



# UNIVERSITÀ DI PISA

---

## RADAR AND STATISTICAL SIGNAL PROCESSING

**GIOVANNI CORSINI**

Anno accademico

2023/24

CdS

INGEGNERIA DELLE  
TELECOMUNICAZIONI

Codice

10111

CFU

12

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
RADAR FUNDAMENTALS	ING-INF/03	LEZIONI	60	MARCO DIANI
STATISTICAL SIGNAL PROCESSING	ING-INF/03	LEZIONI	60	GIOVANNI CORSINI

### Obiettivi di apprendimento

#### *Conoscenze*

Il corso si propone di illustrare il principio di funzionamento dei sistemi radar con particolare riferimento ai radar di sorveglianza. Il radar viene illustrato sia dal punto di vista dell'ingegnere "sistemista" che ha il compito di armonizzare i diversi componenti per il conseguimento della portata richiesta sia da quello dell'analista che ha invece il compito di studiare le strategie di processing ricorrendo all'analisi delle prestazioni e alla simulazione.

#### *Modalità di verifica delle conoscenze*

La verifica delle conoscenze è resa possibile mediante esercizi e attività di laboratorio.

#### *Capacità*

Il corso intende fornire agli studenti sia le nozioni di base necessarie sia per il progetto di un sistema radar sia per ottimizzare e implementare le moderne strategie di elaborazione del segnale.

#### *Modalità di verifica delle capacità*

La verifica delle capacità è ottenuta tramite progetti da risolvere utilizzando l'ambiente di sviluppo MATLAB in cui si richiede allo studente di applicare le nozioni apprese per l'analisi e l'elaborazione di segnali radar sia acquisiti da dispositivi reali sia riprodotti mediante simulazione.

#### *Comportamenti*

Lo studente potrà acquisire e sviluppare la sensibilità relativa al progetto di sistemi radar sia studiando il dimensionamento di massima dello stesso sia realizzando algoritmi di elaborazione e verificando la loro efficacia su dati sperimentali.

#### *Modalità di verifica dei comportamenti*

Lo studente potrà valutare la sua capacità di portare avanti in autonomia la gestione di un progetto durante le attività di esercitazione.

#### *Prerequisiti (conoscenze iniziali)*

Si ritengono propedeutici gli insegnamenti di analisi matematica, algebra, fondamenti di telecomunicazioni, teoria dei segnali e DSP.

#### *Indicazioni metodologiche*

Le lezioni sono tenute mediante lucidi che coprono l'intero contenuto del corso. L'attività di laboratorio è documentata mediante il testo dei progetti da risolvere e la disponibilità di una traccia di soluzione in termini di codice MATLAB. Le esercitazioni sono anch'esse presentate tramite lucidi e rese disponibili sulla piattaforma teams insieme alle lezioni.

