



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCATRONICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

SISTEMI RADAR PER LA LOCALIZZAZIONE
ED IL RICONOSCIMENTO: STATO DELL'ARTE E
ANALISI SPERIMENTALE DI APPLICAZIONI UWB.

Relatore: Ch.mo Prof. ALESSANDRO SONA

Laureando: ANDREA ZACCOMER

Matricola 588590-IMC

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

Ai miei Cari

Sommario

Molte applicazioni in ambito militare e civile (domestico e commerciale) necessitano di rilevare la presenza di “oggetti”. Operazioni di ricerca, sicurezza, sorveglianza e soccorso rappresentano quattro possibili ambiti in cui la capacità di rilevare un oggetto è fondamentale. Causa la diversità di queste applicazioni sia la natura degli ambienti in cui la misura viene eseguita sia la natura del tipo di oggetto da rilevare sono molto varie.

I sistemi RAdio Detection and Ranging (RADAR) si propongono come sistemi capaci di offrire una soluzione al problema del rilevamento. Le loro uniche caratteristiche rispetto ad altri strumenti hanno fatto sì che oggi gli apparati radar si trovino in moltissimi settori. I sistemi radar, oltre al rilevamento del target, consentono di effettuare altre due fondamentali operazioni: la localizzazione e l'identificazione. La conoscenza della sola presenza o meno di un target non è quasi mai utile se anche la sua posizione non è nota; l'identificazione è un'operazione tramite la quale sono ottenute oltre la posizione ulteriori informazioni sul target. Scopo di questo lavoro è quello di classificare i metodi di localizzazione negli apparati radar. Discorso analogo per l'operazione di identificazione: si vogliono classificare e descrivere le caratteristiche e le modalità su cui si basa l'identificazione tramite apparati radar.

Particolare attenzione è data ai sistemi radar impieganti segnali Ultra Wideband. Ulteriore obiettivo del lavoro di tesi è quello di testare il funzionamento e le potenzialità di un sistema radar basato su tecnologia UWB della Time Domain, il PulsON 220.

Indice

Sommario	v
Indice	vii
Elenco delle tabelle	xi
Elenco delle figure	xiii
Introduzione	xvii
1 Sistemi Multiple Input Multiple Output: MIMO	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Introduzione ai sistemi MIMO	1
1.3 Formati: SIMO, MISO, MIMO	2
1.3.1 Terminologia SIMO, MISO, MIMO	3
1.3.2 SIMO	3
1.3.3 MISO	4
1.3.4 MIMO	4
1.3.5 SU-MIMO e MU-MIMO	4
1.4 Introduzione all'analisi teorico-matematica dei sistemi MIMO	5
1.5 Modi di utilizzo dei sistemi MIMO	7
1.6 Benefici della tecnologia MIMO	8
1.6.1 Array gain	8
1.6.2 Spatial diversity gain	8
1.6.3 Spatial multiplexing gain	8
1.6.4 Riduzione delle interferenze	9
1.7 Applicazioni dei sistemi MIMO	9
1.8 MIMO per applicazioni radar	10
1.8.1 Definizione e caratteristiche dei radar MIMO	10
1.8.2 Motivi di impiego dei radar MIMO	12
2 Sistemi Radar	15
2.1 Introduzione	15
2.2 Breve introduzione dei sistemi radar	15
2.2.1 Cenni storici	17
2.2.2 Parti base di un sistema radar	18
2.3 Informazioni disponibili da un radar	22
2.3.1 Misura del range	22
2.3.2 Misura della velocità radiale	22
2.3.3 Misure di angoli	23
2.3.4 Rapporto segnale/rumore	23

2.3.5	Dimensione e forma	24
2.4	Localizzazione in apparati radar	24
2.4.1	Direction of Arrival Methods	25
2.4.2	Time based Methods	27
2.4.3	Signal Strength Methods	30
2.5	Identificazione in apparati radar	32
2.5.1	Sistemi radar ad apertura sintetica	33
2.5.2	Sistemi radar polarimetrici	34
2.5.3	Radar operanti a più frequenze	38
2.5.4	Effetto Doppler per l'identificazione nei sistemi radar	42
3	Panoramica dei sistemi radio UWB	45
3.1	Introduzione	45
3.2	Cos'è un sistema Ultra Wideband	45
3.2.1	Cenni storici	47
3.2.2	Vantaggi dei sistemi Ultra Wideband	48
3.3	Applicazioni dei segnali Ultra Wideband	49
3.4	UWB nei radar	50
3.4.1	Vantaggi dei sistemi radar UWB	51
3.4.2	Differenze dei radar UWB	53
3.5	Linee guida per la progettazione di un radar monostatico UWB	55
3.5.1	Parametri di progettazione dell'impulso: larghezza di banda, frequenza di ripetizione e potenza di picco	56
3.5.2	Determinazione della potenza di picco in accordo allo FCC	56
4	Applicazioni di radar UWB	59
4.1	Introduzione	59
4.2	Radar UWB nel settore medico	59
4.2.1	Sperimentazioni e applicazioni	60
4.3	Radar UWB anticollisione	64
4.4	Radar UWB per la sorveglianza locale	65
4.5	Radar UWB per la discriminazione e caratterizzazione di oggetti (Object Discrimination and Characterization, ODC)	67
4.6	Radar UWB Through Wall	69
5	Dispositivo PulsON 220: descrizione e utilizzo	73
5.1	Introduzione	73
5.2	PulsON 220	73
5.2.1	Antenna BroadSpec P200.	77
5.3	Moduli software	78
5.4	Bistatic Radar Application	79
5.4.1	Interfaccia grafica del modulo BSR	80
5.4.2	Analisi sperimentale	86

5.5	System Analysis Module	92
5.5.1	Interfaccia grafica del modulo SAM	93
5.5.2	Analisi sperimentale	100
5.6	Possibili sviluppi	103
5.6.1	Sincronizzazione dei segnali	105
	Conclusioni	107
	Bibliografia	109

Elenco delle tabelle

4.1	Specifiche radar modello A.	61
4.2	Specifiche radar modello B.	61
4.3	Proprietà elettromagnetiche e anatomiche degli strati di tessuto del torace.	63
4.4	Specifiche radar di sorveglianza.	66

Elenco delle figure

1.1	Schema di un ambiente multipath.	2
1.2	Schema di un generico sistema SIMO.	3
1.3	Schema di un generico sistema MISO.	4
1.4	Schema di un generico sistema MIMO.	4
1.5	Schema di una generica trasmissione in un sistema MIMO.	5
1.6	Aspetti e compromessi in un sistema MIMO.	7
1.7	Illustrazione di un generico radar MIMO. La posizione dello m-esimo trasmettitore è data da x_m , e la posizione dello n-esimo ricevitore è dato da y_n	11
1.8	Risposta scattering coerente rispetto quella non coerente.	12
2.1	Diagramma a blocchi di un semplice radar impiegante un amplificatore di potenza come trasmettitore nella parte superiore della figura e un ricevitore supereterodina nella parte inferiore.	18
2.2	Figura a sx: forma del pencil beam; figura a dx: forma del fan beam.	19
2.3	Coordinate di un target nello spazio.	23
2.4	DoA in un array di antenne costituito da due elementi.	25
2.5	Generico schema a blocchi di un radar monostatico per la stima della distanza.	28
2.6	Generico schema a blocchi di un radar bistatico per la stima della distanza.	29
2.7	Antenna reale e antenna virtuale in un sistema radar SAR.	33
2.8	Figura a sx: onda elettromagnetica polarizzata orizzontalmente; la cresta dell'onda del campo elettrico è orientata nella direzione orizzontale (verde). Figura a dx: onda elettromagnetica polarizzata verticalmente; la cresta dell'onda del campo elettrico è orientata nella direzione verticale (arancione).	35
2.9	Immagini polarimetriche ottenute mediante radar ISAR; due co-polarizzate, hH e vV, e due cross-polarizzate, hv e vH.	36
2.10	Riflectivity di un corpo umano con polarizzazione verticale ed orizzontale in un range di 0.9-20 GHz.	38
2.11	Radar multistatico (un trasmettitore e due ricevitori) operante a più frequenze montato su di un Hummer per identificazione di target da distanza di sicurezza.	39
2.12	Spettrogramma simulato di un uomo mentre cammina. Sono visibili i singolo contributi delle diverse parti in cui il corpo umano è modellato. L'asse delle ascisse rappresenta il tempo di osservazione in s. L'asse delle ordinate la frequenza di Doppler in Hz. La scala dei colori rappresenta l'ampiezza con cui l'eco è ricevuto in dB; il rosso rappresenta la maggior intensità dell'eco mentre il blu la minore.	43
3.1	Generico impulso UWB generato mediante MATLAB. Ascissa: tempo in ns; ordinata: ampiezza normalizzata.	46

4.1	Ipotetico sistema radar UWB montato al soffitto per il monitoraggio di un paziente.	60
4.2	Quattro diversi modelli di radar UWB per applicazioni mediche. A sx: modello A; centro in basso: modello B; dx: modello C.	61
4.3	Diagramma temporali del battito cardiaco e respiratorio tramite elettrocardiogramma (rosso) e radar UWB (blu).	62
4.4	Diagramma temporali del battito cardiaco tramite elettrocardiogramma (rosso) e radar UWB (blu); il soggetto sta trattenendo il respiro.	62
4.5	A sx: diagramma del modello del ritardo temporale subito dal segnale UWB nel percorso emettitore-target-ricevitore. Asse ordinate: tempo in ns ; asse ascisse: profondità in cm . A dx: diagramma del modello dell'attenuazione subita dal segnale UWB nel percorso emettitore-target-ricevitore. Asse ordinate: potenza in dB ; asse ascisse: profondità in cm	64
4.6	Radar UWB SRR in funzione per il rilevamento di un'autovettura vicina.	65
4.7	Processo di predizione della traiettoria di ostacoli mobili. La maggior risoluzione messa a disposizione dalla tecnologia UWB permette una predizione della traiettoria migliore (figura a sx) in confronto ai risultati ottenuti da sistemi radar convenzionali.	65
4.8	Sx: Luogo del test. Centro: immagine parziale dell'apparato radar. Dx: schematizzazione del ambiente di test.	66
4.9	Generico schema rappresentante un test di sorveglianza di un "target" tramite radar UWB.	67
4.10	Sx: uscita del segnale radar in risposta all'attraversamento del perimetro da parte di una persona che si sta muovendo lentamente. Centro: uscita del segnale radar in risposta all'attraversamento del perimetro da parte di due persone. Dx: uscita del segnale radar in risposta all'attraversamento del perimetro da parte di una persona che si sta muovendo velocemente.	67
4.11	Sx: sega circolare BOSCH; Dx in alto: modello dell'utensile; Dx in basso: pattern irradiato dal sensore radar.	68
4.12	Due esempi di trapani impieganti sensori radar UWB.	69
4.13	Attenuazione totale "one way" attraverso vari tipi di materiali usati nelle costruzioni. Asse delle ordinate: attenuazione dB ; asse delle ascisse: frequenza GHz	69
4.14	Immagini relative al sistema radar UWB Xavier 800.	70
4.15	Immagini relative al sistema radar UWB PRISM.	71
4.16	Utilizzo di UWB TWR per operazioni di salvataggio ostaggi da parte delle forze dell'ordine (immagine a sx) e ricerca e soccorso da parte di pompieri (immagine a dx).	71
5.1	Generico schema a blocchi di un correlatore. I segnali vengono prima moltiplicati e poi integrati.	75
5.2	Generico monociclo gaussiano nel dominio del tempo e della frequenza.	76
5.3	Antenna BroadSpec P200	77

5.4	Interfaccia grafica della finestra di controllo del modulo BSR al suo avvio. .	80
5.5	Finestra grafica Acquisition/Data Tab.	82
5.6	Finestra di comando Waveform SubTab.	83
5.7	Finestra di comando File SubTab.	83
5.8	Finestra BIT Tab.	84
5.9	Finestra grafica Detection Tab	85
5.10	Output dell'applicazione BSR: rappresentazione del segnale ricevuto. Asse y: uscita normalizzata del convertitore A/D; Asse x: finestra di osservazione temporale, in <i>bins</i> o <i>ns</i>	85
5.11	Output dell'applicazione BSR: rappresentazione della deviazione di energia. Grafico superiore: asse x numero di scansioni ricevute; asse Y deviazione percentuale dell'energia. Grafico inferiore: asse X numero di scansioni ricevute; asse Y valori discreti in 0 e 1 che rappresentano, rispettivamente, il non rilevamento ed il rilevamento.	86
5.12	Collegamento multiplo PC/PulsOn 220 utilizzando un collegamento con cavi Ethernet tramite hub e indirizzi IP multipli.	87
5.13	Rappresentazione grafica del funzionamento dell'algoritmo di rilevamento Detect 1 sul segnale da analizzare. Il disturbo viene cercato nelle aree di Guard (azzurra) e di Detect (verde) a cavallo della leading edge calcolata tramite un algoritmo di LED.	88
5.14	Uscita afflitta da continui falsi rilevamenti causati dal rumore esterno (Detect1, LED Simple).	88
5.15	Rappresentazione di un generico disturbo che affligge il sistema nel caso di algoritmi Detect 1 e LED 3. Il valore dell'energia é così alto da rendere impossibile un adattamento del valore di soglia.	89
5.16	Rappresentazione dell'uscita del sistema in risposta al passaggio di un operatore a normale velocità di camminata rilevato dal sistema (Detect1, LED4).	90
5.17	Rappresentazione grafica del funzionamento dell'algoritmo di individuazione Detect 2 sul segnale da analizzare. Il disturbo viene cercato nelle area di Detect (verde) ad una certa distanza dalla leading edge calcolata tramite un algoritmo di LED.	91
5.18	Rappresentazione della forma d'onda d'uscita del sistema. L'uscita è afflitta da continui falsi rilevamenti (Detect2, LEDSimple).	91
5.19	Interfaccia grafica della finestra di controllo del modulo SAM.	93
5.20	Finestra grafica Setup tab del modulo SAM.	94
5.21	Finestra Acquisition Tab del modulo SAM.	96
5.22	Finestra Data Tab del modulo SAM.	97
5.23	Finestra SigOpt Tab del modulo SAM.	97
5.24	Finestra Scan Tab del modulo SAM.	98
5.25	Generico segnale visualizzato mediante il software SAM. Asse delle ascisse: finestra temporale di osservazione in <i>ns</i> ; Asse delle ordinate: integrale dell'energia per ogni campione acquisito.	99

5.26 Finestra Scan Tab; evidenziata in viola area della finestra relativa alle statistiche delle trasmissioni radio.	100
5.27 Andamento forma d'onda ricevuta con trasmettitore e ricevitore distanziati di 3 m senza ostacoli. Asse delle ascisse: finestra di osservazione in ns. Asse delle ordinate: energia della forma d'onda ricevuta.	101
5.28 Andamento forma d'onda ricevuta con trasmettitore e ricevitore distanziati di 3 m con parete; offset laterale di 15 cm. Asse delle ascisse: finestra di osservazione in ns; Asse delle ordinate: energia della forma d'onda ricevuta.	102
5.29 Andamento forma d'onda ricevuta con trasmettitore e ricevitore distanziati di 3 m senza ostacoli (verde) e con parete (blu). Asse delle ascisse: finestra di osservazione in ns; Asse delle ordinate: energia della forma d'onda ricevuta.	103
5.30 Rappresentazione grafica mediante MatLab dei campioni acquisiti da misure effettuate mediante il dispositivo PulsON.	104
5.31 Range ellittico correlato ai ritardi temporali con cui i segnali giungono al ricevitore.	105

Introduzione

Una meteora nello spazio, una tubatura in una parete, un aereo nel cielo, una persona nascosta tra il fogliame, una mina sottoterra, una persona intrappolata tra le macerie sono esempi di molteplici situazioni che, a prima vista, sembrano non avere nulla che li accomuni. Le tipologie degli ambienti citati sono tra loro completamente diversi. Ambienti densi come terreno o pareti di edifici sono contraddistinti da caratteristiche che poco hanno a che vedere con ambienti rappresentati dal cielo o dallo spazio. La stessa natura degli oggetti citati presenta un'ampia diversità per quanto riguarda la loro dimensione, composizione, forma, ecc..

Un possibile collegamento tra tutti i precedenti esempi è la necessità di *rilevare*, *localizzare* ed *identificare* gli oggetti nell'ambiente in cui si trovano. Applicazioni di ricerca e studio da parte di agenzie spaziali come la NASA e l'ESA hanno come obiettivo quello di identificare determinate caratteristiche di pianeti e in generale di corpi celesti [1]. In ambito militare, l'esigenza di localizzazione ed identificazione di veicoli ostili è sempre in primo piano [2]. Per esigenze di sorveglianza e sicurezza è fondamentale localizzare e spesso identificare le persone. Il rilevamento e la localizzazione di una persona sono poi i due passi basilari in operazioni di ricerca e soccorso.

I sistemi radar rappresentano uno strumento in grado di svolgere tali tipi di operazioni. Un radar irradia nello spazio un segnale elettromagnetico. Il segnale trasmesso interagisce con l'ambiente e con gli oggetti (target) presenti. In fase di ricezione eventuali variazioni nelle caratteristiche del segnale ricevuto rispetto quello trasmesso possono rappresentare utili informazioni per il rilevamento, localizzazione e identificazione del target illuminato [3]. La grande versatilità che contraddistingue gli apparati radar e gli unici vantaggi di cui godono rispetto ad altre tecniche con gli stessi scopi hanno contribuito alla loro larga diffusione in moltissimi campi della tecnica [1].

I sistemi di visione risentono fortemente della luminosità dell'ambiente in cui lavorano: condizioni di oscurità (derivanti anche dal semplice ciclo dì-notte) peggiorano le prestazioni e l'affidabilità del dispositivo. Apparecchiature come i sensori sismici necessitano di essere collocati in prossimità delle zone di lavoro e questo non è sempre possibile. I sistemi basati su tecnologia laser permettono la scansione solamente su di un piano costringendo quindi ad eseguire molteplici scansioni per osservare completamente un ambiente tridimensionale. I sensori termici nel loro funzionamento sono limitati a lavorare con target che presentano una temperatura sostanzialmente diversa dall'ambiente in cui si trovano.

I sistemi radar non risentono di queste limitazioni. Le onde elettromagnetiche possono propagarsi con qualsiasi valore di luminosità e praticamente in tutte le condizioni atmosferiche. Inoltre i sistemi radar permettono misure anche da grandi distanze quindi senza la necessità di trovarsi in prossimità del target. Sotto certe condizioni i sistemi radar riescono ad attraversare ostacoli solidi come pareti e muri permettendo di “vederci” attraverso. I metodi impiegati dai sistemi radar per eseguire operazioni di localizzazione e identificazione di target sono molteplici.

In questo lavoro di tesi si vuole fornire una classificazione e descrizione dei metodi per

la localizzazione. La classificazione proposta vede la distinzione in tre categorie: metodi basati sul parametro tempo, metodi basati sulla direzione di arrivo del segnale e metodi basati sul valore dell'ampiezza dell'eco di ritorno [4, 5, 6, 7, 1, 2]. Per quanto riguarda il processo di identificazione si vogliono mettere in luce quattro diverse caratteristiche sfruttate dai sistemi radar per migliorare i risultati di identificazione. L'osservazione del target da diversi punti, l'impiego di più frequenze di lavoro, le proprietà polarimetriche dei segnali, il fenomeno Doppler sono spesso utilizzati in apparecchiature radar per processi di identificazione [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Particolare attenzione è data alla localizzazione e identificazione di persone. Applicazioni di sorveglianza, ricerca e soccorso, sicurezza sul lavoro sono caratterizzati dall'avere come target delle persone. In questo campo i sistemi radar vengono spesso utilizzati unitamente a segnali di tipo Ultra Wideband.

I segnali UWB sono una tipologia di segnali, generalmente impulsivi, caratterizzati da una brevissima durata temporale e larga banda occupata in frequenza. Questa caratteristica comporta diversi vantaggi particolarmente utili in applicazioni che vedono gli essere umani presenti come target [15, 16, 17]. Durante il lavoro di tesi si è svolta un'analisi sperimentale su di un dispositivo UWB, il PulsON P220 della Time Domain. L'analisi consiste nell'utilizzo del dispositivo e dei diversi software messi a disposizione per capirne il funzionamento e testarne le funzionalità messe a disposizione. L'obiettivo finale è di comprendere se il PulsON P220 può risultare funzionale e adatto per ricerche e sperimentazioni future.

Il documento è organizzato come segue. Il Capitolo 1 descrive i sistemi MIMO, le loro diverse configurazioni e modalità di funzionamento. Mette in evidenza i vantaggi che il loro impiego comporta e fornisce un elenco di applicazioni del settore delle telecomunicazioni dove i sistemi MIMO hanno trovato spazio. Nel capitolo 1 infine si vuole indagare nella possibile applicazione dei sistemi MIMO nella tecnologia radar. Il Capitolo 2 vuole fornire una panoramica generale sui sistemi radar mettendo in evidenza le tecniche di localizzazione e identificazione. Nel Capitolo 2 sono inoltre riportate molteplici applicazioni radar presenti in letteratura che si basano sulle tecniche descritte. Il Capitolo 3 presenta un'introduzione ai segnali UWB fornendo una loro definizione ed una breve descrizione matematica. Riporta i vantaggi legati ai segnali UWB, i loro campi di applicazione ed in particolare i vantaggi e le problematiche legate ai radar UWB. Il Capitolo 4 riporta e descrive una serie di applicazioni che vedono l'impiego di sistemi radar UWB per diverse finalità. In conclusione il Capitolo 5 è composto da una descrizione sia hardware che software del dispositivo PulsON. Riporta inoltre le modalità di svolgimento ed i risultati dei test e delle misure effettuate.

Sistemi Multiple Input Multiple Output: MIMO

1.1 Introduzione

In questo primo capitolo si vuole fornire una panoramica generale sui sistemi Multiple Input Multiple Output (MIMO) che negli ultimi anni stanno prendendo sempre più piede nei sistemi di telecomunicazione. Si vogliono spiegare le loro diverse modalità di funzionamento e mettere in evidenza i pregi e le caratteristiche che giustificano il loro impiego rispetto le tecnologie precedenti. Infine si vuole indagare se questi sistemi sono impiegati o almeno potenzialmente utilizzabili in altri settori non interni all'area delle telecomunicazioni in senso stretto, come ad esempio i sistemi radar.

1.2 Introduzione ai sistemi MIMO

Il termine MIMO (Multiple Input Multiple Output) si riferisce all'utilizzo di antenne multiple sia in trasmissione che in ricezione in contrapposizione ai tradizionali sistemi SISO (Single Input Single Output) o ai sistemi con semplice diversità spaziale, ovvero antenne multiple solo in trasmissione oppure solo in ricezione. La tecnologia MIMO, in sistemi di tipo wireless, ha rapidamente guadagnato di popolarità negli ultimi dieci anni a causa della sua capacità di migliorare le prestazioni [18]. I guadagni in termini di prestazioni sono inerenti sia ad un miglioramento nella qualità delle trasmissioni radio e/o nell'aumento della velocità di trasmissione. Le nuove tecnologie wireless MIMO sono infatti impiegate per aumentare la capacità del collegamento e l'efficienza spettrale combinata ad un miglioramento dell'affidabilità del collegamento.

La capacità del collegamento, spesso indicato con C e misurato in bit/s rappresenta il limite superiore alla quantità di "informazione" che può essere trasmessa in maniera affidabile per un dato livello SNR (Signal to Noise Ratio) e un tasso di errore piccolo a piacere (teorema di Shannon). L'efficienza spettrale, misurata in $bit/s \times Hz$, è definita come il rapporto tra la velocità di trasmissione (espressa in termini di bit-rate) offerta all'utente da un sistema di comunicazione e la banda B di frequenze (in Hz) utilizzata per tale comunicazione. L'affidabilità è spesso definita in termini di Bit Error Rate (BER, rapporto tra bit ricevuti correttamente e bit trasmessi).

La tecnologia MIMO sfrutta a proprio vantaggio quello che prima era visto come un ostacolo alle comunicazioni: il *multipath*. Il termine multipath (in italiano molteplicità di cammini) rappresenta l'arrivo del segnale trasmesso al ricevitore voluto attraverso differenti angoli e/o differenti ritardi temporali e/o diverse frequenze (effetto Doppler) a causa della dispersione delle onde elettromagnetiche nell'ambiente [18]. Un esempio di ambiente multipath è riportato in Fig. 1.1. I segnali irradiati da una generica sorgente arrivano alla vettura, oltre che in maniera diretta, anche tramite riflessioni su terreno, edifici, vegeta-

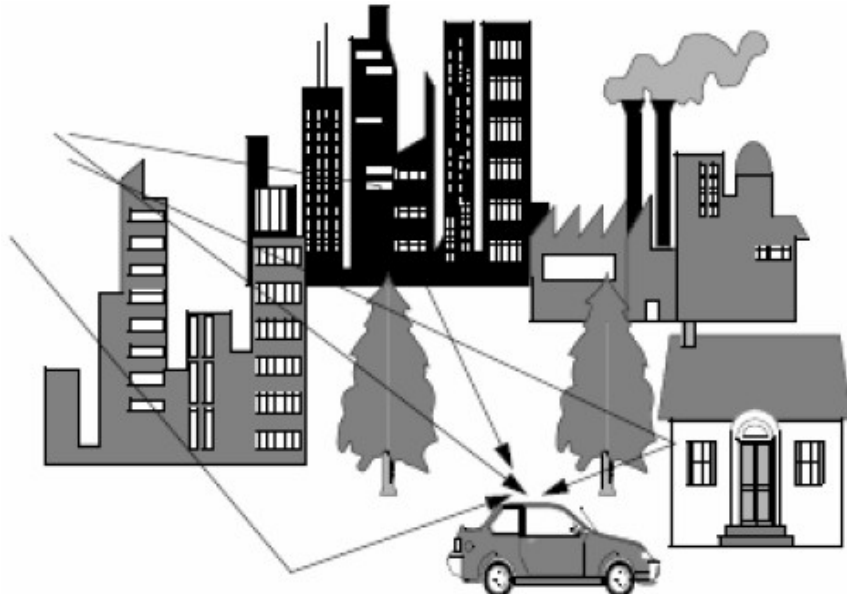


Fig. 1.1: Schema di un ambiente multipath.

zione, ecc.. Come conseguenza, la potenza del segnale ricevuto oscilla nello spazio (a causa dell'angolo di diffusione, *angle spread*) e/o in frequenza (a causa del ritardo di diffusione, *delay spread*) e/o nel tempo (a causa dell'effetto Doppler) a causa della sovrapposizione delle componenti multipath incidenti. Queste casuali oscillazioni nel livello di segnale, noto come *fading* (in italiano attenuazione, dissolvenza), possono pesantemente affliggere la qualità e affidabilità delle trasmissioni.

In aggiunta alle singole antenne in cui sono sfruttate le dimensioni del tempo e della frequenza, la tecnologia MIMO sfrutta la dimensione spaziale (fornita dalla presenza di multipli elementi antenna al trasmettitore e ricevitore).

1.3 Formati: SIMO, MISO, MIMO

I sistemi MIMO possono essere classificati in base al numero di antenne presenti al trasmettitore ed al ricevitore. Queste diverse configurazioni sono denominate SIMO, MISO e MIMO. In linea teorica anche il sistema SISO può essere classificato come un caso "limite" dei sistemi MIMO ma viene qui omesso.

Ciascuna configurazione offre specifici vantaggi e svantaggi che devono essere equilibrati per fornire la soluzione ottima a qualsiasi applicazione. I tre tipi di sistema, oltre a richiedere un diverso numero di antenne, presentano diversi gradi di complessità nella realizzazione ed utilizzo. La stessa elaborazione dei segnali può essere richiesta al lato trasmettente, a quello ricevente o ad entrambi. SIMO, MISO e MIMO sono tutti in grado di fornire significativi miglioramenti nelle prestazioni generali dei sistemi ma al costo di antenne aggiuntive ed elaborazioni richieste più complesse. Nella scelta del loro impiego è necessario effettuare un trade-off tra vantaggi e svantaggi, quest'ultimi in termini di costi, dimensioni e autonomia energetica.

1.3.1 Terminologia SIMO, MISO, MIMO

Le diverse tipologie dei sistemi ad antenne multiple si riferiscono al numero di possibili ingressi ed uscite nella trasmissione. Con questa notazione l'ingresso è il trasmettitore in quanto trasmette nel collegamento radio mentre l'uscita è il ricevitore (è l'uscita del canale radio). Le diverse configurazioni sono definite come segue:

- SIMO - Single Input Multiple Output;
- MISO - Multiple Input Single Output;
- MIMO - Multiple Input Multiple Output.

1.3.2 SIMO

I sistemi Single Input Multiple Output (SIMO) sono caratterizzati dalla presenza di un solo elemento antenna al trasmettitore mentre più antenne interessano la fase di ricezione. UN generico schema di un'architettura SIMO è riportata in Fig. 1.2. Questa configurazione è spesso usata per combattere gli effetti delle attenuazioni in quelle applicazioni in cui il sistema ricevente è interessato dalla trasmissione di segnali provenienti da diverse sorgenti indipendenti. Ad esempio i sistemi SIMO sono stati usati per molti anni nelle stazioni (trasmettenti e riceventi) a onde corte per combattere gli effetti dell'attenuazione causata dalla ionosfera e per combattere le interferenze. I sistemi SIMO hanno il vantag-



Fig. 1.2: Schema di un generico sistema SIMO.

gio di essere relativamente semplici da implementare anche se presentano alcuni svantaggi. L'elaborazione del segnale è infatti necessaria in fase di ricezione. L'impiego dei SIMO può dunque essere accettato in un discreto numero di applicazioni ma non in tutte. Nel caso il ricevitore sia inglobato in un dispositivo mobile, come ad esempio un telefono cellulare, la complessità delle elaborazioni richieste ne influenzerebbero negativamente le dimensioni, i costi e l'autonomia. Esistono due forme per i sistemi SIMO che possono essere utilizzati:

- switched diversity SIMO;
- maximum ratio combining SIMO.

Nella forma Switched diversity SIMO il sistema cerca il segnale più forte tra quelli ricevuti e abilita l'antenna interessata dalla ricezione di proprio quel segnale. Nella seconda forma invece, Maximum ratio combining, il sistema esegue la somma di tutti i segnali ricevuti fornendo una loro adeguata combinazione. In questo modo concorrono nella formazione del segnale complessivo tutti i singoli segnali delle varie antenne.

1.3.3 MISO

I sistemi MISO o Multiple Input Single Output sono caratterizzati dalla presenza di più elementi antenna in fase di trasmissione e dalla presenza di una singola antenna in fase di ricezione. Vengono anche detti “transmit diversity”. In questo caso gli stessi dati sono trasmessi in maniera ridondante dai trasmettitori. Il ricevitore è quindi in grado di ricevere il segnale migliore tra quelli trasmessi per estrarre i dati. I vantaggi dell’impiego



Fig. 1.3: Schema di un generico sistema MISO.

dei sistemi MISO risiedono principalmente nel aver spostato da ricevitore a trasmettitore gli elementi antenna multipli. Discorso analogo vale per la fase di codifica/elaborazione dei segnali. In applicazioni come la telefonia mobile questo è di fondamentale importanza. La possibilità di ridurre le dimensioni, la complessità di elaborazioni necessarie in fase di ricezione (e quindi di conseguenza aumentare l’autonomia del dispositivo), i costi sono parametri di fondamentale importanza in una logica di mercato.

1.3.4 MIMO

Quando sono presenti più di un elemento antenna sia in fase di trasmissione che di ricezione ai lati del canale radio il sistema è definito come MIMO o Multiple input multiple output. I sistemi MIMO possono essere usati per fornire miglioramenti sia per quanto riguarda la robustezza del canale sia per il throughput. Al fine di poter beneficiare delle piene



Fig. 1.4: Schema di un generico sistema MIMO.

potenzialità di un sistema MIMO è necessario essere in grado di utilizzare una codifica sul canale per separare i dati provenienti da diversi percorsi. Questa funzionalità richiede un’elaborazione aggiuntiva ma fornisce robustezza e capacità di canale addizionali.

1.3.5 SU-MIMO e MU-MIMO

I sistemi MIMO possono essere distinti anche per il numero di utenti che possono essere serviti

Nei sistemi Single User MIMO (in italiano ad utente singolo) gli emettitori sono collocati presso un singolo trasmettitore; le antenne riceventi presso un singolo ricevitore, cosa che facilita la coordinazione ad entrambe le estremità del sistema di trasmissione. Il caso di

trasmissione SISO è un particolare caso di questo modello noto come trasmissione punto a punto (point-to point).

Nei sistemi Multiple Users MIMO (in italiano ad accesso multiplo) vi sono più utenti in trasmissione che sono geograficamente isolati tra loro e tra i quali non vi è nessuna coordinazione. Ciascuno di essi ha generalmente il proprio messaggio da trasmettere, indipendente da quello degli altri. Se il ricevitore ha come scopo quello di ricevere tutte le trasmissioni è detto ricevitore centralizzato multiutente (multiuser centralized detector), altrimenti, se il suo scopo è quello di selezionare e ricevere solo una tra le differenti trasmissioni, è detto decentralizzato (decentralized).

Un esempio di sistemi multiple access MU-MIMO-MAC (Multiple Access Channel) è dato dalla tratta in uplink dei sistemi di telefonia cellulare, costituiti da più utenti separati tra loro spazialmente e temporalmente, senza coordinazione ed indipendenti, ed una stazione base (basestation) il cui scopo è quello di ricevere tutte le trasmissioni (centralized).

Nei sistemi MU-MISO-BC (Broadcast Channel) in diffusione (broadcast) vi sono più ricevitori (o utenti) geograficamente distinti tra loro e tra i quali non vi è alcuna coordinazione. Il trasmettitore è spesso costituito da uno o più emittenti coordinate tra loro, ciascuna delle quali trasmette un messaggio distinto.

Un esempio di sistema broadcast è dato dalla tratta in downlink dei sistemi di telefonia cellulare, costituita da un unico sistema di trasmissione, nel quale sono coordinate più trasmissioni distinte tra loro, e più utenti in ricezione geograficamente separati ed indipendenti (decentralized) I sistemi MU-MIMO, in conclusione, forniscono una metodologia che permette la condivisione spaziale dei canali. Questa condivisione può essere raggiunta al costo di hardware addizionale, filtri e antenne, ma senza l'aumento della larghezza di banda minima necessaria (come invece avviene con l'impiego di tecniche come FDMA, TDMA o CDMA).

1.4 Introduzione all'analisi teorico-matematica dei sistemi MIMO

Il sistema MIMO è, come detto, un sistema che utilizza la tecnologia ad antenne radio: il sistema impiega antenne multiple al lato trasmettitore e ricevitore. Un generico schema è riportato in Fig. 1.5. Il trasmettitore trasmette multipli stream (flussi dati) dagli m

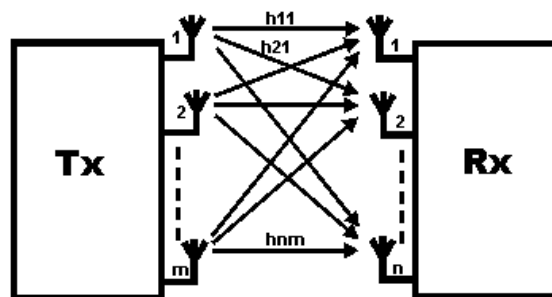


Fig. 1.5: Schema di una generica trasmissione in un sistema MIMO.

emettitori e questi attraversano una *matrice di canale* \mathbf{H} che consiste in tutti gli $m \times n$ percorsi tra le m antenne trasmettenti del trasmettitore e le n antenne riceventi del ricevitore. Per il sistema in figura Fig. 1.5 il canale MIMO in un dato istante e cioè la matrice \mathbf{H} può essere espresso come

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,m} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n,1} & h_{n,2} & & h_{n,m} \end{bmatrix} \quad (1.4.1)$$

Nella matrice \mathbf{H} , di dimensioni $n \times m$, l'elemento $h_{i,j}$ è il guadagno del singolo canale (Single-Input Single-Output) tra il j -esimo ricevitore e l' i -esimo trasmettitore. La p -esima colonna di \mathbf{H} è spesso denominata come *spatial signature* (firma spaziale) della p -esima antenna trasmettente sull'array di antenne riceventi. La geometria relativa delle m spatial signatures determina la possibilità di distinguere i segnali trasmessi al ricevitore. Questo è particolarmente importante quando flussi dati indipendenti sono trasmessi dalle antenne trasmettenti, come nel caso dell'utilizzo dello spatial multiplexing. Come per il caso di canali single-input single-output, i guadagni di canale individuali compresi nel canale MIMO sono comunemente modellati come variabili aleatorie gaussiane complesse a media nulla.

Un canale MIMO con m antenne trasmettenti e n antenne riceventi potenzialmente offre $m \times n$ collegamenti indipendenti. In realtà, il numero di flussi dati che possono essere supportati è pari al minimo tra il numero di antenne presenti al ricevitore e al trasmettitore: $\min(m, n)$ [18].

Per la definizione della matrice di canale \mathbf{H} in (1.4.1) il modello matriciale della trasmissione è

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1.4.2)$$

dove \mathbf{y} è il vettore dei segnali ricevuti di dimensione $n \times 1$, \mathbf{H} la matrice di canale, \mathbf{x} il vettore di dimensione $n \times 1$ rappresentante i segnali trasmessi e \mathbf{n} è il vettore rappresentante il rumore di dimensione $n \times 1$.

Il grado di correlazione tra gli $m \times n$ guadagni di canale singoli compresi nel canale MIMO è una complicata funzione della dispersione nell'ambiente e della spaziatura delle antenne al trasmettitore e ricevitore. Si consideri una situazione estrema in cui tutti gli elementi antenna al trasmettitore siano collocati alla stessa maniera degli elementi al ricevitore. In questo particolare caso tutti gli elementi di \mathbf{H} sono pienamente correlati (in fatti identici) e l'ordine della diversità spaziale del canale è uno.

La scorrelazione tra gli elementi del canale aumenta con la distanza delle antenne. Tuttavia, la sola distanza non è sufficiente per garantire la scorrelazione. La scorrelazione degli elementi del canale MIMO può essere fatta con un'adeguato posizionamento delle antenne ma in un ambiente *scattering* (molto ricco di oggetti riflettenti sparsi). In questo tipo di ambienti la tipica distanza delle antenne richiesta per la scorrelazione è circa $\lambda/2$ dove λ è la lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza di lavoro.

1.5 Modi di utilizzo dei sistemi MIMO

Il termine MIMO non definisce, in generale, il modo di utilizzare le antenne multiple, modo che varia profondamente sia a seconda dell'applicazione, sia a seconda del canale fisico di trasmissione che si ha a disposizione. La Fig.1.6 schematizza i tre aspetti complementari che coinvolgono ogni sistema MIMO: *diversità*, *multiplazione spaziale* e *beamforming*. La

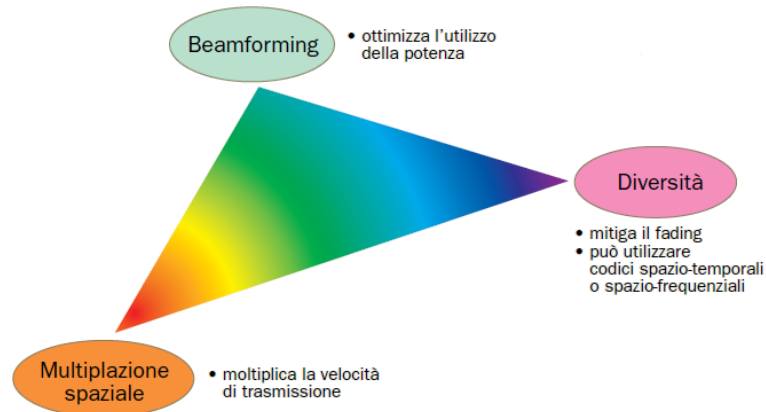


Fig. 1.6: Aspetti e compromessi in un sistema MIMO.

diversità (in inglese *diversity*) ha a che fare con la trasmissione e/o la ricezione di uno stesso simbolo via antenne diverse. Se le antenne sono fisicamente separate da una distanza tale da rendere i segnali ricevuti indipendenti tra loro, è probabile che quando un'antenna non ha un buon rapporto segnale/rumore, la trasmissione possa comunque essere correttamente decodificata a partire dal segnale delle antenne adiacenti. Trattandosi di un tipo di ridondanza spaziale, non aumenta la velocità di trasmissione dei segnali, ma ne aumenta l'affidabilità.

La multiplazione spaziale (in inglese *spatial multiplexing*) è stata storicamente il primo impiego studiato per i sistemi MIMO. Più informazioni possono essere codificate e suddivise su antenne diverse, e trasmesse contemporaneamente sulla stessa banda. In questa situazione, le antenne riceventi vedono un campo risultante che è la sovrapposizione di tutti i segnali in trasmissione che avranno tipicamente percorso cammini differenti e saranno soggetti a riflessioni multiple differenti. Si dimostra matematicamente che se i vari cammini sono effettivamente indipendenti, è possibile ricostruire tutte le informazioni trasmesse a partire da tutti i segnali presenti sulle antenne riceventi. La multiplazione spaziale permette, su canali trasmissivi ad alto rapporto segnale/rumore e molto ricco di oggetti riflettenti sparsi (in inglese *rich scattering*), di aumentare notevolmente la velocità di trasmissione. La multiplazione spaziale è realizzabile a patto di avere in ricezione un numero di antenne maggiore o uguale al numero di flussi di informazione trasmessi in parallelo. Viceversa, l'utilizzo di MIMO in diversità non pone vincoli sul numero di antenne in trasmissione e ricezione.

Il beamforming consente invece, in generale, di indirizzare la potenza irradiata non uniformemente nello spazio, ma verso direzioni preferenziali in cui ad esempio possono essere

localizzati i trasmettitori. Nei sistemi MIMO, quando il canale di trasmissione è noto al trasmettitore, è possibile adottare una codifica in trasmissione detta "eigen-beamforming" (ovvero beamforming basato sui modi spaziali del canale) che ottimizza l'utilizzo della potenza e massimizza la trasmissione dell'informazione tra tutte le antenne trasmittenti e tutte quelle riceventi. L'eigen-beamforming è utilizzabile soprattutto quando è possibile stimare il canale di trasmissione con grande precisione e quando la variazione nel tempo del canale stesso non è troppo rapida.

