair* della *IEEE Radar Conference* - Firenze 2020... durante la pandemia (*slides* 94-95).
- Collaborazione con università, formazione continua e tutoraggio (attività riassunte nelle *slides* a pp. 96-102).
- Accademia di Radar e Sensori (*Radar & Sensors Academy*) di **Leonardo S.p.A.** (attività riassunte nelle *slides* 103-105).

⁶³ EU: *European Union* (Unione Europea).



- Premi (Attività riassunte nelle *slides* da 106 (anno 1987) a 113 (anno 2020), ed inoltre nelle *slides* 114⁶⁴ e 115⁶⁵).
- Eredità culturale: Un elenco di titoli di pubblicazioni scientifiche... le prime 1000... in un recente *opuscolo* del giugno 2023 (*slide* 116):

UN ESTRATTO DALLA PREFAZIONE DELL'OPUSCOLO⁶⁶

Lo scopo di questo opuscolo è raccogliere una lista di pubblicazioni collegate alla mia passione ed esperienza professionale che coprono più di cinquant'anni di applicazioni matematiche e di ingegneria elettronica sui temi relativi ai settori aerospaziale, civile e della difesa, con particolare riguardo ai sistemi Radar. La mia speranza è di aver tracciato un percorso scientifico mirato a fornire alle nuove generazioni di brillanti ingegneri, matematici e fisici idee innovative e creative in questo settore, e coltivare il *leitmotif* per una relazione proficua e costruttiva tra l'industria, l'università, i centri di ricerca e le agenzie governative.

Sono stato co-autore di queste pubblicazioni insieme a un gran numero di colleghi ed amici: li ringrazio di cuore per aver condiviso con me il loro tempo, la loro competenza professionale, l'entusiasmo e l'amicizia.

Ho seguito dal 1964 ad oggi un percorso che mi ha portato a creare la mia personale linea di ricerca e sviluppo, affrontando varie difficoltà. Nel far ciò, sento di aver lasciato molti "sassolini" sul mio percorso, fatti di articoli, libri e pubblicazioni. La ricostruzione della mia evoluzione scientifica -insieme a quella di altri insigni colleghi – può essere una mappa da perfezionare ed arricchire per trovare nuovi orizzonti di conoscenza. **Come sempre, le parole chiave sono competenza, lavoro duro (*no free lunch!*), e team collaborativo, compresi gli ingegneri *junior* e *senior* con formazioni professionali differenti, per favorire la "*cross-fertilization*."**

⁶⁴ Breve intervista a Rai Storia per i 70° Anniversario della ditta **Leonardo S.p.A.**

⁶⁵ National Academy of Engineering (U.S.A.) International Fellow.

⁶⁶ Mi riferisco all'opuscolo raffigurato a sinistra nella *slide* 116.

ACCADE NELLA VITA ("LIFE HAPPENS").

ACCADE che il 6 giugno 2023 io abbia festeggiato il 50° anniversario della mia laurea in Ingegneria (50 giri intorno al Sole!). Il giorno prima avevo tenuto una conferenza plenaria: *"Towards Mature AI-driven Sensing – Aspects from a Realization Perspective"*, Roma, Ordine degli Ingegneri, *Annual Meeting and celebration of PhD awards*.

ACCADE che la correlazione tra la foto del mio primo articolo sulla rivista *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* e la mia foto di oggi sia molto bassa. → 2^a Legge della Termodinamica. Entropia → Irreversibilità dei processi naturali → la Freccia del Tempo che procede inesorabilmente.

Mi sento fortunato: nondimeno, il mio entusiasmo ed il desiderio di continuare quotidianamente a cercare di scoprire *nuovi frammenti di conoscenza in tutti gli ambiti (un sottinsieme, nel mio caso)* mi ha convinto che il nostro Paese è – e dovrebbe essere sempre di più – la patria di studiosi di talento (di tutte le età) → **"Catturare informazioni"** e mitigare gli effetti della 2^a Legge della Termodinamica. In ogni caso, una battaglia senza fine.

Sono orgoglioso: Da un punto di vista ingegneristico siamo allenati a cercare nuove e più efficaci soluzioni di Sistema che mitighino sempre di più tutte le limitazioni ed i problemi pratici che rendono così difficile ed esaltante trasformare algoritmi matematici in sistemi funzionanti, che "respirano onde elettromagnetiche, onde acustiche, emissioni nell'infrarosso", e ci diano le informazioni di cui abbiamo bisogno.

Per concludere questa mia tesi, è un onore ricordare l'**UDIENZA CON PAPA FRANCESCO**⁶⁷ il 10 settembre 2022, per la Sessione Plenaria della Pontificia Accademia delle Scienze, tenutasi nella sala Clementina della Città del Vaticano.

Sono riconoscente e grato per questa memorabile opportunità.



⁶⁷ <http://www.vatican.va/content/francesco/it/speeches/2022/september/documents/20220910-plenaria-pas.html>

È il sito che contiene il "Discorso del Santo Padre Francesco ai partecipanti alla Sessione Plenaria della Pontificia Accademia delle Scienze", Sala Clementina, Sabato 10 settembre 2022.



L'ultima immagine⁶⁸ non può che essere dedicata alla mia adorata compagna di vita **Franca**, purtroppo prematuramente scomparsa. Con Lei ho condiviso 40 anni di matrimonio e 6 di fidanzamento. Sento la sua mancanza e mi rammarico di averle sottratto molto del nostro tempo, per i miei impegni professionali.

A Lei va il mio ringraziamento per avermi sempre sostenuto e per aver contribuito alla mia crescita professionale.

Ed è per questo che a Lei voglio dedicare questa giornata e questo straordinario riconoscimento.

A special mention goes to **Franca**

*"Franca is always in my
prayers and good
memories."*

*"My wish is that one day we
will meet again in the future
and stay as one forever"*

Alfonso and Franca at the gala dinner in Santo Spirito
in Sassia, May 2008, at the IEEE RADARCON, Rome.



Grazie a voi tutti.

Alfonso Farina

⁶⁸ Slide 121.

unipa.it



**Università
degli Studi
di Palermo**