#### *Programma (contenuti dell'insegnamento)*

- 1. Struttura di massima del sistema radar:** Introduzione al sistema radar. Risoluzione in distanza ed in angolo. Il fenomeno Doppler. Schema di principio di un radar non coerente e di un radar coerente. Analisi del segnale mediante rappresentazione complessa. Dimensionamento del filtro a frequenza intermedia. Filtro adattato ad un impulso RF e realizzazione semplificata dello stesso. Banda equivalente di rumore del filtro adattato ad un impulso RF e *straddle loss*. Filtro adattato in rumore "colorato". Equazione del radar.
- 1. Compressione d'impulso:** Forma d'onda LFM e suo impiego per il miglioramento della risoluzione in distanza. Spettro del segnale LFM. Compressione d'impulso mediante filtro adattato. Guadagno di compressione. Uso di finestre per la riduzione dei lobi laterali e perdite associate in termini di risoluzione in distanza e di guadagno. Laboratorio: simulazione della forma d'onda LFM, analisi dello spettro e implementazione della catena di processing (filtro adattato e finestre per riduzione lobi laterali).
- 1. Radar clutter.** Il *clutter* in un sistema radar. Classificazione delle sorgenti di *clutter*. Calcolo della potenza di *clutter* da superficie in sistemi *pulse limited* e *beam limited*. Riflettività: dipendenza dalla frequenza e dall'angolo di *grazing*. Modelli di probabilità per il *clutter* da superficie: distribuzione di *Weibull* e *K*. Illustrazione di misure di *clutter* e modelli empirici (GTRI). *Clutter* volumetrico. Rapporto segnale *clutter*. Modelli per la densità spettrale di potenza del *clutter*.
- 2. Radar Doppler:** Moto del bersaglio e frequenza Doppler. Cenni ai radar CW (*Continuous Wave*). Radar MTI: cancellatore a due o più impulsi e implementazione di filtri numerici *ad hoc*. *Clutter improvement factor*. Problema delle velocità cieche e tecnica *staggered PRF*. Radar *Pulse Doppler*. Matrice dei dati. Analisi nel piano *range/Doppler* mediante FFT. Impiego di finestre per la riduzione degli artefatti dovuti ai lobi laterali. Risoluzione spettrale, perdite nel valore di picco e nello SNR, *straddle loss* e *zero padding*. FFT come banco di filtri adattati. Sbilanciamento dei rami I/Q nel demodulatore coerente. Digital I/Q. Laboratorio: implementazione della catena di processing su dati I/Q reali.
- 3. Elementi di Teoria della decisione:** Il criterio di Neyman-Pearson. Decisione basata su un singolo impulso: curve ROC e loro impiego nel dimensionamento di massima di un sistema radar. Formula empirica di Albersheim. Integrazione di M impulsi nel *Coherent Processing Interval* (CPI). Integrazione coerente (segnale perfettamente noto e noto a meno di una fase costante) e non coerente. Strategia ottima per integrazione coerente e calcolo delle ROC. Strategia ottima per integrazione non coerente e calcolo delle ROC. Formule empiriche. Fluttuazioni della RCS e modelli Swerling I, II, III, IV. Curve ROC e formula di Shnidman. Integrazione binaria. Laboratorio: implementazione dell'equazione radar e calcolo della massima distanza di scoperta da specifiche di sistema.
- 4. Tecniche CFAR:** Sensibilità delle prestazioni del decisore alla variabilità della RCS. Struttura CFAR su disturbo bianco. Finestra di stima. CA-CFAR calcolo delle ROC per bersaglio SW0 e della perdita in termini di SNR. Automascheramento dovuto ad un target esteso: finestra di guardia e suo dimensionamento. Cenni a strategie GO-CFAR, OS-CFAR Trimmed-Mean CFAR. Clutter map CFAR. Laboratorio. Illustrazione del funzionamento delle strategie CFAR in presenza di target multipli e di target estesi.
- 5. Approccio statistico al problema della stima:** stima campionaria, media campionaria e varianza campionaria. Stimatori corretti e stimatori consistenti. Stima a Massima Verosimiglianza: La definizione di verosimiglianza di un parametro deterministico incognito. Lo stimatore a massima verosimiglianza (ML) di un vettore di parametri incogniti. Stimatore congiunto di valor medio e varianza di variabili gaussiane. Verifica mediante simulazione delle prestazioni di uno stimatore. La ricerca di stimatori ottimi: Criterio a minimo MSE. Stimatori irrealizzabili. Stimatori corretti a varianza minima dell'errore di stima. Il teorema di Cramer-Rao. L'informazione di Fisher e CRLB per il caso di stimatore del valor medio e di stimatore della varianza di una variabile gaussiana. Il teorema di Cramer-Rao per vettore di parametri incogniti.
- 6. Stimatori bayesiani:** La funzione costo, il costo medio o rischio bayesiano. Il costo quadratico e derivazione dello stimatore MMSE: proprietà. Il costo assoluto e derivazione dello stimatore MMAE. Il costo Hit-Miss e derivazione dello stimatore MAP. La densità di probabilità a posteriori e la ricerca della sua moda.
- 7. Stimatori lineari:** Lo stimatore lineare ottimo secondo il criterio del minimo errore quadratico medio (LMMSE). Stimatore LMMSE nel caso di osservazioni multiple. Il principio di ortogonalità e sua applicazione nella ricerca dello stimatore LMMSE. Il filtro di Wiener causale e il predittore lineare ad uno o a più passi. Il problema dell'imbiancamento.
- 8. Modelli parametrici di processi aleatori:** I modelli AR(P). Equazione alle differenze per la funzione di autocorrelazione. Densità spettrale di potenza in forma complessa. Le equazioni di Yule-Walker. Il filtro imbiancante nel caso di disturbo AWGN. Calcolo delle radici della densità spettrale in forma complessa e selezione del filtro a fase minima del modello AR del segnale sommato a disturbo. Modelli ARMA(P,Q) equazione alle differenze finite per la funzione di autocorrelazione. Modelli MA(Q): funzione di trasferimento del filtro del modello, modello a soli zeri. Risposta impulsiva di tipo FIR e determinazione della funzione di autocorrelazione. Stimatori della funzione di autocorrelazione di un processo. Criteri per la scelta dell'ordine di un modello AR, il coefficiente di autocorrelazione parziale e il metodo di Levinson-Durbin. Scelta dell'ordine di un modello MA.
- 9. Stima della densità spettrale di potenza:** Stimatori non parametrici: Metodi indiretti e diretti. Il periodogramma: analisi delle proprietà di correttezza e consistenza. Metodi di Bartlett, Welch e Blackmann-Tuckey.
- 10. Metodi di predizione e filtraggio:** Modello di un sistema dinamico a variabili di stato Il filtro di Kalman scalare: Equazione di stato e equazione di misura. Calcolo del guadagno di Kalman. Prestazioni del filtro. Condizioni di funzionamento a regime del filtro di Kalman. Modelli di sistemi vettoriali. Il filtro di Kalman vettoriale. Esempio dell'applicazione del filtro di Kalman al tracking di un bersaglio.

#### Bibliografia e materiale didattico

[1] M.A. Richards, J.A. Scheer, W.A. Holm, *Principles of Modern Radar, Vol. 1 basic principles*, Scitech publishing, 2010.



## UNIVERSITÀ DI PISA

---

[2] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, McGrawHill Education, 2014.

[3] S.M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Prentice Hall, 1993.

### Indicazioni per non frequentanti

Lo studente non frequentante può seguire la struttura delle lezioni consultando il registro reso disponibile online dal docente e richiedendo i lucidi presentati o scaricandoli da Microsoft Teams creato appositamente per il corso. Lo stesso vale per le esercitazioni e le attività di laboratorio.

### Modalità d'esame

Prova orale (può richiedere l'uso dell'ambiente MATLAB).

*Ultimo aggiornamento 20/10/2023 16:46*