1.6 Benefici della tecnologia MIMO

I benefici della tecnologia MIMO che consentono di ottenere miglioramenti nelle prestazioni (in termini di capacità, affidabilità e range di copertura) sono array gain, spatial diversity gain, spatial multiplexing gain e riduzione delle interferenze.

1.6.1 Array gain

Array gain è l'incremento nello SNR ricevuto che risulta da un'appropriata combinazione degli effetti dei segnali wireless al ricevitore. Questa combinazione può essere realizzata attraverso spatial processing all'array di antenne al ricevitore e/o spatial pre-processing alla array di antenne al trasmettitore. In tal modo si migliorano la resistenza al rumore e aumenta il range delle reti.

1.6.2 Spatial diversity gain

Come già precedentemente detto, il livello di segnale al ricevitore in un sistema wireless oscilla (fading). Spatial diversity gain contrasta gli effetti dell'attenuazione. È realizzato trasmettendo al ricevitore copie multiple del segnale trasmesso nello spazio, frequenza o tempo. Idealmente le copie del segnale sono indipendenti. Con un incremento del numero di copie indipendenti la probabilità che almeno una delle copie non sia stata sottoposta ad un'attenuazione significativa aumenta, aumentando la qualità e l'affidabilità della ricezione. Un canale MIMO con M_T antenne trasmittenti e M_R antenne riceventi potenzialmente offrono $M_T \times M_R$ collegamenti indipendenti.

1.6.3 Spatial multiplexing gain

I sistemi MIMO offrono un incremento lineare nella velocità di trasmissione (data rate) attraverso la tecnica dello spatial multiplexing, trasmettendo flussi dati indipendenti all'interno della banda di lavoro. Sotto certe condizioni di canale, come la presenza di un ambiente ricco di oggetti riflettenti sparsi, il ricevitore può separare i flussi dati. Inoltre, ciascun flusso dati gode di una qualità di canale almeno pari a quella che incontrerebbe in un sistema single-input single-output (SISO) aumentano la capacità di un fattore moltiplicativo pari al numero di flussi. In generale, il numero di flussi dati che possono essere supportati da un canale MIMO è pari al minimo tra il numero di antenne presenti al ricevitore e al trasmettitore: $\min(M_T, M_R)$. Lo spatial multiplexing gain aumenta

le capacità del sistema. Un canale MIMO con M_T antenne trasmittenti e M_R antenne riceventi potenzialmente offre $M_T \times M_R$ collegamenti indipendenti.

1.6.4 Riduzione delle interferenze

Le interferenze nei sistemi wireless derivano da utenti multipli che condividono risorse di tempo e frequenza. Le interferenze possono essere attenuate nei sistemi MIMO sfruttando la dimensione spaziale per incrementare la separazione tra gli utenti. Ad esempio, in presenza di interferenze, array gain incrementa la tolleranza al rumore, quindi migliorando il rapporto segnale rumore più interferenze (Signal To Noise Plus Interference Ratio). La dimensione spaziale può essere sfruttata per il fine di evitare le interferenze, dirigendo l'energia del segnale verso l'utente desiderato e minimizzando le interferenze ad altri utenti. La riduzione e l'evitare le interferenze migliorano la copertura e il range del collegamento.

In generale non è possibile sfruttare simultaneamente tutti i benefici descritti sopra a causa delle esigenze contrastanti di ciascuno. Tuttavia, usando alcune combinazioni dei benefici il risultato è migliorare la capacità, copertura e affidabilità del sistema.

1.7 Applicazioni dei sistemi MIMO

La tecnologia MIMO, sin dai suoi inizi è stata studiata, testata e affinata in ambito delle telecomunicazioni. La richiesta di nuovi servizi dati ad elevate velocità di trasmissione e la scarsa disponibilità di banda giustificano l'impiego di queste nuove tecnologie che consentono l'aumento dell'efficienza spettrale e della qualità radio dei sistemi di comunicazione wireless. Il sistema MIMO è oggi parte integrante di alcuni sistemi in corso di standardizzazione o il cui standard è stato recentemente completato. Fra gli standard che integrano i sistemi MIMO si possono includere le WLAN di nuova generazione, anche note con l'acronimo IEEE 802.11n ed aventi alta velocità di trasmissione, il sistema WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) per l'accesso a larga banda sia fisso che mobile su aree estese, anche noto con l'acronimo IEEE 802.16d/e, e l'evoluzione del sistema UMTS nel gruppo di standardizzazione 3GPP LTE (Long Term Evolution).

I sistemi MIMO sono presenti nel mercato europeo dal 2006 integrati in molteplici data cards, dispositivi che forniscono un collegamento mobile a banda larga. Sistemi router wireless utilizzati per fornire un accesso alla rete a più utenti, sono sistemi in cui la tecnologia MIMO trova spazio. La diversità di antenna in ricezione introduce un miglioramento della qualità di servizio percepita dall'utente che si traduce, ad esempio, in una riduzione dei tempi di download oppure nell'estensione dell'area di copertura in cui la rete è in grado di fornire un prefissato valore di *throughput*. Nei sistemi RFID (Radio-frequency identification) la tecnologia MIMO incrementa l'affidabilità della lettura ed il range di lettura utilizzando la diversità spaziale.

I sistemi MIMO trovano largo spazio nel settore denominato "digital home" in cui sono in grado di fornire collegamenti tra dispositivi video, connessioni a banda larga, linee telefoniche, sistemi audio, dispositivi di immagazzinamento dati etc.

Occorre comunque ricordare che l'introduzione di una nuova tecnologia in un sistema di comunicazione wireless è conveniente dal punto di vista industriale solo se i vantaggi introdotti dalla tecnologia considerata sono ottenuti con un aumento contenuto della complessità degli apparati (terminali e stazioni radio base) e conseguentemente dei relativi costi. I sistemi MIMO lo stanno dimostrando [18].

I sistemi MIMO, come visto, trovano largo spazio in applicazioni legate alla trasmissione dati e ai sistemi di comunicazione. I vantaggi derivanti dalla tecnologia MIMO stanno interessando anche settori di ricerca non strettamente connessi all'ambito delle telecomunicazioni. Un esempio è sicuramente l'applicazione della tecnologia MIMO in applicazioni di tipo radar.

1.8 MIMO per applicazioni radar

La tecnologia Multiple Input Multiple Output radar ha ricevuto negli ultimi anni una crescente attenzione da parte di ricercatori, professionisti e agenzie di finanziamento [19]. I radar MIMO possono essere impiegati per rilevamenti/identificazioni e tracking di target, stima dei parametri del modello del target, creazione immagini dei target e molti altri. I radar MIMO sono caratterizzati dalla possibilità di trasmettere simultaneamente diverse (possibilmente linearmente indipendenti) forme d'onda dalle antenne multiple del trasmettitore e utilizzare le antenne al ricevitore per ricevere i segnali riflessi. I radar MIMO possiedono potenzialità significative per ridurre il fenomeno del fading, aumentare la risoluzione e per l'eliminazione delle interferenze e jamming. Sfruttare a pieno queste potenzialità può portare a miglioramenti significativi nel rilevamento dei target, stima dei parametri, così come nelle prestazioni del tracking di un target e riconoscimento/identificazione del target.

1.8.1 Definizione e caratteristiche dei radar MIMO

L'idea di radar MIMO consiste semplicemente nell'avere multiple locazioni radianti e riceventi come mostrato in Fig. 1.7. I sistemi radar MIMO si differenziano dai tradizionali sistemi radar "phased-array" in quanto le forme d'onda trasmesse possono essere molto diverse tra loro. Nei sistemi radar phased-array invece i segnali trasmessi sono versioni scalate dello stesso: phased array trasmettono una singola forma d'onda che è ricevuta dalla diverse antenne con differenti fasi (ritardi). In altre parole, le forme d'onda ad antenne differenti sono perfettamente correlate.

Questa capacità dei sistemi radar MIMO risulta essere importante per quanto riguarda la *parameter identifiability*. Con *parameter identifiability* si definisce il massimo numero di target che possono essere univocamente identificati dal radar. Causa le diverse forme d'onda utilizzabili nei sistemi MIMO queste prestazioni sono migliori rispetto i radar phased-array [19].

Le informazioni collezionate in un sistema come in Fig.1.7 sono poi processate unitamente. In un certo senso, i radar MIMO sono una generalizzazione dei concetti di radar multistatico. I concetti basilari sono probabilmente stati scoperti numerose volte in modo

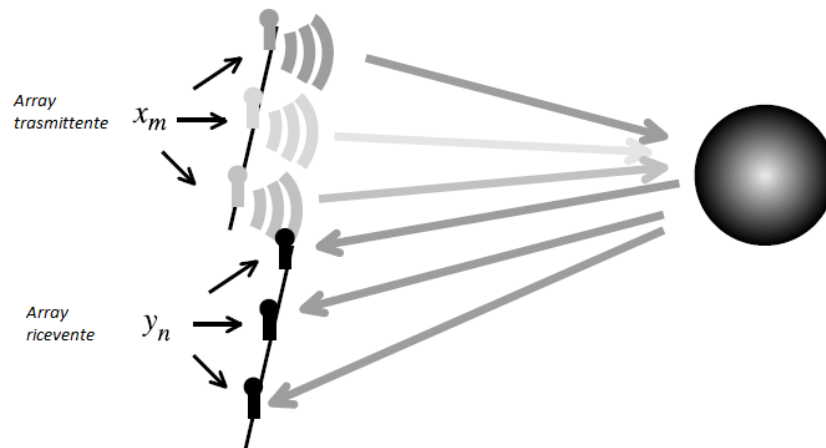


Fig. 1.7: Illustrazione di un generico radar MIMO. La posizione dello m -esimo trasmettitore è data da x_m , e la posizione dello n -esimo ricevitore è dato da y_n .

indipendente. Pur non usando la nomenclatura radar MIMO, i sistemi Radar a Impulsion et Antenne Synthetique (RIAS) e Synthetic Impulse and Aperture Radar (SIAR), che sono stati sperimentalmente sviluppati per studiare tecnologie per sorveglianza aerea, sono primissimi esempi di sistemi che possono essere classificati come radar MIMO.

Con la definizione più generale, molti sistemi radar sviluppati e già in uso possono essere considerati come speciali casi di radar MIMO. Ad esempio, il sistema Synthetic Aperture Radar (SAR) può essere considerato una forma di radar MIMO. Sebbene i SAR tradizionali impieghino una singola antenna trasmittente ed una singola antenna ricevente, le posizioni di queste due antenne sono traslate e le immagini sono formate dall'elaborazione congiunta di tutte le informazioni. La sostanziale differenza tra questo radar e un "tipico" radar MIMO, che sfrutta a pieno i gradi di libertà, è che il sistema SAR non ha accesso a misure del canale per tutte le posizioni trasmettitore-ricevitore usate nella misura. Equivalentemente, si può dire che sono misurati solamente gli elementi diagonale della matrice del canale.

Nei radar MIMO possono essere utilizzate diverse tecniche di segnale. Le antenne trasmettenti irradiano segnali, che possono essere o meno correlati, e le antenne riceventi tentano di "sbrogliare" questi segnali. Nella maggior parte della lettura attuale, si assume che le forme d'onda provenienti da ciascuna antenna trasmittente siano ortogonali ma questo non è un requisito per i radar MIMO. Tuttavia, l'ortogonalità può facilitare l'elaborazione dei segnali. Due semplici approcci per ottenere l'ortogonalità sono la time division multiplexing (in italiano multiplazione a divisione di tempo) e la frequency division multiplexing (in italiano multiplazione a divisione di frequenza). La risposta scattering del target o dell'ambiente è generalmente time-varying (tempo-variante) o frequency-selective (frequentialmente-selettiva), limitando l'abilità di combinare coerentemente le informazioni dalle coppie di antenne. In alcune applicazioni, è utile introdurre la correlazione tra i segnali trasmessi.

Esiste un continuum nei concetti dei sistemi radar MIMO; tuttavia ci sono due regimi di operazioni base nella letteratura corrente. Nel primo caso, le antenne dell'array trasmit-

tente (e gli elementi dell'array ricevente) sono ampiamente distanziate, fornendo risposte di scattering indipendenti per ciascuna coppia di antenne. Qualche volta questa modalità di impiego è detta *statistical MIMO radar*. In genere, in questi sistemi, si hanno dei miglioramenti nella rilevabilità dei target [19].

Nel secondo caso, gli elementi dell'array trasmettente (e le antenne dell'array ricevente) sono molto vicine in modo che il target si trovi nel campo lontano dell'array trasmettitore-ricevitore. Questo seconda modalità a volte è definita *coherent MIMO radar*. In questo caso è assunto vero che la risposta scattering del target è la stessa per ciascuna coppia di antenne, con l'aggiunta di qualche ritardo. Una tale configurazione permette alte risoluzioni, maggior sensibilità nel rilevamento di target lentamente mobili, maggior numero di target rilevabili.

Nei coherent MIMO radar, la stima della separazione angolare minima per avere risposte scattering indipendenti, richiede la conoscenza dei dettagli del target. Per darne solamente un ordine di grandezza è possibile ipotizzare il target come un array di "scatters" (elementi riflettenti sparsi, in italiano scatteratori) con risposte di fase ottimizzate per focalizzare l'energia verso una delle antenne. Come mostrato in Fig. 1.8 se un appropriato array di scatters di dimensioni fisiche del target può risolvere la localizzazione individuale delle antenne, allora teoricamente possono essere possibili risposte scattering indipendenti. Al

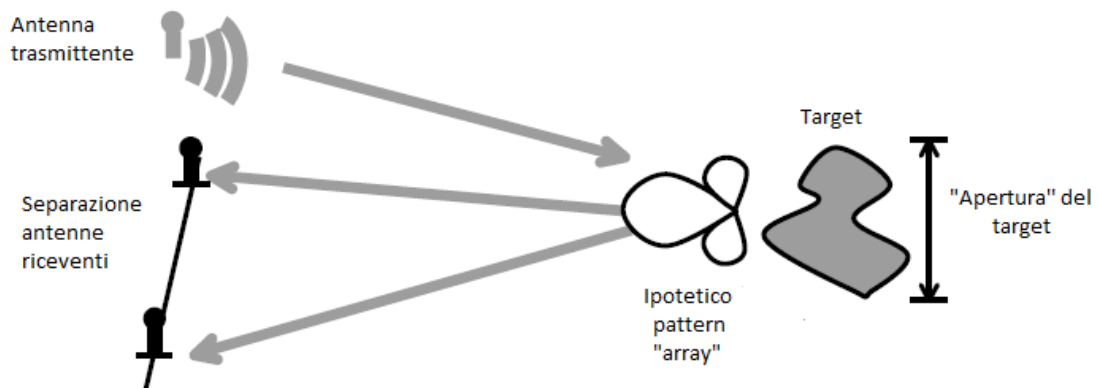


Fig. 1.8: Risposta scattering coerente rispetto quella non coerente.

contrario, se le complessive distanze angolari sono piccole comparate al "beamwidth" (in italiano larghezza del fascio) dell'array di scatters allora sarebbe praticabile l'elaborazione coerente. Quest'analisi è facilmente applicabile nei sistemi radar per la sorveglianza aerea per i quali un target è ben distanziato da qualsiasi ambiente di fondo. Anche se i ragionamenti rimangono infatti validi, il rilevamento di un target in presenza di un ambiente di fondo può essere meno chiara.

1.8.2 Motivi di impiego dei radar MIMO

Esistono una varietà di potenziali vantaggi derivanti dall'impiego dei radar MIMO. Per delle date scelte di progettazione del sistema, alcuni di questi vantaggi possono essere:

- miglioramento prestazioni del rilevamento dei target;

- miglioramento accuratezza delle stime degli angoli;
- decremento minima velocità rilevabile;
- miglioramento della stima dei parametri del modello;
- elaborazione dei segnali sia in trasmissione che ricezione;
- progettazione delle forme d'onda utilizzate.

Per il primo tipo di radar MIMO discusso nella sezione 1.8.1 nel quale le singole antenne trasmittenti e riceventi sono ampiamente distanziate, la diversità fornita dai molteplici angoli in trasmissione e ricezione può essere sfruttata per migliorare le prestazioni dei rilevamenti. Similmente alla diversità frequenziale utilizzata in alcuni radar tradizionali, la diversità (angolare) spaziale può essere impiegata per ridurre la probabilità che una risposta scattering caratterizzata da una bassa ampiezza causi un mancato rilevamento del target.

Nel secondo tipo di radar MIMO discusso nella sezione 1.8.1 nel quale le antenne sono relativamente vicine tra loro possono essere migliorate le prestazioni nella stima degli angoli (di *azimuth* e di *elevazione*).

Comparati ai sistemi tradizionali, i radar MIMO GMTI (Ground Moving-Target Indication) possono essere utilizzati per migliorare il valore della minima velocità rilevabile. Entrambe queste caratteristiche possono essere migliorate nei radar MIMO. Per un giusto confronto occorre tenere in considerazione che le prestazioni del sistema sono diverse a seconda dell'applicazione. I radar GMTI possono essere usati per sorvegliare una vasta area o tracking un target particolare. Si prende in considerazione la prima delle due applicazioni citate. In questo caso i sistemi GMTI generalmente o trasmettono da un singolo elemento coprendo l'area maggiore o scansionano un raggio dall'array trasmittente sull'area di interesse. Per un confronto con un tradizionale radar GMTI ad un singolo elemento, il sistema MIMO può avere n_T trasmettitori che illuminano la stessa area. Assumendo che il sistema MIMO stia trasmettendo simultaneamente sequenze indipendenti l'area può essere illuminata quindi con una potenza più grande di n_T volte. La combinazione di un'illuminazione per un tempo maggiore ed una più grande apertura dei radar MIMO forniscono la possibilità di migliorare sensibilmente la minima velocità rilevabile nei sistemi GMTI [19].

Una delle funzioni dei radar è quella di stimare i parametri del modello usato per descrivere gli stessi target. I primi radar potevano distinguere in maniera non ambigua un parametro, il *range*. I sistemi radar a onda continua (Continuos Wave) possono identificare solamente il *range rate*. I radar Pulse-Doppler possono simultaneamente identificare range e range rate del target. I sistemi radar con elementi array vengono impiegati per la stima dei parametri angolari. I sistemi MIMO radar permettono l'identificazione in maniera non ambigua di parametri del target addizionali [19].

Per quanto concerne l'elaborazione dei segnali, sono significativi i possibili miglioramenti derivanti dall'impiego di radar MIMO. Gli schemi di molti tradizionali sistemi radar attivi non permettono l'elaborazione dei segnali trasmessi e lavorano solamente sul segnale

ricevuto. I radar MIMO permettono l'elaborazione anche dei segnali trasmessi e questo comporta maggior flessibilità del sistema e vantaggi: prestazioni più alte per il rilevamento dei target, maggior accuratezza nella localizzazione e maggior risoluzione angolare [19]. La possibilità di elaborare anche i segnali trasmessi risulta di particolare importanza anche dove gli spazi sono limitati e dove la probabilità di intercettazioni e di interferenza con sistemi vicini devono essere molto basse (ad esempio in ambito militare).

Nella progettazione delle forme d'onda da utilizzare nelle applicazioni radar concorrono molti parametri. Una generica divisione le distingue in *adattative* e *non adattative*. Nel primo caso, le forme d'onda dipendono da informazioni riguardo alla particolare scena che si sta osservando; forme d'onda non adattative non tengono conto di queste informazioni. I radar MIMO permettono l'impiego di segnali che non possono essere utilizzati in radar convenzionali che permettono miglioramenti nei valori del SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio), resistenza alle interferenze e clutter, riduzione dei tempi di ricerca, miglioramento della risoluzione spaziale e rilevabilità dei target.

I radar MIMO sono una tecnologia relativamente recente. I primi articoli risalgono agli anni 2003-2004. Le pubblicazioni in ambito scientifico inerenti a questa classe di sistemi radar sono molteplici come testimoniato dalla bibliografia riportata in [19] del 2008. Effettive applicazioni commerciali sembrano non essere ancora presenti ma i vantaggi dei sistemi radar MIMO li rendono sicuri candidati per il futuro mercato [19].

Sistemi Radar

2.1 Introduzione

In questo secondo capitolo si vuole fornire una panoramica generale sui sistemi RAdio Detection and Ranging (RADAR) focalizzandosi su una descrizione delle parti base che lo compongono ed il tipo di informazioni che mettono a disposizione.

Si vuole inoltre proporre una possibile classificazione dei metodi di localizzazione impiegati in apparecchiature radar. I metodi descritti sono tre: Directional of Arrival, Time Based e Signal Strength. Di ciascuno è riportata una descrizione e un numero di applicazioni che ne dimostrano l'impiego.

Infine vengono riportate alcune caratteristiche che rendono i sistemi radar particolarmente utili in fase di identificazione di un target. Sono presi in considerazione quattro diverse caratteristiche: il movimento relativo tra target e radar, le caratteristiche polarimetriche dei segnali, la dipendenza dello RCS dalla frequenza delle onde elettromagnetiche e l'effetto Doppler. Di ciascuno viene riportata una descrizione. Vengono inoltre riportate molteplici applicazioni trovate in letteratura scientifica dove queste caratteristiche permettono l'identificazione o almeno ne migliorano i risultati.

2.2 Breve introduzione dei sistemi radar

Il radar (RAdio Detection And Ranging) é un sensore elettromagnetico per il rilevamento (detection) e localizzazione (localization) di oggetti riflettenti.

Le discipline che in Italia sono classificate sotto il nome di *comunicazioni* possono essere suddivise in due raggruppamenti:

- comunicazioni dati;
- *rilevamento* (telerilevamento, sorveglianza, riconoscimento).

I sistemi radar fanno parte del secondo raggruppamento. Il rilevamento definisce i metodi e le modalità con i quali è possibile acquisire informazioni su oggetti o sull'ambiente circostante. In linea teorica, si ipotizza che l'ambiente e gli oggetti siano sorgenti di informazione. L'informazione è resa disponibile all'utente attraverso opportune analisi ed elaborazioni [2]. In particolare i sistemi radar appartengono alla sottocategoria di rilevamenti attivi. In questo caso oggetti e/o l'ambiente circostante sono stimolati mediante la trasmissione di determinati segnali. I segnali re-irradiati dagli oggetti e/o dall'ambiente in risposta a tali sollecitazioni vengono ricevuti ed elaborati dal sistema di rilevamento stesso, ad esempio un sistema radar. L'altra sottocategoria è rappresentata dai rilevamenti passivi.

Un sistema radar, come generico sistema di rilevamento, deve poter effettuare operazioni di rilevazione (teoria della *rilevazione*) di un segnale in presenza di disturbo ed essere in grado di estrarre informazioni utili dal segnale rilevato (teoria della *stima*). Più in dettaglio, le principali operazioni possono essere riassunte come segue:

- il radar irradia energia elettromagnetica da un'antenna e la propaga nello spazio;
- parte dell'energia radiata è intercettata da un oggetto riflettente, generalmente chiamato *target*; situato ad una certa distanza dal radar;
- l'energia intercettata dal target è re-irradiata in molte direzioni;
- parte dell'energia re-irradiata (eco) è restituita e ricevuta dall'antenna radar;
- dopo l'amplificazione a livello di ricevitore e con l'aiuto di una corretta elaborazione del segnale, è possibile in uscita al ricevitore prendere la decisione se è presente o meno l'eco di un target. In quel momento, vengono acquisite la posizione del target e ulteriori possibili altre informazioni riguardanti lo stesso.

Un generico esempio di un sistema radar per rilevamento di aeroplani è riportato in [1]. La forma d'onda irradiata dal radar è rappresentata da una serie di brevi impulsi rettangolari di durata pari a $1 \mu s$ e di periodo di ripetizione (Pulse Repetition Time, RPT) pari a $1 ms$; la relativa frequenza di ripetizione (Pulse Repetition Frequency, PRF) risulta pari a $1 kHz$. La potenza del picco di potenza trasmesso è pari a $10^6 W$; la potenza media è pari a $1 kW$. Il radar in esempio lavora in un range di frequenze che vanno dai 2.7 ai $2.9 GHz$. Questo intervallo rappresenta una banda di frequenze tipicamente impiegato per fini di sorveglianza negli aeroporti. Con un appropriata antenna un tale tipo di sistema radar potrebbe rilevare un aereo in un *range* (distanza tra il radar ed il target) pari a circa $100 km$. Un valore attendibile della potenza del segnale di eco ricevuto dal target è $10^{-13} W$. Se la potenza radiata, come prima detto, è pari a $10^6 W$ il rapporto tra potenza del segnale di eco e potenza del segnale trasmesso risulta essere $10^{-19} W$. In altre parole l'eco ricevuto è $190 dB$ minore del segnale trasmesso. L'esempio riportato è uno tra le molteplici e varie applicazioni dei sistemi radar. Nell'esempio il target è rappresentato da un aeroplano con i relativi parametri del caso. I sistemi radar possono essere impiegati in applicazioni in cui le dimensioni (del target e del range) sono molto più piccole ma anche molto più grandi. Un esempio sono radar in cui i target sono rappresentati da pianeti e i range assumono valori dell'ordine delle distanze tra pianeti. I target dei radar possono essere rappresentati dagli "oggetti" più disparati: aerei, navi, o missili ma anche persone, uccelli, insetti, precipitazioni, turbolenze d'aria, caratteristiche del territorio (vegetazione, montagne, strade, fiumi, aeroporti, edifici, recinzioni), mari, ghiacci, iceberg, boe di segnalazione, metropolitane e pianeti. Per tali motivi i sistemi radar possono essere di qualsiasi dimensione: piccoli da essere portati da una persona e grandi da occupare un intero stadio di calcio.

Oltre a misurare il range del target, i sistemi radar possono misurare altri parametri caratteristici del target: la *direzione angolare* e la *velocità radiale*.

2.2.1 Cenni storici

É possibile dividere la storia del radar in quattro fasi:

1. scoperta dei principi base (fine del XIX secolo);
2. primi esperimenti (anni '20 e '30);
3. prime installazioni operative (Seconda Guerra Mondiale);
4. sviluppo e maturità (dal dopoguerra in poi).

La scoperta dei principi base della tecnica radar si può far risalire alle prime osservazioni condotte da Heinrich Hertz sulla riflessione delle onde elettromagnetiche da parte di corpi metallici (1886). É degno di nota il fatto che gli esperimenti furono condotti ad una frequenza di ben 450 Hz . tali osservazioni furono ripetute molto tempo dopo dall'ingegnere Christian Hülsmeier di Dusseldorf, il quale il 30 aprile 1904 ottenne il brevetto 165546 relativo al sistema da lui sviluppato per rilevare la presenza di oggetti metallici (navi) a mezzo di onde elettriche. La prima dimostrazione ebbe luogo a Colonia, con il rilevamento di una nave a distanze massime dell'ordine di uno o due km , il 18 maggio 1904 mediante un sistema bistatico ad onda continua operante a lunghezze d'onda di circa mezzo metro. Non ci fu in quel periodo un grande interesse per questa scoperta. Dovettero passare altri venti anni perché Marconi, in un discorso alla IRE nel 1992, prefigurasse un utilizzo pratico degli esperimenti di Hülsmeier per la sicurezza della navigazione.

I primi esperimenti che dimostrano, oltre alla capacità di rivelazione, la misura della distanza furono condotti in Inghilterra da Appleton Barnett nel dicembre 1924 usando quello che oggi chiameremo radar bistatico ad onda continua modulata in frequenza, nel quale la frequenza di battimento tra il segnale diretto e quello riflesso dalla ionosfera era proporzionale all'altezza dello strato ionosferico riflettente.

Nel 1925/26 gli statunitensi Breit e Tuve utilizzarono quello che può essere considerato il primo radar ad impulsi per misurare la distanza degli strati ionosferici.

Durante gli anni '30 apparve evidente che la minaccia rappresentata dai bombardieri era difficilmente contrastabile senza un sistema capace di rilevarli e localizzarli a grandi distanze (decine di chilometri). Tale problema era particolarmente sentito in Inghilterra, dove lo Scientific Survey of Air Defense sollecitò Sir Robert Watson-Watt a proporre, in un memorandum datato 27 febbraio 1935, un sistema radar per rilevare aeromobili e localizzarli in tre dimensioni. Solo cinque mesi dopo (luglio 1935) Watson-Watt ed i suoi colleghi dimostrarono il rilevamento e la misura della distanza di aeromobili. Tale radar, operante inizialmente a 6 MHz e poi a 12 MHz ed a 25 MHz , costituì la base del sistema di difesa aerea (il primo del mondo) denominato Chain Home, il quale funzionò ininterrottamente durante la Seconda Guerra Mondiale.

In Germania il primo avvistamento di bersagli navali (e, casualmente, aerei) avvenne il 24 ottobre 1934 con un apparato a magnetron operante sui 600 MHz . Anche in Italia, Giappone, Francia, Olanda ed Ungheria si svilupparono in quegli anni apparati radar. Oltre l'Atlantico, negli Stati Uniti, gli esperimenti dapprima con radar ad onda continua (Taylor, Young e Hyland, 1932-34) e poi con radar ad impulsi furono condotti dal Naval

Research Laboratory; i primi echi impulsati furono osservati il 28 aprile 1936 alla frequenza di 28.3 MHz ed il 22 luglio 1936 alla frequenza di 200 MHz .

L'avvicinarsi della guerra provocò una accelerazione dello sviluppo di apparati radar. Le prime installazioni operative per protezione antiaerea furono realizzate nel 1937 ancora dagli inglesi (la già citata Chain Home); a queste seguirono i due sistemi americani SCR-268 (1938) e CXAM (1941). Queste due grandi potenze intensificarono nel corso della Seconda Guerra Mondiale gli sforzi congiunti per giungere a sistemi sempre più affidabili e dotati di portata maggiore. In questo periodo venne introdotto il magnetron, con catodo a cavità multirisonanza, costruito da Randall e Booth presso l'università di Birmingham e funzionante il 21 febbraio del 1940, producendo ben 400 W (e successivamente oltre 1 kW) in onda continua ad una lunghezza d'onda compresa tra 9 e 10 cm . Tale tubo a microonde è simile a quelli utilizzati ancora oggi. In Germania inizia lo sviluppo di apparati radar, tra i quali il Freya (1936) ed il Würzburg, capace di misurare distanza, azimut ed elevazione ed operante a 566 MHz , del quale l'aeronautica ordinò 5000 esemplari.

Durante la Seconda Guerra Mondiale si svilupparono con grandissima velocità tecniche e sistemi quali le microonde (si arrivò, già nel 1943, a radar avionici operanti a $9\text{-}10\text{ GHz}$), il pulse-Doppler e lo MTI.

Dopo la Seconda Guerra Mondiale le installazioni radar si sono moltiplicate, diffondendosi anche in ambito civile. Tra le principali tappe tecnologiche del dopoguerra si possono ricordare l'introduzione del tubo amplificatore a microonde chiamato klystron (più potente del magnetron ed adatto all'uso di forme d'onda codificate) negli anni '50, e quindi dei tubi ad onda progressiva (TWT). In tempi più recenti i tubi sono stato sostituiti da dispositivi a stato solido per le applicazioni che richiedono potenze di picco minori.

2.2.2 Parti base di un sistema radar

Fig. 2.1 rappresenta uno schema a blocchi molto elementare mostrante i sottosistemi che generalmente si trovano in un radar. Il sottosistema *trasmettitore* (a destra in Fig. 2.1)

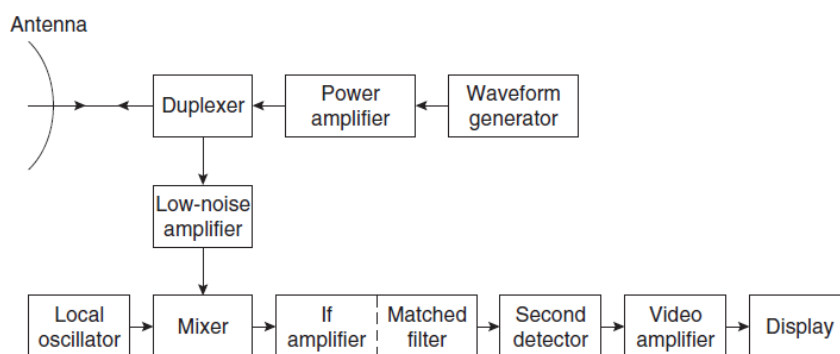


Fig. 2.1: Diagramma a blocchi di un semplice radar impiegante un amplificatore di potenza come trasmettitore nella parte superiore della figura e un ricevitore supereterodina nella parte inferiore.

è costituito dai due blocchi *Waveform generator* e *Power amplifier*. Il trasmettitore ha l'obiettivo di generare una precisa forma d'onda in funzione della particolare applicazione per cui il sistema radar è impiegato. La forma d'onda può essere caratterizzata da potenze

medie dell'ordine dei mW fino ai MW in base al tipo di uso (si ricorda come la potenza media rappresenti un'indicazione di gran lunga migliore delle prestazioni dei sistemi radar rispetto alla potenza di picco del segnale trasmesso. La maggior parte dei radar impiegano una forma d'onda impulsiva di breve durata [1]. Il trasmettitore, oltre che generare segnali con potenze medie e di picco sufficienti per il rilevamento di target al massimo range richiesto, devono anche generare segnali della forma d'onda voluta e fornire la stabilità necessaria per la funzione in questione.

I trasmettitori, oltre che amplificatori come riportato nello schema di Fig. 2.1, possono anche essere oscillatori di potenza. Gli oscillatori permettono di fornire elevate potenze ma non danno la possibilità di predire la fase con cui si innescherà l'oscillazione. Gli amplificatori di solito offrono più vantaggi e gli oscillatori erano maggiormente utilizzati in passato [1].

L'*antenna* è il dispositivo che permette la trasmissione e ricezione delle forme d'onda: interfaccia l'apparato radar al "mondo esterno". L'energia trasmessa, tramite l'antenna, si propaga nello spazio; l'antenna permette di rilevare l'energia dei segnali di eco provenienti dal target. Spesso le antenne radar sono antenne direttive e cioè antenne caratterizzate da stretti fasci in modo da poter direzionare l'energia irradiata (e quindi concentrare la potenza) sul target. Questo facilita sensibilmente la fase di rilevamento e gli eventuali successivi step. Tipi di antenna a fascio stretto ad es. sono antenne *pencil beam* (o fascio a matita) e antenne *fan beam* (o fascio a bandiera), riportate in Fig. 2.3. Le prime permettono elevata

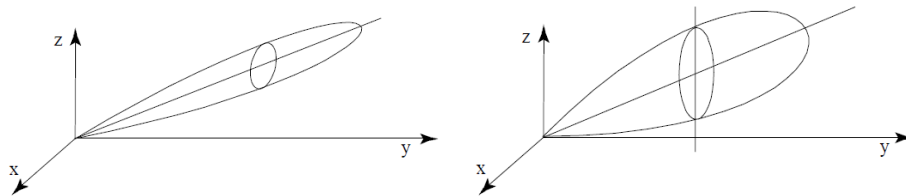


Fig. 2.2: Figura a sx: forma del pencil beam; figura a dx: forma del fan beam.

precisione di misura e risoluzione angolare su entrambi i piani (orizzontale e verticale). Le seconde, fan beam, presentano invece un fascio stretto solo sul piano orizzontale e vengono usate in quelle applicazioni dove la precisione sul piano verticale non è predominante. Un radar che impiega un fascio di esplorazione di tipo fan beam consente soltanto di misurare con un certa accuratezza distanza (range) e azimuth. Un simile apparato trova applicazioni ad es. nel campo del controllo del traffico aereo quando l'oggetto rilevato dal radar è in grado di comunicare direttamente la sua quota. In generale, data un'antenna radar, per comprendere che tipo di fascio è in grado di generare, basta osservare le sue dimensioni fisiche sui piani verticale e orizzontale. Ad esempio se l'antenna è lunga orizzontalmente e stretta verticalmente il fascio generato è di tipo fan beam. Se si impiega un'antenna a paraboloide circolare o ad array di forma quadrata si ha un fascio di tipo pencil beam. Sistemi caratterizzati da stretti fasci direttivi in trasmissione generalmente hanno una larga area in ricezione in modo da permettere il rilevamento dei segnali di eco di bassa potenza provenienti dal target [1].

I compiti principali di un'antenna possono essere sintetizzati come segue:

- concentrare l'energia radiata in trasmissione;
- rilevare i segnali di eco provenienti dal target;
- fornire una misura della direzione angolare del target;
- fornire la risoluzione spaziale per risolvere (o separare) target in angle;
- permettere l'osservazione del volume di spazio desiderato.

In apparati radar la scansione tramite antenne può essere di tipo meccanico o elettronico. Nella scansione di tipo meccanico il fascio è mosso, generalmente ruotato, in modo meccanico con velocità angolare uniforme. Le connessioni elettriche tra l'antenna rotante e il resto del sistema vengono realizzate con un giunto rotante. Nella scansione elettronica è possibile invece modificare il fascio emesso dell'antenna introducendo sfasamenti controllati nell'alimentazione. Questa scansione è spesso impiegata con sistemi ad antenna a schiera (o array di antenne), cioè sistemi costituiti da un insieme o allineamento di antenne tutte identiche, disposte linearmente (su una linea) o planarmente (su un piano), equi-orientate, alimentate in generale con ampiezza e fase distinte per ogni elemento dell'array. Il vantaggio di usare una schiera di antenne sta nella possibilità di ottenere un diagramma di radiazione configurabile quasi a piacere, variando le ampiezze e le fasi delle singole antenne componenti. Il fascio è quindi spostato nello spazio in modo elettronico. A valle dell'antenna è presente un dispositivo di disaccoppiamento tra il sottosistema di trasmissione e quello di ricezione (in basso in Fig. 2.1). Un simile sottosistema è denominato *duplexer* e consente di utilizzare la stessa antenna sia in trasmissione che in ricezione. Il duplexer può anche avere funzioni di protezione.

Nel sottosistema di ricezione il segnale ricevuto viene amplificato ad un livello sufficiente per poter essere rilevato. A monte di questo sottosistema è presente un blocco denominato *Low-noise amplifier* che rappresenta il rumore prodotto dal ricevitore stesso. Il rumore viene inserito nello schema a blocchi in quanto rappresenta un forte limite sull'affidabilità del radar nel rilevare il target ed estrarre ulteriori informazioni. Il blocco è posto al primo stadio del ricevitore in quanto si è supposto che il sistema stia lavorando nelle frequenze delle microonde, come spesso accade [1].

Oltre al rumore l'affidabilità e le prestazioni dei sistemi radar possono essere limitate dalla presenza di echi indesiderati detti *clutter*. Esistono diversi tipi di clutter e una possibile classificazione è riportata di seguito:

- clutter legato a fenomeni atmosferici come pioggia, neve, grandine, turbolenze atmosferiche ecc.;
- clutter di terra e mare. Si verifica quando il fascio d'antenna è radente o incidente la superficie terrestre o marina;
- clutter prodotti da fenomeni di natura non sempre chiara come sciami di uccelli, sciami di insetti, chaff (insieme di particelle metalliche lanciate da aerei per creare falsi echi [2]).

Esistono diversi metodi, sia in trasmissione che in ricezione, che possono essere impiegati per limitare il fenomeno dei clutter. In generale, per dare una soluzione al problema è necessario che il ricevitore abbia un *range dinamico* abbastanza grande da non andare in saturazione causa i molteplici echi indesiderati. Il range dinamico, espresso in *dB*, è definito come rapporto tra il massimo e il minimo livello di potenza del segnale di ingresso in cui il ricevitore funziona nella medesima condizione. Il valore dell'estremo superiore dell'intervallo di funzionamento può dipendere da effetti non lineari della risposta del ricevitore mentre quello inferiore è vincolato al livello del minimo segnale rilevabile dal sistema. Il *signal processor* può essere definito come quella parte del ricevitore che separa il segnale utile da quello indesiderato in quanto, quest'ultimo, potrebbe degradare il processo di rilevamento. Il *signal processing* include il *matched filter* e il *doppler processing*. Il primo massimizza il rapporto segnale/rumore eseguendo la correlazione tra il segnale trasmesso e quello ricevuto (l'operazione di correlazione evidenzia le parti "uguali" dei segnali tra cui è calcolata). Il secondo massimizza il rapporto segnale/clutter di un target in movimento; separa un target mobile da altri target in movimento o dai clutter.

All'uscita del ricevitore viene presa la *decisione di rilevamento* e cioè l'indicazione o meno della presenza in ingresso al ricevitore dell'eco di un target. La decisione viene presa in base al superamento o meno di un valore di soglia. Il concetto è semplice ma la scelta del valore può risultare difficile. Valori troppo bassi potrebbero rendere il sistema sensibile ad un numero di *falsi rilevamenti* eccessivi. Viceversa, valori troppo alti renderebbero il sistema "bucabile": molteplici target potrebbero non essere rilevati. La scelta del valore di soglia si basa su un trade-off tra i aspetti di cui sopra. Dopo aver effettuato la decisione di rilevamento, è possibile ad esempio effettuare il tracking del target ovvero il luogo dei punti occupati dal target nel tempo. Il tracking è un esempio di *data processing*. L'uscita del segnale radar potrebbe poi essere processata nuovamente nel caso sia richiesto fornire diverse informazioni riguardo il tipo di target rilevato.

Il *controllo radar* assicura che le varie parti del radar lavorino in maniera coordinata e cooperativa, ad esempio fornendo ai vari blocchi segnali temporali per la sincronizzazione se richiesta [1].

Le risorse a disposizione della tecnologia radar sono il *tempo*, la *frequenza*, lo *spazio* e l'*energia*. Il tempo è necessario in doppler processing; la larghezza di banda per disporre di buoni valori di risoluzione del range; lo spazio che permette l'impiego di grandi antenne (dimensioni maggiori comportano prestazioni migliori); l'energia per prestazioni a lungo raggio e accuratezza nelle misure.

I fattori esterni al sistema che possono affliggere le prestazioni di un radar sono molteplici.

- Caratteristiche del target;
- Clutter;
- Interferenze con altri dispositivi e sistemi elettromagnetici.

Questi fattori sono menzionati per evidenziare che i loro effetti devono essere presi in considerazione in fase di progettazione e applicazione dei sistemi radar.

2.3 Informazioni disponibili da un radar

Il rilevamento di un target può avere poca importanza se non è accompagnato da altre informazioni inerenti al target. Vale anche il viceversa: conoscere particolari caratteristiche del target senza conoscerne la posizione potrebbe risultare poco utile. Le principali misure eseguite da un apparato radar vengono ora elencate e descritte.

2.3.1 Misura del range

La misura del range (distanza) di un target è probabilmente la caratteristica più importante in un apparato radar convenzionale. La misura del range, in generale, si basa sul ritardo tra l'istante in cui il segnale viene trasmesso e l'istante in cui l'eco è ricevuto. Data la misura di questa differenza temporale necessaria al segnale per arrivare al target, essere riflesso e tornare al ricevitore e nota la velocità di propagazione del segnale ($c = 300000\text{km/s}$, velocità della luce) è possibile risalire alla distanza del target. Nessun altro sensore può eseguire misure di range di target lontani con la stessa accuratezza di un apparato radar [1]. Due parametri che influenzano l'accuratezza sono la conoscenza della velocità di propagazione e principalmente la larghezza di banda; maggiore è la larghezza di banda migliore è l'accuratezza. Anche l'accuratezza del sistema risulta avere ottime prestazioni: per valori medi di range la precisione della misura può essere di pochi centimetri.

Una caratteristica fondamentale nelle misure di velocità è il *concetto di risoluzione*.

Normalmente un sistema radar opera in un ambiente in cui possono essere presenti più oggetti. Di conseguenza, nell'effettuare la misura di distanza occorre poter discriminare tra i vari target presenti. In gergo si dice che si cerca di "risolvere" tali target, in altri termini si vuole che i target presenti conservino la loro individualità [2]. Ciò significa che due (o più) bersagli presenti devono essere visti dal radar come due (o più) echi distinti.

2.3.2 Misura della velocità radiale

La misura della velocità radiale è un'altra informazione che può essere ricavata dal segnale di eco. La velocità radiale è definita come la proiezione del vettore velocità lungo la congiungente radar-target. Un metodo per ottenere il valore della velocità radiale consiste nella misura della variazione del range in un periodo di tempo prefissato.

Un'altro metodo consiste nella misura della frequenza Doppler. Nel caso più generale il segnale ricevuto dal radar è una replica ritardata e quindi sfasata dell'impulso emesso (radar a impulsi). Se lo sfasamento misurato è costante, esso non è di particolare interesse. Se però l'oggetto si muove, al variare del tempo lo sfasamento del segnale ricevuto varia. Nel caso più semplice si può cercare di individuare una frequenza di variazione dello sfasamento dei vari impulsi ricevuti. Tale frequenza è detta *frequenza Doppler* (f_D). Egli infatti dimostrò per primo la proporzionalità tra la velocità relativa del target e lo

spostamento in frequenza del segnale di eco ricevuto rispetto a quello trasmesso. Se il bersaglio si muove verso il radar la frequenza aumenta, in caso contrario diminuisce. Se è possibile estrarre l'informazione relativa alla frequenza Doppler è possibile risalire alla velocità radiale dell'oggetto in esame [2]. L'accuratezza per la misura della velocità di radiazione necessita di *tempo* [1]. L'aver a disposizione per la misura un intervallo di tempo più o meno grande comporta misure della velocità radiale più o meno accurate.

2.3.3 Misure di angoli

Per identificare univocamente la posizione di un target (o per determinare la sua posizione) occorre misurare, oltre alla distanza, l'angolo di provenienza dell'energia retrodiffusa dal target stesso. A tale scopo vengono utilizzate delle antenne direttive. Se si deve identificare la posizione di un oggetto nello spazio oltre alla distanza occorre misurare anche i due angoli indicati in Fig. 2.3. L'angolo θ è definito angolo di *azimuth* mentre l'angolo ϕ è detto

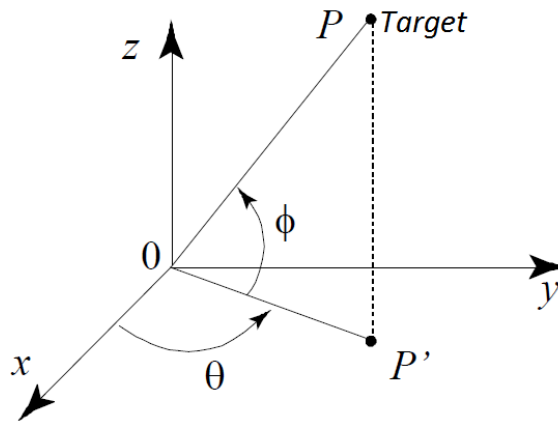


Fig. 2.3: Coordinate di un target nello spazio.

angolo di *elevazione*. La misura di uno dei due angoli necessita dell'impiego di due antenne; la misura di entrambi richiede quattro antenne [1]. Le antenne in questione devono essere caratterizzate da fasci molto stretti. Si definisce *larghezza di fascio* l'intervallo angolare che corrisponde ad una diminuzione di 3 dB del guadagno di antenna rispetto al guadagno massimo. Un'antenna è tanto più direttiva quanto più è piccola la larghezza del fascio misurata sui vari piani caratteristici.

L'accuratezza di una misura angolare dipende dalla *dimensione elettrica* dell'antenna [1].

2.3.4 Rapporto segnale/rumore

L'accuratezza di tutte le misure degli apparati radar tanto quanto un affidabile rilevamento del target dipendono dal rapporto $\frac{E}{N_o}$ dove E è l'energia totale del segnale ricevuto che è processato dal radar e N_o è il rumore per unità di banda del ricevitore [1]. $\frac{E}{N_o}$ è quindi un importante parametro delle capacità di un radar.

Risoluzione angolare è direttamente proporzionale alla larghezza di banda

2.3.5 Dimensione e forma

Se l'apparato radar è caratterizzato da una sufficiente risoluzione spaziale o angolare può fornire una misura del target estesa in alta risoluzione. Il range è generalmente la coordinata a cui fa riferimento la risoluzione del sistema. La risoluzione nel cross range (dato dal prodotto del range per la larghezza di fascio dell'antenna) può essere ottenuta con antenne a larghezza di fascio molto strette. Il cross range è espresso come $DR_{cross} = Rq$ dove R rappresenta il range in metri e q la larghezza del fascio dell'antenna in radianti e rappresenta la lunghezza dell'arco individuato dall'angolo q e la distanza R; rappresenta anche la larghezza del fascio radar alla distanza R. La risoluzione nel cross range così definito tuttavia è limitata dalla larghezza del fascio dell'antenna e non è quindi così buono come la risoluzione nel range. La risoluzione in cross range può essere fortemente migliorata impiegando sistemi SAR o ISAR [1]. Con sufficienti valori di risoluzione nel range e nel cross range è possibile ottenere in certi casi, oltre che le dimensioni del target in due coordinate ortogonali, la forma del target.

2.4 Localizzazione in apparati radar

L'acronimo RADAR, come già precedentemente introdotto, significa RAdio Detection and Ranging. L'acronimo mette in evidenza le due principali funzioni degli apparati radar: il rilevamento (detection) e la localizzazione (ranging) del target. Le tecniche di ranging sono tecniche tramite le quali è possibile ricavare la distanza incognita del target rispetto ad un riferimento, generalmente rappresentato dall'apparato stesso. I metodi di ranging possono essere suddivisi in tre grandi categorie [20]:

- Direction of Arrival Methods (DoA);
- Time based Methods (ToA/TdoA);
- Signal Strength Methods (SS).

Le tecniche di ranging possono essere applicate su diversi sistemi (GPS, laser ranging, localizzazione in telefonia mobile) tra cui gli apparati radar.

Nei sistemi radar ciascuna di queste tecniche, impiegata singolarmente, non permette la localizzazione del target ma solamente la creazione di un luogo dei punti in cui il target si trova. Il luogo dei punti è definito rispetto l'apparato radar. Esso può essere di diverso tipo a seconda del metodo applicato e del sistema radar in questione. Nel caso di localizzazione nel piano, con tecniche DoA il luogo dei punti è rappresentato da una retta; con tecniche SS da una curva (circonferenza o ellissi); con tecniche ToA ancora da una curva (circonferenza o ellissi). Nel caso di localizzazione nello spazio i luoghi dei punti sono i duali di quelli visti nel piano: una porzione angolare, superficie di una sfera e superficie di un ellissoide. In generale quindi queste diverse tecniche vengono utilizzate in maniera multipla sullo stesso target: l'intersezione di più luoghi di punti permette l'effettiva localizzazione del target. Spesso poi i metodi di localizzazione vedono l'impiego di diverse tecniche combinate insieme [21].

2.4.1 Direction of Arrival Methods

Gli apparati radar hanno la possibilità di valutare la direzione in cui si trova il target. Questi metodi, indicati come *Direction of Arrival*, sono spesso impiegati nei sistemi radar. Le tecniche DoA richiedono l'utilizzo di smart antenna e/o antenne a schiera. Nel caso di antenne a schiera, ciascun elemento antenna sarà interessato dalla ricezione degli eco provenienti dal target sfasati e quindi giunti in istanti temporali diversi in funzione della posizione relativa del target e della geometria dell'array (schiera) stesso. In Fig. 2.4 è riportato una generica schematizzazione di un array di antenne composto da due elementi. Causa la diversa posizione del target rispetto i singoli elementi antenna, gli eco “colpisco-

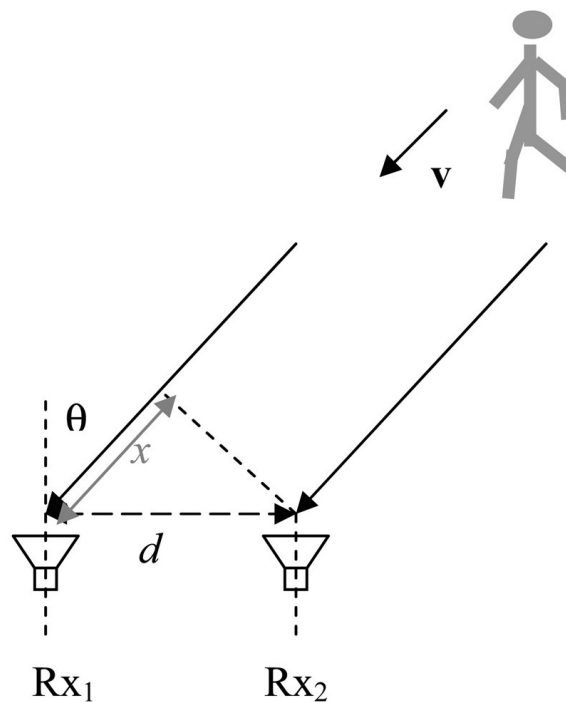


Fig. 2.4: DoA in un array di antenne costituito da due elementi.

no” le antenne in diversi istanti. La misura dei diversi ritardi temporali (TDoA) in fase di ricezione tra elementi successivi dell'array permette di risalire a x . x rappresenta la differenza, in unità di lunghezza, percorsa dagli eco per raggiungere due elementi contigui. Ottenuto il valore di x e nota la distanza d di separazione tra gli elementi dell'array è possibile risalire all'angolo di incidenza θ dell'eco. La misura può essere resa più accurata e precisa elaborando poi i diversi angoli ottenuti da ciascuna coppia. Un metodo, ad esempio, è quello di pesare maggiormente l'indicazione angolare dell'antenna interessata dalla ricezione del segnale ad ampiezza maggiore. È possibile ottenere θ anche dalla misura della differenza di sfasamento con cui il segnale è ricevuto da elementi contigui dell'array. L'angolo è misurato rispetto ad una direzione di riferimento (generalmente indicata come orientazione) data dall'apparato radar stesso. Ottenuta la direzione di arrivo risulta noto il luogo dei punti (retta) dove giace il target. Per poter ottenere la posizione del target è indispensabile individuare almeno due rette: il loro punto di intersezione rappresenta la posizione effettiva del target. A tale scopo è quindi necessario che il sistema ricevitore

sia composto da almeno due diversi elementi riceventi costituiti ciascuno da antenne a schiera. Ciascuno effettuerà le stesse operazioni ed individuerà una retta. Nel caso di localizzazione nello spazio, dove gli angoli da individuare sono due è necessario l'impiego di almeno quattro antenne: due per le misure di azimuth e due per quelle di elevazione.

Un altro modo per la determinazione della direzione di arrivo di un target mediante l'utilizzo di un array di antenne è riportato in [22]. Il sistema ricevente, costituito da elementi antenna diversi, illumina lo spazio con molteplici fasci, uno per ciascun elemento. I fasci sono ampi in azimuth e molto stretti in elevazione (viceversa per una determinazione dell'angolo di azimuth). Misurando la tensione disponibile fornita da ciascuna antenna è possibile, elaborandole in maniera corretta, determinare la direzione di arrivo in elevazione del target.

I problemi legati ai metodi DoA derivano dal tipo di situazione in cui si sta lavorando. Se il cammino tra apparato e target è privo di ostacoli (Line of Sight, LOS) le tecniche DoA non presentano problemi; se il cammino è NLOS invece la direzione di ricezione non è in generale quella in cui si trova effettivamente il target e la localizzazione del target risulta essere più complessa. Infine la presenza di multipath può disturbare la corretta misurazione angolare.

Applicazioni

La misura della direzione di arrivo è spesso utilizzata in tutti quegli apparati radar finalizzati a funzioni di *tracking* e di *search* (ricerca) di un target. Un "search radar" controlla un determinato volume di spazio con l'obiettivo di rilevare l'eventuale presenza di target; un "tracking radar" invece tiene puntati i suoi fasci verso un target selezionato in modo autonomo [23].

Nel documento [4] la stima della direzione di arrivo dei target è effettuata in un apparato radar bistatico con segnale impulsivo. Nell'applicazione riportata l'apparato radar è costituito da un'antenna trasmittente ed un array di antenne al sistema ricevente. I target in questione sono costituiti da rottami spaziali in orbita bassa sopra la terra. La misura di DoA unitamente all'impiego di altre tecniche di ranging permette la localizzazione dei target nell'area di ricerca (search radar). Un altro esempio di radar a ricerca è descritto in [24]. Il sistema è costituito da un radar bistatico utilizzato per la sorveglianza dell'area circostante l'apparato. La localizzazione di eventuali target passa anche attraverso la determinazione della loro direzione di arrivo. La direzione è ottenuta dall'impiego di un array di antenne lineare in fase di ricezione. Un esempio di tracking radar è riportato in [25]. L'apparato radar è di tipo bistatico e trasmette un segnale continuo (CW). Il sistema radar è impiegato per la localizzazione ed il tracking di meteore. L'apparato trasmittente dista 20 miglia da quello ricevente. Quest'ultimo è costituito da tre diverse antenne. La stima dell'angolo di arrivo è fatta calcolando la differenza di fase degli eco alle tre antenne. L'impiego di tecniche DoA è impiegato in molti apparati radar, sia monostatici che bistatici, finalizzati al tracking di target volanti quali aeroplani [1]. Nell'articolo [26] è riportato ed utilizzato un apparato radar monostatico funzionante con la tecnica *monopulse* [23]

utilizzato per misure dell'angolo di elevazione di aeroplani. Il radar è di tipo monostatico e in fase di ricezione la DoA viene calcolato come differenza di fase tra i segnali di eco ricevuti da una array di antenne. Applicazione analoga di misura dell'angolo di elevazione è riportata in [27]. Nel caso specifico si è preso in considerazione i problemi legati alla misura della direzione di arrivo in presenza di multipath causato dalla vicinanza di specchi d'acqua.

La misura della direzione di arrivo è utilizzata anche per la localizzazione di target molto più piccoli di quelli rappresentati da aeroplani o meteore. Nel documento [5] i target hanno dimensioni minori e sono rappresentati da persone. L'apparato (radar bistatico costituito da due elementi riceventi con segnale ad onda continua) permette la misura della direzione di arrivo tramite lo sfasamento con i quali i segnali sono ricevuti. Per migliorare la misura propone anche un procedimento mediante il quale la DoA è ottenuta da elaborazioni sulla variazione della frequenza di Doppler causata da più target. La necessità di rilevare target in movimento di dimensioni paragonabili a persone e di effettuare la loro localizzazione è importante in tutti i sistemi di sorveglianza e sicurezza [5]. Gli articoli [28, 29] riportano la misura di DoA per le stesse finalità.

In [?] viene impiegata anche la tecnica DoA per valutare il movimento e la posizione relativa di uomini/oggetto mobile in ambienti indoor non noti. Montando due radar CW sull'utente (o oggetto mobile) la stima dell'angolo è ottenuta come differenza di fase tra i segnali ricevuti da due diverse antenne. In maniera molto simile a [?] l'angolo di arrivo è misurato tramite due diverse antenne come differenza di fase tra i segnali ricevuti.

2.4.2 Time based Methods

I metodi *Time Based* basano il proprio funzionamento sulla misura del ritardo di propagazione del segnale tra il target ed il sistema radar. Supposta la velocità di propagazione del segnale pari a quella della luce è possibile risalire alla distanza del target dalla semplice relazione $d = \Delta t/c$ dove d è la distanza incognita, Δt il ritardo misurato e c la velocità della luce (Time of Arrival, ToA). Anche in questa configurazione ciò che si ottiene non è l'effettiva posizione del target ma bensì il luogo geometrico dei punti equidistanti dal radar. Il luogo geometrico può essere di tipo diverso a seconda del tipo di radar impiegato. Nel caso di tecniche Time Difference of arrival (TDoA) (molto simili a ToA) quello che si va a misurare è la differenza temporale con cui gli eco provenienti dallo stesso target sono ricevuti da più sistemi ricevitori [21]. La misura di TdoA è ottenuta mediante un'operazione di correlazione tra i più segnali ricevuti. Il luogo dei punti del piano generato da una misura di TDoA è rappresentato da un ramo di iperbole (nello spazio iperboloidi di rivoluzione) [21].

Radar monostatico

Nel caso si stia utilizzando un radar monostatico il luogo dei punti ottenuto è una circonferenza (superficie di una sfera nel caso 3D). Un radar monostatico è un radar in cui sistema ricevente e trasmittente coincidono. In Fig. 2.5 è riportato il generico schema a blocchi di una misura di ToA in configurazione monostatica. In questa configurazione è

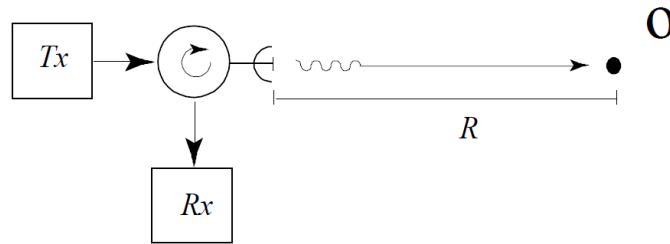


Fig. 2.5: Generico schema a blocchi di un radar monostatico per la stima della distanza.

possibile ottenere la misura di R e cioè della distanza del target andando a misurare il tempo di ritardo tra il segnale trasmesso e quello ricevuto. In questo caso la differenza temporale Δt può essere calcolata con un'operazione di correlazione tra un segnale di riferimento (generalmente quello trasmesso) e quello ricevuto [21]. Il tempo di arrivo è ottenuto calcolando quando la correlazione tra segnale ricevuto e modello è massima. Noto Δt è possibile mediante tecnica ToA risalire a R come: $R = \Delta t \times c/2$. Il luogo dei punti che viene generato è una circonferenza di raggio R e centro il radar monostatico nel caso piano. Per l'effettiva localizzazione del target è necessario affiancare a questa procedura altre modalità. Un primo esempio è rappresentato dall'avere a disposizione più radar monostatici in posizione note tra loro. Ogni apparato esegue la propria localizzazione. L'intersezione delle varie circonferenze rappresenta la localizzazione del target cercato. In questo caso sono necessari tre apparati radar: l'intersezione di tre circonferenze individua uno ed un solo punto nel piano. Unico vincolo di questo metodo è che i tre apparati non devono essere allineati tra loro. Diversamente dall'impiego di più apparati radar è possibile utilizzare unitamente alla tecnica ToA una tecnica DoA precedentemente vista. L'intersezione tra la circonferenza e la retta rappresentante la direzione di arrivo dell'eco del target (angolo di azimuth) localizza il target. Nel caso di localizzazione in 3D il luogo dei punti è rappresentato dalla superficie di una sfera di raggio R e centro il radar monostatico. Per la localizzazione mediante più apparati monostatici risultano necessari ora quattro sistemi radar e non più tre. Affiancando una tecnica DoA è invece necessaria la conoscenza della direzione di arrivo sia in azimuth che in elevazione.

Nella realtà, l'intersezione di più luoghi geometrici ottenute sia mediante tecniche miste o con la stessa impiegata più volte non porta all'individuazione di un singolo punto. Generalmente si riesce ad ottenere un'area in un intorno del punto che si presume corrispondere al target. Quest'area è tanto più piccola quanto migliore è l'accuratezza del sistema.

Radar bistatico

L'impiego di un radar di tipo bistatico porta all'individuazione di un luogo di punti a pari distanza temporale. In questo caso il luogo dei punti è un'ellisse con fuochi rappresentati dal sistema ricevente e quello trasmittente. In Fig. 2.6 è riportato un generico schema a blocchi di una misura di ToA nel caso di radar bistatico. Lo sfasamento (ritardo) tra il segnale trasmesso e quello ricevuto, indicato con Δt , permette di ottenere il valore di $R_1 + R_2$ come: $R_1 + R_2 = \Delta t \times c$. $R_1 + R_2$ è definito *range bistatico* [1]. Ottenuto la

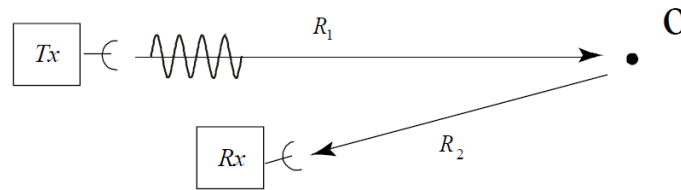


Fig. 2.6: Generico schema a blocchi di un radar bistatico per la stima della distanza.

somma è possibile tracciare un'ellisse sul piano individuato dalla coppia $T_X - R_X$ luogo dei punti a pari distanza temporale in cui si trova il target in accordo con quanto detto precedentemente sui metodi Time Based. Come per il caso monostatico, il target non è univocamente individuato. A tal fine è necessario l'utilizzo di più apparati bistatici. Ognuno individua la propria ellisse e l'intersezione porta alla localizzazione del target. Nel caso piano è necessario il tracciamento di tre ellissi. È possibile utilizzare un solo apparato bistatico aggiungendo oltre alla misura del ritardo temporale con cui il segnale trasmesso viene ricevuto una misura della direzione di arrivo dell'eco del target (DoA in azimuth).

Nel caso tridimensionale (3D) il luogo generato è rappresentato dalla superficie di un'ellissoide. Si necessita di quattro ellissoidi o della misura della direzione di arrivo sia in azimuth che in elevazione per la localizzazione del target.

Rispetto al caso di radar monostatico il radar bistatico permette un'altra modalità di funzionamento. Impiegando un apparato radar multistatico è possibile utilizzare un trasmettitore con più ricevitori. Ogni coppia $T_X - R_i$ costituisce un apparato bistatico. i variabile in $1, 2, \dots, n$ rappresenta i diversi ricevitori dove n è il loro numero. È possibile tracciare n ellissi in cui un fuoco è sempre rappresentato dalla posizione dell'unico trasmettitore. Discorso analogo vale nel caso di localizzazione 3D.

Applicazioni

La localizzazione di target mediante la misura del ToA (e TDoA) è praticamente utilizzata in tutti i sistemi radar sia per fini civili che militari [1, 2, 23]. Apparati radar monostatici e bistatici che basano la localizzazione di un target impiegando misure di tempo si ritrovano in innumerevoli applicazioni nei settori più diversi. In linea generale apparati bistatici e monostatici utilizzano una tecnica mista applicando agli eco ricevuti elaborazioni per ottenere sia la misura del ToA che del DoA [30].

Applicazioni nella sorveglianza aerea a corto e lungo raggio, nel tracking di satelliti, localizzazione di intrusi a corto, medio e lungo raggio, misure del vento, esplorazione di pianeti, misure della ionosfera, localizzazione e tracking di missili vedono con successo l'impiego di tecniche ToA [1].

Maggiore attenzione si vuole dare alle applicazioni inerenti alla localizzazione di persone e oggetti di piccole e medie dimensioni mediante tecniche basate su misure di tempo. Nell'articolo [6] tre radar monostatici indipendenti vengono utilizzati per localizzare oggetti e persone. Il sistema lavora in un ambiente indoor e basa il proprio funzionamento su segnali

impulsivi. Il tracciamento delle tre circonferenze ottenute ciascuna da un singolo apparato radar deriva da misure di ToA degli eco riflessi. L'intersezione delle tre circonferenze rappresenta il target localizzato (trilaterazione). Un'applicazione simile a [6] è riportata anche in [?] dove tre radar monostatici indipendenti vengono utilizzati per la localizzazione di persone. In questo caso, diversamente dal precedente, si prende in considerazione la localizzazione tramite ToA in un ambiente indoor sconosciuto. Sempre inerenti ad applicazioni di sicurezza, [7] vede l'impiego di un radar multistatico per la localizzazione di persone. L'apparato funziona con segnale di tipo impulsivo ed è composto da un trasmettitore e tre ricevitori. Il sistema lavora anche nello spazio e nel caso è aggiunto un quarto ricevitore. Le ellissi disegnate da ciascuna coppia $T_X - R_X$ si basano su misure del ToA degli eco. Per quanto riguarda le tecniche TDoA gli articoli [31, 32] riportano applicazioni di sistemi radar che effettuano la misura del TDoA. In tutte e tre le fonti i target in questione sono rappresentati da aeroplani.

I radar monostatici trovano in generale maggiori applicazioni dei bistatici principalmente per due motivi. In primo apparenze monostatiche richiedono elaborazioni meno complesse di quelle necessarie su radar bistatici ed il loro costo è inferiore [30]. Oltre a questo non sempre si hanno a disposizione grandi spazi e quindi il posizionamento separato di trasmettitore e ricevitore (con elettronica di alimentazione ed elaborazione annessa) può essere un problema.

2.4.3 Signal Strength Methods

Il principio su cui si basano i *Signal Strength Methods* è la misura della potenza del segnale ricevuto. L'apparato radar in trasmissione emette segnali con un valore di potenza nota. L'apparato "risolve" i segnali ricevuti estraendone il valore della loro potenza. Noti i valori di potenza trasmessa e potenza ricevuta è possibile calcolare l'attenuazione che il segnale ha subito nel teorico percorso trasmettitore-target-ricevitore. Dalla conoscenza dell'attenuazione si risale alla posizione tramite la conoscenza di un modello che rappresenti le possibili attenuazioni nell'ambiente in cui si sta lavorando. Il modello ambientale può essere ottenuto in due modi:

- approccio teorico;
- approccio sperimentale.

Nel primo caso il modello di attenuazione è ottenuto da considerazioni teoriche e fisiche dell'ambiente. L'attenuazione è caratterizzabile come somma di un termine di assorbimento e di un termine di diffusione (scattering) [2]. In generale i pesi di assorbimento e diffusione dipendono dal valore della frequenza di lavoro. Spesso la creazione teorica di questi modelli è molto complessa. La sola presenza di precipitazioni (pioggia, neve, grandine) può far variare i valori di assorbimento e diffusione. Nel secondo metodo, quello sperimentale, invece il valore delle attenuazioni è ottenuto sperimentalmente con misure dirette sul campo ad es. tramite un radiometro. In entrambi i casi i modelli devono essere

il più completi, precisi e accurati possibile.

Oltre alla conoscenza del modello ambientale occorre effettuare delle considerazioni anche sul tipo di target di cui si vuole calcolare la posizione. Un “modello” del target è rappresentato, nel caso di apparati radar, dal parametro indicato come area equivalente e più noto nella sua notazione inglese come *Radar Cross Section* (RCS). Quando il segnale emesso dal radar colpisce il target quota parte della potenza incidente viene retrodiffusa verso il ricevitore. Il parametro RCS caratterizza la minore o maggiore capacità del target di diffondere lungo ogni direzione l'energia e.m. che lo investe. Questa grandezza ha le dimensioni di un'area e si misura in m^2 . Per definizione un oggetto in grado di assorbire tutta la potenza che lo investe è caratterizzato da un valore di RCS=0. Nel caso di radar monostatico, anche un oggetto che pur non assorbendo tutta la potenza incidente è in grado di diffonderla solo in direzioni diverse da quella di illuminazione ha una sezione trasversale nulla. Un'importante considerazione per quanto riguarda l'RCS di un target è che può essere variabile o meno nel tempo. Nel caso si stia trattando di un target non sferico e in movimento rispetto al radar l'RCS deve essere considerato variabile. Se l'RCS è costante il target è detto non fluttuante, altrimenti lo è. In letteratura l'RCS viene spesso modellato come un processo stocastico [2].

In linea teorica, tramite l'impiego di metodi SS è possibile risalire al luogo dei punti in cui si può trovare il target. Dalla misura dell'ampiezza dell'eco ricevuto e nota l'ampiezza del segnale trasmesso è possibile ricavare l'attenuazione dell'eco ricevuto. Noto un modello di attenuazione dell'ambiente in cui si sta lavorando è possibile individuare il luogo dei punti a pari attenuazione. Diversamente dai metodi basati su differenze temporali, il luogo dei punti non è ora rappresentabile da una figura geometrica nota come circonferenze o ellissi (superfici di sfere ed ellissoidi nel caso 3D). Il luogo dei punti può quindi avere le forme più diverse.

I problemi che presentano questi metodi sono molteplici e legati a più fattori. Il fenomeno del multipath ne è un esempio. La presenza di più segnali ricevuti in fase di ricezione che non sono effettivi echi del target rendono la misura di potenza errata. In particolare si può incorrere ad una sovrastima della distanza del target. I signal strength methods sono poi soprattutto legati alla precisione e accuratezza con cui sono costruiti i modelli (ambientale e del target). La costruzione di modelli è un'operazione complessa e soprattutto di non sempre possibile applicazione. Non è possibile a priori conoscere sempre l'ambiente ed i target con cui i radar dovranno interagire. Il luogo dei punti inoltre non è noto a priori in maniera qualitativa e come detto non è una forma di “semplice” interpretazione. Questo rende ancora più difficile l'impiego dei metodi SS nel processo di localizzazione.

I metodi SS sono basilari in fase di rilevamento del target ma non costituiscono praticamente mai la tecnica principale di localizzazione in apparati radar causa i loro forti limiti. Vengono utilizzati in particolari applicazioni per migliorare o confermare la localizzazione del target ottenuta mediante altre tecniche. Metodi inerenti alla misura dell'ampiezza vengono invece utilizzati in fase di identificazione.

2.5 Identificazione in apparati radar

Gli apparati radar, oltre alla localizzazione del target, permettono in molti casi anche la sua identificazione.

Quando un radar trasmette un segnale elettromagnetico al target il segnale interagisce con il target stesso. Variazioni nelle caratteristiche del segnale ricevuto rispetto quello trasmesso possono rappresentare utili informazioni per il rilevamento, localizzazione e identificazione del target illuminato [3]. L'identificazione mediante apparati radar richiede di poter estrarre dall'eco riflesso molteplici caratteristiche del target permettendo la sua identificazione. I tipi di caratteristiche da estrarre possono essere molto vari a seconda del tipo di target con cui si deve lavorare. I tipi di target possono essere di diversa natura, forma, dimensioni ecc. In letteratura esistono infinite applicazioni di identificazione di target mediante sistemi radar che avvalorano la loro larga diffusione.

L'articolo [33] tratta dell'identificazione di uccelli mediante apparati radar. Una tale applicazione è utile in ambiti di studi per le migrazioni di uccelli, valutazione sugli impatti ambientali e sicurezza negli aeroporti. L'identificazione in questa applicazione è svolta estraendo dal segnale di eco principalmente due caratteristiche: intensità del segnale e velocità di volo. L'intensità del segnale permette di identificare gli uccelli rispetto a tutti gli altri target meno che gli insetti. La velocità serve per distinguere gli uccelli dagli insetti che generalmente volano a velocità più basse.

Un altro tipo di target che spesso è identificato mediante apparati radar è rappresentato dagli aeroplani. Il metodo più semplice proposto in [34] è il confronto tra la misura dell'RCS del target. Anche l'articolo [35] tratta di identificazione di aeroplani ma con metodi più sofisticati. Uno è quello di elaborare un'immagine 2D ottenuta mediante apparato radar.

Apparati radar sono utilizzati anche per l'identificazione di mine sepolte e più in generale di oggetti nascosti. Come riportato in [36] le caratteristiche estratte dal target sono dovute alla diversa permittività tra target e ambiente. L'identificazione del target avviene con un confronto dell'ampiezza dell'eco ricevuto sulle immagini ottenute mediante radar SAR.

Esistono molteplici altre applicazioni di identificazione mediante sistemi radar ma già questi esempi riportati danno un'idea della vastità di applicazione di questo strumento. Le grandezze interessate da ciascuna identificazione sono diverse e il processo di identificazione ha principalmente una caratteristica in comune. In ogni applicazione avviene un confronto tra le grandezze ottenute e un database in cui sono memorizzati i "modelli" dei diversi target. Il solo confronto tra misura e modello permette l'identificazione o meno del target. Si prendono ora in considerazione quattro caratteristiche utili nell'identificazione. La prima consiste nel contributo dato dal movimento dell'apparato radar rispetto al target per l'identificazione (radar SAR). Il secondo prende in considerazione le caratteristiche polarimetriche dei segnali radar e la loro influenza nell'identificazione dei target. Il terzo considera la dipendenza dello RCS di un target dalla frequenza del segnale radar che lo investe e sfrutta questa dipendenza nel processo di identificazione. L'ultimo caso considera la possibilità di utilizzare l'effetto Doppler a fini di identificazione.

2.5.1 Sistemi radar ad apertura sintetica

Nel processo di identificazione mediante sistemi radar una possibilità è data dai sistemi radar ad apertura sintetica.

Il radar ad apertura sintetica, in inglese Synthetic Aperture Radar (SAR), è stato sviluppato a partire dal 1951 in seguito ad osservazioni effettuate da Carl Wiley della Goodyear Aircraft Corporation. Egli notò che poteva essere ottenuta un'elevata risoluzione angolare analizzando lo spettro del segnale in ricezione da un sistema radar di tipo coerente (un sistema coerente tiene conto nelle elaborazioni sia dell'ampiezza che della fase degli eco ricevuti).

Il sistema SAR sfrutta il movimento relativo tra target e radar per generare un array di antenne virtuale. I radar SAR infatti lavorano similmente ai phased array ma invece di avere a disposizione un grande numero di antenne parallele utilizzano la stessa antenna in istanti e posizioni differenti. Le differenti posizioni geometriche assunte dall'antenna durante l'illuminazione del target dipendono dal movimento dell'apparato radar ed il risultato è che l'antenna reale lavora come un'antenna virtuale con una maggiore apertura come illustrato in Fig. 2.7. L'elettronica del radar memorizza tutti gli eco del target rice-

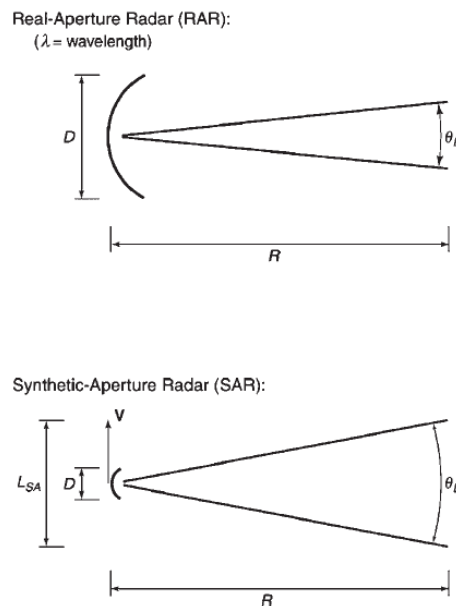


Fig. 2.7: Antenna reale e antenna virtuale in un sistema radar SAR.

vuti nelle varie posizioni in cui l'antenna viene a trovarsi. Le informazioni dagli eco sono relative sia all'ampiezza che alla fase. Se T è il periodo di osservazione del radar e v la velocità relativa tra target e radar è possibile ricostruire un segnale ottenuto come avendo a disposizione un'antenna di lunghezza $v \times T$. Questo rende disponibile una maggiore risoluzione e di conseguenza una maggiore quantità di informazioni inerenti il target. La risoluzione è tanto maggiore quanto più grande è il valore del periodo di osservazione T . La quantità di informazioni acquisite dagli eco dipende dall'apertura sintetica dell'apparato.

Differentemente dai radar tradizionali che utilizzano i segnali di eco ricevuti per rilevare

la presenza, posizione e velocità di un target i sistemi SAR generano dalle informazioni memorizzate un'immagine dell'area osservata, target compreso. Questo processo è di solito noto come *synthetic aperture processing*. In campo dell'identificazione questa abilità dei radar SAR li rendono molto utili: la possibilità di avere a disposizione un'immagine della scena permette infatti di identificare gli eventuali target presenti.

Applicazioni

In letteratura impieghi di radar SAR per identificazione di target sono molteplici e di varia natura. Le classiche applicazioni di identificazione dei radar SAR sono rappresentate da un'osservazione di vaste aree dall'alto, ad esempio con l'impiego di un aeroplano. I target che possono essere identificati dalle immagini ottenute sono diversi. L'articolo [8] riporta l'impiego di radar SAR per identificare i danni prodotti alla foreste da incendi. Nel documento [37] invece si utilizzano le immagini di radar SAR per monitorare aree marittime con l'obiettivo di identificare eventuali fuoriuscite di petrolio. L'utilità, oltre ad un monitoraggio ambientale, è rappresentata da una previsione sull'eventuale tossicità degli alimenti provenienti dalle zone monitorate. L'applicazione descritta in [38] utilizza immagini SAR per identificare danni provocati da alluvioni. L'immunità dei radar agli agenti atmosferici come la pioggia, permette l'utilizzo di radar SAR per identificare danni a strutture come ponti, strade ed edifici in modo da permettere la maggior efficienza in operazioni di salvataggio e evacuazioni. [?] impiega le immagini derivanti da un sistema SAR per identificare vari tipi di "sea ice" (ampie parti di mari e oceani ghiacciati). Per quanto concerne l'identificazione di persone, nel documento [9] è affermato che è possibile identificare una persona da immagini della scena ottenute mediante un radar SAR. L'aver a disposizione un tale tipo di informazione permette l'identificazione di un'eventuale persona presente nella scena. Il processo di identificazione avviene con un confronto tra l'immagine ottenuta e dei modelli umani rappresentati da più scatteratori. Una persona umana è infatti considerabile un target complesso e la risposta del target si ottiene come somma vettoriale (modulo e fase) delle risposte dei singoli scatteratori.

In letteratura altri esempi di identificazione di persone mediante immagini SAR non sono state trovate. Questo fatto unito alla sostanziale differenza tra le classiche applicazioni di identificazione che vedono l'impiego di immagini SAR e l'identificazione di persone rende l'impiego di immagini SAR poco efficiente a tale scopo. Inoltre l'alta richiesta computazionale per elaborazioni real-time e l'impossibilità da parte dei radar SAR di osservare in tutte le direzioni sono ulteriori cause di una loro scarsa efficienza nel caso di identificazioni umane.

2.5.2 Sistemi radar polarimetrici

I sistemi radar possono eseguire un'operazione di identificazione non solo dalle caratteristiche spettrali dell'eco ricevuto ma anche dalle sue caratteristiche polarimetriche. In generale un sistema radar può trasmettere e ricevere forme d'onda con orientazione del campo elettrico verticale o orizzontale. La principale caratteristica dei radar polarimetrici è che possono trasmettere onde elettromagnetiche sia con orientazione verticale che

orizzontale. In Fig. 2.8 sono riportati gli andamenti di due generiche forme d'onda ad orientazione orizzontale e verticale che possono essere irradiate dai radar polarimetrici. La più semplice modalità di trasmissione dei segnali riportati in Fig. 2.8 è la modalità

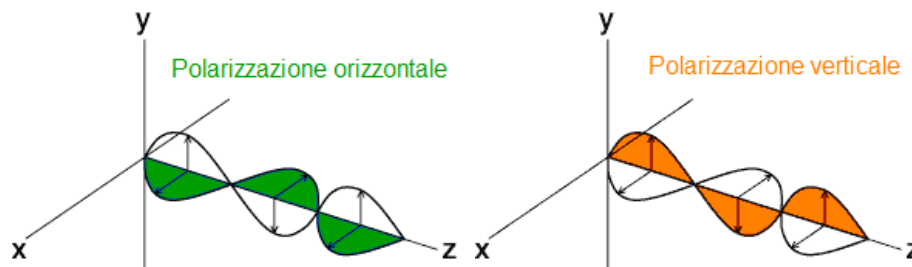


Fig. 2.8: Figura a sx: onda elettromagnetica polarizzata orizzontalmente; la cresta dell'onda del campo elettrico è orientata nella direzione orizzontale (verde). Figura a dx: onda elettromagnetica polarizzata verticalmente; la cresta dell'onda del campo elettrico è orientata nella direzione verticale (arancione).

impulsiva. Impulsi ad orientazione orizzontale e verticale sono trasmessi in maniera alternata. Dopo ciascun impulso è presente un tempo di “ascolto” in cui il sistema radar riceve e interpreta l'eco del target.

I segnali polarimetrici sono molto sensibili alla forma e posizione del target. La possibilità per questi radar di poter illuminare il target con entrambe le polarizzazioni (verticale e orizzontale), aggiunta alla capacità di rilevare le caratteristiche polarimetriche degli eco ricevuti, rendono tali tipi di radar utili nel processo di identificazione. Una conseguenza di questo funzionamento, ad esempio, è la capacità da parte dei radar polarimetrici di ottenere informazioni inerenti le dimensioni del target nelle sue due dimensioni orizzontali e verticali.

Applicazioni

I radar polarimetrici trovano largo impiego nel settore della meteorologia; misurano la potenza riflessa sia sul piano orizzontale che su quello verticale. In applicazioni meteo, dal confronto delle due misure, è possibile ottenere informazioni inerenti alla forma, dimensione e “densità di ghiaccio” di nubi e precipitazioni. Da misure sul piano orizzontale e su quello verticale è possibile calcolare variabili come la riflessività differenziale ottenuta dal rapporto tra la potenza dell'eco orizzontale e quello verticale e il coefficiente di correlazione ottenuto tramite un'operazione di correlazione tra eco orizzontale e eco verticale. Dal primo è possibile identificare la forma delle gocce mentre dal secondo il tipo di precipitazione. In questo modo è possibile ottenere un'identificazione tramite la quale viene identificata la forma delle gocce. In generale tramite i radar polarimetrici è possibile discriminare la pioggia dalla grandine, identificare il tipo di precipitazione in una tempesta invernale e identificare condizioni di “icing” per gli aeroplani. L'identificazione remota di zone di turbolenza e altri “oggetti” atmosferici pericolosi risulta di enorme utilità in condizioni di volo [10].

Tramite gli stessi radar polarimetrici è possibile identificare uccelli ed insetti. Essi dal punto di vista meteorologico rappresentano solamente dei disturbi. Le loro uniche carat-

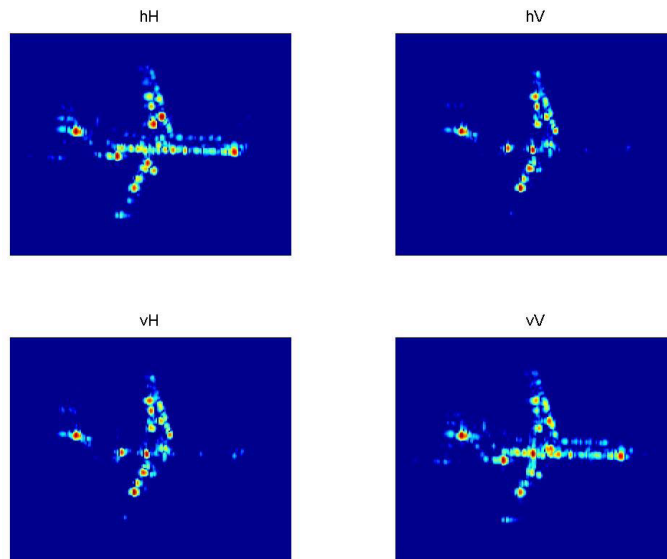


Fig. 2.9: Immagini polarimetriche ottenute mediante radar ISAR; due co-polarizzate, hH e vV, e due cross-polarizzate, hv e vH.

teristiche polarimetriche li rendono, a tali tipi di radar, facilmente identificabili.

In letteratura è possibile trovare altre diverse applicazioni di identificazione utilizzando radar polarimetrici, spesso utilizzati mutuamente ad altre tecniche. Nel documento [39] sono sfruttate le caratteristiche polarimetriche dei segnali per migliorare le immagini ottenute da un radar ISAR per l'identificazione di aeroplani civili. Un sistema Inverse SAR è un radar che sfrutta il moto relativo tra sistema e target dove però il radar è fisso. Il radar insegue il target per un tempo sufficiente ad acquisire una quantità di informazioni minime per generare un'immagine. Le immagini ottenute mediante radar polarimetrico forniscono informazioni aggiuntive rispetto le immagini ottenute da un radar SAR standard. Le immagini tramite ISAR riportano infatti le sole informazioni inerenti alla distribuzione delle riflessioni causate dal target; ciascun profilo così acquisito deve essere allineato con i precedenti utilizzando un complesso metodo di correlazione. Tramite un radar polarimetrico è possibile impiegare anche informazioni derivanti dai meccanismi elettromagnetici che producono le riflessioni. In Fig. 2.9 sono riportate le immagini ottenute dal radar sia in co-polarizzazione (hH-vV) che in cross-polarizzazione (hv-vH). In ciascuna immagine sono presenti circa dieci principali punti luminosi che identificano il target. L'area di ciascun punto luminoso è definita selezionando tutti i pixel con uno span maggiore di un certo livello. La creazione di un database costituito appositamente sulle caratteristiche polarimetriche dei target può permettere un'identificazione di diversi aeroplani inseriti nel database. Il documento [39] riporta anche come l'utilizzo di radar SAR polarimetrici permetta la classificazione delle vegetazioni.

L'articolo [40] riporta un radar SAR che oltre a basarsi su tecniche interferometriche, basa il proprio funzionamento su tecniche polarimetriche per l'identificazione di edifici. L'identificazione di un edificio si divide in due fasi: la differenziazione tra edifici e l'ambiente circostante e successivamente la sua caratterizzazione. La differenziazione è fatta su tre grandi categorie: superficie, edifici e vegetazione; la caratterizzazione consiste nel deter-

minare tre parametri: forma (lunghezza e larghezza) ed altezza dell'edificio.

Nell'articolo [41] è descritto l'impiego di un radar polarimetrico per aumentare la sicurezza alla guida di un automobile. Sistemi come le cinture di sicurezza e air bag sono già presenti in tutte le autovetture. Essi vengono definiti come sistemi passivi: non cercano di ridurre le probabilità di incidente ma hanno come obiettivo quello di ridurre i danni provocati dall'incidente. I radar fanno invece parte di quella categoria di sistemi attivi che hanno come obiettivo quello di evitare gli incidenti rilevando e identificando eventuali situazioni di guida non sicure e collisioni imminenti. I radar polarimetrici rappresentano una possibilità per migliorare l'identificazione dei target. Le tecniche polarimetriche infatti oltre a risolvere il problema del multipath, del rapporto segnale/rumore, delle interferenze permettono di migliorare l'identificazione dei target identificando la categoria a cui essi appartengono. L'identificazione richiede il presupposto di conoscere a priori la risposta polarimetrica delle categorie dei target voluti (pedoni, biciclette, motociclette, automobili).

Nell'articolo [42] è impiegata l'analisi polarimetrica, in aggiunta ad un'analisi delle caratteristiche spettrali degli eco, per ottenere l'identificazione di eventuali armi nascoste su di una persona. I radar polarimetrici possono ricevere sia la risposta co-polarizzata che la risposta cross-polarizzata entrambe in ampiezza e fase. La risposta co-polarizzata è la risposta che si ottiene quando la polarizzazione del trasmettitore e del ricevitore è la stessa; la risposta cross-polarizzata si ottiene invece per polarizzazioni diverse dell'apparato trasmittente e ricevente. Ad alte frequenze l'ampiezza della risposta cross-polarizzata di grandi target rappresenta il livello di "smoothness" e la simmetria del target. Le geometrie delle più comuni armi nascoste sono fortemente irregolari e se posizionate vicine ad un corpo umano possono far aumentare il livello dell'ampiezza cross-polarizzata rendendo possibile così identificare una persona armata. Isolando la risposta polarimetrica dell'eco del torso che singolarmente non genera una sensibile risposta cross-polarizzata permette di identificare persone armate o che nascondono altri oggetti. Un'applicazione di radar polarimetrici simile è riportata in [43]. In questo studio vengono impiegate le caratteristiche polarimetriche dei segnali oltre che per migliorare l'identificazione di persone armate o meno anche per permettere di capire se una persona sta impugnando o meno l'arma che porta. L'articolo prende in considerazione il caso in cui l'arma, se non impugnata, è portata al braccio. La presenza di un'arma modifica sensibilmente la classica superficie di retrodiffusione (riflessione di onde che tornano nella stessa direzione da cui provengono ma in verso opposto) piana rappresentata da una parte del corpo quale il gomito e questo permette di identificare un uomo armato. Se l'arma è impugnata il movimento del gomito è sensibilmente diverso da quello rappresentato in una camminata naturale. Questa variazione permette di isolare il movimento di un'ipotetica arma attraverso il calcolo della differenza di fase tra misure ottenute in co-polarizzazione (antenne trasmettenti e riceventi entrambe in polarizzazione orizzontale HH e poi verticale VV). Sia [42, 43] sono di particolare importanza in applicazioni legate alla sicurezza in aree civili e militari.

L'impiego di tecniche polarimetriche è quindi spesso utilizzato per migliorare il processo di identificazione di target. I radar polarimetrici permettono miglioramenti nell'identificazione

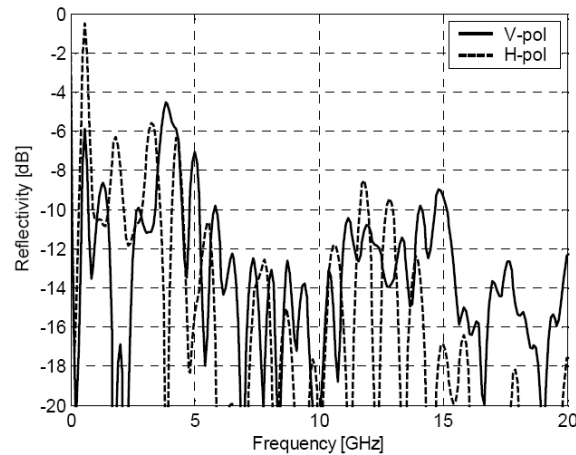


Fig. 2.10: Reflectivity di un corpo umano con polarizzazione verticale ed orizzontale in un range di 0.9-20 GHz .

anche nel caso il target sia costituito da una persona. Spesso queste applicazioni vedono l'utilizzo contemporaneo oltre che di tecniche polarimetriche anche di segnali Ultra Wide-band. In [11] viene monitorato il battito cardiaco mediante un radar impiegante tecnologia UWB. I segnali UWB godono di altissime risoluzioni spaziali che permettono il monitoraggio di spostamenti molto piccoli come quello fatto dal torace causa il respiro. [11] mostra come sia l'ampiezza che la forma del segnale riflesso dal corpo umano dipenda anche dalla polarizzazione della forma d'onda. Fig. 2.10 riporta l'andamento della *reflectivity* del segnale trasmesso per un range di frequenze tra 0.9 e 20 GHz . Esistono frequenze dove la *reflectivity* è maggiore per una polarizzazione e viceversa. Queste diversità possono essere sfruttate per migliorare le operazioni di identificazione. I segnali polarizzati tuttavia sono molto sensibili alla forma e posizione del target. Indumenti o semplici oggetti di metallo portati addosso possono influenzare il segnale. L'impiego di tecniche di polarizzazione in ambienti complessi quindi necessita ancora di studi e ricerche a riguardo.

2.5.3 Radar operanti a più frequenze

La possibilità per un apparato radar di poter utilizzare più frequenze di lavoro può portare significativi miglioramenti nelle sue prestazioni [1]. Con la notazione *agilità di frequenza* (in inglese *frequency agility*) si individuano tutti quei sistemi in grado di cambiare le proprie frequenze di lavoro all'interno di un dato insieme di frequenze. I valori di frequenze utilizzabili sono generalmente abbastanza vicine tra loro. Il loro range di variazione come pure la velocità del cambiamento dipende dall'hardware e software del sistema in questione. Invece con *diversità in frequenza* (in inglese *frequency diversity*) si indicano tutti quei sistemi in grado di sfruttare multiple frequenze di lavoro largamente spaziate fra loro. I sistemi che sfruttano la diversità in frequenza possono lavorare simultaneamente a ciascuna frequenza o quasi [1].

La possibilità di poter utilizzare più frequenze di lavoro può risultare molto utile nei processi di identificazione di target ad opera di un apparato radar. Il radar cross section di un target spesso può variare a seconda delle frequenze a cui il radar lavora. L'RCS

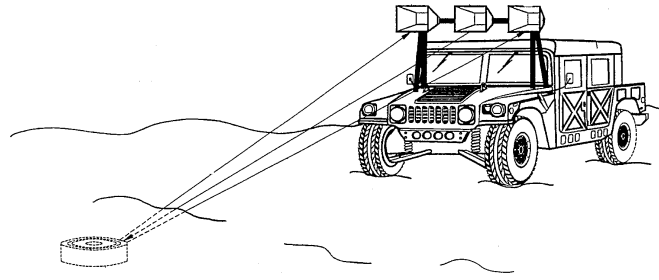


Fig. 2.11: Radar multistatico (un trasmettitore e due ricevitori) operante a più frequenze montato su di un Hummer per identificazione di target da distanza di sicurezza.

di un target complesso (ad esempio un aeroplano) può variare fortemente in funzione di un cambio in frequenza. Ad alcune frequenze il valore dello RCS può risultare piccolo mentre in altre può assumere ampiezze molto più grandi. Potendo operare con un diverso numero di frequenze l'RCS varierà assumendo valori minori e maggiori. È possibile utilizzare questa caratteristica per migliorare i processi di identificazione combinando gli RCS ottenuti da misure a varie frequenze oppure andando a scegliere l'RCS maggiore tra quelli disponibili. “Illuminare” un target con frequenze di lavoro molto diverse permette di avere a disposizione informazioni molto più accurate riguardo il target.

Applicazioni

Nel documento [44] è descritto un radar operante a più frequenze per l'identificazione di target generici come cubi, piastre, coni, tubi e sfere. Per fornire un'unica e completa definizione di un target è necessario impiegare un range di frequenze infinito. Ciò nella realtà non è ovviamente possibile e in [44] viene usato un insieme di frequenze finito. Le frequenze più alte sono impiegate per definire i dettagli più minimi dei target mentre frequenze più basse vengono impiegate per ottenere informazioni riguardo le dimensioni, la forma approssimativa e il materiale di composizione. La stessa tecnica è stata utilizzata per l'identificazione di aeroplani che rappresentano un tipo di target molto diverso da quelli precedentemente elencati sia per quanto riguarda le dimensioni che la sua complessità di forma. Nell'articolo [45] è riportata un'applicazione molto simile a quella appena descritta. In questo caso i target sono rappresentati da cilindri, cubi e viti. Il numero di frequenze utilizzate è pari a dieci e le varie misure ottenute sono poi impiegate per la creazione dell'immagine del target.

Nel documento [12] viene impiegato un radar frequency agility per rilevare, localizzare e identificare target da distanza di sicurezza. I target sono rappresentati da mine e il radar è composto da due antenne riceventi ed una trasmettente montate su di un veicolo Hummer come mostrato in Fig. 2.11. Il trasmettitore trasmette segnali ad onda continua a diverse frequenze che illuminano l'area di target. Gli eco dei segnali a ciascuna frequenza sono memorizzati e processati per rilevare la presenza del target ed effettuare un'identificazione dello specifico tipo.

Nell'articolo [46] è sviluppato il problema dell'identificazione di target mediante sistemi

radar. I target sono rappresentati da aerei, carro armati, camion, automobili e navi. I target sono modelli complessi rappresentati da più scatteratori, ciascuno con la propria specifica locazione e identità. Un modello di scatteratori rappresenta l'eco del target come somma degli eco provenienti da ciascun scatteratore. I principali elementi del modello sono rappresentati dagli angoli, spigoli, lamiere, cilindri. Gli elementi del modello devono essere elettricamente isolati cioè gli scatteratori devono essere visti singolarmente dal segnale radar che li investe. La risposta di più scatteratori visti "vicini" dal segnale radar infatti non è la somma lineare delle singole risposte ma una loro combinazione. Il segnale radar vede gli scatteratori vicini o distanti (e quindi singoli) in base alla sua lunghezza d'onda e di conseguenza alla sua frequenza. Il sistema radar raccoglie gli eco ricevuti inviando segnali a frequenze multiple per migliorare l'identificazione. L'eco degli scatteratori dipende inoltre dall'angolo con cui è investito dal segnale e dalla polarizzazione del segnale stesso. Oltre a misure a più frequenze il sistema radar effettua misure per diversi angoli e polarizzazioni.

Nell'articolo [13] è descritto l'impiego di un radar con due frequenze di lavoro per l'identificazione di animali e persone. Il sistema si basa su tre passi: il rilevamento del target, la localizzazione del target e l'identificazione del target. L'identificazione "risolve" il target come un animale (comprendendo gli essere umani) o meno. Il sistema radar è montato su di un veicolo mobile e permette la "soluzione" dei target presenti di fronte al veicolo nel suo movimento. Il radar opera prima ad una frequenza di 10 GHz per poi commutare ad una frequenza di 60 GHz. Gli eco riflessi da animali o uomini sono di più difficile rilevamento: l'intensità degli eco provenienti da oggetti in metallo, avendo una più alta conduttività elettrica, infatti sono maggiori. Questo limite giustifica l'impiego di più frequenze per migliorare il processo di identificazione [13]. L'apparato analizza i segnali di eco ricevuti dal target illuminato dai segnali ad entrambe le frequenze. Vengono calcolati i *receiving rates* (RR) definiti come il rapporto percentuale tra l'intensità del segnale ricevuto e l'intensità del segnale trasmesso per entrambe le frequenze.

$$RR_{10} = \frac{E_{R10}}{E_{T10}} \times 100(\%), \quad (2.5.1)$$

$$RR_{60} = \frac{E_{R60}}{E_{T60}} \times 100(\%), \quad (2.5.2)$$

dove E_R e E_T rappresentano l'intensità dell'onda ricevuta e trasmessa.

Nel processo di identificazione vengono usati contemporaneamente i dati provenienti dalle due frequenze di lavoro come rapporto e/o prodotto degli RR trovati nelle Eq. 2.5.1 e 2.5.2. I valori ottenuti dal rapporto dei due receiving rates sono infatti confrontati con un valore di soglia scelto in base a considerazioni fisiche delle proprietà elettriche dei materiali considerati.

$$\frac{RR_{10}}{RR_{60}} = \frac{E_{R10}}{E_{T10}} \div \frac{E_{R60}}{E_{T60}} = \frac{E_{R10}}{E_{T10}} \times \frac{E_{T60}}{E_{R60}} = \frac{E_{T10}}{E_{T60}} \times \frac{E_{R10}}{E_{R60}}. \quad (2.5.3)$$

I segnali trasmessi sono costanti e di conseguenza lo è anche il loro rapporto. L'Eq. 2.5.3 può essere riscritta come

$$\frac{RR_{10}}{RR_{60}} = K_R \times \frac{E_{R10}}{E_{R60}}, \quad (2.5.4)$$

dove K_R è il rapporto tra le intensità dei segnali trasmessi a 10 e 60 GHz.

Il rapporto dei receiving rates può dunque essere trovato immediatamente dal rapporto tra i segnali ricevuti ad entrambe le frequenze moltiplicati da una costante nota. L'identificazione si basa sul confronto del valore così ottenuto ed un parametro di soglia. Se il rapporto è più piccolo della soglia allora il target identificato è un uomo.

Discorso analogo per il prodotto tra i receiving rates. Con un procedimento matematico analogo al precedente si arriva a scrivere

$$RR_{10} \times RR_{60} = \frac{E_{R10}}{E_{T10}} \times \frac{E_{R60}}{E_{T60}} = \frac{E_{R10} * E_{R60}}{K_P}, \quad (2.5.5)$$

dove K_P è il prodotto tra le intensità dei segnali trasmessi a 10 e 60 GHz. Il prodotto dei receiving rates può dunque essere immediatamente trovato dal prodotto tra i segnali ricevuti ad entrambe le frequenze divisi per una costante nota. L'identificazione si basa nel verificare che i valori ottenuti siano compresi in un intervallo di soglia. Se ciò accade il target "risolto" è un umano. I valori degli estremi di soglia sono sempre scelti in base a considerazioni fisiche delle proprietà elettriche dei materiali considerati.

Se entrambi i responsi ottenuti dal confronto del rapporto e prodotto dei receiving rates danno lo stesso esito (essere o meno un'essere umano) non sorge alcun problema sull'identificazione. Nel caso in cui gli esiti siano discordi allora risulta necessario, se possibile, effettuare ulteriori misure e ripetere il procedimento.

Un problema dell'processo di identificazione descritto è rappresentato dai valori di soglia. I valori sono ottenuti e tabulati per una certa distanza tra radar e target. L'identificazione, per essere effettuata in maniera corretta, deve essere quindi eseguita ad una determinata distanza target-radar o quantomeno in un intorno più stretto possibile di essa ma spesso questo non è possibile. Il problema trova una soluzione sfruttando il secondo passo che il sistema compie nel suo funzionamento: la localizzazione. È possibile adattare i valori di soglia con cui devono essere fatti i confronti in base alla distanza target-radar ottenuta al passo della localizzazione.

La dipendenza dell'RCS dalla frequenza di lavoro è quindi una caratteristica sfruttata per quanto concerne l'identificazione mediante sistemi radar. L'utilizzo di più frequenze rappresenta un utile strumento nell'identificazione di target o almeno permette il miglioramento dell'identificazione effettuata con altri metodi. Radar operanti a più frequenze mettono a disposizione un maggior numero di informazioni inerenti il target e come visto prima possono essere impiegati anche nell'identificazione di target umani da target non umani. In [13], il confronto tra i prodotti e i rapporti tra le potenze dei segnali ricevuti a due frequenze diverse è un esempio di metodo d'identificazione di target umani.

2.5.4 Effetto Doppler per l'identificazione nei sistemi radar

Come già descritto precedentemente l'effetto Doppler descrive lo spostamento della frequenza centrale di un'onda incidente un oggetto causato dal movimento dello stesso oggetto. Nel caso di sistemi radar esso lega lo spostamento in frequenza dell'eco ricevuto rispetto il segnale trasmesso causato dall'incidenza con un target. Il segnale trasmesso in frequenza dal radar illumina il target in movimento e il segnale retrodiffuso è ricevuto in fase di ricezione. Lo spostamento in frequenza dell'eco ricevuto rispetto alla forma d'onda irradiata in trasmissione è proporzionale alla velocità di movimento del target. Una possibile rappresentazione di questi segnali di eco è data da una loro visualizzazione in un piano frequenza di Doppler-tempo (o velocità radiale-tempo); questi tipi di grafici sono detti *spettrogrammi*.

Questo strumento di identificazione può essere impiegato per l'identificazione di vari tipi di target. Nell'articolo [14] ad esempio è riportato lo spettrogramma ottenuto dai segnali di eco provenienti da un veicolo leggero. Questo processo di identificazione è però di notevole importanza nel caso in cui i target interessati dall'osservazione siano esseri umani. Gli spettrogrammi umani sono unici e possono essere utilizzati non solo per identificare target come esseri umani ma anche per estrarre le caratteristiche del target osservato. Ad esempio si può essere interessati alle dimensioni, al sesso, all'azione che sta compiendo, alla velocità del target [47]. Lo spettrogramma umano è dato dalla somma degli eco riflessi dalle varie parti mobili di cui il corpo umano si compone. Il modello del corpo umano maggiormente usato in questo ambito è costituito da dodici punti ognuno rappresentante una parte del corpo: testa, arti superiori divisi in braccia e avambraccia, arti inferiori divisi in cosce e gambe, torso e piedi. Ciascuna parte del corpo ha un contributo diverso nello spettrogramma a seconda della sua velocità di spostamento e delle sue dimensioni. In Fig. 2.12 è riportato lo spettrogramma simulato di un uomo. È possibile osservare i contributi di tutte le parti in cui il corpo umano è suddiviso. L'eco a maggior intensità è l'eco di ritorno dal torace rappresentato dal colore rosso. Il torace è infatti la parte del corpo a maggior superficie e quindi in grado di riflettere maggiormente. L'eco del torace è anche quello che presenta la più piccola oscillazione della frequenza di Doppler in quanto è la parte del corpo che nel movimento umano subisce le più piccole variazioni di velocità. Viceversa i piedi appaiono nello spettrogramma caratterizzati dal più grande valore nell'oscillazione delle frequenze e minore intensità dell'eco prodotto (colore giallo).

In generale, i vantaggi legati all'impiego di sistemi radar e effetto Doppler sono costituiti da tutti i vantaggi dei sistemi radar senza nessuna limitazione: possibilità di lavorare in condizioni NLOS, ventiquattro ore al giorno (l'oscurità non è un ostacolo), in tutte le condizioni atmosferiche e a grandi distanze. Un limite è invece rappresentato dalla necessità di osservare il target per qualche istante consecutivo. Il movimento di camminata umano è infatti considerabile un movimento ciclico. Anche gli eco ricevuti da ciascuna parte del corpo saranno periodici e questa periodicità è legata alla velocità di movimento. Per ottenere lo spettrogramma in un suo intero periodo è dunque necessario osservare il target per un intervallo di tempo minimo.

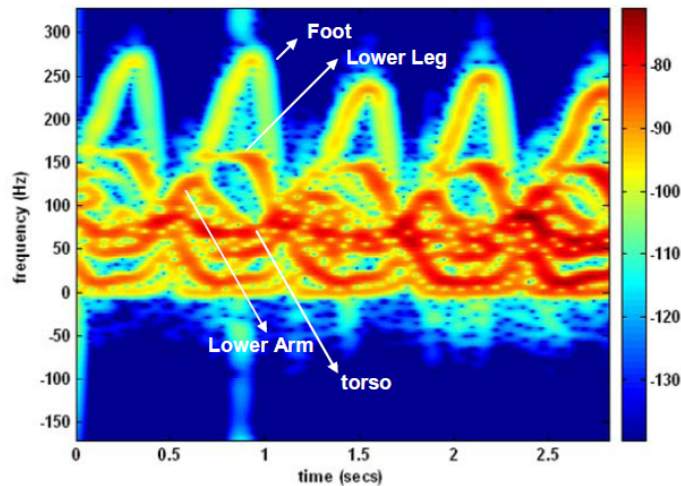


Fig. 2.12: Spettrogramma simulato di un uomo mentre cammina. Sono visibili i singoli contributi delle diverse parti in cui il corpo umano è modellato. L'asse delle ascisse rappresenta il tempo di osservazione in s. L'asse delle ordinate la frequenza di Doppler in Hz. La scala dei colori rappresenta l'ampiezza con cui l'eco è ricevuto in dB; il rosso rappresenta la maggior intensità dell'eco mentre il blu la minore.

Applicazioni

In letteratura esistono molteplici riferimenti ad applicazioni dell'effetto Doppler e dell'impiego degli spettrogrammi per l'identificazione di target soprattutto di essere umani. Tutte queste applicazioni basano la propria efficacia sul confronto tra lo spettrogramma del target da identificare e un database di spettrogrammi a disposizione. I modelli di spettrogramma contenuti nel database possono essere ottenuti da trattazioni teoriche del target oppure tramite misure dirette. Ad esempio in [48] è descritto un metodo per ottenere degli spettrogrammi simulati a partire da dati ottenuti da programmi di animazione computerizzata impiegati nell'industria dei videogiochi e cinematografica. Migliori sono i modelli disponibili e più grande è il loro numero maggiore è l'importanza e l'efficacia dello strumento.

Negli articoli [14, 49] è descritto l'impiego dell'effetto Doppler e degli spettrogrammi per l'identificazione, oltre che di persone, di altri tipi di target. L'articolo [14] riporta lo spettrogramma di un veicolo leggero in movimento. Il veicolo è un target compatto e per tale motivo è caratterizzato da una frequenza Doppler predominante e da strette bande spettrali nel suo intono. Questo lo distingue dallo spettrogramma di una persona in cui i contributi significativi e rilevabili dipendono come detto da più parti in movimento. L'articolo [49] riporta anche esso lo spettrogramma di target diversi dalla persona ottenuti mediante misurazioni. I target sono costituiti da un cavallo e fantino, da un'auto, e da un uomo in bicicletta. Gli spettrogrammi ottenuti sono sostanzialmente diversi da quelli relativi al movimento umano e questo rende facile una loro identificazione.

Nel documento [50] sono proposte delle tecniche per estrarre dallo spettrogramma caratteristiche in modo da differenziare umani da animali (nel caso specifico da cani). Inoltre sempre in [50] è possibile identificare individui di sesso maschile da quelli di sesso femminile.

Nell'articolo [51] è trattato l'impiego delle informazioni ottenute da spettrogrammi per identificare uomini trasportanti carichi. Carichi aggiuntivi modificano la normale andatura di una persona e questa variazione si ripercuote sullo spettrogramma generato. Nel caso specifico si è andato a studiare un'applicazione per identificare eventuali kamikaze in ambienti affollati. Lo spettrogramma di un kamikaze è diverso da quello ottenuto da un uomo "normale" causa il peso aggiuntivo e soprattutto a causa della sua distribuzione. Gli ordigni nascosti sotto i vestiti costituiscono quindi una causa di variazioni nello spettrogramma. Queste variazioni sono studiate e raccolte ed un confronto tra spettrogrammi può portare all'identificazione di un soggetto armato. Il processo può essere effettuato ad esempio ad un check-in e la distanza necessaria tra target e radar è di circa trenta centimetri.

In [49] vengono utilizzate le informazioni derivanti da spettrogrammi per diminuire falsi allarmi in applicazioni di sorveglianza e sicurezza. L'applicazione è sviluppata agli US Army Research Laboratory ed è in grado di identificare l'azione compiuta dal target in camminata, jogging e corsa. L'ipotetica corsa di un target può essere infatti associata ad un'azione ostile. È inoltre in grado di identificare lo spettrogramma derivante da un gruppo di persone che si muovono insieme. Oltre a questo l'applicazione, come detto, è in grado di diminuire drasticamente i falsi allarmi provocati dalla presenza di animali. Lo spettrogramma di un animale è sensibilmente diverso da quello di un essere umano e ciò permette l'identificazione. Il sistema identifica un essere umano nel 100 % dei casi mentre identifica un'animale nello 87% delle volte.

Anche l'articolo [52] è riportata un'applicazione per l'identificazione della camminata, jogging e corsa di una persona. Gli spettrogrammi acquisiti sono confrontati con dei modelli costruiti per via teorica e i risultati ottenuti sono molto soddisfacenti. Oltre a questo anche in questo caso il sistema è in grado di identificare spettrogrammi generati da più persone. In questa applicazione viene considerato lo spettrogramma generato da due persone.

Il campo dell'analisi del movimento umano è molto ampio e offre moltissime prospettive future [52]. Le applicazioni qui riportate e descritte mettono in luce le capacità dei metodi di identificazione tramite effetto Doppler e spettrogrammi. Causa la particolare natura dello spettrogramma umano queste tecniche si prestano fortemente ad essere utilizzate in tutte quelle applicazioni di sicurezza e sorveglianza nell'identificazione di target umani. Le capacità e le funzionalità descritte sembrano porre in primo piano queste tecniche nell'identificazione di persone rispetto agli altri metodi visti. Ad avvalorare questa conclusione è anche il grande numero di recenti articoli presenti in letteratura specifici nella sola identificazione umana.

Panoramica dei sistemi radio UWB

3.1 Introduzione

In questo terzo capitolo si vuole fornire una panoramica sui segnali UWB. Si vuole spiegare cos'è un segnale UWB, elencare quali caratteristiche lo contraddistinguono e evidenziare i vantaggi che comporta l'impiego di questa nuova tecnologia. Infine si vuole indagare sull'uso di segnali UWB negli apparati radar e sulle principali differenze con i tradizionali tipi di radar a banda stretta.

3.2 Cos'è un sistema Ultra Wideband

La tecnologia Ultra Wideband è una tecnologia nata principalmente a causa della sempre maggiore richiesta di velocità di trasmissione e capacità di canale necessaria alle sempre più complesse operazioni di comunicazione. I sistemi UWB hanno la capacità di coesistere con altri sistemi a banda stretta preesistenti [53]. È permessa la coesistenza con i sistemi UWB in quanto essi devono rispettare severe costrizioni in termini di potenza trasmessa in modo da non interferire con altri sistemi di comunicazione. I valori di potenza trasmessa da dispositivi UWB sono controllati da agenzie di regolazione. Un esempio è lo Federal Communications Commission negli Stati Uniti, FCC. A causa di questa particolarità, l'UWB offre soluzioni interessanti per molte aree di comunicazione wireless che includono wireless personal area network (WPANs), sistemi di telemetria e telemedicina wireless e reti di sensori wireless.

Sono state formulate e tuttora coesistono diverse definizioni che hanno come obiettivo quello di identificare una trasmissione radio di tipo Ultra Wideband. In letteratura un sistema UWB è definito come qualsiasi schema trasmissivo wireless occupante una banda più grande di 1.5 GHz, qualsiasi segnale che occupa più di 500 MHz nella banda compresa tra 3.1 e 10.6 GHz e che rispetta i requisiti imposti dallo FCC sullo spettro trasmissivo e altre ancora. La più comunemente usata anche se non copre a pieno tutte le varietà di segnali e sistemi UWB è la seguente: qualsiasi tecnologia wireless che produce segnali con una larghezza di banda maggiore ai 500 MHz o segnali con una banda frazionaria maggiore di 0.2 [53]. La banda frazionaria è definita come il rapporto tra la larghezza di banda Δf e la frequenza centrale f_c :

$$B_f = \frac{\Delta f}{f_c}. \quad (3.2.1)$$

Nello specifico risulta che il segnale per essere classificato come Ultra Wideband debba soddisfare la condizione

$$B_f = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} > 0.2, \quad (3.2.2)$$

dove f_h e f_l rappresentano rispettivamente la frequenza superiore ed inferiore della banda del segnale a -10 dB. La più diffusa tecnica per l'implementazione di un segnale UWB è l'impulso radio (IR). Questa tecnica si basa sulla trasmissione di impulsi di brevissima durata (dell'ordine dei ns) a basso quantitativo energetico.

Il generico impulso UWB è ottenuto dalla derivata di una funzione gaussiana del tipo:

$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\sigma}\right)^2}. \quad (3.2.3)$$

L'ordine della derivata può essere diverso. In Fig. 3.1 è riportato l'andamento di un impulso UWB rappresentante la derivata terza della forma gaussiana. Ampiezza e durata

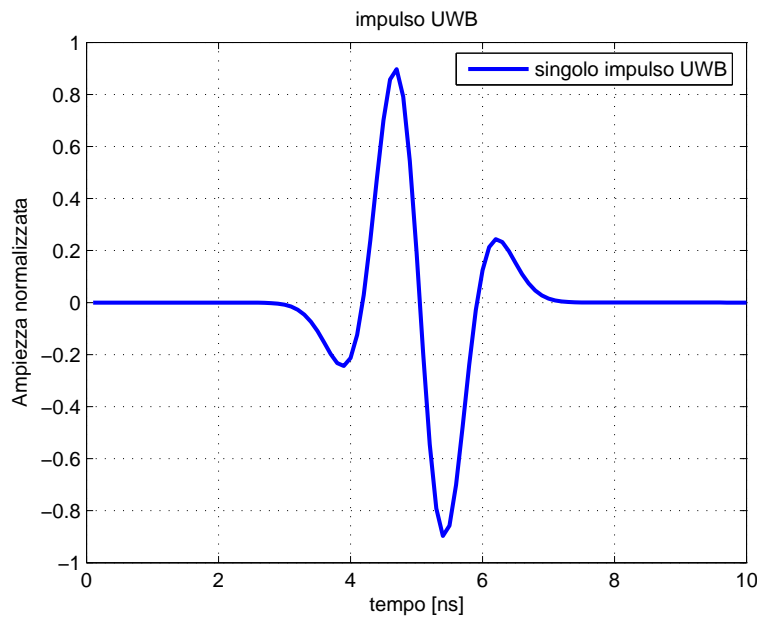


Fig. 3.1: Generico impulso UWB generato mediante MATLAB. Ascissa: tempo in ns ; ordinata: ampiezza normalizzata.

dell'impulso UWB dipendono, come descritto in 3.2.3, da σ .

L'impiego di segnali impulsivi offre un'alternativa alle tradizionali forme d'onda sinusoidali impiegate in comunicazioni wireless. La banda di un segnale è inversamente proporzionale alla sua durata. Gli impulsi UWB, essendo come detto di brevissima durata, godono di un ampio valore di larghezza spettrale. La potenza trasmessa dell'impulso è quindi distribuita su di un ampio spettro e questo garantisce il rispetto dei severi limiti imposti per quanto riguarda la densità di energia. É proprio per questa caratteristica che i segnali UWB non causano sensibili interferenze agli altri sistemi di comunicazione [53].

3.2.1 Cenni storici

Il termine Ultra Wideband è stato usato nel 1989, probabilmente dal Dipartimento della Difesa statunitense, per indicare sistemi e tecnologie con particolari caratteristiche.

Il concetto di comunicazione Ultra Wideband ha origine già nei primi tempi di sviluppo della radio ed è stato usato per più decenni. I primi trasmettitori radio di Marconi e Hertz, chiamati spark gap transmitter, furono sviluppati nei primi del Novecento. Infatti le loro comunicazioni si basavano sull'invio di un segnale "spalmato" su di una banda molto ampia. Questo tipo di impiego dello spettro non consentiva la corretta sintonizzazione nelle comunicazioni e nemmeno la condivisione di bande di segnale. Nel 1927 i trasmettitori spark gap furono completamente banditi.

La maggior parte dei concetti base e brevetti della moderna tecnologia Ultra Wideband risalgono agli anni Sessanta. Gli studi e lavori di Gerald F. Ross e K.W. Robbins (R&R) allo Sperry Research Center, Henning F. Harmuth alla Catholic University of America e Paul van Etten sono i principali esempi.

I libri e gli articoli pubblicati da Harmuth tra il 1969 e il 1984 descrivevano i concetti basilari per la progettazione di trasmettitori e ricevitori UWB. Nello stesso periodo Ross e Robbins lavoravano con segnali elettromagnetici nel dominio del tempo e giunsero a numerosi brevetti tra il 1972 e il 1987 sperimentarono l'uso di segnali UWB in più aree di lavoro che comprendevano applicazioni radar e di comunicazione. Sia Harmuth che R&R applicarono ai sistemi UWB i ben noti concetti di matched filtering. Van Etten proseguì e sviluppò i concetti di progettazione di sistemi e di antenne per sistemi radar UWB.

Il progresso della tecnologia UWB è stato incentivato da sviluppi tecnici in altri settori. Un esempio di notevole importanza è l'invenzione dell'oscilloscopio nel 1962 da parte di Barney Oliver.

Nel 1974 Morey progettò il primo sistema Ground Penetration Radar (GPR) basato su tecnologia UWB. Negli anni Settanta diventò chiaro che le innovazioni nel campo degli UWB potessero provenire principalmente da miglioramenti in particolari sottosistemi e apparecchiature ma non più nei concetti principali dei sistemi. I componenti base come i generatori di treni di impulsi, i modulatori di treni di impulsi, i ricevitori, antenne a banda larga erano ormai noti.

Nel 1986-1987 R. Fontana e Ross svilupparono e implementarono un sistema di comunicazione a bassa probabilità di intercettazione e rilevamento. Nel 1987 Larry Fullerton (fondatore di Time Domain) brevettò l'invenzione del Picotimer. Nel 1994 T.E. McEwan allo Lawrence Livermore National Laboratory inventò il Micropower Impulse Radar (MIR), un dispositivo UWB compatto e poco costoso operante a livelli di potenza estremamente bassi.

È importante menzionare che negli Stati Uniti la maggior parte del lavoro, particolarmente nell'area delle comunicazioni impulsive, è stata svolta da programmi governativi classificati. Lo sviluppo della tecnologia ha accelerato fortemente dal 1994 e la gran parte del lavoro è stato effettuato senza vincoli di segretezza.

3.2.2 Vantaggi dei sistemi Ultra Wideband

La tecnologia UWB presenta molteplici e unici vantaggi rispetto le altre tecnologie wireless già esistenti [53]. In primo luogo la tecnologia UWB permette di utilizzare uno spettro estremamente ampio e di conseguenza comporta un forte aumento dell'efficienza spettrale. I sistemi UWB godono di grande flessibilità nell'uso dello spettro e nei valori di velocità di trasmissione dati, range di funzionamento e potenza fornita. Lo spettro può essere infatti "sfruttato" in modalità differenti a seconda di quale parametro migliorare in funzione del tipo di applicazione. Lo stesso valore della velocità dati può essere bilanciato per un'estensione del range di lavoro. Ulteriormente gli stessi valori del range e della velocità dati possono essere bilanciati per ottimizzare la potenza. La cosa più importante è che lo stesso dispositivo può essere progettato per fornire servizi per molteplici applicazioni con una grande varietà di richieste senza la necessità di hardware aggiuntivo [53].

La tecnologia UWB, grazie alla larghezza di banda occupata, fornisce elevate velocità di trasmissione in range di funzionamento molto corti. Si possono raggiungere velocità maggiori di 1 Gbps in range inferiori ad 1 m, valore decisamente elevato visto che si sta sempre considerando un sistema di telecomunicazioni wireless.

L'elevata risoluzione temporale dei segnali UWB implica un'elevata robustezza nei confronti del fenomeno del multipath. La brevissima durata dell'impulso rende difficile, in fase di ricezione, che un segnale riflesso possa interferire con la ricezione del segnale diretto. La capacità di distinguere in fase di ricezione segnale diretto ed eco riflessi rappresenta il principale motivo per cui la tecnologia UWB è utilizzata in sistemi di localizzazione operanti in ambienti chiusi permettendo risoluzioni dell'ordine del centimetro [53]. La stessa breve durata dell'impulso previene il fenomeno di "fading" del segnale che corrisponde a fluttuazioni indesiderate nella potenza del segnale ricevuto.

I segnali UWB grazie all'ampio range di frequenze occupate mostrano una relativa bassa perdita nella penetrazione dei materiali [53]. I picchi di assorbimento di diversi materiali (in particolare i metalli) sono concentrati in ristrette bande di frequenza. I segnali UWB, a differenza degli altri segnali, risentono quindi meno dell'attenuazione dovuta ad ostacoli. La trasmissione di segnali UWB comporta l'impiego di una bassa potenza trasmissiva. Questo, aggiunto ai valori delle bande di frequenze utilizzate, permettono la coesistenza con sistemi già presenti e forniscono una bassa probabilità di essere intercettati. La scarsa probabilità di intercettazione può risultare particolarmente utile in applicazioni militari. Dal punto di vista dell'implementazione i ricetrasmittitori UWB dovendo effettuare operazioni più semplici dal punto di vista computazionale e in un numero minore rispetto a ricetrasmittitori generici potenzialmente possono essere meno costosi e di dimensioni più ridotte. Si vogliono elencare e motivare le varie applicazioni in cui i segnali UWB trovano impiego soffermandosi principalmente sulle applicazioni radar.

Di questo settore si vogliono mettere in evidenza i vantaggi dei radar UWB rispetto i radar tradizionali e definire alcune delle differenze che li contraddistinguono. Infine si vuole proporre una basilare linea guida per la progettazione di un radar UWB monostatico.

3.3 Applicazioni dei segnali Ultra Wideband

I vantaggi della tecnologia UWB sono stati riconosciuti dagli ambienti radar e delle telecomunicazioni da lungo tempo [53]. I segnali UWB offrono, come detto, capacità uniche che possono essere sfruttate per applicazioni nelle comunicazioni, nei radar, nei sistemi di posizionamento e creazione delle immagini. La grande larghezza spettrale messa a disposizione e la breve durata degli impulsi aprono le porte ad un largo numero di applicazioni caratterizzate da elevate richieste di banda. Sistemi di comunicazione che richiedono alte velocità di trasmissione dati (in range di funzionamento medio-corti) possono trovare grandi vantaggi nell'utilizzo di segnali UWB. Le velocità di trasmissione dati permesse possono essere impiegate in collegamenti wireless per monitor, stampanti, videocamere, telefoni cellulari e altri dispositivi portatili [10]. In generale trovano larghe applicazioni in reti Personal Area Network (PAN). I segnali UWB, avendo come detto bassa densità spettrale e conseguentemente bassa probabilità di essere rilevati (Low Probabilily Detection), sono utilizzabili in applicazioni militari o sistemi civili che richiedono un particolare livello di sicurezza. La necessità di non essere intercettati è particolarmente sentita in tutti quei casi in cui si trattano dati sensibili. Anche, uffici pubblici, aziende private sono solo alcuni esempi. Stesse esigenze di sicurezza, riservatezza e immunità ai disturbi sono manifestate nelle comunicazioni delle forze dell'ordine, pompieri, team di soccorso.

I livelli di potenza molto bassi prima citati uniti alle alte capacità di risoluzione rendono i sistemi UWB ideali per ambienti come ospedali e cliniche. Applicazioni di monitoraggio di segnali vitali come ad esempio battito cardiaco, pressione, frequenza respiratoria possono trovare nella tecnologia UWB vantaggi o un'alternativa alle tecnologie impiegate ora. Sempre in ambito medico in alcuni casi inoltre i pazienti vengono "monitorati" con un radar UWB. Il radar illumina il paziente e poi analizza gli eco di ritorno. In questo modo il sistema è in grado di rilevare improvvisi movimenti del paziente che possono rappresentare situazioni di emergenza attivando un segnale di allarme per il personale medico.

Sistemi basati su tecnologia UWB possono "risolvere" ritardi derivanti dal multipath per tempi dell'ordine dei *ns*. Questo li rende adatti in applicazioni per la creazione di immagini in quanto mettono a disposizione eccellenti risoluzioni. Discorso analogo vale per sistemi di navigazione.

Le proprietà di alta risoluzione e relativa immunità all'attenuazione nell'attraversamento di ostacoli dei segnali UWB vengono sfruttate per "vedere" attraverso i muri e in generale attraverso ostacoli. I segnali UWB rendono possibile il rilevamento e la localizzazione di target nascosti. In ambito edile esempi di questo oggetti sono le tubature, i telai, le intercapedini. Intrusi, forze ostili (mezzi o uomini), armi e ordigni nascosti su di un persona sono invece esempi di oggetti di interesse in ambito di sorveglianza e sicurezza. La tecnologia UWB inoltre migliora il processo di creazione di immagini degli oggetti osservati.

I sistemi UWB trovano spazio anche nei sistemi di localizzazione real-time ed inseguimento sia in ambiti militari che civili. I dispositivi UWB possono essere usati sia per determinare la distanza che la posizione del target. Questa loro capacità può trovare applicazioni in aree come i localizzatori personali di emergenza e inventari mobili. Sistemi di navigazione di veicoli (industriali e agricoli) che richiedono elevate risoluzioni ed in generale elevate

prestazioni vedono l'impiego di tecnologie UWB.

I sistemi UWB inoltre trovano vasta applicazione anche all'interno di sistemi RFID (Radio Frequency IDentification) in cui si vuole monitorare la posizione di alcuni oggetti all'interno di magazzini di dimensioni considerevoli.

Vengono inoltre utilizzati in sistemi domobase o in generale in reti domestiche. In questi sistemi si vuole controllare il funzionamento dei diversi elettrodomestici presenti nell'abitazione. Tale applicazione della tecnologia UWB è dovuta principalmente al fatto che i sistemi UWB difficilmente interferiscono con il funzionamento di altre tecnologie già presenti. In ambienti domestici i sistemi di radiocomunicazione sono molteplici e la bassa densità di potenza spettrale (Power Spectral Density) dei segnali UWB si dimostra quindi un grande vantaggio.

Nel 2002 FCC ha rilasciato un RO (Report and Order) descrivendo cinque classi di applicazioni (dispositivi) Ultra Wideband:

- Sistemi per la formazione di immagini
 1. Radar a penetrazione del terreno (GPR), creazione immagini mediche
 2. Sistemi di sorveglianza, creazioni di immagini attraverso muri
- Sistemi di comunicazione e di misura
 1. Sistemi indoor
 2. Sistemi outdoor hand-held (portatili)
- Sistemi radar in veicoli
 1. collisioni, miglioramento attivazione airbag, sistemi di sospensione, ecc.

3.4 UWB nei radar

L'interesse nei sistemi radar UWB ha avuto una forte crescita negli anni Ottanta quando è stato anticipato che i radar UWB potevano rilevare target di medie dimensioni meglio dei tradizionali radar operanti a banda stretta [16]. La prima area di applicazione per questi apparati radar è stata il rilevamento di oggetti nascosti. In questo tipo di applicazione ci si aspetta che la tecnologia UWB goda di vantaggi maggiori rispetto ai convenzionali radar a banda stretta. Questo problema non ha ancora però una soluzione chiara [17]. Nonostante questo l'impiego di apparati UWB in questo settore è ancora attuale.

La seconda area di applicazione per sistemi radar UWB è inerente le operazioni di rilevamento e sorveglianza di target a brevi distanze (dai m fino le decine di m). Esistono radar che possono rilevare target in ambienti caratterizzati da mezzi con alta densità (terreno e ghiaccio) e radar che operano in aria. La necessità di queste tipologie di radar è alta [17]. Questa necessità è dimostrata oggi dall'alto numero di radar militari e civili di questo tipo applicati per risolvere vari tipi di specifiche. Dal punto di vista costruttivo i radar operanti a distanze medio-corte non presentano grosse difficoltà di implementazione e il loro equipaggiamento occupa piccoli volumi [16]. Questo fatto unito ad una progettazione

a “moduli” accorciano i tempi di sviluppo e rendono quindi i sistemi capaci di fornire rapide risposte alle sempre variabili richieste di mercato.

La terza area applicativa per sistemi radar UWB è la formazione di immagini. Il grande aumento nella quantità e qualità di informazioni ricevute dagli eco permette la formazione di “immagini” radar del target. I radar SAR (Synthetic-Aperture Radar) vedono l’impiego della tecnologia UWB. Questi radar sono spesso montati su aeroplani o piattaforme a terra e vengono utilizzati per la formazione di mappe del terreno e ricerca di target mimetizzati nella vegetazione, sepolti o nascosti in altri modi [17].

La quarta area di applicazione è la sorveglianza di aree di diversa natura. Aree marine, aeroporti, foreste, città ne sono solo alcuni esempi. Questi tipi di radar si pongono a metà tra radar per applicazioni a corto raggio e radar a lungo raggio [16].

Il grande interesse per l’impiego della tecnologia UWB in apparati radar è in generale confermata dal crescente numero di pubblicazioni. Quasi tutte le conferenze e convegni sui radar inoltre presentano speciali sezioni dedicate ai radar UWB.

Causa la fine della guerra fredda tra USA e URSS molte ricerche, sovvenzioni, sperimentazioni e sviluppi su sistemi radar hanno subito un forte ridimensionamento se non l’effettiva chiusura. I sistemi radar UWB hanno risentito di questa situazione in maniera meno pesante causa la maggior semplicità con cui possono essere riadattati. La maggior quantità e qualità di informazioni a disposizione hanno reso più semplice la conversione di queste apparecchiature per fini civili e commerciali [16].

3.4.1 Vantaggi dei sistemi radar UWB

La maggior parte dei sistemi radar convenzionali operano in una banda di frequenze relativamente stretta. Essi usano segnali armonici (sinusoidali) come portanti oscillatorie per trasmettere le informazioni. La ragione di tale scelta è dovuta alla facilità con la quale è possibile implementare il sistema [17]; una sinusoide è un’autooscillazione di un sistema RLC che costituisce il più semplice e quindi maggiormente usato sistema oscillatorio elettrico [54]. Le proprietà di risonanza di un sistema di questo tipo rendono possibile la selezione in frequenza di un largo numero di canali operanti nell’ambiente comune. La selezione in frequenza è quindi il metodo principale per dividere questi canali e la maggior parte dei sistemi radar in uso sono sistemi a banda stretta con valori di larghezza di banda quindi minori della frequenza della portante. É proprio su questa caratteristica che si basano le teorie e il funzionamento degli attuali sistemi radar [17] e [54].

Come noto, in un sistema radar la larghezza di banda è di fondamentale importanza nel determinare la quantità di informazioni che possono essere acquisite. In molte aree della scienza esistono dei limiti teorici che non è possibile oltrepassare. Questo è vero anche per quanto riguarda la quantità di informazioni che possono passare attraverso un dato canale trasmissivo in presenza di un valore di rumore fissato. L’Eq. 3.4.1 rappresenta la legge che governa questo processo.

$$H = \Delta f \log \left(1 + \frac{S}{N} \right). \quad (3.4.1)$$

La legge è chiamata teorema di Shannon dal nome dell'uomo che la formulò nel 1948. La legge mette in relazione H , Δf e S/N . H rappresenta la quantità di informazioni trasmesse nel tempo e la sua unità di misura è *bit/s*; Δf rappresenta la larghezza di banda del canale espresso in *Hz*; S/N rappresenta il rapporto segnale/rumore fissato (numero puro essendo il rapporto di due potenze).

Il volume di informazioni trasmesso per unità di tempo è dunque direttamente proporzionale alla banda di frequenze che il segnale occupa. Un aumento della banda utilizzabile si ripercuote in maniera diretta sul volume di informazioni. Un aumento della quantità di informazione a causa di un aumento del rapporto segnale-rumore risulta invece limitato dalla natura logaritmica di questa dipendenza [15]. La capacità "informativa" è un problema diventato sempre più comune oltre che nei sistemi radar in generale in tutti i sistemi di comunicazione radio in accordo con la veloce informatizzazione della società ed il continuo aumento dei flussi di informazione. Per aumentare la capacità informativa di un sistema radar conviene quindi aumentare la larghezza di banda che il segnale occupa. I segnali UWB risultano quindi di particolare interesse. Nei sistemi radar tradizionali la banda di frequenza assume valori limitati e spesso non è maggiore del 10% della frequenza della portante. Questo tipo di sistema radar ha praticamente esaurito il suo potenziale informativo [54]. La limitata larghezza di banda rende possibile il rilevamento e localizzazione del target ma limita le possibilità di estrarre dagli eco ulteriori informazioni inerenti il target che potrebbero portare ad una sua identificazione. Ad esempio, la creazione di immagini mediante apparecchiature radar necessita di una notevole quantità di informazioni e di conseguenza di banda. Per questo molti sforzi sono compiuti per poter aumentare le informazioni provenienti dal target osservato. L'impiego di segnali UWB in sistemi radar rende possibile ottenere maggiori informazioni e rende, come detto, più semplice la creazione di un'immagine.

L'incremento nel contenuto informativo dei sistemi radar che impiegano segnali UWB è il risultato di una riduzione nella durata dell'impulso e quindi in un aumento della sua risoluzione spaziale. Per un qualsiasi impulso radar, la lunghezza dell'impulso è $c\tau$ e la risoluzione spaziale è $\Delta r = c\tau/2$ dove c è la velocità della luce e $\tau = 1/\Delta f$. Per esempio, riducendo la durata di un impulso irradiato da $1 \mu s$ a $1 ns$ si diminuisce la sensibilità dell'impulso radar da 300 a $0.3 cm$. Per tale motivo si può dire che lo strumento usato per osservare lo spazio diventa più sensibile. Sotto le condizioni di radar UWB vale la relazione $c\tau = c/\Delta f \ll L$ dove L è la lunghezza dell'obiettivo lungo la direzione radiata. Il range di risoluzione Δr così migliorato risolve il segnale di ritorno del target in più segnali riflessi dalle differenti componenti del target per poter formare una sua immagine. Grazie a questo miglioramento i sistemi radar UWB godono di alcune specifiche caratteristiche:

- maggiore accuratezza nelle misure di range (distanza) e migliori risoluzioni; questo comporta nel radar un aumento della risoluzione lungo tutte le coordinate del target;
- riduzione delle zone morte e cioè zone in cui il sistema radar non può operare;
- identificazione della classe e del tipo di target tanto meglio quanto è maggiore il contenuto informativo del segnale ricevuto come eco dal target. L'eco considerato

contiene informazioni oltre che sul target nel suo complesso anche dai possibili singoli elementi che lo compongono;

- migliori contromisure radar nei confronti di segnali elettromagnetici di interferenza a banda stretta;
- maggiore immunità del radar a tutte le interferenze passive come pioggia, nebbia, ecc.; la ragione di questo é che il Radar Cross Section (RCS) dell'interferenza in un impulso di breve durata diventa minore o al massimo comparabile con l'RCS del target;
- aumento dell'immunità dei radar a radiazioni elettromagnetiche, interferenze e rumori;
- incremento della probabilità di rilevamento del target e maggior affidabilità nella funzione di inseguimento (tracking) dovuti all'aumento dello RCS del target;
- maggior affidabilità nel tracking di target per bassi valori di degli angoli di elevazione; avendo a disposizione maggiori risoluzioni è possibile infatti distinguere gli eco provenienti direttamente dal target e quelli invece generati dalle riflessioni sul terreno;
- é possibile cambiare i parametri di radiazione (forma e larghezza del pattern) variando i parametri dei segnali irradiati, tra di loro, ottenendo un diagramma di radiazione dell'antenna ultra-stretto;
- incremento nella sicurezza delle operazioni. I segnali UWB diminuiscono infatti la possibilità di rilevamento delle operazioni radar ed il successo di attacchi esterni.

3.4.2 Differenze dei radar UWB

I processi di rilevamento, localizzazione e identificazione tramite l'impiego di apparati radar con tecnologia UWB differiscono sostanzialmente dagli stessi processi con radar impieganti segnali a banda stretta. Questo accade nel caso in cui la larghezza spaziale del segnale è minore dell'apertura dell'antenna o delle dimensioni del target [17]. I radar basati su segnali a banda stretta godono infatti di una importante proprietà: nel loro funzionamento la forma d'onda irradiata sostanzialmente non si modifica. La forma d'onda non cambia con le tradizionali tecniche di trasformazioni che comprendono somme, sottrazioni, derivate e integrali che avvengono durante la trasmissione, riflessione e ricezione del segnale. Questa costanza nella forma d'onda è così comune che il parametro forma dei segnali in radar a banda stretta spesso è omesso dalle specifiche [15]. Sotto la condizione $c\tau \ll L$ la larghezza spaziale del segnale è minore anche dell'apertura dell'antenna. Quando la risoluzione spaziale del segnale diventa più piccola delle dimensioni del target, il segnale riflesso subisce forti cambiamenti e ritorna con una differente forma [15]. La dipendenza della forma dei segnali UWB ai parametri dell'antenna, angoli di osservazione e caratteristiche del target rappresenta un'importante differenza rispetto gli apparati radar a banda stretta. Differenze tra radar UWB e radar impieganti segnali a banda stretta si mostrano

in pratica in tutti gli stadi di funzionamento (formazione, irradiazione, riflessione, ricezione ed elaborazione di un segnale UWB). Le principali differenze comprendono:

- cambio della forma d'onda dei segnali radar durante l'osservazione del target. Nei sistemi radar convenzionali basati su segnali a banda stretta, un segnale riflesso da un obiettivo è molto simile nella forma al segnale irradiato. I parametri che possono cambiare sono solamente il valore dell'ampiezza e lo sfasamento temporale. Nei radar UWB, il segnale invece durante le fasi di radiazione, riflessione e ricezione subisce una trasformazione che interessa anche la sua forma. Come risultato si ha un andamento sconosciuto del segnale ricevuto. Il cambiamento della forma, in maniera più precisa, può essere schematizzato in sei passi [54].

L'impulso (ad esempio di corrente) generato subisce una prima trasformazione durante la sua radiazione: l'intensità del campo elettromagnetico irradiato varia proporzionalmente alla derivata della corrente che scorre nell'antenna. Il secondo cambiamento nella forma avviene quando l'antenna è eccitata in un punto e la corrente scorre lungo il radiatore elettrico. In questo caso gli elementi dell'antenna irradiano impulsi elettromagnetici in serie intervallati nel tempo. Un singolo impulso si trasforma quindi in una sequenza di impulsi. Il terzo cambiamento nella forma è causato dal fatto che gli impulsi irradiati da un elemento dell'antenna sono ritardati rispetto agli impulsi irradiati da un elemento adiacente. Ogni elemento antenna vede infatti il target ad un differente angolo θ (angolo tra la normale all'array di antenne ed il target). Il quarto cambiamento avviene a causa della riflessione del target. I target possono essere sempre modellati come un insieme di singoli scatteratori. Il segnale UWB viene riflesso dagli elementi discreti di cui si può comporre il target ottenendo una sequenza di impulsi. Il numero, l'intensità ed il ritardo temporale dipendono dalla forma del target e dalla sua risposta impulsiva [54]. Questa sequenza di impulsi è detta "immagine del target". La quinta trasformazione avviene in fase di ricezione: il campo elettromagnetico ai vari elementi dell'antenna ricevente genera segnali di corrente ritardati tra loro. Il sesto cambiamento della forma del segnale avviene durante la propagazione del segnale nell'atmosfera.

Questo rende difficile l'applicazione dei convenzionali metodi di elaborazione dei segnali (matched signal processing);

- dipendenza dei parametri dell'antenna dalle forme d'onda del segnale, e viceversa. Questa dipendenza risulta nel fatto che i parametri d'antenna come larghezza e posizione del fascio, direttività e guadagno diventano tempo variabili e non stazionari. La forma del pattern della antenna al sistema ricevente dipende dalla sua direzione relativa all'antenna in trasmissione. Questo fatto rende impossibile applicare i metodi convenzionali per determinare i parametri d'antenna;
- variazioni temporali dello RCS. Questo comporta delle complicazioni quando si vuole determinare il valore dell'eco di ritorno con i metodi tradizionali. Ora, questi valori dipendono dal tipo di elaborazione del segnale a livello del ricevitore radar;

- cambiamenti introdotti nella forma dell'equazione canonica del range del radar per determinare i parametri dei radar UWB. Alcuni dei parametri dell'equazione dipendono infatti dal tempo e dalla forma del segnale. Nel caso di segnali UWB non è quindi possibile utilizzare l'equazione canonica;
- variazione della forma e della posizione dei diagrammi trasmettenti e riceventi dell'antenna durante la trasmissione e ricezione dei segnali UWB;
- impiego del dominio del tempo anziché del dominio della frequenza per ricezione ed elaborazione del segnale;
- impossibilità di applicare i tradizionali metodi di filtraggio per ottimizzare l'elaborazione dei segnali UWB.

Le specifiche caratteristiche dei radar UWB e le loro diversità rispetto i tradizionali radar a banda stretta creano maggiori difficoltà nella progettazione di questi tipi di radar. Il raggiungimento dei vantaggi precedentemente elencati richiede l'implementazione di una base teorica in quanto spesso non è permesso usare teorie e metodi tradizionali quando si vanno a progettare gli elementi che compongono il sistema in base alle specifiche desiderate. Per questo i metodi impiegati per ricerca, sviluppo e progettazione differiscono significativamente dai metodi usati nei tradizionali radar a banda stretta. Da questo punto di vista, l'implementazione di segnali e radar UWB sta portando alla creazione di un nuovo ramo scientifico e a diversi tipi di innovative soluzioni ingegneristiche [17].

Una soddisfacente e sistematica teoria dei radar Ultra Wideband non è ancora tuttavia stata sviluppata [54]. La ragione ha a che fare con le significanti distinzioni nel processo di osservazione in un sistema UWB rispetto allo stesso processo svolto con l'impiego di segnali a banda stretta prima elencate e descritte.

3.5 Linee guida per la progettazione di un radar monostatico UWB

Per la progettazione di un radar monostatico UWB è necessario prestare particolare attenzione alle severe specifiche imposte dallo FCC per quanto riguarda le potenze irradiate. Come già detto questi limiti sono imposti per ridurre ed evitare le interferenze con dispositivi già pre-installati. Gli impulsi radar devono essere appositamente dimensionati per rispettare i limiti e contemporaneamente ottimizzare il rapporto segnale/rumore ed il tempo di acquisizione [55]. Un elevato rapporto segnale/rumore disponibile in ingresso al ricevitore facilita le operazioni necessarie al rilevamento (ed eventualmente localizzazione e identificazione del target); il tempo di acquisizione deve essere impostato in modo da rendere più veloce possibile il sistema. I parametri che bisogna inizialmente considerare nella progettazione di un impulso radar sono la larghezza di banda degli impulsi trasmessi, la potenza di picco e la frequenza di ripetizione.

3.5.1 Parametri di progettazione dell'impulso: larghezza di banda, frequenza di ripetizione e potenza di picco

La larghezza di banda Δf è facilmente calcolabile dalle specifiche inerenti la risoluzione del range Δr secondo 3.5.1

$$\Delta r = \frac{c}{2\Delta f}. \quad (3.5.1)$$

Incrementando la larghezza di banda è quindi possibile disporre di risoluzioni maggiori. La frequenza di ripetizione degli impulsi (Pulse Repetition Rate, PRR) deve essere scelta in modo da evitare ambiguità nel range di misure voluto.

$$PRR \leq \frac{c}{2R_{MAX}}, \quad (3.5.2)$$

dove R_{MAX} rappresenta il massimo range consentito per il rilevamento di un target.

3.5.2 Determinazione della potenza di picco in accordo allo FCC

Nella regolamentazione FCC il principale limite è rappresentato dal massimo valore della densità spettrale di potenza della potenza irradiata efficace [55]. È utile avere a disposizione una procedura per la determinazione dei parametri in accordo allo FCC. Una generica espressione della corrente d'antenna durante la trasmissione dell'impulso è data in

$$i_{TX}(t) = A \times e^{-\pi(\frac{t}{\tau})^2} \times \cos(2\pi f_c t). \quad (3.5.3)$$

In 3.5.3 f_c è la frequenza centrale degli impulsi trasmessi, A è un fattore di scala da determinare per rispettare i limiti dello FCC e τ rappresenta la larghezza temporale degli impulsi trasmessi. La densità spettrale di potenza relativa a 3.5.3

$$dps_{TX} = G_T \times PRR \times R_{ant} \times |I_{TX}(f)|^2, \quad (3.5.4)$$

dove $I_{TX}(f)$ è la trasformata di Fourier della corrente d'antenna e $|I_{TX}(f)|^2$ è la densità spettrale di energia degli impulsi trasmessi, G_T è il guadagno dell'antenna in trasmissione e R_{ant} è la resistenza di radiazione.

Il limite imposto per la d.s.p. è pari a -41.3 dBm/MHz per radar operanti nel range di frequenze $3.1\text{-}10.6 \text{ GHz}$; stesso valore consentito nel caso di sistemi radar montati su veicoli operanti nel range di frequenze $22\text{-}29 \text{ GHz}$.

Da 3.5.3 e 3.5.4 è possibile ottenere l'espressione della potenza trasmessa espressa in W/Hz calcolando la trasformata di Fourier di 3.5.3.

$$P_{TX} = G_T \times PRR \times R_{ant} \times \left(\frac{A * \tau}{2}\right)^2 \times e^{-2\pi(\tau(f-f_c))^2}. \quad (3.5.5)$$

Da 3.5.5 si ottiene il valore di P_{MAX} imponendo $f = f_c$

$$P_{MAX} = G_T \times PRR \times R_{ant} \times \left(\frac{A * \tau}{2}\right)^2. \quad (3.5.6)$$

Il massimo valore di potenza è relativo al massimo valore ammissibile di PRR in modo da permettere la misura nel tempo più breve alla massima distanza.

$$P_{MAX} = G_T \times \frac{c}{2R_{MAX}} \times R_{ant} \times \left(\frac{A * \tau}{2} \right)^2. \quad (3.5.7)$$

La trasformata di Fourier dell'impulso descritto in 3.5.3 ha una forma di tipo gaussiano con larghezza di banda, in teoria, infinita. In pratica la larghezza di banda si può approssimare scegliendo un limite di $-10dBm$ [55]. Con questa approssimazione l'espressione di τ è

$$\tau = \frac{2}{\Delta f} \times \sqrt{\frac{\ln(10)}{2\pi}} = \frac{2.421 * \Delta r}{c}. \quad (3.5.8)$$

Sostituendo (3.5.8) in (3.5.7) è ora possibile ricavare il valore del fattore A misurato in *Ampere* in modo da rispettare i vincoli imposti dallo FCC per i segnali UWB. A è espresso come

$$A = \frac{1}{2.421 * \Delta r} \times \sqrt{\frac{8 * P_{MAX} * R_{MAX} * c}{G_T * R_{ant}}}. \quad (3.5.9)$$

Noto ora il valore dell'ampiezza di corrente A è possibile, utilizzando l'equazione radar adatta ai segnali UWB, determinare il rapporto Segnale/Rumore. Nel caso S/N sia troppo basso è possibile agire in due diversi modi. Il primo consiste nell'incrementare la potenza di picco con relativa diminuzione dello PRR. Una tale scelta comporta l'introduzione di un'amplificatore di potenza che può provocare distorsioni ed inoltre può vanificare un approccio che tenta di avere in uscita i valori di potenza più bassi. Il secondo modo vede invece l'utilizzo di un insieme di N impulsi per ciascuna misura. In questo caso è richiesto una più complessa elaborazione del segnale ed inoltre questo approccio fa sorgere dei problemi nel caso il target si muova in direzione radiale. Generalmente il primo metodo viene scartato vista la sua richiesta nel valore di picco dell'impulso, soprattutto nelle applicazioni a bassa potenza [55].

Applicazioni di radar UWB

4.1 Introduzione

I sistemi radar sono ancora comunemente associati ad applicazioni legate alla difesa nazionale, alla sicurezza aerea o ai servizi meteorologici. Quest'idea di apparato radar è stata vera per molto anni e i motivi sono da ricercare nell'origine di queste apparecchiature. Le principali cause di ricerca, sviluppo e sperimentazioni sono infatti associate ad esigenze militari. La necessità di rilevare e poi localizzare target come navi e aerei ostili furono determinanti fattori nella nascita e crescita di questo settore della tecnica.

Ormai da un decennio i sistemi radar si stanno estendendo in altri settori molto più vicini alla vita quotidiana. La tecnologia UWB, come già detto, è stata di particolare importanza in questo processo di “migrazione” [56]. I vantaggi conseguenti a questa tecnologia (alta risoluzione spaziale, maggior immunità ai disturbi ed interferenze, “trasparenza” agli ostacoli, ecc.) oltre a quelli comuni a tutti gli apparati radar (immunità alle condizioni climatiche, condizioni di oscurità, ecc.) hanno facilitato il riadattamento di sistemi già esistenti e lo sviluppo di nuovi.

Si vuole ora presentare una serie di applicazioni “ordinarie” che sono svolte (o potrebbero essere svolte) mediante l'impiego di radar UWB. Si vogliono mettere in luce i vantaggi che queste tecnologie possiedono rispetto ad altri sistemi già esistenti e i miglioramenti da esse introdotte nei vari campi di applicazione.

4.2 Radar UWB nel settore medico

Nel settore medico, si possono distinguere due principali applicazioni: sistemi di *monitoraggio* e sistemi di *diagnostica* per immagini UWB.

Il monitoraggio di funzioni fisiologiche tramite tecnologia radar è stato preso in considerazione sin dagli anni Settanta [57]. Gli ingombri ed i costi delle apparecchiature ne hanno però ritardato l'impiego. I sistemi UWB basano le proprie capacità di monitoraggio su principi fisici che differiscono da quelli utilizzati dalle altre tecnologie aventi gli stessi scopi. La possibilità di monitorare i movimenti degli organi interni senza la necessità di un contatto diretto tra persona e strumento aggiunta al non dover utilizzare un campo indotto nella misura rendono l'utilizzo dei radar UWB particolarmente vantaggioso. In questo modo il trattamento al paziente risulta essere meno invasivo e quindi maggiormente sopportabile. La possibilità di un monitoraggio “in remoto” rende più libero nei movimenti il paziente. L'utilizzo inoltre di un campo radiato e non indotto evita che il paziente debba essere confinato in un ambiente limitato. Le risonanze magnetiche eseguite per fornire immagini dei movimenti degli organi interni impiegano un campo indotto e quindi costringono il paziente a dover essere confinato.

I vantaggi da un tale tipo di monitoraggio sono sensibili anche dal punto di vista del personale medico. La maggior mobilità del paziente e l'assenza intorno ad esso di cavi e fili che lo collegano a diverse strumentazioni rendono notevolmente più semplice il lavoro del personale stesso. Anche lo stesso eventuale trasferimento del paziente risulta essere di più semplice attuazione.

Collocati al soffitto di camere di ospedali come in Fig. 4.1 i sistemi UWB consentono di monitorare continuamente le frequenza cardiaca e respiratoria di più pazienti contemporaneamente. In gravidanze a rischio è possibile utilizzare radar UWB per un monitoraggio

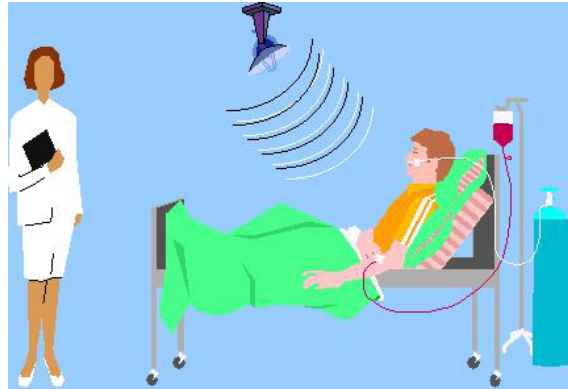


Fig. 4.1: Ipotetico sistema radar UWB montato al soffitto per il monitoraggio di un paziente.

continuo del feto: le emissioni degli apparati, causa i loro limitati valori, non sono fonte di danno per la salute del paziente [57]. La stessa procedura può essere applicata di routine nell'ultimo periodo di una gravidanza.

La seconda applicazione medica e cioè i sistemi di diagnostica per immagini UWB sembrano essere un'applicazione molto promettente. Come descritto in [57] i vari tessuti umani hanno caratteristiche d'assorbimento e di riflessione specifiche e su questa caratteristica si possono sviluppare sistemi di diagnostica per immagine molto efficaci. Rispetto ad una risonanza magnetica nucleare i sistemi radar permettono un'analisi più rapida e delicata. Evitano inoltre di sottoporre il paziente alle radiazioni degli apparecchi ai raggi X.

4.2.1 Sperimentazioni e applicazioni

In letteratura esistono molteplici lavori in cui sono studiati, sperimentati e descritti sistemi UWB per il monitoraggio di parametri vitali quali frequenza cardiaca, frequenza respiratoria e in certi casi anche la pressione. I documenti [58, 59, 57, 60] sono solo alcuni esempi. In Fig. 4.2 sono rappresentati tre modelli di radar presentati e testati in [58, 59]. Le principali specifiche del modello A sono riportate in Tab. 4.1. Questo modello di radar è un prototipo preposto a fini di ricerca. In laboratorio è stato testato nel monitorare in remoto i parametri vitali di un ipotetico paziente posto ad una distanza nota e costante. L'ampiezza dei segnali in uscita dal sistema radar sono direttamente proporzionali all'ampiezza e alla velocità del movimento del torace e del cuore. I dati ottenuti sono confrontati

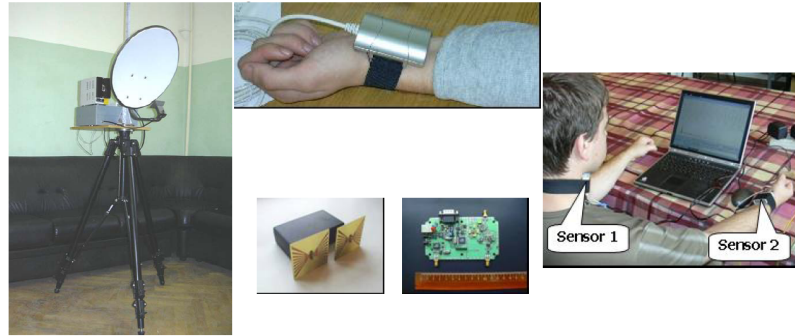


Fig. 4.2: Quattro diversi modelli di radar UWB per applicazioni mediche. A sx: modello A; centro in basso: modello B; dx: modello C.

Tab. 4.1: Specifiche radar modello A.

Specifiche	Valori	Unità di misura
Range operativo	8	m
Potenza dell'impulso	10	mW
Potenza media	80	μW
Larghezza del pattern dell'antenna	$8^\circ * 8^\circ$	gradi
Durata temporale dell'impulso irradiato	2	ns

con misure derivanti dall'impiego di un cardiografo medico; le misure sono state effettuate nelle stesse condizioni. Il coefficiente di correlazione tra i segnali ottenuti dal radar e quelli mediante apparato tradizionale è pari circa a 0.91 [58].

Anche il modello B riportato in Fig. 4.2 (vista esterna ed interna) rappresenta un prototipo di cui è stato testato il funzionamento. Le sue specifiche sono riportate in Tab. 4.2. [59] riporta i diagrammi ottenuti dalle prove effettuate. In Fig. 4.3 è riportato nella

Tab. 4.2: Specifiche radar modello B.

Specifiche	Valori	Unità di misura
Range operativo	0.1-3	m
Potenza dell'impulso	0.4	W
Potenza media	240	μW
Frequenza di ripetizione	2	MHz
Durata temporale dell'impulso irradiato	4	ns

parte bassa in blu il diagramma temporale di un segnale derivante dalla somma dei contributi del battito cardiaco e respiratorio rilevato tramite il radar UWB. Dagli andamenti riportati in Fig. 4.3 si può stimare il periodo di un respiro circa pari a 5 s e quindi la frequenza respiratoria pari circa a 12 *atti/minuto*; la frequenza cardiaca è circa pari a 60 *battiti/minuto*. Entrambi i valori ottenuti sono concordi con specifiche mediche.

L'andamento è confrontato con un elettrocardiogramma ottenuto mediante un elettrocardiografo medico (segnale rosso in alto). Fig. 4.3 mostra un accurata somiglianza tra il battito cardiaco registrato dal radar UWB e quello ottenuto da elettrocardiogramma.

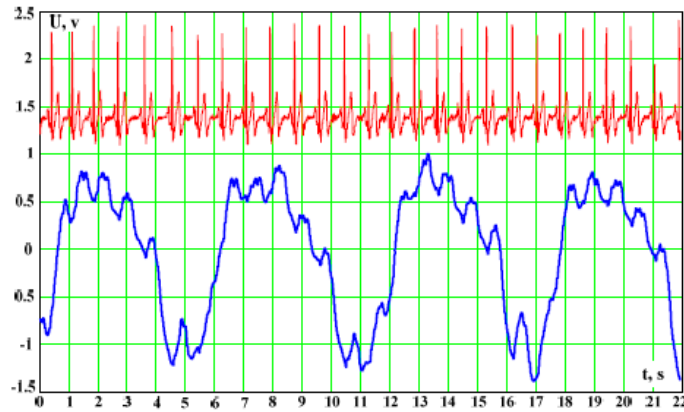


Fig. 4.3: Diagramma temporali del battito cardiaco e respiratorio tramite elettrocardiogramma (rosso) e radar UWB (blu).

Come visibile, il contributo prevalente al segnale visualizzato è dato dal movimento respiratorio. Il polmone umano è situato sotto il torace ed ha un volume di 4-6 *l*; la quantità di volume d'aria interessata nel respiro è nell'ordine di 500-800 *ml* [60]. Il movimento del torace causata dalla funzione respiratoria è nell'ordine dei 10-20 *mm* [60]. Per meglio visualizzare la somiglianza tra segnale radar e elettrocardiogramma si è quindi chiesto al soggetto monitorato di trattenere appositamente il respiro. Fig. 4.4 riporta i segnali registrati. Il modello di radar C riportato in Fig. 4.2 è costituito da due diversi sensori radar.

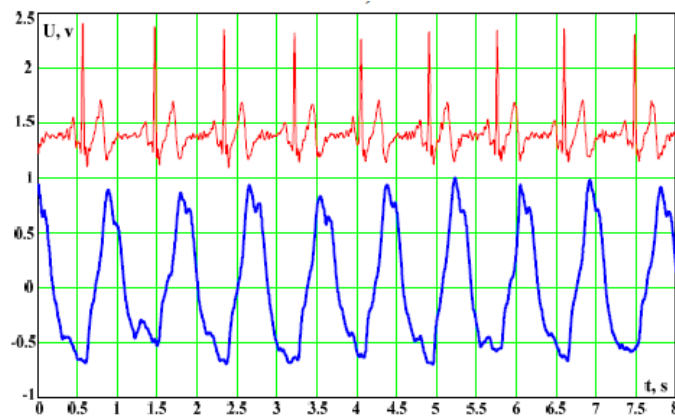


Fig. 4.4: Diagramma temporali del battito cardiaco tramite elettrocardiogramma (rosso) e radar UWB (blu); il soggetto sta trattenendo il respiro.

I sensori sono posizionati su due diverse arterie (carotide e arteria radiale) e misurano la velocità di propagazione dell'onda impulsiva. La conoscenza di queste due velocità costituisce un importante strumento diagnostico per problemi cardiaci e vascolari [58].

Infine si ricorda come questi tipi di prototipi possano facilmente trasferire tramite un collegamento wireless i dati ottenuti ad un telefono mobile ed in futuro ad un centro medico, caratteristica che li rendono particolarmente utili per monitoraggi in ambiente domestico. I risultati dei test medici effettuati sui modelli di radar riportati confermano le potenzialità di questi sistemi per il monitoraggio di frequenza respiratoria e battito cardiaco nelle persone [58].

L'articolo [57] riporta un'applicazione ed un miglioramento di radar UWB sviluppata al Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Gli obiettivi sono quelli di rilevare il movimento del muscolo cardiaco e quindi ottenere la frequenza cardiaca. In questo caso le modalità con cui vengono ottenuti i dati sono però in parte diverse: il sistema sfrutta il metodo signals strenght descritto nel Capitolo 2.

Gli impulsi UWB, in grado di "investigare" il corpo umano, sono sensibili alle diverse impedenze che caratterizzano i vari strati di materiale che l'impulso è costretto ad attraversare nel tragitto emettitore-target-ricevitore. Allo LLNL è stato sviluppato un sistema radar per il rilevamento del movimento delle pareti del cuore basato proprio su questa caratteristica. Nel caso specifico i materiali interessati sono costituiti da tessuti del corpo umano: l'impedenza del muscolo cardiaco è stimata essere di 60 Ohm mentre quella del sangue di 50 Ohm [57]. I diversi valori portano a stimare in un 10% del segnale inviato l'ampiezza della riflessione al limite tra cuore e vasi sanguigni. Lo stesso principio vale al confine tra aria/torace, torace/polmone e ugualmente ai confini dei vasi sanguigni. Il confronto tra l'ampiezza stimata e i segnali ottenuti sul campo mediante sistema radar permette di ottenere il rilevamento del movimento del muscolo cardiaco e di conseguenza la pulsazione cardiaca.

In [57] è proposto un miglioramento al metodo appena descritto. Il metodo dello LLNL è abbastanza semplice in quanto non tiene conto di tutti i tessuti che il segnale UWB deve attraversare prima di raggiungere la "voluta" parete cardiaca e generare quindi l'eco utile al rilevamento. L'articolo [57] non considera più vera l'ipotesi per cui il segnale UWB dopo essere stato emesso arrivi direttamente alla parete del cuore. Viene proposto un modello del percorso obbligato che tiene conto degli spessori, impedenze, attenuazioni lineari e velocità di propagazione dei segnali caratterizzanti diversi tipi di tessuti del corpo più uno strato d'aria. I parametri caratterizzanti il modello del percorso sono riportati in Tab. 4.3. I parametri riportati in Tab. 4.3 permettono di costruire un modello del cam-

Tab. 4.3: Proprietà elettromagnetiche e anatomiche degli strati di tessuto del torace.

Tipo di strato	Impedenza Ω	Attenuazione m^{-1}	Velocità m/s	Spessore m
Aria	376.7	0.00	$2.998 * 10^8$	$1.00 * 10^{-2}$
Grasso	112.6	8.96	$8.958 * 10^7$	$0.96 * 10^{-2}$
Muscolo	49.99	31.67	$3.978 * 10^7$	$1.35 * 10^{-2}$
Cartilagine	58.16	31.93	$4.628 * 10^7$	$1.16 * 10^{-2}$
Polmone	52.86	29.62	$4.206 * 10^7$	$5.78 * 10^{-3}$
Aria	49.17	38.71	$3.912 * 10^7$	

mino rappresentante sia il ritardo temporale che l'attenuazione che il segnale subisce utile all'applicazione UWB. Fig. 4.5 sono riportati graficamente i due modelli. In Fig. 4.5 il ritardo temporale è stimato essere pari a 1.7 s mentre il valore di attenuazione essere pari a -35 dB . L'attenuazione di -35 dB è confermata anche dal lavoro riportato in [60]. Nota la posizione del paziente relativa al sistema radar e tramite il confronto tra i ritardi tem-

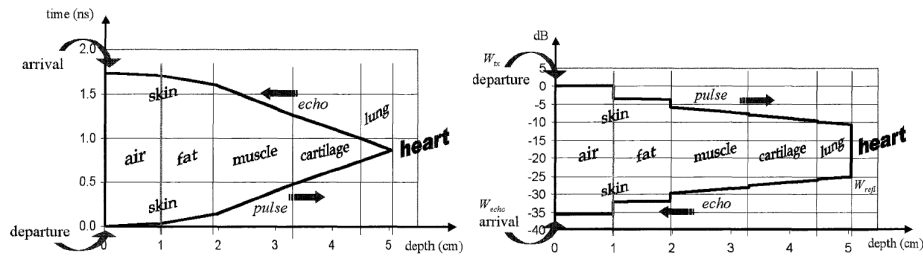


Fig. 4.5: A sx: diagramma del modello del ritardo temporale subito dal segnale UWB nel percorso emettitore-target-ricevitore. Asse ordinate: tempo in ns ; asse ascisse: profondità in cm . A dx: diagramma del modello dell'attenuazione subito dal segnale UWB nel percorso emettitore-target-ricevitore. Asse ordinate: potenza in dB ; asse ascisse: profondità in cm

porali e attenuazioni misurate con i valori in uscita al modello permettono il rilevamento del battito cardiaco con risultati soddisfacenti. Anche in questo esempio il contributo del movimento del torace causa la respirazione in parte “ostacola” il rilevamento del battito cardiaco.

Anche nel documento [57] l'apparato radar è utilizzato per un rilevamento delle pareti arteriose. Il movimento della parete arteriosa è legata alla differenza tra la pressione sistolica (massima) e quella diastolica (minima). Dalla conoscenza della pressione in due diverse sezioni dell'arteria è possibile risalire alla velocità del flusso sanguigno. L'aver a disposizione un metodo per la misura della velocità di scorrimento che non necessita contatto può essere particolarmente utile come strumento diagnostico per problemi arteriosi. L'arteriosclerosi (indurimento delle pareti) ne è un esempio.

L'articolo [57] accenna, infine, all'impiego di radar UWB per la valutazione del parlato ed il monitoraggio delle strutture alla base del processo di generazione dei suoni. Studi in questo ambito possono portare a capire meglio i meccanismi mediante i quali le persone possono emettere suoni.

4.3 Radar UWB anticollisione

I radar UWB a corto raggio (Short Range Radar, SRR) sono sistemi radar spesso costituiti da una combinazione di radar UWB e di convenzionali radar Doppler. Sono montati su autovetture con lo scopo di diminuire la probabilità di collisioni. La tecnologia UWB SRR permette di rilevare, localizzare ed inseguire i movimenti di persone ed oggetti mobili da 10 a 30 m [61]. Questo tipo di sistemi sono generalmente costituiti da ricetrasmittitori radar montati nei paraurti e sulle fiancate del veicolo e da un apparato per l'elaborazione dei segnali all'interno dell'autovettura [62]. I Sistemi UWB SRR sono in grado di avvertire il conducente del rischio di collisione con altri veicoli o pedoni. Inoltre adempiono ad una funzione accessoria di aiuto al parcheggio.

La larghezza di banda messa a disposizione dalla tecnologia UWB permette una maggior precisione nel rilevamento degli oggetti [61]. Questa capacità migliora i sistemi per evitare collisioni con oggetti vicini e rende più affidabile il processo di predizione della traiettoria



Fig. 4.6: Radar UWB SRR in funzione per il rilevamento di un'autovettura vicina.

di ipotetici ostacoli. I sistemi UWB SRR possono essere impiegati quindi per la sola

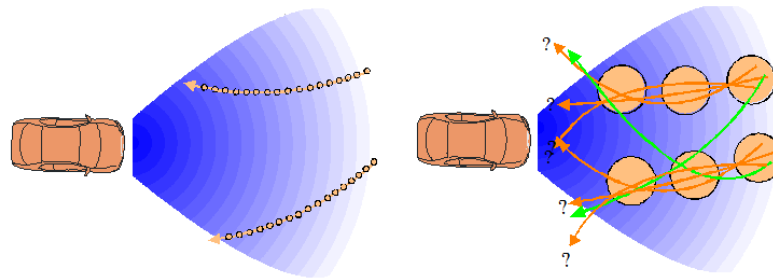


Fig. 4.7: Processo di predizione della traiettoria di ostacoli mobili. La maggior risoluzione messa a disposizione dalla tecnologia UWB permette una predizione della traiettoria migliore (figura a sx) in confronto ai risultati ottenuti da sistemi radar convenzionali.

funzione di avvertimento. Questa modalità di funzionamento è detta passiva e dovrebbe permettere di ridurre il numero dei normali incidenti della circolazione come le collisioni posteriori spesso dovute alla distrazione. È possibile utilizzare i sistemi radar anche in maniera attiva. Il sistema nel caso stimi l'impossibilità di evitare l'impatto è in grado di intervenire sul sistema di frenaggio; inoltre i dispositivi di sicurezza s'innescano in anticipo (le cinture di sicurezza si tendono e gli airbag si attivano prima dell'impatto). I sistemi UWB SRR attivi permettono infine una miglior risposta delle sospensioni alle condizioni del manto stradale [61]. Esempi di autovetture che impiegano sistemi UWB SSR sono i mercedes classe S e i BMW serie 5.

4.4 Radar UWB per la sorveglianza locale

La sorveglianza e sicurezza di oggetti o aree è un problema molto comune. Applicazioni di questo genere trovano spazio in tutti gli ambienti: militare, civile e commerciale. La necessità di monitorare un perimetro, localizzare un intruso e sorvegliare un oggetto non sono certo richieste insolite. I sistemi radar UWB, grazie alle loro uniche caratteristiche, trovano spazio anche in questo settore. Nell'articolo [59] sono riportati i risultati dell'impiego di un radar UWB utilizzato per la sorveglianza di un perimetro. Un'immagine parziale del radar, dell'ambiente di test e di una sua schematizzazione sono riportati in

Fig. 4.8. Come visibile il perimetro da sorvegliare è costituito da una foresta. L'obiettivo



Fig. 4.8: Sx: Luogo del test. Centro: immagine parziale dell'apparato radar. Dx: schematizzazione dell'ambiente di test.

del sistema è quello di rilevare eventuali intrusi in avvicinamento. Le principali specifiche del prototipo sono riportate in Tab. 4.4. Il test consiste nel rilevare il movimento di due

Tab. 4.4: Specifiche radar di sorveglianza.

Specifiche	Valori	Unità di misura
Range operativo	300	<i>m</i>
Risoluzione del range	41	<i>cm</i>
Potenza di picco del trasmettitore	10	<i>W</i>
Potenza media del trasmettitore	8.4	<i>mW</i>
Velocità del target rilevabile	10-0.2	<i>m/s</i>

persone a circa 50 *m* nella foresta per una distanza complessiva dall'apparecchio di circa 100 *m* come visibile in Fig. 4.8. I risultati riportati in [59] dimostrano il superamento del test da parte dell'apparato UWB.

I radar UWB possono essere utilizzati anche per definire un perimetro di sorveglianza attorno ad un oggetto sensibile. Sono spesso dispositivi compatti grandi quanto una lattina che contengono un mini radar UWB con una portata di una decina di metri e un impianto radio standard per trasmettere l'allarme in caso di intrusione. L'articolo [] riporta i risultati di test fatti su di un radar UWB testato in una configurazione paragonabile a quella riportata in Fig. 4.9. Fig. 4.10 mostra i segnali di uscita dal radar corrispondenti all'attraversamento da parte di un "intruso" del perimetro di sorveglianza. Tali apparecchi possono essere utilizzati attorno a un oggetto pubblico sensibile come ad esempio un edificio, un aereo o un'opera d'arte in un museo ma anche come impianto d'allarme attorno alla propria casa o piscina per evitare il rischio di annegamento, troppo frequente, dei bambini piccoli che sfuggono per qualche minuto all'attenzione dei genitori.

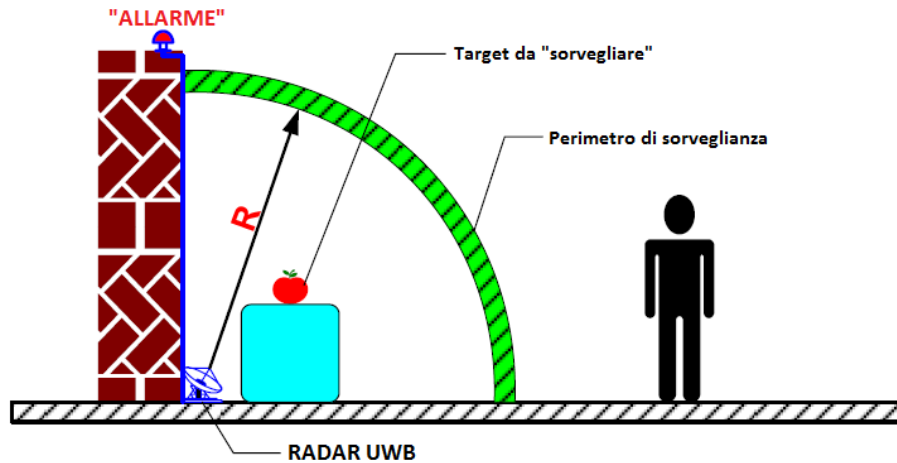


Fig. 4.9: Generico schema rappresentante un test di sorveglianza di un “target” tramite radar UWB.

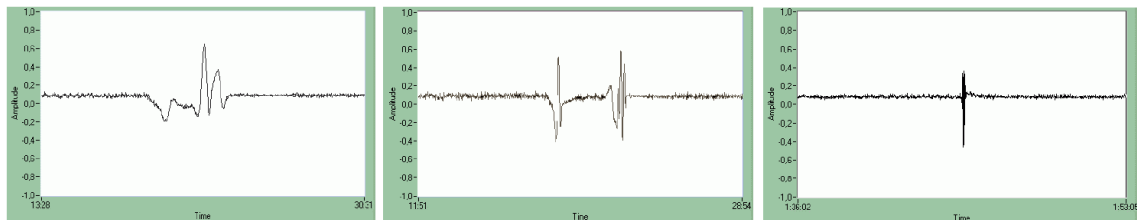


Fig. 4.10: Sx: uscita del segnale radar in risposta all’attraversamento del perimetro da parte di una persona che si sta muovendo lentamente. Centro: uscita del segnale radar in risposta all’attraversamento del perimetro da parte di due persone. Dx: uscita del segnale radar in risposta all’attraversamento del perimetro da parte di una persona che si sta muovendo velocemente.

4.5 Radar UWB per la discriminazione e caratterizzazione di oggetti (Object Discrimination and Characterization, ODC)

I sistemi radar UWB ODC sono sviluppati allo scopo di distinguere e identificare chiaramente diversi tipi di materiali. Questi sistemi generalmente lavorano in un range di frequenze da 2.2 a 8.5 GHz [63]. I sistemi radar UWB ODC sono impiegati in due specifiche aree:

- sicurezza sul lavoro con utensili da taglio;
- operazioni in ambito edile.

Nella loro prima applicazione i radar UWB ODC sono in grado di distinguere piccoli target come dita o altre parti del corpo umano rispetto diversi tipi di materiali in aree “pericolose” (generalmente da 0 a 40 cm) [63]. Questa potenzialità può essere utilizzata in tutte quelle situazioni in cui gli operatori si trovano in situazioni di potenziale pericolo. In ambito lavorativo l’impiego di seghe circolari e seghe a banco sono solamente due esempi in cui un operatore può venire a contatto con una lama. I sistemi radar UWB ODC collocati

ad esempio in prossimità della lama di una sega circolare, sono in grado di distinguere un pezzo di legno da un dito avvicinatosi pericolosamente e arrestare la macchina. Fig.

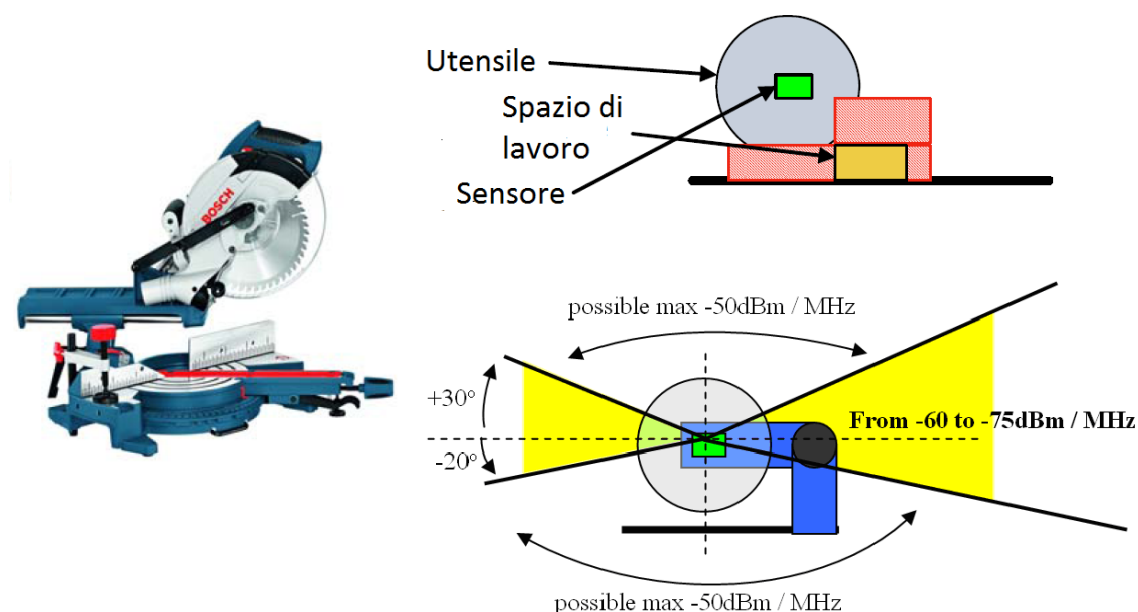


Fig. 4.11: Sx: sega circolare BOSCH; Dx in alto: modello dell'utensile; Dx in basso: pattern irradiato dal sensore radar.

4.12 riporta una sega circolare della BOSCH equipaggiata con un radar UWB ODC. Sono inoltre riportati lo schema semplificato dell'utensile in cui è posta in evidenza la posizione dell'oggetto e il pattern irradiato dal radar per "sorvegliare" l'area di lavoro. Nel mercato dei "consumatori" questi sistemi possono trovare impiego come sistemi di sicurezza per utensili elettrici e macchine pericolose.

Utensili come seghe circolari provocano ogni anno un numero di incidenti sul lavoro notevole e parte di essi costringono ad un'amputazione. L'utilizzo di radar ODC UWB può sensibilmente aumentare i livelli di sicurezza [63].

In ambito edile invece è possibile utilizzare questi radar per individuare precisamente le strutture presenti all'interno di un muro come ad esempio le armature, i cavi elettrici o le condotte d'acqua. I radar UWB possono essere direttamente montati su utensili adibiti alla perforazione e trapanazione. Trapani e macchine perforatrici a percussione possono essere dei pratici esempi. Il radar UWB monitora il processo di foratura e controlla l'utensile a seconda di disomogeneità nel materiale [63]. Questo modo di funzionamento necessita di una sincronizzazione tra sensore radar e strumento. In presenza di target di materiale inatteso (tubi del gas e dell'acqua o cavi elettrici) è quindi possibile avvisare l'utente ad esempio con un allarme sonoro o visivo. Questi tipi di radar a volte vengono definiti radar Building Material Analysis Systems non (BMAS).

Una possibile area di sviluppo per le due applicazioni viste è il rilevamento di armi di nuova generazione. Nuovi materiali possono rendere le armi "invisibili" ai comuni scanner negli aeroporti in grado di rilevare solo la presenza di metallo. L'impiego di radar UWB



Fig. 4.12: Due esempi di trapani impieganti sensori radar UWB.

ODC potrebbe migliorare l'affidabilità di questi sistemi di sicurezza.

4.6 Radar UWB Through Wall

I sistemi radar Through Wall (in inglese TWR) sono sistemi di particolare interesse per le forze di polizia [64], di salvataggio, di sicurezza [65], di sorveglianza [66], anti-terrorismo [67] e così via. Questi sistemi radar richiedono l'abilità di rilevare target attraverso materiali relativamente ad alta densità come calcestruzzo, pietra e mattoni. L'attenuazione che il segnale subisce, causa l'attraversamento di questi materiali, costituisce un limite importante nel rilevamento del target e nei valori di potenza da trasmettere [68]. In Fig. 4.13 sono riportati gli andamenti dell'attenuazione subita da un segnale elettromagnetico irradiato. Le attenuazioni sono diagrammate in funzione della frequenza di lavoro e di diversi tipi di materiali. In Fig. 4.13 sono riportati gli andamenti per diversi tipi di

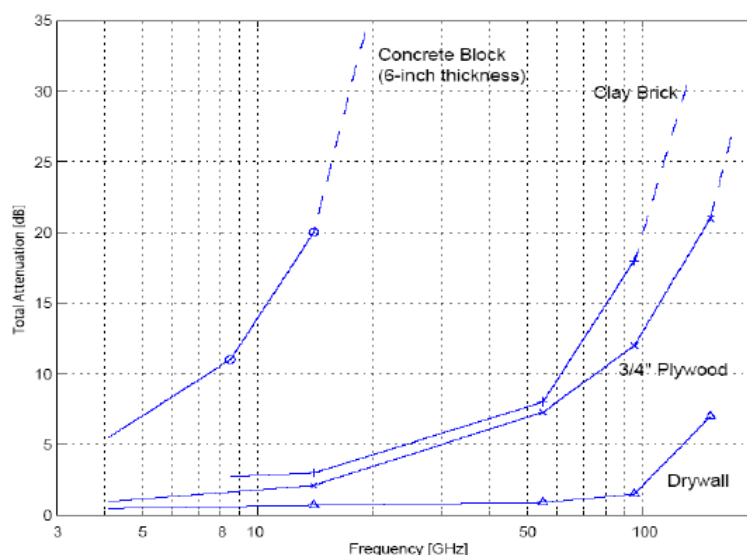


Fig. 4.13: Attenuazione totale “one way” attraverso vari tipi di materiali usati nelle costruzioni. Asse delle ordinate: attenuazione dB ; asse delle ascisse: frequenza GHz .

materiali impiegati nel settore dell'edilizia: blocchi di calcestruzzo, mattoni di argilla, legno/compensato e cartongesso. Questi materiali si trovano facilmente in tutti i tipi di

costruzione. L'attenuazione che causano aumenta all'aumentare della frequenza. In Fig. 4.13 sono diagrammate le attenuazioni "one way" e cioè l'attenuazione che il segnale subisce nel percorso emettitore-target. Materiali come il calcestruzzo e l'argilla presentano sensibili valori di attenuazione. Questo comporta una diminuzione nell'affidabilità dei processi di rilevamento, localizzazione ed identificazione e può essere causa di una propagazione multipath del segnale [69]. Per un'applicazione reale occorre inoltre tenere conto anche del percorso target-ricevitore: l'attenuazione reale subita dal segnale utile si può quindi considerare pari al doppio di quella diagrammata.

Oltre ai problemi legati all'attenuazione del segnale i sistemi radar Through Wall devono tenere in considerazione che le condizioni di propagazione del segnale dipendono dalla posizione dei sensori e dalla struttura interna degli edifici. Questo può causare l'aver in ricezione segnali di difficile interpretazione [70]. La necessità di rendere portatili questi sistemi impone severe specifiche per quanto riguarda dimensioni, peso e consumo energetico che rendono l'implementazione del sistema più difficile. Dimensioni ridotte comportano un limite pratico alle dimensioni dell'antenna pur dovendo mantenere elevate risoluzioni angolari; il consumo energetico deve essere ridotto al minimo per minimizzare peso e dimensioni delle batterie.

I radar Through Wall inoltre devono tenere in considerazione limiti fisici inerenti i valori delle frequenze utilizzate. La banda di frequenze impiegate è un compromesso tra l'aver bassi valori per penetrare i materiali attenuanti che costituiscono gli edifici, elevate larghezza di banda per ottenere buone risoluzioni spaziali e valori di frequenze compatibili con antenne portatili [70]. Infine anche i valori di potenza trasmessa sono limitati da caratteristiche del sistema. Compatibilità con altri sistemi, prestazioni limitate dai clutter e bassa probabilità di essere rilevati ne sono tre esempi.

L'impiego dei segnali UWB costituisce una modalità efficace per risolvere buona parte di questi problemi [68]. La loro capacità di rendere muri e pareti "trasparenti" risiede nella larga banda che caratterizza gli impulsi trasmessi [68]. I segnali UWB quindi ben si adattano ad applicazioni radar Through Wall. I sistemi radar UWB Through Wall sono spesso apparecchi compatti grandi quanto un computer portatile: lo Xaver 800 e il PRISM System sono due esempi citati in letteratura [71, 70].

L'articolo [71] riporta l'utilizzo del sistema Xavier 800 per la creazione di immagini "through wall". L'apparecchiatura è un sistema radar UWB portatile a micro potenza. Il

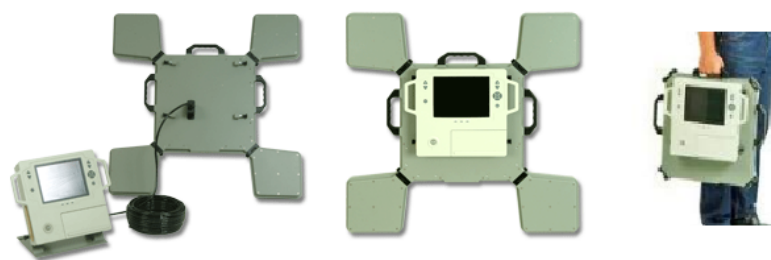


Fig. 4.14: Immagini relative al sistema radar UWB Xavier 800.

sistema UWB mette a disposizione dell'operatore informazioni visive 3D in modo veloce e affidabile. I valori di risoluzione disponibili permettono di "vedere" target come persone

distinguendo le diverse parti (testa, braccia, busto, ecc.) che le compongono. La qualità delle immagini e la facilità di utilizzo fanno sì che lo Xaver 800 trovi impiego in svariate applicazioni [71].

Nel documento [70] è riportato l'utilizzo del Portable Radar Interior Space Monitor (PRISM) System come sistema UWB TWR. L'uscita del sistema sono la posizione e velocità del target in coordinate (x, y, z) . Il PRISM è in grado di distinguere se il soggetto è in piedi o seduto, consente di impostare una zona di warning tridimensionale mediante il software ed ha la capacità di eseguire operazioni di inseguimento del target [70]. Il sistema inoltre determina un movimento di avvicinamento o di allontanamento dal sensore, evidenzia allo stesso tempo target statici come muri e target come persone in movimento. È infine in grado di rilevare piccoli movimenti associati al respiro [70].



Fig. 4.15: Immagini relative al sistema radar UWB PRISM.

Spesso questi tipi di apparecchiature sono utilizzate da team di soccorso e forze dell'ordine nello svolgimento delle loro funzioni.



Fig. 4.16: Utilizzo di UWB TWR per operazioni di salvataggio ostaggi da parte delle forze dell'ordine (immagine a sx) e ricerca e soccorso da parte di pompieri (immagine a dx).

Nel caso di operazioni di ricerca e soccorso è necessario un rapido rilevamento e localizzazione di individui ad esempio sotto edifici crollati, macerie o valanghe. Il sistema deve poter funzionare anche in caso di fumo e/o fiamme ed inoltre deve essere in grado di localizzare vittime anche solo dal movimento causato dal battito cardiaco e respiratorio. Le vittime possono infatti trovarsi in condizioni di mobilità limitata o assente. Il sistema

radar deve inoltre poter funzionare attraverso spessori significanti di materiali attenuanti (calcestruzzo, ecc.).

Nel caso di operazioni di incursioni in edifici o salvataggio di ostaggi in ambienti chiusi le specifiche che gli apparati devono fornire sono simili a quelle già elencate per operazioni di ricerca e soccorso. Affidabilità nella localizzazione di individui, buona risoluzione per determinare il numero di soggetti eventualmente presenti, indicazioni di eventuali oggetti ingombranti che potrebbero ostacolare i movimenti sono caratteristiche comuni alle due tipologie di operazioni. Questa seconda categoria di operazioni richiede inoltre che le operazioni di rilevamento e localizzazione da parte dell'apparecchiatura debbano essere effettuate in tempi molto stretti e che la risoluzione a disposizione permetta di classificare gli individui almeno in due categorie: ostaggi e sequestratori.

Dispositivo PulsON 220: descrizione e utilizzo

5.1 Introduzione

In questo capitolo si vuole presentare il dispositivo PulsON della Time Domain utilizzato per i test [72]. Si vogliono descrivere le sue principali caratteristiche hardware e software. Si vogliono poi illustrare e spiegare le sue diverse modalità di funzionamento e analizzare le due di maggior interesse per gli obiettivi di questo lavoro. Vengono poi descritti i software utilizzati per le misure riportando in modo dettaglio le diverse finestre grafiche che un operatore deve utilizzare per settare e comandare il dispositivo. Ciascuna di queste finestre è spiegata in maniera approfondita.

Vengono poi descritte e riportate le diverse misure effettuate sul campo mediante il dispositivo. Si vuole verificare la possibilità di avere a disposizione le misure ottenute tramite PulsON in un formato utilizzabile per altri software. Infine vengono presentati dei possibili impieghi del dispositivo per applicazioni diverse da quelle descritte in questo capitolo.

5.2 PulsON 220

La tecnologia UWB fornisce un valido metodo per l'implementazione non solo di comunicazioni radio ma anche per applicazioni radar con finalità di rilevamento/localizzazione e tracking nel tempo. Il dispositivo PulsON 220 della TimeDomain Corporation ne è un esempio. Il dispositivo impiega la tecnologia Ultra Wideband in grado di trasmettere e ricevere impulsi di energia molto brevi (dell'ordine dei ns) a bassa potenza. Queste capacità unite all'impiego di alcune applicazioni software fornite sempre dalla TimeDomain Corporation costituiscono un sistema per applicazioni di tipo radar e anche un punto di inizio per studi e ricerche sui segnali UWB. Le applicazioni software messe a disposizione inoltre sono progettate in modo da fornire una base di partenza per possibili sviluppi e miglioramenti delle applicazioni stesse. La capacità di generare impulsi di brevissima durata permette di poter lavorare con segnali a spettro molto ampio in cui la potenza è distribuita su di un ampio intervallo di frequenze. Il sistema impiega quattro coppie di correlatori (operazione di moltiplicazione e integrazione dei segnali) per ricevere questi impulsi e sommarli poi tra loro in modo da migliorare il segnale ricevuto rispetto al rumore. Il dispositivo può essere pensato costituito da più funzioni principali operanti nel dominio analogico e in quello digitale. Tra le funzioni analogiche al trasmettitore si trovano il "pulse timing" per stabilire il preciso momento in cui un impulso dovrebbe essere trasmesso, il "pulse forming" per generare i brevi impulsi di energia e il "pulse/spectral shaping" per filtrare l'energia in modo da rispettare i limiti imposti dallo FCC. Al ricevitore, invece si trovano il filtraggio del segnale per rimuovere interferenze indesiderate, l'amplificazione di segnale per stabilire una bassa figura di rumore e incrementare il segnale UWB e la cor-

relazione dei segnali di ingresso. Le principali funzioni digitali includono invece il “pulse coding” (channelization e cioè la condivisione del canale con altri collegamenti), modulazione/demodulazione, integrazione coerente (impiega informazioni inerenti l’ampiezza e la fase del segnale), acquisizione e tracking. I tipi di modulazione messi a disposizione dal sistema sono Flip Modulation, Quadrature Flip Modulation (QFTM) e Multi-Position Modulation (MPM).

Il sistema PulsON è un sistema basato sulla trasmissione di pacchetti sia per quanto riguarda le modalità con cui viene comandato dall’operatore e sia per quanto riguarda il suo funzionamento vero e proprio come ricevitore/trasmittitore radio. I comandi da operatore a dispositivo sono infatti incapsulati, trasmessi e gestiti in pacchetti; gli stessi segnali inviati e ricevuti dal dispositivo sono generati impiegando un codice a sedici impulsi.

In generale le applicazioni software messe a disposizione sono costituite da tre componenti: una componente host detta anche interfaccia grafica (GUI), una componente embedded e una componente Application Program Interface (API) di interfaccia che permette le comunicazioni tra le due precedenti tramite cavo Ethernet. L’interfaccia grafica è in esecuzione su di un pc mentre la componente embedded sul dispositivo stesso; la componente embedded si basa sul sistema operativo realtime VxWorks. La GUI utilizza la API per interfacciarsi e lavorare con la componente embedded. L’API mette a disposizione una modalità di comunicazione basata su invio e ricezione di pacchetti. Per ogni pacchetto di comando (command packet) esiste il relativo pacchetto di risposta (response packet). Come idea generale ogni pacchetto è costituito da varie componenti come packet type, packet size, packet ID, time stamp e altre che vanno a determinare le sue caratteristiche e le modalità con cui deve essere trasmesso, ricevuto e gestito dal dispositivo e dal software. Il sistema impiega un protocollo TCP per la trasmissione/ricezione dei pacchetti di comando e risposte a comando mentre un protocollo UDP è impiegato per gestire i pacchetti dati.

Anche la trasmissione via radio tra i dispositivi si basa sull’invio di impulsi in modo tale da costituire dei pacchetti di informazioni. I contenuti dei pacchetti sono diversi a seconda del software impiegato e della modalità di lavoro scelta. Le applicazioni software mettono a disposizione tre modi di impiego BER, E_b/N_{eff} e Scan.

Il BER (o Normal) abilita le normali operazioni di analisi delle trasmissioni radio. Il trasmettitore invia un “BER pattern” noto al ricevitore. Al ricevimento di ogni pacchetto, il ricevitore determina e accumula i bit d’errore per le successive analisi statistiche. La modalità E_b/N_{eff} permette di quantificare le performance della trasmissione radio non solo in presenza di rumore termico (indicato con il rapporto E_b/N_o) ma anche di interferenze ambientali che limitano le prestazioni. L’ultima modalità, Scan, abilita il trasmettitore ed il ricevitore a trasmettere/ricevere pacchetti per produrre una scansione della forma d’onda.

Selezionandone un’applicazione piuttosto di un’altra i dispositivi si predispongono ad inviare e ricevere un certo tipo di pacchetti. La prima si diversifica dalle altre due principalmente perchè non necessita dell’invio (e quindi ricezione) dei campioni per costituire le forme d’onda. Trasmette e riceve solo le informazioni necessarie al ricevitore per sincronizzare

il funzionamento, individuare il pacchetto, capirne il tipo ed estrarre le informazioni utili per analisi statistiche. Nella modalità E_b/N_{eff} e Scan il trasmettitore inserisce nel pacchetto (o più se necessari) anche le informazioni inerenti ai campioni della forma d'onda di cui si sta eseguendo la scansione. I campioni andranno poi memorizzati nel dispositivo ricevente secondo una logica FIFO (First In First Out) ed elaborati per la visualizzazione delle forme d'onda.

Un generico pacchetto contiene una “acquisition component” e una “payload component”. Ciascun pacchetto deve essere acquisito in maniera individuale. La funzione pulse coding appiana lo spettro della trasmissione e fornisce un meccanismo per la condivisione del canale con altri sistemi radio presenti. Le porzioni di pacchetto “acquisition component” e “payload component” sono trasmessi utilizzando codici diversi. L’“acquisition code” è ottimizzato per un veloce rilevamento del segnale e determina la polarità ed il posizionamento di massima di ciascun impulso nel tempo. Il “payload code” e i dati da trasmettere sono combinati per determinare la polarità dell'impulso e l'alta risoluzione del collocamento temporale degli impulsi durante la sola “payload portion” del pacchetto.

L'integrazione coerente permette di poter lavorare con segnali anche piccoli che comunque vengono evidenziati rispetto al rumore. Ciascuna componente (acquisizione, tracciamento e modulazione) ha un proprio parametro di integrazione. Questa caratteristica permette grande flessibilità nella progettazione del sistema e nei trade-off. Ad esempio, quando ogni pacchetto deve essere ricevuto, il parametro di integrazione dell'acquisizione può significativamente aumentare mentre il parametro di integrazione dei dati può rimanere basso così da non ostacolare l'effettiva velocità dati.

L'acquisizione usa quattro correlatori in fase e quattro in quadratura su ogni impulso per permettere un'acquisizione in parallelo. Le quattro coppie nel dispositivo PulsON sono indicate come $A_i - A_q, B_i - B_q, C_i - C_q$ e $D_i - D_q$. Un correlatore costituisce un ricevitore ottimo per segnali impulsivi [73]. Il correlatore esegue la correlazione tra un segnale di riferimento ed il segnale ricevuto come integrazione del prodotto dei due segnali.

Un ricevitore, per rilevare il segnale trasmesso, varia la fase del suo correlatore nell'intera

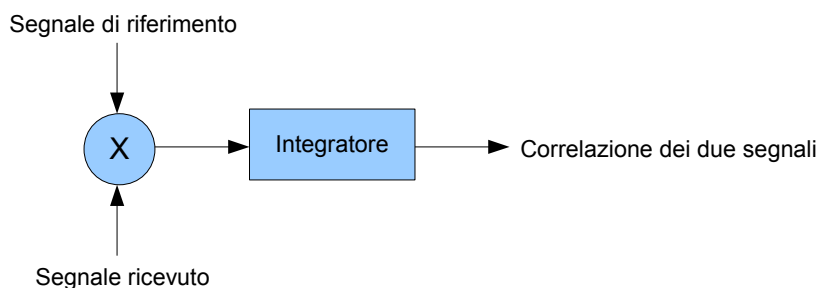


Fig. 5.1: Generico schema a blocchi di un correlatore. I segnali vengono prima moltiplicati e poi integrati.

finestra di acquisizione. A ciascun ritardo di fase il ricevitore si ferma per uno specifico numero di impulsi e integra l'energia campionata. Dopo ciascun periodo di “sosta” il ricevitore incrementa la fase del correlatore e ripete il processo.

La coppia A è sempre usata per il tracking e la demodulazione. Il funzionamento del dispositivo cerca sempre di tenere A_i nel punto passante per lo zero della forma d'onda mentre A_q al picco della forma d'onda. I valori provenienti da A_q sono impiegati per eseguire misure di E_b/N_{eff} . Questo perchè A_q è sempre posizionato sul picco della forma d'onda di energia. Le coppie di correlatori B, C e D sono invece disponibili per le scansioni. Il sistema mette a disposizione le seguenti configurazioni: A, A-C, A-C-D, A-B-C-D. Il correlatore A nelle configurazioni è sempre presente vista la sua funzione di riferimento per gli altri. Convien evitare l'ultima configurazione a causa del crosstalk tra la coppia A e B.

Generalmente, la forma degli impulsi che caratterizza i dispositivi di comunicazione UWB è ottenuta dalla derivata (di vario ordine) di una funzione gaussiana descritta in 3.2.3. TimeDomain Corporation, una dei pionieri nella produzione di dispositivi UWB insieme alla XtremeSpectrum, dichiara che la tecnologia PulsON emette monocicli gaussiani. Un monociclo gaussiano è definito come la derivata prima di un impulso gaussiano. La forma di un impulso gaussiano è descritta come $f(t) = e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}$ e il monociclo gaussiano è

$$f(t) = \frac{t}{\sqrt{\tau}} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2} \quad (5.2.1)$$

dove t è la durata dell'impulso. La figura (5.2.1) mostra l'andamento di un generico monociclo ideale centrato a 2 GHz nel dominio del tempo e della frequenza. Le specifiche

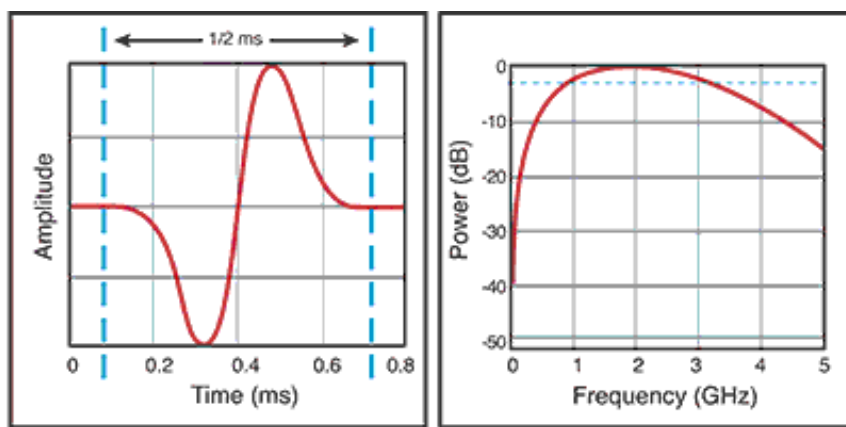


Fig. 5.2: Generico monociclo gaussiano nel dominio del tempo e della frequenza.

di targa riportate dal dispositivo sono:

- frequenza di ripetizione degli impulsi (Pulse Repetition Frequency): 9.6 MHz;
- frequenza centrale: 4.7 GHz;
- larghezza di banda (10 dB): 3.2 GHz;
- potenza isotropica irradiata equivalente (EIRP): -12.8 dBm;
- consumo in potenza: 5.7 Watt;
- dimensioni 16.5X10.2X5.1cm;

- range di temperature di lavoro: 0-40 gradi centigradi.

Data la natura sperimentale del dispositivo, esso non risulta approvato per usi commerciali dallo FCC.

Il dispositivo inoltre non è stato testato per resistere a scariche elettrostatiche (ElectroStatic Discharge), vibrazioni, shock o corrosioni. Il dispositivo non dovrebbe essere esposto ad umidità eccessiva, immerso o esposto a pioggia e neve.

5.2.1 Antenna BroadSpec P200.

Le antenne per applicazioni UWB devono soddisfare specifiche esigenti riguardo le loro prestazioni. Idealmente un'antenna UWB dovrebbe essere non dispersiva o almeno esserlo in modo controllato e riconducibile ad una compensazione. Per poter essere impiegate in molteplici applicazioni è inoltre utile avere antenne con una risposta omnidirezionale. Le antenne devono essere adattate (well-matched) e efficienti. Fini commerciali impongono ulteriori specifiche inerenti alle dimensioni e costi. Le antenne messe a disposizione dalla Time Domain sono antenne a dipolo ellittiche piane mostrate in Fig. 5.3. In Fig. 5.3 si



Fig. 5.3: Antenna BroadSpec P200

possono vedere gli elementi di radiazione superiori e inferiori, oltre che il balun per il disaccoppiamento.

L'antenna in questione irradia un monociclo lungo 500 *ps* che diventa approssimativamente una forma d'onda di 1 *ns* una volta che è ricevuto da un'antenna adattata. Le specifiche generali sono di seguito riportate.

- Forma d'onda irradiata: monociclo da 500 *ps*; forma d'onda da 1 *ns*;
- Omnidirezionale in azimuth da +/- 1.5 *dB*;
- Guadagno: ~ 3 *dB**i* (nominale);
- Risposta di fase: lineare;
- Efficienza: ~ 90% (nominale).

L'antenna UWB è omnidirezionale, non dispersiva ad alta efficienza e fornisce “good impedance matching” (riflessioni minime) e piccole distorsioni sul campo di funzionamento. Bisogna fare attenzione all'orientazione dell'antenne. Nonostante la loro omnidirezionalità il segnale ricevuto è più forte quando le facce piate delle antenne trasmettenti e riceventi

sono parallele tra loro e non hanno offset laterali. Le performance delle antenne possono essere fino a 6 *dB* maggiori rispetto a quando le antenne sono orientate “edge-on” (cioè sono orientate secondo gli spigoli, il lato stretto dell’antenna).

5.3 Moduli software

Il dispositivo PulsON è fornito unitamente a più moduli software messi sempre a disposizione dalla Time Domain. I moduli forniti sono diversi a seconda di che tipo di kit si sta impiegando (starter kit, evaluation kit, reference design e integratable module). Ciascun modulo software è fornito per facilitare l’uso del PulsON e per facilitare lo sviluppo di applicazioni da parte del cliente. I pacchetti software forniti rendono possibile l’utilizzo del PulsON per applicazioni anche molto diverse tra loro. Ciascun modulo è costituito da due componenti: una componente in esecuzione sul pc (host side) e una componente in esecuzione nel dispositivo (embedded side) che comunicano tra loro tramite collegamento Ethernet (gestito da API). Nella versione a disposizione i moduli software presenti sono:

- Ultrawideband Radio Sample Application (URSA);
- Fused Sample Application (FSA);
- Ranging Analysis Module (RAM);
- Bistatic Radar Application (BSR);
- System Analysis Module (SAM).

Il modulo **URSA** è uno strumento grafico che permette di stabilire un semplice collegamento con il dispositivo e osservare il BER (Bit Error Rate), l’intensità del segnale (E_b/N_{eff}) e le scansioni dei dati del collegamento. Per poter essere utilizzato, il modulo necessita sempre di due istanze: una per il comando del trasmettitore e l’altra per il comando del ricevitore. Le due istanze possono essere in esecuzione nello stesso pc.

Il modulo **FSA** permette all’utente di comunicare tra due diversi pc utilizzando dei messaggi di chat. Ciascun pc deve essere collegato mediante cavo Ethernet ad un dispositivo PulsON e avere in esecuzione un’istanza del software FSA. La comunicazione, basata sull’invio di pacchetti tra i dispositivi sfruttando la tecnologia UWB, è in real-time.

Il modulo **RAM** permette di misurare la distanza tra due dispositivi PulsON. Il ranging si basa su di una modalità di comunicazione half-duplex (comunicazione tra i due dispositivi in entrambe le direzioni ma non simultanea). Un dispositivo è impostato come richiedente mentre l’altro come ricevente. Il richiedente inizia il processo di ranging inviando un pacchetto con la richiesta della distanza al ricevente. Quando il ricevente riceve la richiesta della distanza invia un pacchetto di risposta al richiedente. Il richiedente usa la differenza nel tempo tra invio pacchetto di richiesta e ricezione pacchetto di risposta per calcolare la distanza tra i due dispositivi.

I moduli **BSR** e **SAM** sono i due moduli con cui maggiormente si è lavorato per valutare le possibilità di ricerche e di impiego del dispositivo PulsON. Entrambi sono di seguito spiegati in maniera dettagliata.

5.4 Bistatic Radar Application

L'applicazione BSR permette di stabilire un semplice link tra due dispositivi PulsOn (si ricorda come questi dispositivi basino il loro funzionamento sulla trasmissione e ricezione di pacchetti). Rappresenta un modo per dimostrare come costruire ed utilizzare un applicazione radio UWB come radar bistatico. Tramite l'applicazione BSR il ricevitore scansiona le forme d'onda ed invia Waveform Scan Data (le informazioni relative alle scansioni delle forme d'onda) ad un pc. Il pc elabora il segnale secondo dei particolari algoritmi (LED e rilevamento) per rilevare la presenza di un target.

Un radar bistatico è una tipologia di radar che impiega un'antenna trasmittente e un'antenna ricevente (o più antenne) distanziate tra loro. L'energia inviata dal trasmettitore riflette sugli oggetti presenti nell'ambiente e arriva poi al ricevitore. Possono essere usati più ricevitori per ottenere diverse misure del segnale ricevuto. I ricevitori misurano la forma d'onda inviata dal trasmettitore e riflessa dagli oggetti dell'ambiente. La forma d'onda ricevuta è comparata con una forma d'onda precedentemente acquisita per rilevare un possibile movimento e il risultato è comparato rispetto un valore di soglia. Se il movimento è sufficientemente ampio, esso può essere interpretato come la presenza di un intruso. Gli algoritmi di individuazione del movimento generalmente impiegano tecniche di elaborazioni digitali del segnale per filtrare il rumore. Un esempio di questo tipo è il filtro passabanda. Questo filtraggio riduce i clutter dell'ambiente (eco al ricevitore non desiderate) e aiuta a eliminare gli errori nel valutare o meno la presenza di un target (false detections).

Il modulo BSR è costituito da due componenti software. Una componente host anche nota come Graphical User Interface (GUI) in esecuzione su di un pc ed una componente embedded in esecuzione sul dispositivo stesso. La BSR Application Program Interface (API) fornisce un metodo di comunicazione basato sulla trasmissione di pacchetti e viene usata dalla GUI per interfacciarsi alla componente embedded. La API utilizza per la comunicazione su cavo Ethernet un protocollo TCP per la trasmissione di pacchetti inerenti a comandi e risposte a comandi. Impiega invece un protocollo UDP per la trasmissione dei dati. In tal modo è possibile garantire un certo livello di sicurezza per quanto riguarda i comandi ed una certa velocità per quanto concerne invece la trasmissione dei dati.

I pacchetti di comando (Command Packet) sono trasmessi dalla componente host. La componente embedded risponde con il corrispettivo pacchetto di risposta (Response Packet). In generale i pacchetti contengono tre campi: packet type, packet size, packet ID (e status se si tratta di un pacchetto di risposta). I pacchetti dati (Waveform Scan Data Packet) contengono il numero di campioni della scansione, il tempo (in *ms*) di quando la forma d'onda è ricevuta e i valori di ciascun campione. Questo tipo di pacchetto viene poi incapsulato secondo il protocollo per la trasmissione UDP della API in UDP Data Packet. I pacchetti trasmessi tramite protocollo UDP sono formati da un packet type, il numero

della scansione, il numero totale di pacchetti per contenere la scansione, il numero del pacchetto attuale e i valori dei campioni incapsulati in words. La necessità di avere più pacchetti per una singola scansione sta nel fatto che un singolo pacchetto può contenere al massimo 365 campioni in scansione (scan samples). Nel caso il numero di campioni sia maggiore la scansione della forma d'onda viene perciò divisa in più pacchetti. La GUI generalmente configura, controlla e monitora i dispositivi radio. Utilizza le informazioni in ciascun pacchetto UDP per ordinare i pacchetti ricevuti. Il sistema non ha problemi se i pacchetti di ciascuna scansione arrivano ordinati e se i pacchetti di ciascuna scansione arrivano in maniera non ordinata. Il sistema non riesce invece a gestire quando in ricezione pacchetti di diverse scansioni si mescolano tra loro. La componente embedded esegue le funzioni richieste dalla componente host. Tramite l'applicazione BSR quando un dispositivo è configurato come trasmettitore e la trasmissione è avviata, automaticamente inizierà quindi ad inviare Waveform Packets in aria. Se il dispositivo è configurato come ricevitore inizierà la scansione dei Waveform Packets e trasmetterà i Waveform data alla componente host.

5.4.1 Interfaccia grafica del modulo BSR

L'interfaccia grafica del modulo BSR è costituita principalmente da due finestre: la finestra "Bistatic Radar Application (BSR)" e la finestra "Bi-Static Radar Application Display". Nella BSR window è possibile connettere e configurare il dispositivo, iniziare e terminare le trasmissioni, selezionare un algoritmo di LED (Leading Edge Detection) e uno di rilevamento per l'uso, settare i parametri degli algoritmi usati. Dalla BSR Application Display è possibile invece visualizzare le scansioni della forma d'onda o la deviazione di energia. Una rappresentazione dell'interfaccia grafica con cui il modulo BSR si presenta all'avvio è riportata in Fig. 5.4. L'interfaccia grafica permette l'accesso a cinque diverse finestre:

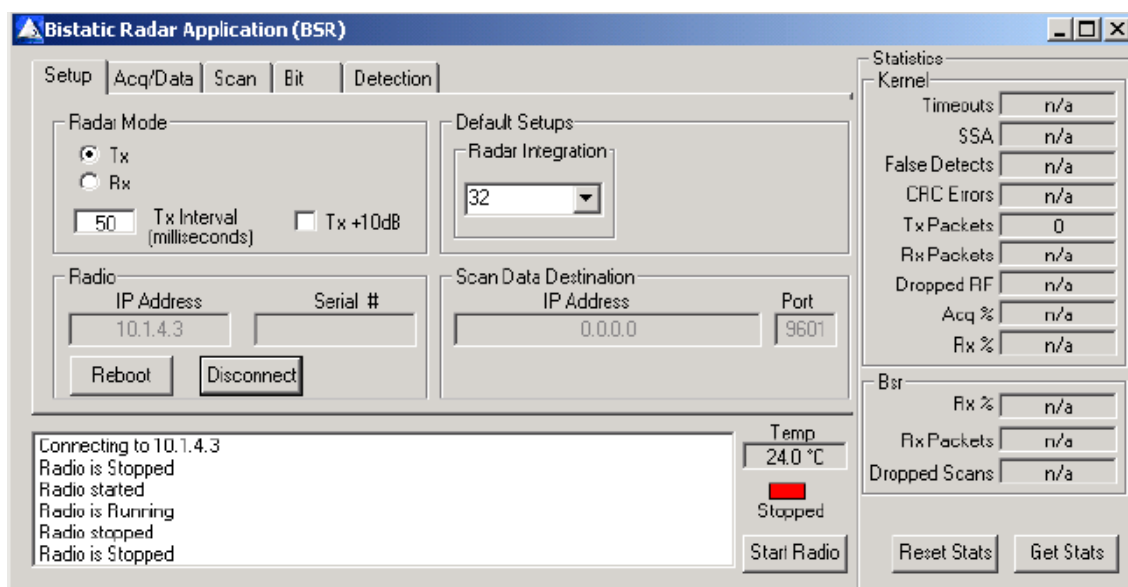


Fig. 5.4: Interfaccia grafica della finestra di controllo del modulo BSR al suo avvio.

- Setup Tab;
- Acq/Data Tab;
- Scan Tab;
- Bit Tab;
- Detection Tab.

Di queste cinque finestre si riporta in seguito una descrizione.

Setup Tab

La finestra Setup-Tab è la finestra di default ed è riportata in Fig. 5.4. Contiene i comandi per connettere il dispositivo, per selezionare la modalità di funzionamento del dispositivo (trasmettitore o ricevitore), per impostare l'intervallo tra pacchetti trasmessi in *ms* (Tx Interval) e per impostare la costante di integrazione radar (Radar Integration). Questa costante rappresenta il numero di impulsi integrati per costruire un simbolo scansione. Alti valori di questo parametro permettono un miglioramento del rapporto segnale rumore (SNR) dando la possibilità di rilevare target a grandi distanze e rilevamenti di piccoli target; bassi valori permettono scansioni più veloci. La finestra Setup-Tab consente anche di impostare l'indirizzo IP e la porta a cui inviare i dati della scansione. Di norma indirizzo e porta sono impostati in modo da essere inviati all'indirizzo IP che inizia le operazioni di trasmissione.

Acquisition / Data Tab

La finestra Acq/Data Tab permette di scegliere i valori dei parametri interessati nel processo di acquisizione e elaborazione dei dati.

Una sua generica rappresentazione è riportata in Fig. 5.5. Per quanto riguarda la parte di acquisizione è possibile scegliere il numero di impulsi che devono essere integrati per formare un simbolo acquisizione (Integration), la finestra temporale in bin ($1 \text{ bin} = 3.1789 \text{ ps}$; i timer interni al dispositivo misurano il tempo in questa unità) tra due simboli acquisizione successivi, la scelta del "codefile" tra quelli messi a disposizione dalla Time Domain. I "codefile" sono codici usati per lavorare con le singole parti in cui un generico pacchetto impiegato per la trasmissione viene diviso. In questo caso si considererà la parte del pacchetto utile in fase di acquisizione.

Per la fase di elaborazione dei dati è possibile scegliere il tipo di equazione impiegata nell'acquisizione, il valore della costante di soglia da usare durante l'acquisizione e il codefile per lavorare con la parte di pacchetto relativa ai dati.

Scan Tab

La finestra Scan Tab è suddivisa in due sotto-finestre: "Waveform SubTab" e "File SubTab". Nella Waveform SubTab è possibile scegliere i parametri di scansione utilizzati per scansionare i segnali. Tramite questa sotto-finestra è possibile impostare il valore della

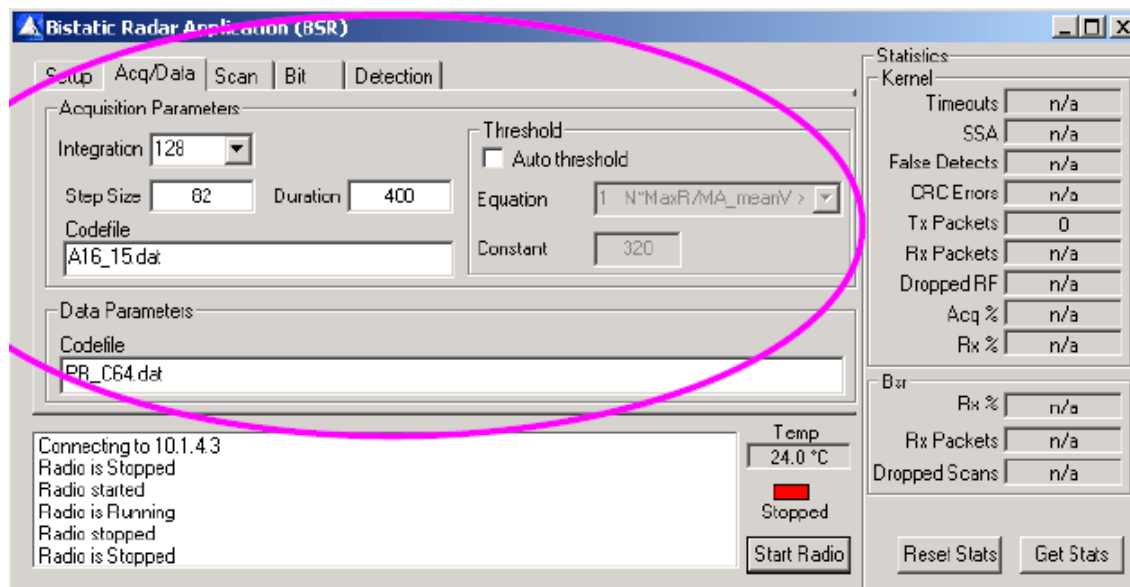


Fig. 5.5: Finestra grafica Acquisition/Data Tab.

posizione di inizio e fine scansione come offset in ns rispetto la linea di lockspot (Start Pos/ Stop Pos), il numero di simboli dati (campioni mediati) da integrare (Bit Integration) per generare un singolo punto nella scansione della forma d'onda, la larghezza temporale tra due campioni successivi o risoluzione della forma d'onda (Step Size), il numero di correlatori impiegati nella scansione. Ciascun simbolo è generato integrando il numero di impulsi specificato nella costante di integrazione radar (Integration) e quindi il numero totale di impulsi per campione è ottenuto dalla moltiplicazione tra la costante di integrazione radar e Bit Integration: $PulsePerSample = RadarIntegration * BitIntegration$. Viene visualizzato in Pulse per Sample (PPS). Oltre a visualizzare il numero di impulsi per campione, la finestra visualizza il numero di campioni per forma d'onda (Pulse Per Waveform, PPW) calcolato come $PPW = PPS * SW/STEP$. La sotto-finestra in questione è riportata in Fig. 5.6. La sotto-finestra File SubTab contiene i controlli usati per salvare le varie forme d'onda acquisite tramite PulsON. "Save Single Scan" permette di salvare l'ultima scansione catturata. Il formato del file è .txt e contiene i campioni per scansione acquisiti (Sample per Scan ,SPC) e un header. Il numero di SPC è calcolato come $SW/STEP$ mentre l'header riporta i valori di alcuni parametri settati per le misure.

Built-In-Test (BIT) Tab

La finestra BIT mostra i risultati del built-in-test che è automaticamente eseguito all'accensione del dispositivo o quando l'operatore ne decide l'esecuzione tramite il pulsante Run Tests. Il BIT inoltre calibra i dispositivi radio. I test vengono eseguiti per verificare che funzionamento dei timer, guadagni, offset DC siano compatibili con i valori nominali.

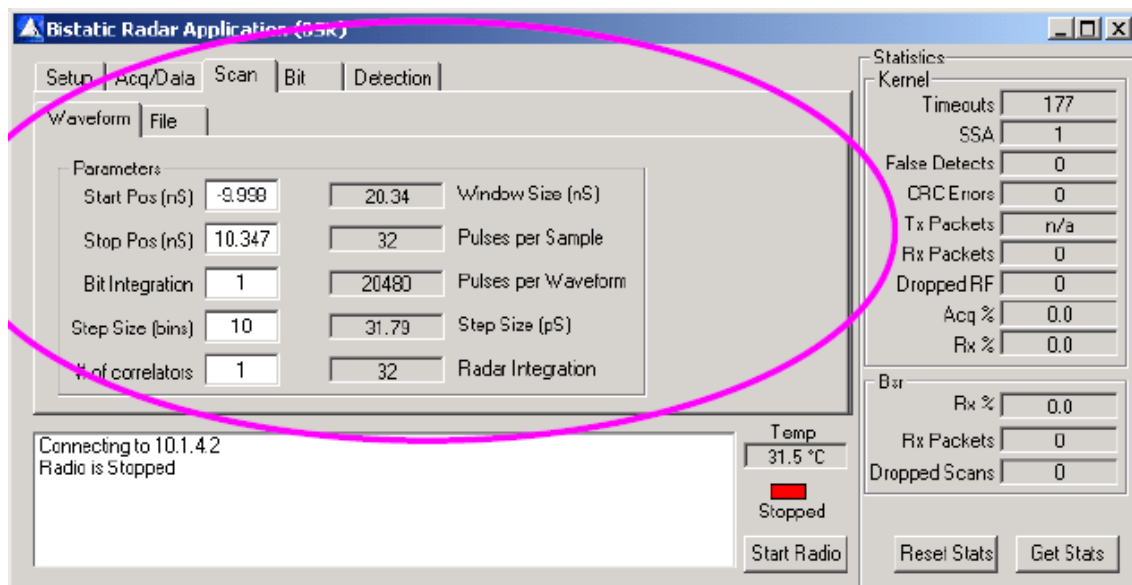


Fig. 5.6: Finestra di comando Waveform SubTab.

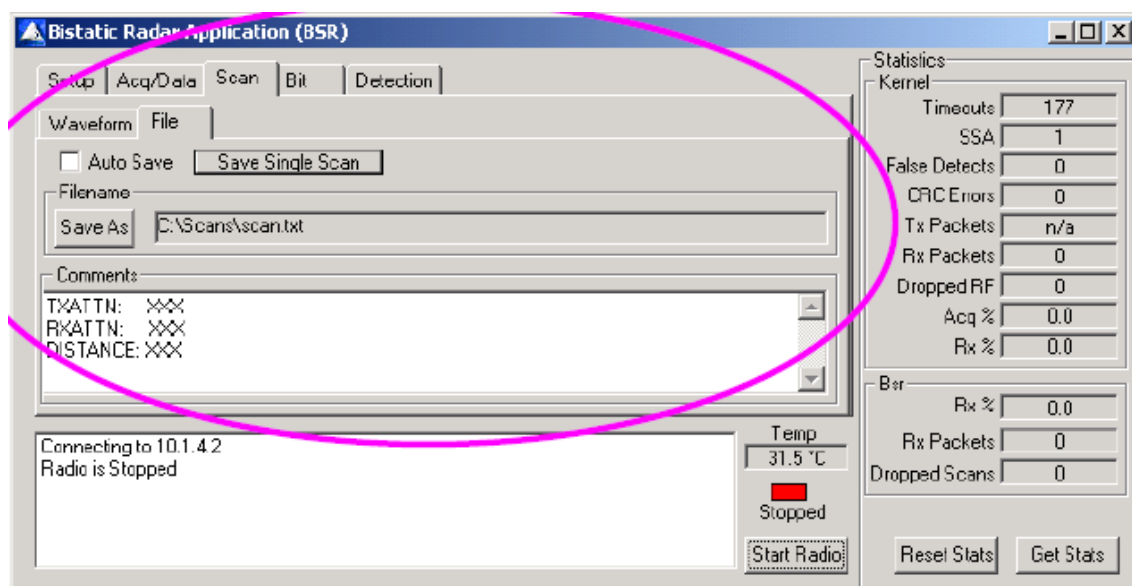


Fig. 5.7: Finestra di comando File SubTab.

Detection Tab

La Detection Tab contiene i controlli che definiscono i parametri degli algoritmi di LED e rilevamento oltre a visualizzare la BSR Application Display.

I parametri che si possono impostare sono la distanza tra i due dispositivi (Radio Separation), la distanza rispetto la linea retta virtuale che collega i dispositivi alla quale l'algoritmo di rilevamento deve iniziare a cercare eventuali disturbi (Detect Start Pos), la distanza rispetto la virtuale linea retta che collega i dispositivi alla quale il sistema deve fermare la sua ricerca di disturbi (Detect Stop Pos), il valore del coefficiente usato come media mobile dall'algoritmo di rilevamento per elaborare la deviazione di energia. Nella sezione "Algorithms" invece è possibile scegliere che tipo di algoritmo di rilevamento e

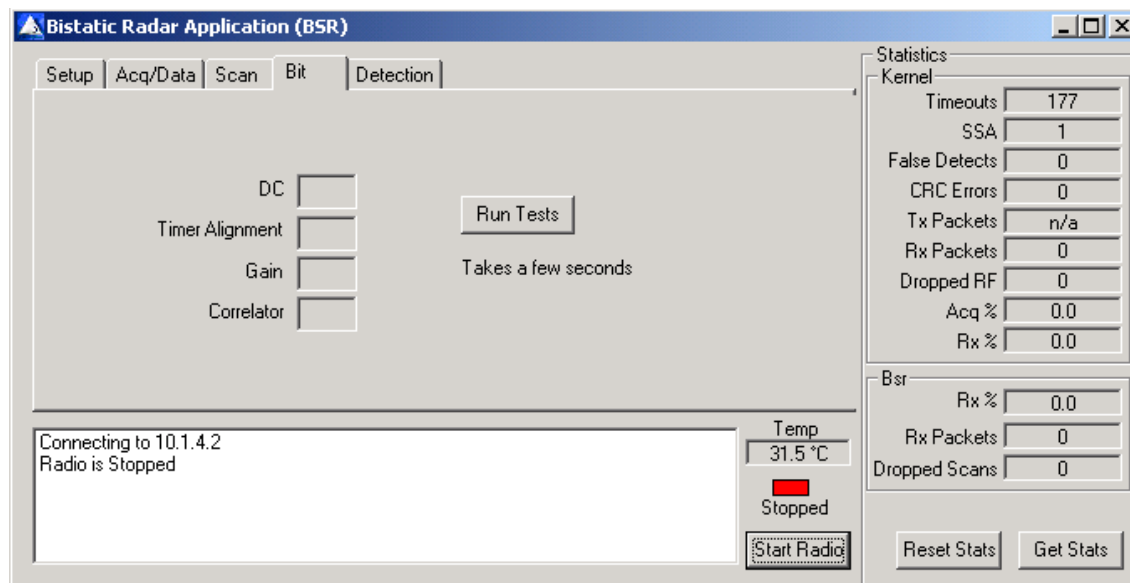


Fig. 5.8: Finestra BIT Tab.

di LED (Leading Edge Detection) usare tra quelli messi a disposizione. Gli algoritmi di rilevamento messi a disposizione sono due, Detect 1 e Detect 2. Detect 1 è impiegato per rilevare il superamento di un valore di soglia nella deviazione di energia quando il target si trova in prossimità della linea diretta tra trasmettitore e ricevitore. Detect 2 è più sofisticato e permette di misurare la deviazione di energia in una specifica area spostata dalla linea diretta tra trasmettitore e ricevitore.

Gli algoritmi di LED sono una parte critica del processo di rilevamento. La leading edge (letteralmente bordo d'entrata) è la parte ascendente dell'onda, prima di un picco e rappresenta il primo segnale ricevuto. Il più semplice modo per determinare la leading edge è individuare il picco che contiene la maggior energia. A causa della natura dispersiva dei segnali UWB una tale scelta potrebbe portare a scarsi risultati o addirittura errori nel funzionamento [74].

Time Domain fornisce tre diversi algoritmi di LED: Simple, LED3 e LED4. Simple è l'algoritmo più suscettibile ad errori in ambienti molto rumorosi ma è anche quello meno complesso e più veloce. Questo algoritmo determina la leading edge su un picco del segnale ricevuto il cui quadrato è maggiore di $1/3$ del massimo picco presente nel segnale. L'algoritmo LED3 invece è sensibile al primo picco del segnale sopra al rumore. Esso impiega un filtro esterno per ridurre il rumore e aumentare le proprie prestazioni. Questo algoritmo risulta meno suscettibile ad errori rispetto al Simple LED ma richiede maggior tempo a causa del filtraggio. L'ultimo algoritmo a disposizione, LED4, è simile a LED3 ma presenta un filtraggio interno. Il tempo richiesto per il filtraggio più complesso è maggiore rispetto ai precedenti ma risulta scarsamente suscettibile ad errori di rilevamento. LED4 mostra avere il più grande range dinamico a causa della miglior riduzione del rumore.

Dalla finestra Detection Tab è possibile inoltre personalizzare la finestra Bi-Static Radar Application Display. Dall'area Display della Detection Tab è possibile specificare che tipo di uscita visualizzare tra le due messe a disposizione. Scegliendo "Raw" si visualizzano le

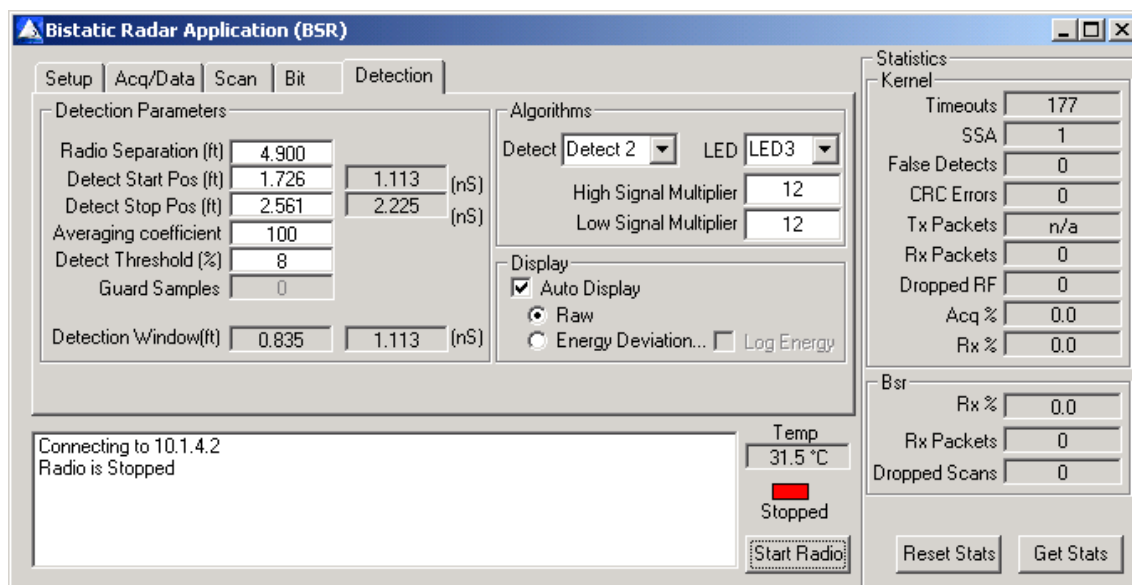


Fig. 5.9: Finestra grafica Detection Tab

scansioni delle forma d'onda così come sono ricevute; la finestra appare automaticamente alla ricezione della prima scansione. In questo caso l'asse delle ordinate rappresenta i livelli dell'uscita del convertitore A/D normalizzati per il valore della costante di integrazione radar mentre l'asse delle ascisse rappresenta la finestra temporale, in *bins* o *ns*. Scegliendo "Energy Deviation" si visualizza la deviazione di energia per ciascuna scansione unitamente ad un valore di soglia che indica quando un intruso è rilevato o meno. Fig. 5.10 e Fig. 5.11 riportano una loro generica rappresentazione. Il grafico superiore di Fig.

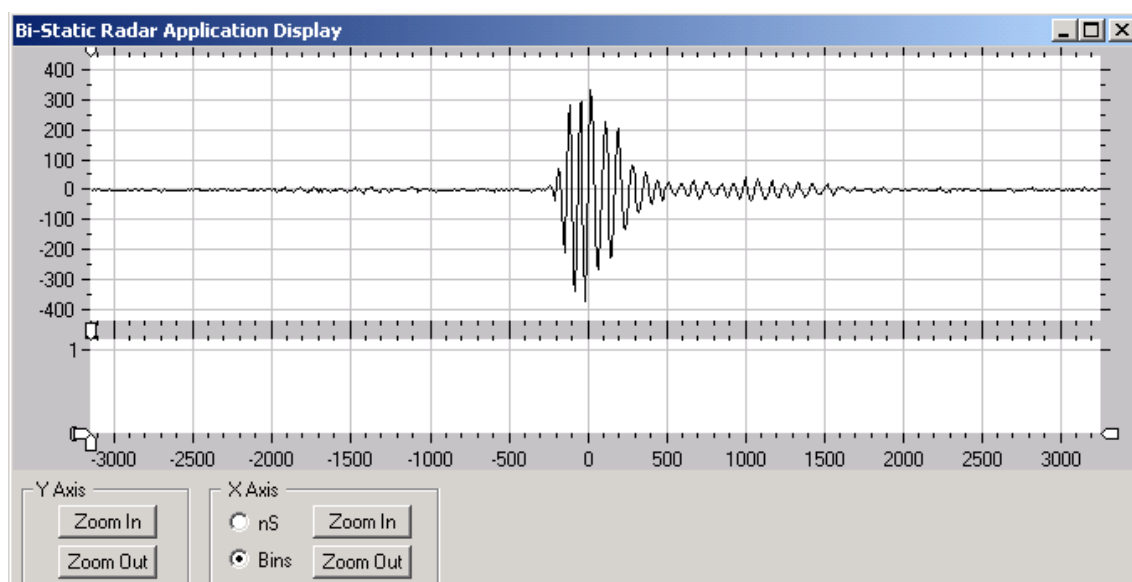


Fig. 5.10: Output dell'applicazione BSR: rappresentazione del segnale ricevuto. Asse y: uscita normalizzata del convertitore A/D; Asse x: finestra di osservazione temporale, in *bins* o *ns*.

5.11 mostra la deviazione di energia calcolata per ciascuna scansione ricevuta; ciascun punto del grafico rappresenta la deviazione di energia della scansione corrente rispetto la

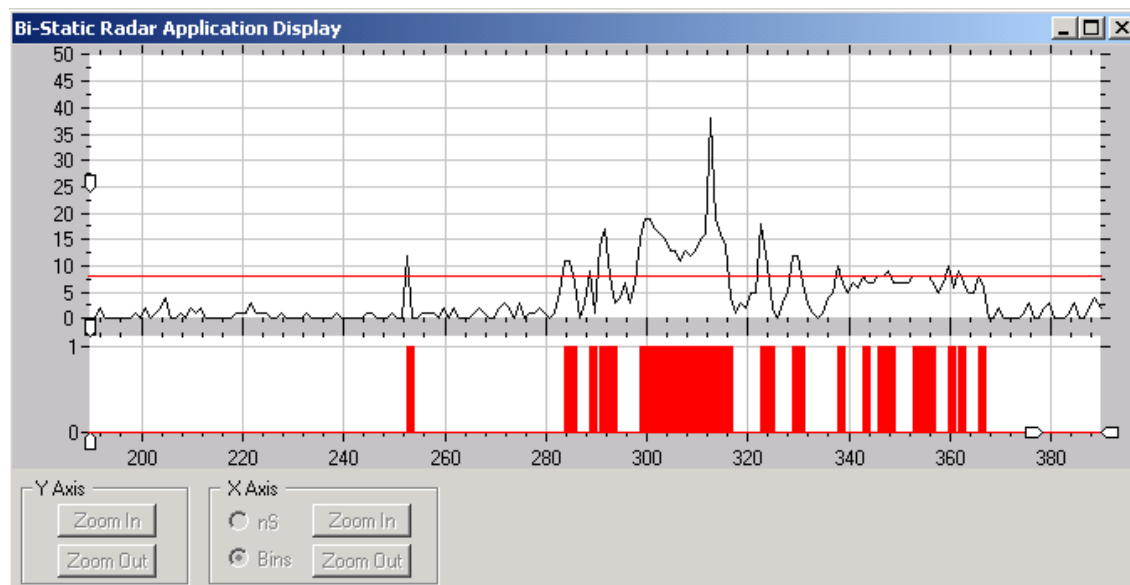


Fig. 5.11: Output dell'applicazione BSR: rappresentazione della deviazione di energia. Grafico superiore: asse x numero di scansioni ricevute; asse Y deviazione percentuale dell'energia. Grafico inferiore: asse X numero di scansioni ricevute; asse Y valori discreti in 0 e 1 che rappresentano, rispettivamente, il non rilevamento ed il rilevamento.

media delle scansioni recenti. L'asse delle ordinate rappresenta la deviazione percentuale di energia. L'asse delle ascisse il numero di scansioni ricevute. Il grafico inferiore mostra invece, per ciascuna scansione, quando una decisione di rilevamento è presa o meno. L'asse delle ordinate in questo caso può assumere valore 1 o 0 a seconda del rilevamento o meno.

Statistics Frame Area

In ciascuna delle finestre sopra analizzate è presente una sezione denominata Statistics Frame Area dalla quale è possibile visualizzare le statistiche di molteplici parametri, divisi per statistiche inerenti al Kernel (inerenti alla trasmissione/ricezione dei pacchetti da parte dei dispositivi) e statistiche inerenti all'elaborazione fatta dall'applicazione BSR.

5.4.2 Analisi sperimentale

L'analisi sperimentale è svolta presso il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali dell'Università di Padova presso la sede staccata di Vicenza. I test svolti hanno come obiettivo quello di verificare la bontà e capacità del dispositivo e del software messo a disposizione. Per le modalità di connessioni impiegate per l'utilizzo dei dispositivi PulsON si faccia riferimento allo schema di Fig. 5.12.

Il pc viene collegato mediante cavo Ethernet ad un hub al quale, a loro volta, sono collegati due diversi dispositivi PulsON 220 sempre tramite cavi Ethernet. A ciascun dispositivo viene assegnato un diverso IP statico mediante l'interfaccia di gestione del pc. Dal pc vengono lanciate due istanze dell'interfaccia grafica del BSR. Ciascuna GUI BSR si interfaccia alla componente embedded di un dispositivo che è caricata e inizializzata all'accensione del dispositivo. Le due componenti, come detto, comunicano mediante cavo

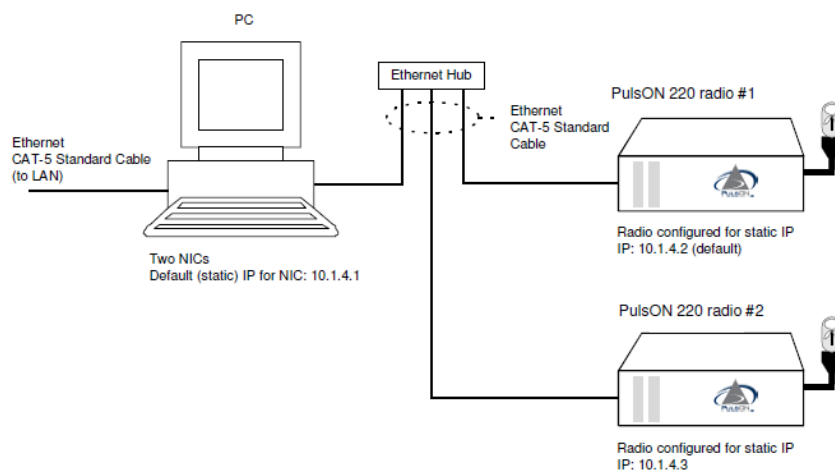


Fig. 5.12: Collegamento multiplo PC/PulsOn 220 utilizzando un collegamento con cavi Ethernet tramite hub e indirizzi IP multipli.

Ethernet. Con questo modulo software non è necessario l'impiego di più pc per comandare due o più PulsON ma è sufficiente lanciare il numero di istanze necessarie da un unico elaboratore.

Un dispositivo è impostato come trasmettitore mentre l'altro come ricevitore. Mentre i dispositivi sono in funzione, la componente embedded passa continuamente i dati alla GUI BSR per l'elaborazione. L'elaborazione sui dati è svolta usando gli algoritmi di LED e di rilevamento per individuare intrusi. La modalità BSR richiede una procedura di acquisizione di una "training sequence" (sequenza di allenamento) nota al ricevitore come primo passo prima di qualsiasi altra ricezione dati. L'obiettivo è definire i principali parametri della comunicazione e ,più importante, sincronizzare trasmettitore e ricevitore.

Come precedentemente detto il modulo mette a disposizione tre algoritmi LED e due algoritmi di rilevamento. Ciascun algoritmo di rilevamento richiede un algoritmo di LED. In linea teorica ciascun algoritmo di LED può essere usato con ciascun algoritmo di rilevamento. Si cerca di andare a migliorare il funzionamento del sistema impostando al meglio i vari parametri gestibili dall'operatore seguendo le specifiche da manuale e in maniera sperimentale sul campo.

Algoritmo di rilevamento Detect 1

L'algoritmo di rilevamento Detect 1 prende, come ingresso, la leading edge della scansione ottenuta mediante uno dei tre algoritmi di LED. Detect 1 determina l'energia sul e intorno al primo impulso lungo la linea diretta tra i due dispositivi. L'algoritmo calcola l'energia come somma dei valori assoluti dei valori scansionati nelle Guard Window e Detection Window. L'algoritmo mantiene in esecuzione una media di questa energia come riferimento. Confronta poi questo valore di riferimento con i nuovi valori di energia calcolati. Un'individuazione di movimento avviene se il valore assoluto dell'ampiezza di questa differenza è maggiore di un valore di soglia precedentemente impostato. Questo funzionamento è mostrato in Fig.5.13. La Guard Window è una finestra che viene posta



Fig. 5.13: Rappresentazione grafica del funzionamento dell'algoritmo di rilevamento Detect 1 sul segnale da analizzare. Il disturbo viene cercato nelle aree di Guard (azzurra) e di Detect (verde) a cavallo della leading edge calcolata tramite un algoritmo di LED.

a favore di sicurezza in modo che la leading edge non venga calcolata sul rumore.

I dispositivi sono stati posizionati al suolo alla distanza di 90 *cm* (Detect Stop Pos). Si sta testando il sistema in una configurazione che vorrebbe simulare un'ipotetico sistema anti-intrusione nell'accesso ad un locale, in questo caso un ufficio. L'area da sorvegliare rispetto la linea diretta tra i due dispositivi è stata impostata pari a 60 *cm*. Il test dell'algoritmo di rilevamento è stato effettuato impiegando tutti e tre gli algoritmi di LED. L'impiego del Simple LED, nell'ambiente testato, non permette l'uso del dispositivo per la funzione voluta. I disturbi ambientali presenti vanno a influenzare la misura e creano molteplici rilevamenti di target fasulli. Fig.5.14 riporta l'andamento dell'uscita del sistema con questo set di parametri. Nel grafico inferiore di Fig. 5.14 si può vedere come il

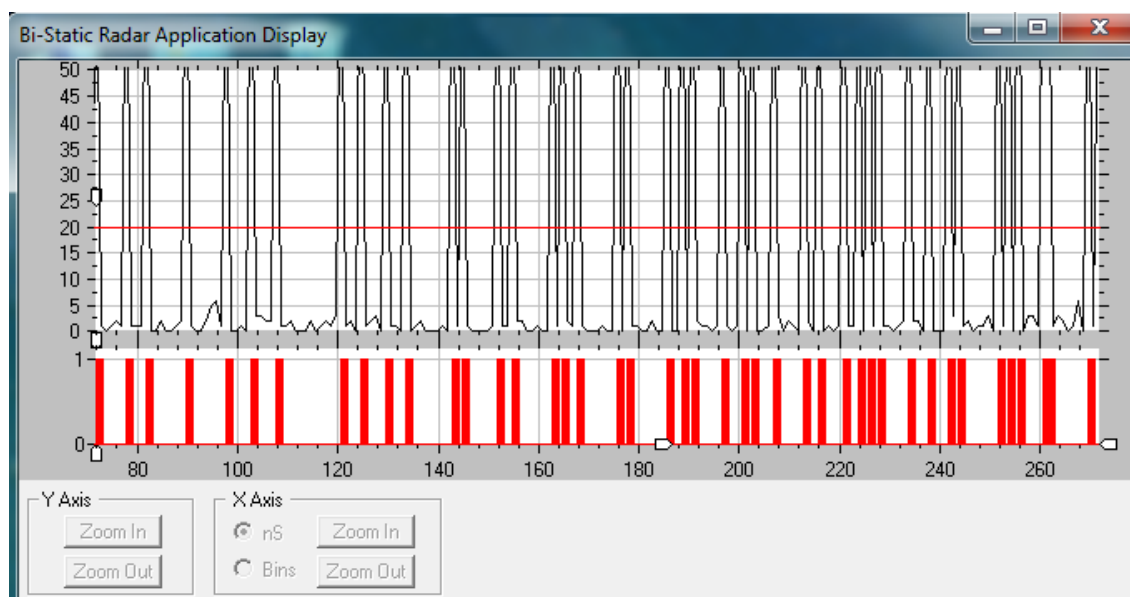


Fig. 5.14: Uscita afflitta da continui falsi rilevamenti causati dal rumore esterno (Detect1, LED Simple).

dispositivo rilevi quasi in maniera continua la presenza di un intruso nell'area di sorve-

gianza nonostante nessuno sia presente. Anche aumentando il valore del parametro Bit Integration per rendere il sistema meno sensibile ai rumori esterni il funzionamento non varia.

Nello stesso tipo di configurazione (distanza 90 cm, area da sorvegliare 60 cm) si è testato il secondo algoritmo di LED, LED3. Il funzionamento del sistema, con questo settaggio, sembrerebbe dipendere dal momento in cui le prove sono effettuate. Nei test svolti si è riscontrato che in certi casi il sistema così impostato è interessato da falsi rilevamenti (false detection). A distanza di poche ore con lo stesso settaggio il funzionamento è perfettamente corretto e le individuazioni fatte erano relative all'effettiva presenza dell'operatore. Un motivo di questo può provenire dalle modalità con cui le misure sono state effettuate. L'ambiente a disposizione non rispetta perfettamente le specifiche da manuale. Oltre a ciò l'ambiente può essere ancora causa di errate misure vista l'impossibilità di controllare in maniera completa il luogo dei test. A causa di questo risulta difficile individuare eventuali fattori esterni che possono influenzare i test. I valori di questi falsi rilevamenti risultano essere poi così alti da non permettere una modifica del valore di soglia usato nell'algoritmo. Per andare a escludere i disturbi infatti si dovrebbe scegliere un valore così alto da impedire il rilevamento di un vera presenza.

Come riportato in Fig. 5.15 il valore della deviazione di energia causata dai disturbi risulta infatti molto maggiore di quella causata dalla generica presenza dell'operatore (generalmente intorno al 40 %). Per quanto concerne le sue capacità di rilevare la presenza di un

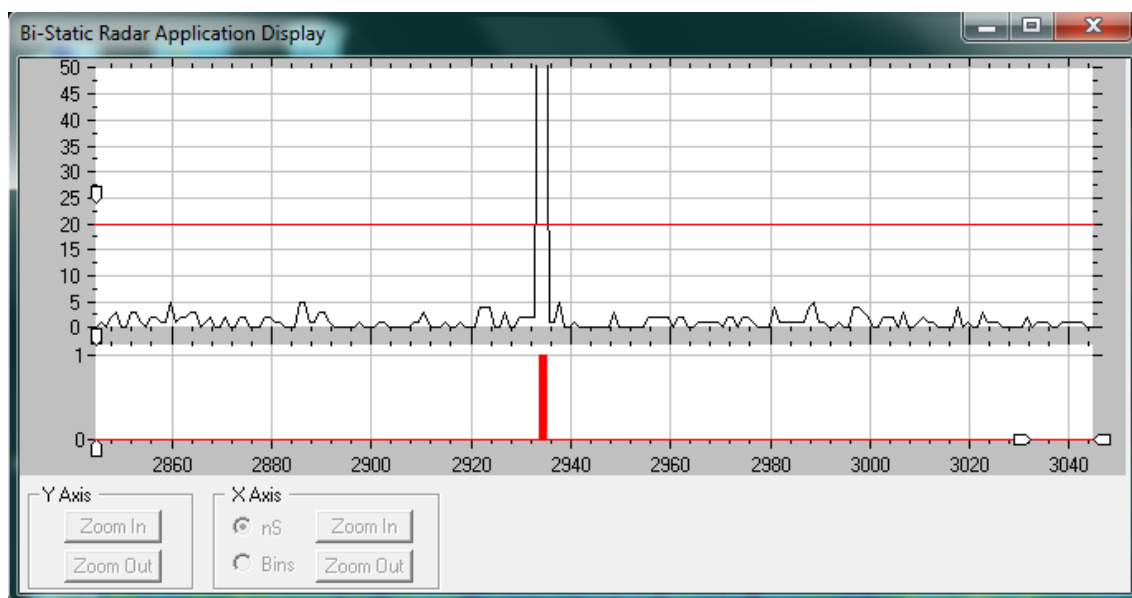


Fig. 5.15: Rappresentazione di un generico disturbo che affligge il sistema nel caso di algoritmi Detect 1 e LED 3. Il valore dell'energia è così alto da rendere impossibile un adattamento del valore di soglia.

intruso il dispositivo funziona in modo accurato. Sottoposto al passaggio di un operatore ad intervalli diversi in lunghi periodi il dispositivo non ha mai mancato un rilevamento, anche nel passaggio a velocità più sostenute della semplice camminata. In questo funzionamento l'area effettivamente sorvegliata dal sistema non è esattamente conforme alle

specifiche. Pur avendo impostato un'area di sorveglianza di 60 *cm* dalla linea diretta tra i due dispositivi, il passaggio dell'operatore viene individuato sempre in prossimità della linea diretta. Anche aumentando l'area di sorveglianza (nelle possibilità degli spazi a disposizione) il funzionamento del dispositivo non è sensibilmente cambiato.

Nel terzo ed ultimo caso, l'impiego dell'algoritmo di LED4 ha eliminato completamente i falsi rilevamenti che negli intervalli di utilizzo, spesso più di trenta minuti consecutivi, non si sono mai verificati. Il sistema non ha mai mancato l'individuazione del passaggio di un intruso. La sensibilità all'area di sorveglianza rispetto la linea diretta tra i due dispositivi è migliore ma già a 120 *cm* il sistema risponde dopo l'area impostata.

Il sistema è stato testato in altre configurazioni compatibili con lo spazio a disposizione

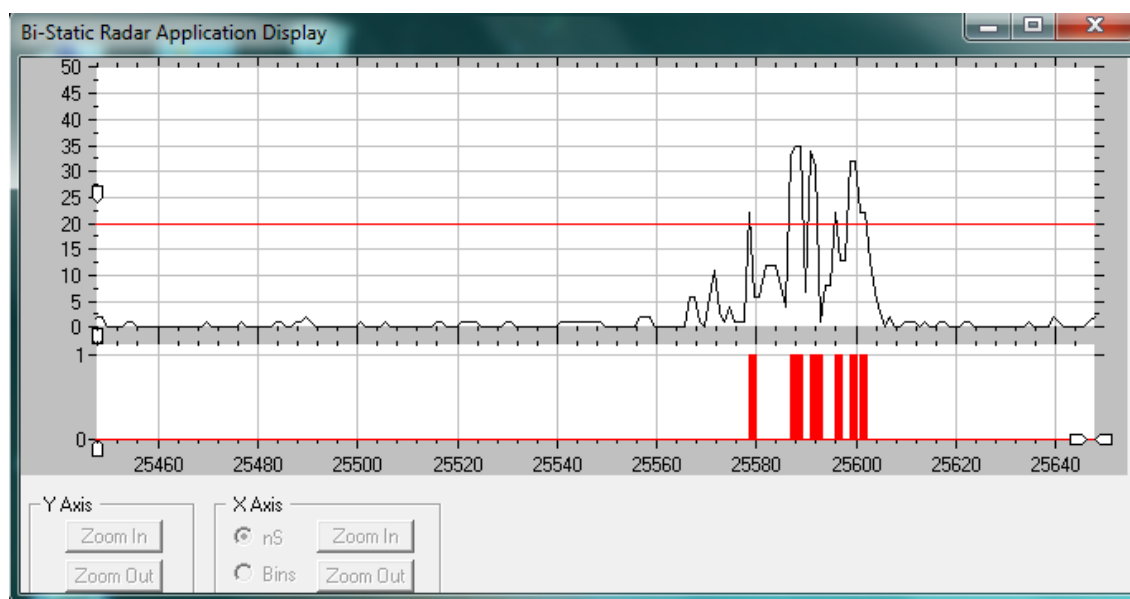


Fig. 5.16: Rappresentazione dell'uscita del sistema in risposta al passaggio di un operatore a normale velocità di camminata rilevato dal sistema (Detect1, LED4).

ma non si è riscontrata nessuna significativa differenza nel funzionamento. Man mano che la distanza tra i due dispositivi aumenta (massimo possibile 3 *m*) la frequenza di falsi rilevamenti aumenta (maggiormente con LED Simple e LED3).

Algoritmo di rilevamento Detect 2

L'algoritmo di individuazione Detect 2 è simile a quello di Detect 1 precedentemente illustrato. Applicando tecniche di elaborazione dei segnali più avanzate permette però di monitorare la variazione di energia in un'area spostata di un costante rispetto la leading edge. Questa capacità permette, in linea teorica, di definire una finestra circa ellittica di sorveglianza tale per cui un operatore al suo interno non può causare allarmi. In Fig. 5.17 è rappresentato questo funzionamento in maniera grafica. Anche in questa configurazione, impiegando l'algoritmo LED Simple, il funzionamento del sistema non è accettabile. I falsi rilevamenti si ripetono continuamente. I loro valori sono più alti del valore medio di un generico segnale derivante dalla presenza di un operatore: non c'è la possibilità di modificare il valore di soglia in maniera più funzionale. In queste condizioni di lavoro



Fig. 5.17: Rappresentazione grafica del funzionamento dell'algoritmo di individuazione Detect 2 sul segnale da analizzare. Il disturbo viene cercato nelle area di Detect (verde) ad una certa distanza dalla leading edge calcolata tramite un algoritmo di LED.

l'uscita del software BSR è riportata in Fig. 5.18.

Con l'impiego del secondo algoritmo di LED, LED3, i falsi rilevamenti sono presenti ma

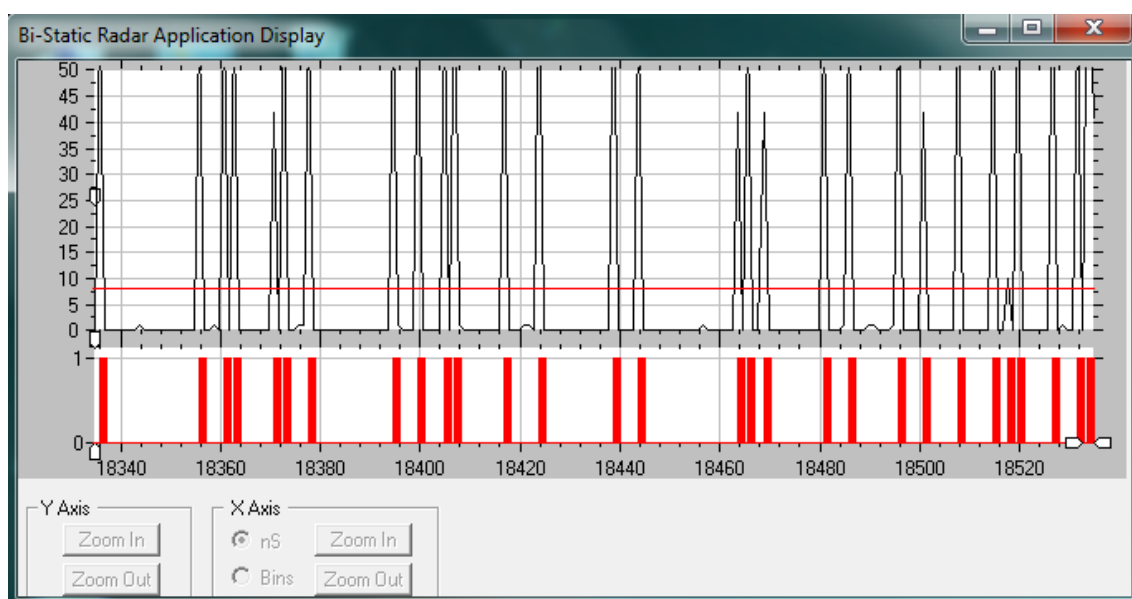


Fig. 5.18: Rappresentazione della forma d'onda d'uscita del sistema. L'uscita è afflitta da continui falsi rilevamenti (Detect2, LEDSimple).

il loro valore risulta essere modesto. Questo rende possibile impostare un diverso valore della costante di soglia. Il valore scelto è troppo alto perché i valori di energia relativi ai disturbi lo superino ma sufficientemente basso per essere sensibile alla presenza di un intruso. In questa configurazione i valori della deviazione di energia dei disturbi risultano essere costanti intorno al 10 % e quindi molto più bassi del generico 40% che, come già precedentemente detto, rappresenta il valore di deviazione associato al movimento di un operatore riportato dal manuale del dispositivo. Nei test svolti, l'area di sorveglianza impostata (Radio Separation = 150 cm, Detect Start Pos = 120 cm, Detect Stop Pos = 210 cm) tramite la finestra Detection Tab (5.9) non risulta essere rispettata. Il movimento

di un operatore in una area interna alla zona di sorveglianza è causa di rilevamenti da parte del sistema. Questi allarmi, a livello teorico, non dovrebbero essere presenti. L'avvicinamento dell'operatore, da qualsiasi direzione verso il sistema, è causa di rilevamenti. Il sistema sembrerebbe essere poco sensibile all'area di sorveglianza impostata e genericamente sensibile al movimento nell'area intorno ai due dispositivi. L'impiego dell'algoritmo LED3 con l'algoritmo di rilevamento Detect 2 non manifesta gli stessi inconvenienti riscontrati con l'algoritmo Detect 1 precedentemente discussi.

L'impiego dell'ultimo algoritmo a disposizione, LED4, rende il sistema molto meno sensibile ai disturbi presenti nell'ambiente. Il funzionamento, come nel caso di LED3, non risulta coerente con le specifiche teoriche e i parametri impostati: il rilevamento del target avviene quasi sempre anche all'interno dell'ellisse. I test sono stati anche ripetuti posizionando i dispositivi PulsOn ad una certa altezza da terra, circa 30 *cm*, come descritto nel manuale per limitare le riflessioni del pavimento ma anche in questa configurazione gli esiti non sono stati soddisfacenti. Possibili cause di questo comportamento possono essere trovate in una scelta non ottimale nel settaggio dei parametri e, come già detto, in problemi legati all'ambiente di test non controllabili che possono aver influenzato le misure.

5.5 System Analysis Module

Il System Analysis Module (SAM) è uno strumento che permette all'utente di configurare, comandare e ricevere analisi dei dati dal dispositivo PulsOn.

L'architettura software del SAM può essere divisa in due componenti: una componente host che viene eseguita su di un pc ed una componente embedded in esecuzione nel dispositivo stesso. La componente sul pc, detta anche interfaccia grafica (in inglese Graphical User Interface, GUI) accetta i comandi da operatore, costruisce/invia pacchetti di richiesta al componente embedded e riceve/elabora i pacchetti di risposta. La componente embedded a sua volta accetta pacchetti di comando dal GUI, elabora i comandi, costruisce/invia i pacchetti di risposta al pc. La trasmissione dei pacchetti viene gestita dalla API (Application Program Interface). La trasmissione avviene su cavo Ethernet ed impiega un protocollo TCP per gestire i flussi di pacchetti di tipo richiesta e risposta a richiesta mentre un protocollo UDP per i pacchetti dati.

Con il SAM, l'utente ha la possibilità di misurare molteplici parametri inerenti le radio-comunicazioni sia in ricezione come BER, numero di bit ricevuti, numero di pacchetti ricevuti, percentuale dei pacchetti persi, effettiva velocità dati, percentuale di pacchetti ricevuti, temperatura del dispositivo, energia per bit, SNR che in trasmissione come numero di bit trasmessi, numero di pacchetti trasmessi, tempo di funzionamento, temperatura di funzionamento del dispositivo.

L'interfaccia grafica (GUI) del SAM presenta due finestre, la "Control window" e la "Plot window".

5.5.1 Interfaccia grafica del modulo SAM

La Control window presenta cinque distinte aree di interesse come evidenziato in Fig. 5.19. Le aree sono:

- Menu bar;
- Message area;
- Radio operations command area;
- Tabbed form fields;
- Statistic frame area.

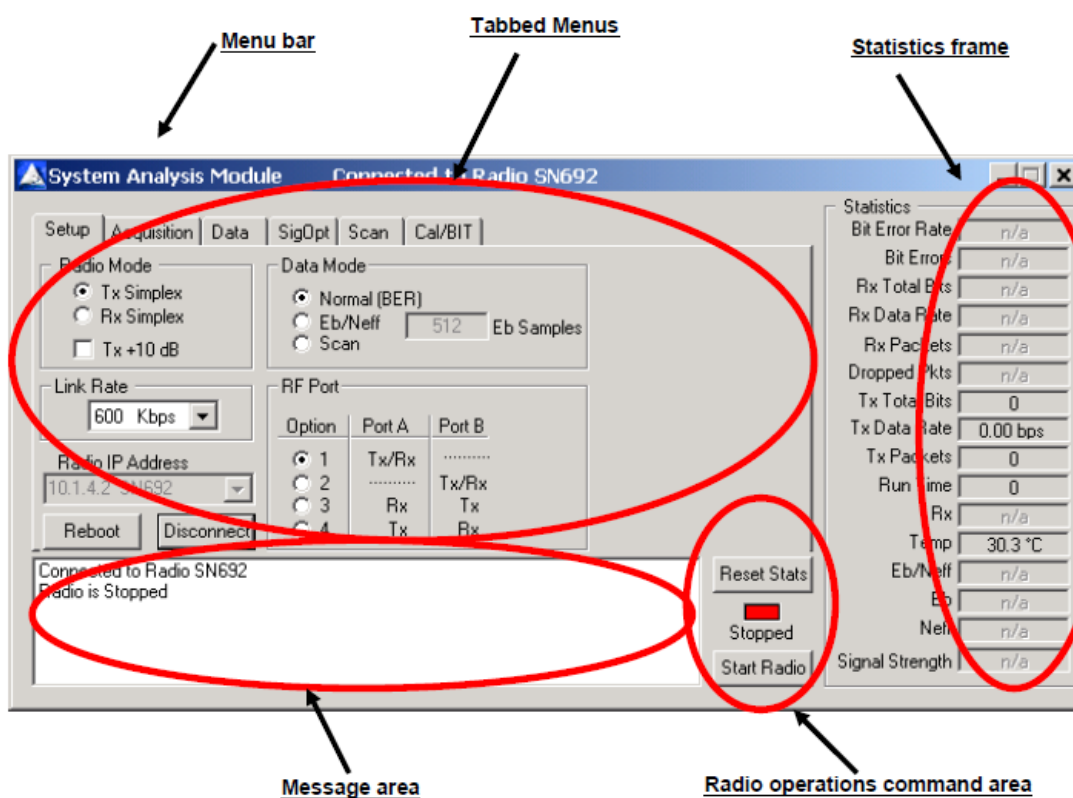


Fig. 5.19: Interfaccia grafica della finestra di controllo del modulo SAM.

Menu bar

La barra di menù permette le normali operazioni di una finestra e l'accesso alle informazioni inerenti la versione del software installato.

Message Area

Quest'area elenca i messaggi registrati dal software.

Radio Operations Comand Area

L'area è usata per tre operazioni

- Resettare le statistiche;
- Iniziare le comunicazioni radio;
- Terminare le comunicazioni radio.

Tabbed Form Fields

In questa zona dell'interfaccia grafica sono contenute le seguenti schede mediante le quali è possibile configurare e comandare i dispositivi.

1. Setup;
2. Acquisition;
3. Data;
4. SigOpt (Signal Optimization);
5. Scan;
6. Cal/Bit (Calibration/Built-In-Test).

Setup Tab La scheda Setup Tab riportata in Fig. 5.20 è usata per:

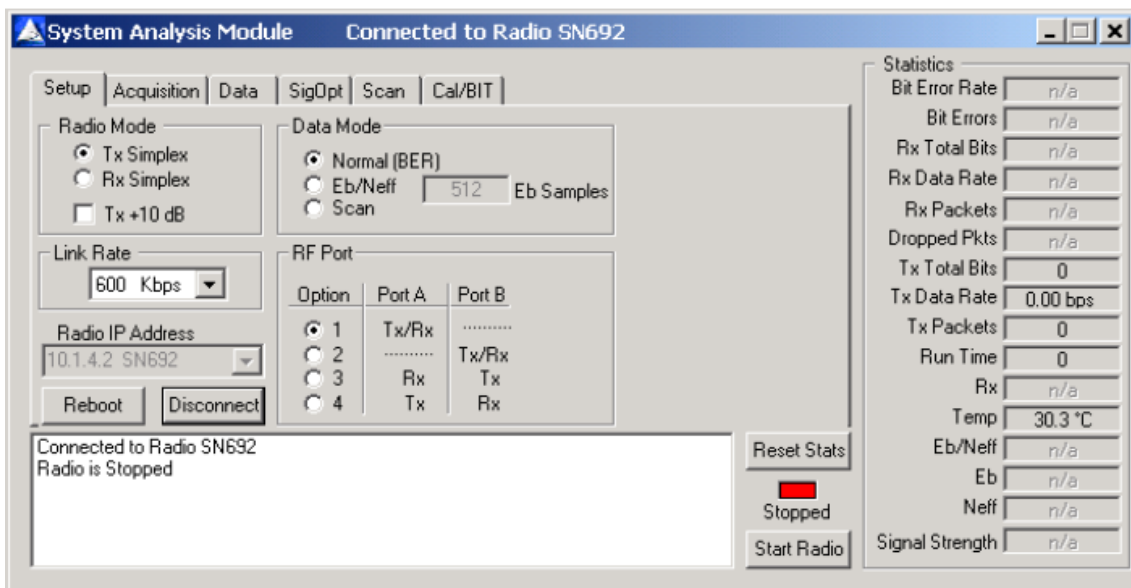


Fig. 5.20: Finestra grafica Setup tab del modulo SAM.

- Connettere/disconnettere/riavviare l'interfaccia grafica GUI al dispositivo PulsOn 220;

- Settare il dispositivo in modalità trasmettitore (Tx Simplex) o ricevitore (Rx Simplex);
- Impostare la velocità del link tra trasmettitore e ricevitore in un range compreso tra 9.6 *Mbps* e 75 *Kbps*. Il valore della velocità è particolarmente importante: il sistema setta in automatico altri parametri (Acquisition integration, Data integration, tipo di modulazione) in modo da garantire il valore impostato.
- Configurare le modalità di trasmissione e di lavoro dei dispositivi tra le possibili messe a disposizione: BER, E_b/N_{eff} e Scan.

La modalità BER, come già precedentemente detto, abilita le normali operazioni di analisi delle trasmissioni radio. Il trasmettitore invia un “BER pattern” noto al ricevitore. Al ricevimento di ogni pacchetto, il ricevitore determina e accumula i bit d’errore per i successivi calcoli statistici. La modalità E_b/N_{eff} permette di quantificare le prestazioni della trasmissione radio non solo in presenza di rumore termico (indicato con il rapporto E_b/N_o) ma anche di interferenze ambientali (rappresentati da un qualsiasi rumore non modellabile come gaussiano) che limitano le prestazioni. La modalità Scan abilita il trasmettitore ed il ricevitore a trasmettere/ricevere pacchetti di forma e contenuti adeguati per produrre una scansione della forma d’onda.

- Impostare l’uso delle due possibili porte (A e B) disponibili al collegamento con le antenne;
- Selezionare l’indirizzo IP a cui connettersi e cioè selezionare il dispositivo PulsON a cui si vuole interfacciare la GUI;

Acquisition Tab La finestra Acquisition Tab permette di impostare i parametri inerenti alla fase di acquisizione. In questa fase trasmettitore e ricevitore cercano di allinearsi per permettere le trasmissioni tra loro. Questa scheda presenta tre diverse sottofinestre: “Setup Sub-Tab”, “Thresholds Sub-Tab” e “Statistic Sub-tab”; Fig. 5.21 ne riporta una generica rappresentazione grafica. Nel Setup Sub-Tab è possibile caricare il “codefile” da impiegare per l’acquisizione (tutti di lunghezza pari a 16 impulsi), il numero di impulsi (Acquisition Integration) che devono essere integrati per formare un simbolo acquisizione, il tempo tra l’acquisizione di due simboli successivi in *ps* (Acquisition step size), il numero massimo di simboli (Acquisition duration) che devono essere trasmessi all’inizio di ciascun pacchetto (o, in fase di ricezione, il numero di simboli che devono essere cercati prima di reinizializzare il processo di acquisizione) nella fase di acquisizione. Il tempo può anche essere espresso in *bin* ($1 \text{ bin} = 3.1789 \text{ ps}$) perché i timer interni al dispositivo misurano il tempo in questa unità. Nel Thresholds Sub-Tab è possibile selezionare l’equazione per l’acquisizione tra le tre messe a disposizione dal software (Equation) e il valore della costante di soglia usata durante l’acquisizione (Constant). I parametri che compongono le diverse equazioni sono il primo e secondo più grande valore dei simboli acquisizione, la media mobile della varianza del correlatore, il valore dell’Acquisition integration. Per quanto riguarda il valore della costante, se troppo basso comporta che il dispositivo è

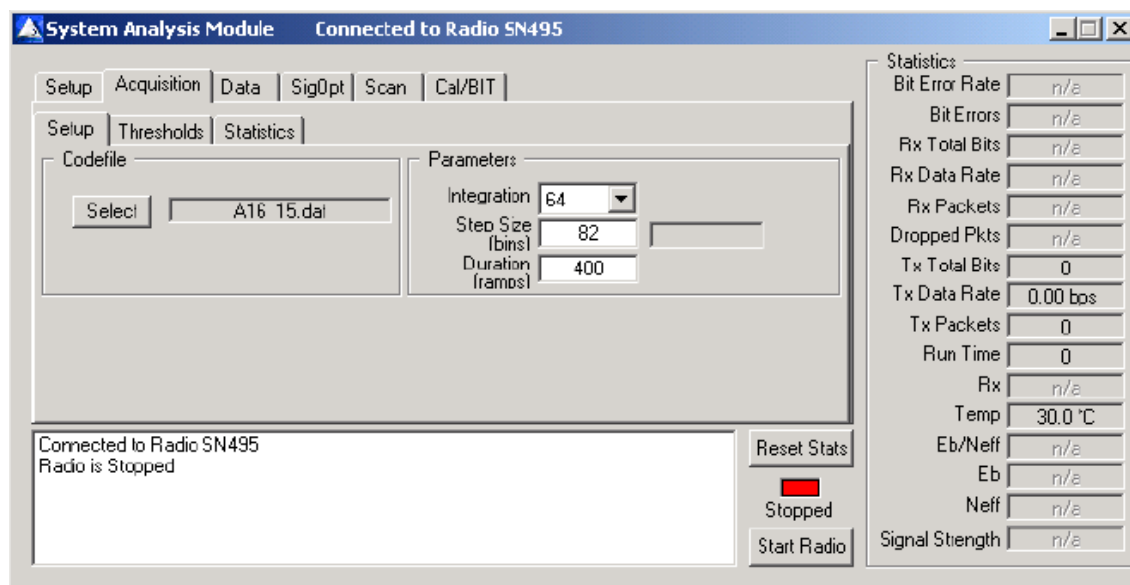


Fig. 5.21: Finestra Acquisition Tab del modulo SAM.

probabilmente agganciato al rumore piuttosto che al segnale causando un numero di falsi allarmi significativi. Se il valore della costante è invece troppo alto si incorre in un elevato numero di fallimenti nel rilevamento (detection timeout). La documentazione tecnica fornita dalla Time Domain riporta delle linee guida per la scelta dell'equazione e del valore della costante in base al tipo di ambiente in cui si vuole operare. Nel Statistic Sub-Tab è possibile visualizzare le statistiche di insuccesso inerenti all'acquisizione e rilevamento.

Data Tab Nella finestra Data Tab è possibile scegliere il tipo di codefile che da usare per la demodulazione dei dati (Codefile), il numero di campioni che dovranno essere integrati (Integration) per la demodulazione di un simbolo (dove un simbolo è la somma di campioni successivi provenienti da un singolo correlatore) e infine il tipo di modulazione/demodulazione dei dati (Modulation).

SigOpt Tab La finestra SigOpt Tab è utilizzata per cambiare la posizione dei correlatori durante l'ottimizzazione del segnale (rispetto la linea di lock spot), cambiare il range di scansione in *ns* (o *bin*) di un singolo correlatore, cambiare il passo di cambio fase (hop size) usato da ciascun correlatore. Un'esempio di questa finestra è riportato in Fig. 5.23.

Scan Tab La finestra Scan Tab, riportata in Fig. 5.24 è suddivisa a sua volta in tre sotto-finestre: "Waveform Sub-Tab", "Ambient RF Sub-Tab" e "File Operations Sub-Tab". Nella sotto-finestra Waveform Sub-Tab è possibile abilitare/disabilitare la scansione, definire i parametri da usare nella scansione e personalizzare il display della forma d'onda.

I controlli relativi alla scansione sono "Enable Scanning", "Continuos Plots", "Overlay Plots" e "Auto Correlate". Se la scansione è attiva (Enable Scanning selezionato) i dispositivi trasmettono/ricevono pacchetti in un formato necessario a produrre le scansioni della forma d'onda. La spunta di Continuos Plots comporta un continuo aggiornamento

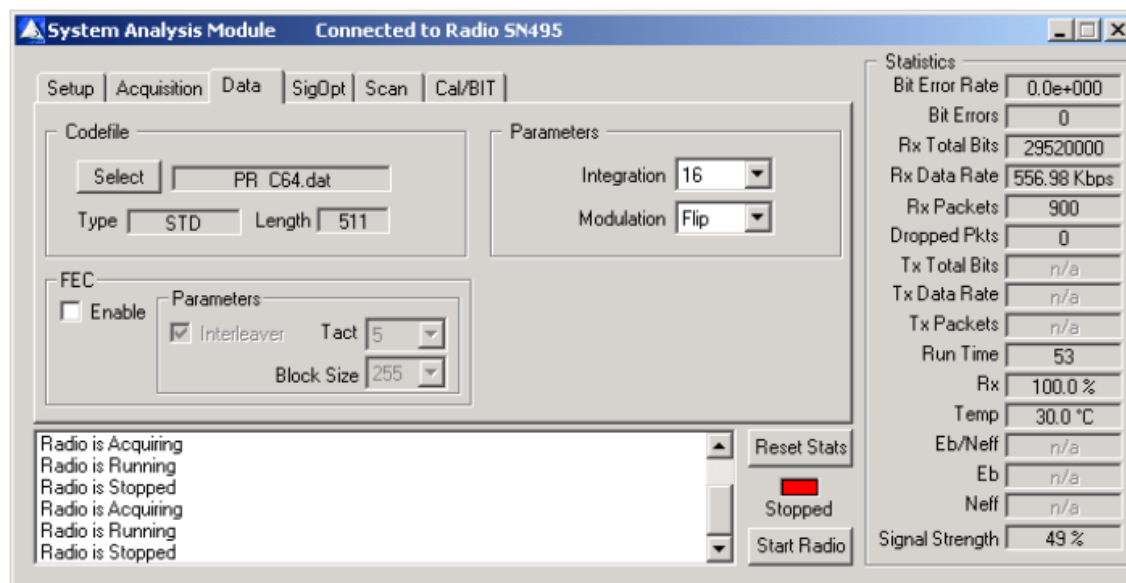


Fig. 5.22: Finestra Data Tab del modulo SAM.

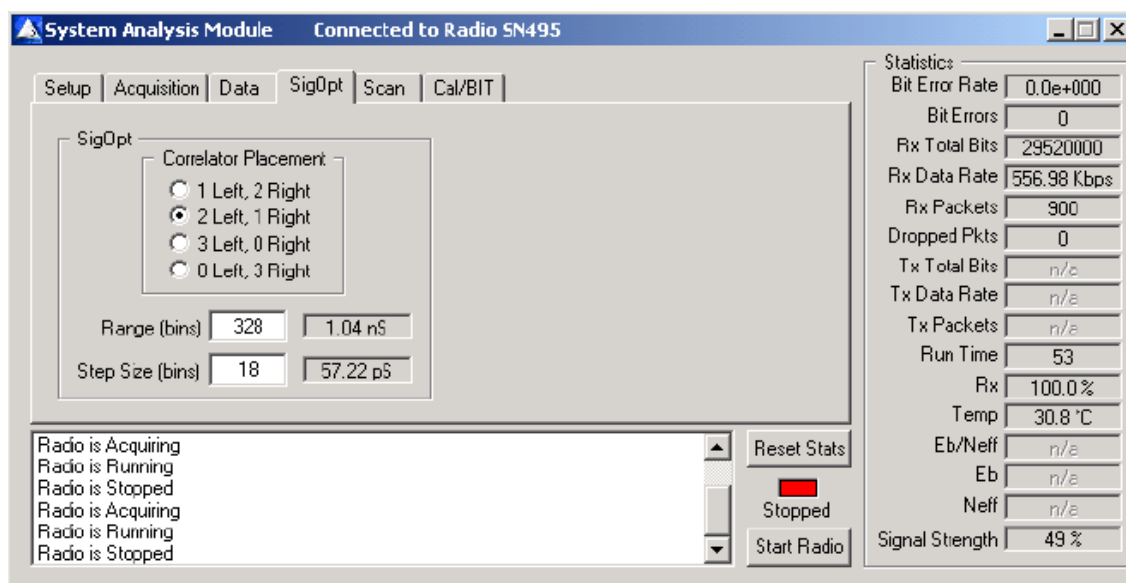


Fig. 5.23: Finestra SigOpt Tab del modulo SAM.

della forma d'onda. Le forme d'onda visualizzate, anche nella modalità Continuous Plots, non provengono da pacchetti consecutivi: una nuova scansione è richiesta al trasmettitore solo quando una viene ricevuta. Questo rappresenta un forte limite all'utilizzo del dispositivo come spiegato in 5.6. Overlay Plot permette di visualizzare contemporaneamente più forme d'onda acquisite. L'impiego di Auto Correlate (attivabile solo con Overlay Plots attivo) permette di eseguire la correlazione tra le forme d'onda acquisite. Selezionando "Capture Scan" si attiva la visualizzazione delle forme d'onda.

I parametri di scansione gestibili dalla sotto finestra Waveform Sub-Tab sono molteplici. È possibile settare il numero di correlatori (da 1 a 3) impiegati nella scansione (Num Correlators), il punto di partenza della scansione in termini di ns rispetto la linea di lockspot (Start Position) e il punto di fine della scansione (Stop Position). La differenza tra Start

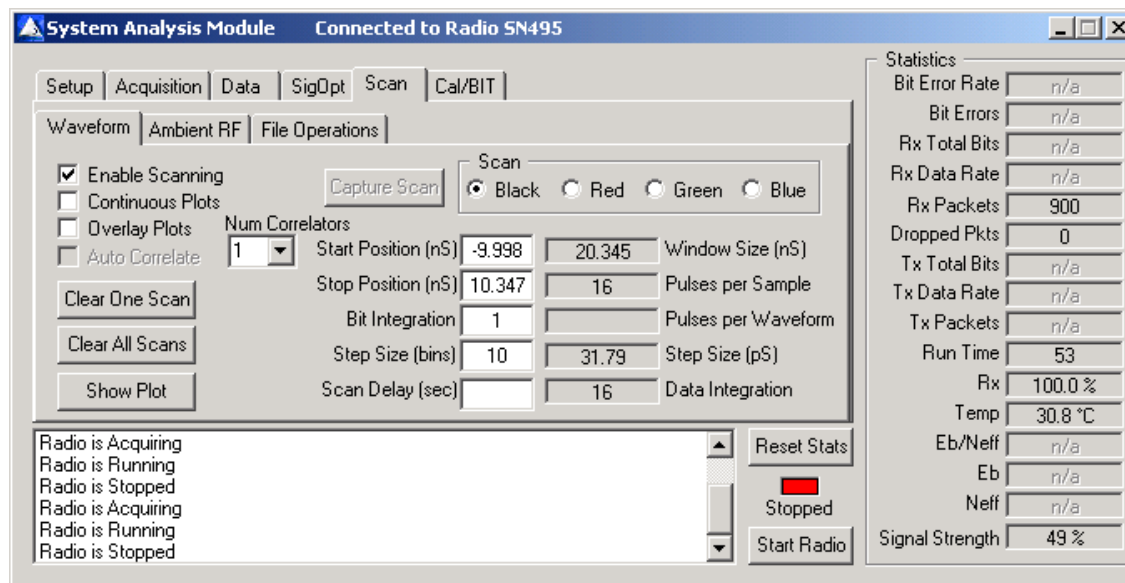


Fig. 5.24: Finestra Scan Tab del modulo SAM.

Position e Stop Position non può mai superare i 100 ns. Tramite Bit Integration è possibile settare il numero di impulsi da integrare. Il risultante numero di impulsi da integrare per generare un singolo punto nella scansione della forma d'onda è mostrato in "Pulse Per Sample" ($PPS = Data\ integration \times Bit\ Integration$). Step size rappresenta la larghezza temporale tra due campioni successivi o risoluzione della forma d'onda. Il parametro "Scan Delay" specifica il ritardo dell'inizio della scansione rispetto il comando Capture Scan. In questa sotto-finestra è possibile visualizzare i valori della finestra di scansione (Window Size), il numero di impulsi per campione (Pulses Per Sample) e il numero di impulsi da integrare per costruire un simbolo dati (Data Integration) calcolati in base ai valori imposti agli altri parametri di scansione.

La sotto-finestra Ambient RF oltre a mettere nuovamente a disposizione molteplici funzioni già viste nella sotto-finestra Waveform Sub-Tab permette di settare il numero di campioni per ogni scansione, generalmente 4096. Ogni qual volta viene attivata la funzione Capture Scan il dispositivo cattura il numero di campioni specificato.

L'ultima sotto-finestra messa a disposizione è la sotto-finestra File Operation. In questa sezione è possibile andare a specificare quale forma d'onda acquisita deve essere salvata. Mette a disposizione le operazioni basilari per il salvataggio e caricamento dei segnali (nome con cui salvare il file, directory dove salvarlo, eventuale salvataggio automatico). Il formato con cui il software utilizzato mette a disposizione i file è .scn. In questo formato, ciascun file creato contiene un header con i valori dei principali parametri con cui i dispositivi sono settati per la prova e ovviamente i dati scansionati (se Enable Scanning è attivo). Una ricerca sui file di tipo .scn non ha portato risultati particolarmente utili ai fini di questo lavoro. Si è trovato che, ad esempio, sono utilizzati per applicazioni audio e nei sistemi grafici di molti videogiochi.

I file messi a disposizione permettono, in linea teorica, di esportare i dati acquisiti anche in software diversi da quelli messi a disposizione dalla Time Domain. La possibilità di

poter elaborare i dati acquisiti dal dispositivo con software quali MatLab ad esempio, renderebbe il dispositivo molto più interessante e utilizzabile in applicazioni diverse da quelle standard. Le potenzialità e i limiti di questa possibilità verranno messe meglio in evidenza nella sezione 5.6.

La finestra Plot Window, generabile dalla finestra Scan Tab tramite il comando Capture Scan, permette di osservare e analizzare singoli o molteplici andamenti delle forme d'onda acquisite, eseguire le ordinarie operazioni sugli assi (zoom e unità di misura). Una generica rappresentazione è riportata in Fig. 5.25. Nell'area denominata Graphing Area è rappresentata la forma d'onda acquisita. L'asse delle ascisse rappresenta in *ns* (o *bin*) la durata della finestra temporale impiegata nella scansione. L'asse delle ordinate rappresenta il valore dell'energia del segnale calcolata per ogni campione ricevuto. Le altre tre aree messe in evidenza rappresentano la possibilità di effettuare degli zoom sugli assi e la scelta dell'unità di misura dell'asse x; permettono di visualizzare o meno la linea di lockspot.

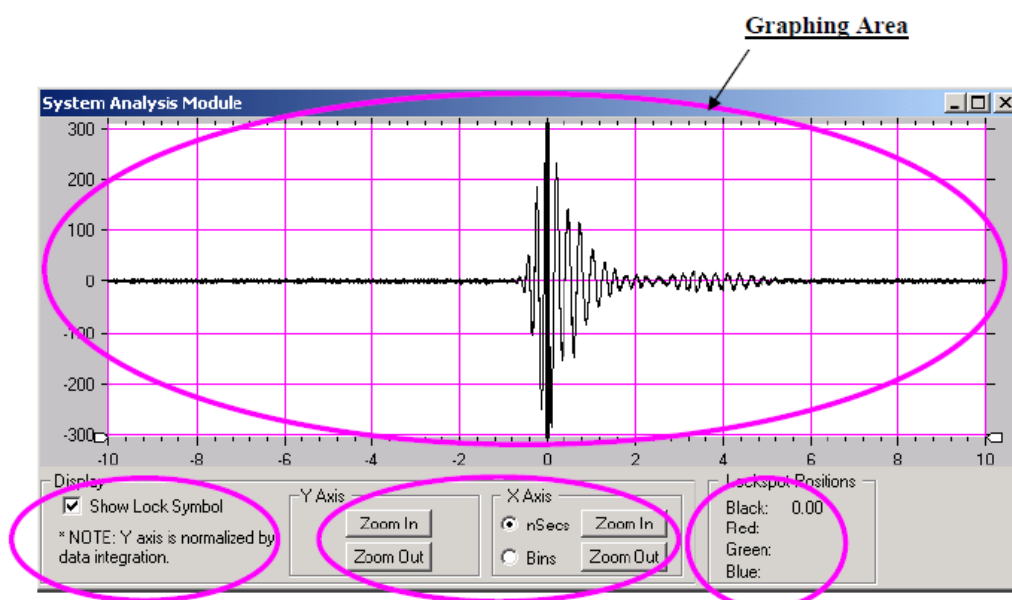


Fig. 5.25: Generico segnale visualizzato mediante il software SAM. Asse delle ascisse: finestra temporale di osservazione in *ns*; Asse delle ordinate: integrale dell'energia per ogni campione acquisito.

Cal/BIT Tab La finestra Cal / BIT Tab permette di eseguire una serie di test che vanno a calibrare il dispositivo e risolvere eventuali problemi legati ad una scelta non coerente dei diversi parametri da settare. Le calibrazioni interessano gli offset, i guadagni, la quadratura dei vari correlatori.

In ciascuna delle finestre e sotto-finestre di cui sopra, è presente un area denominata Statistic. In quest'area è possibile visualizzare, a seconda che il dispositivo sia settato come trasmettitore o ricevitore e in base alla modalità di funzionamento scelta, le performance della trasmissione radio. I valori dei parametri riportati che quantificano le prestazioni sono molteplici: Bit Error Rate (BER), numero di bit ricevuti e inviati, numero di pacchetti

inviati e ricevuti, numero di pacchetti persi, velocità di trasmissione con cui i dati vengono trasmessi, temperatura di lavoro, la potenza del segnale e molteplici altri come riportato a titolo di esempio in Fig. 5.26.

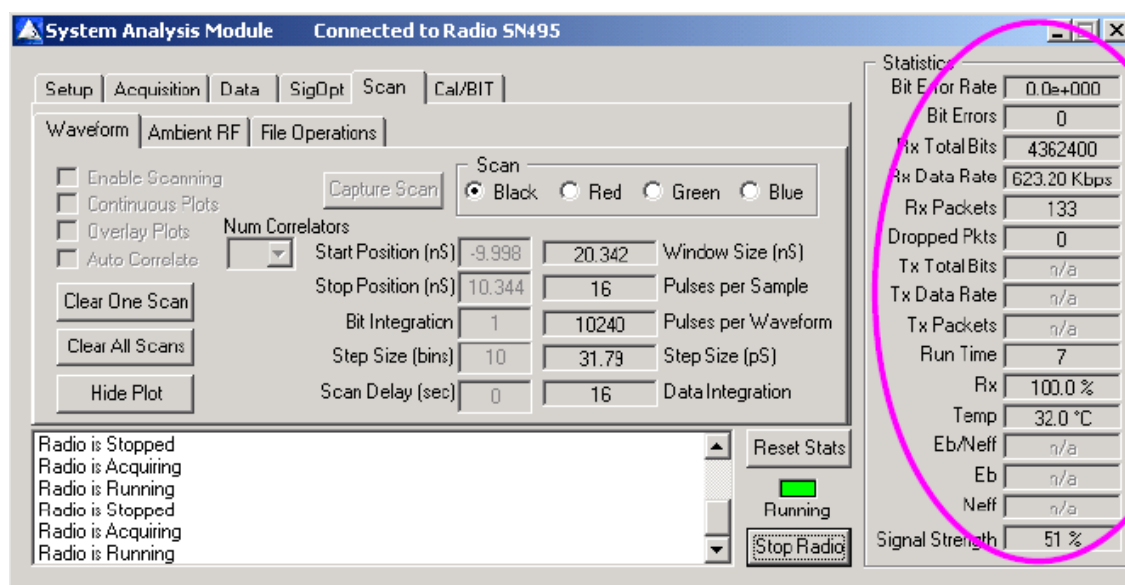


Fig. 5.26: Finestra Scan Tab; evidenziata in viola area della finestra relativa alle statistiche delle trasmissioni radio.

5.5.2 Analisi sperimentale

L'analisi sperimentale è stata svolta presso il Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali dell'Università di Padova presso la sede staccata di Vicenza. I test svolti hanno come obiettivo quello di verificare la bontà e capacità del dispositivo e del software messo a disposizione. Per le modalità di connessioni impiegate per l'utilizzo dei dispositivi PulsON si faccia riferimento allo schema di Fig. 5.12.

Il pc viene collegato mediante cavo Ethernet ad un hub al quale, a loro volta, sono collegati due diversi dispositivi PulsON 220 sempre tramite cavi Ethernet. A ciascun dispositivo viene assegnato un diverso IP statico mediante l'interfaccia di gestione del pc. Dal pc vengono lanciate due istanze del modulo software SAM. Ciascuna realizza una connessione con uno dei due PulsON rendendo possibile il loro impiego. Non è necessario l'impiego di più pc per comandare due o più PulsON ma è sufficiente lanciare il numero di istanze necessarie da un unico elaboratore.

Un dispositivo è impostato come trasmettitore mentre l'altro come ricevitore e su entrambi è attivata la modalità Scan. I valori dei principali parametri impostati in trasmissione e ricezione per i test sono di seguito riportati:

- numero di impulsi integrati per formare un simbolo acquisizione: 64;
- larghezza della finestra temporale tra simboli acquisizione successivi: 260 ps;
- numero di simboli acquisizione che devono essere trasmessi (o ricevuti) durante la fase di acquisizione: 400;

- numero di campioni integrati per formare un simbolo dati: 16;
- tipo di modulazione: flip;
- bit integration: 1;
- larghezza finestra temporale di scansione della forma d'onda: 20 ns;
- numero di impulsi per ciascun campione della forma d'onda: 16;
- numero di impulsi collezionati per la scansione delle forme d'onda: 9728.

La scelta dei valori si è basata principalmente sulle linee guida fornite dalla documentazione tecnica del costruttore per poi essere perfezionata sul campo.

I risultati ottenuti dall'acquisizione sono riportati in Fig. 5.27. L'andamento riportato

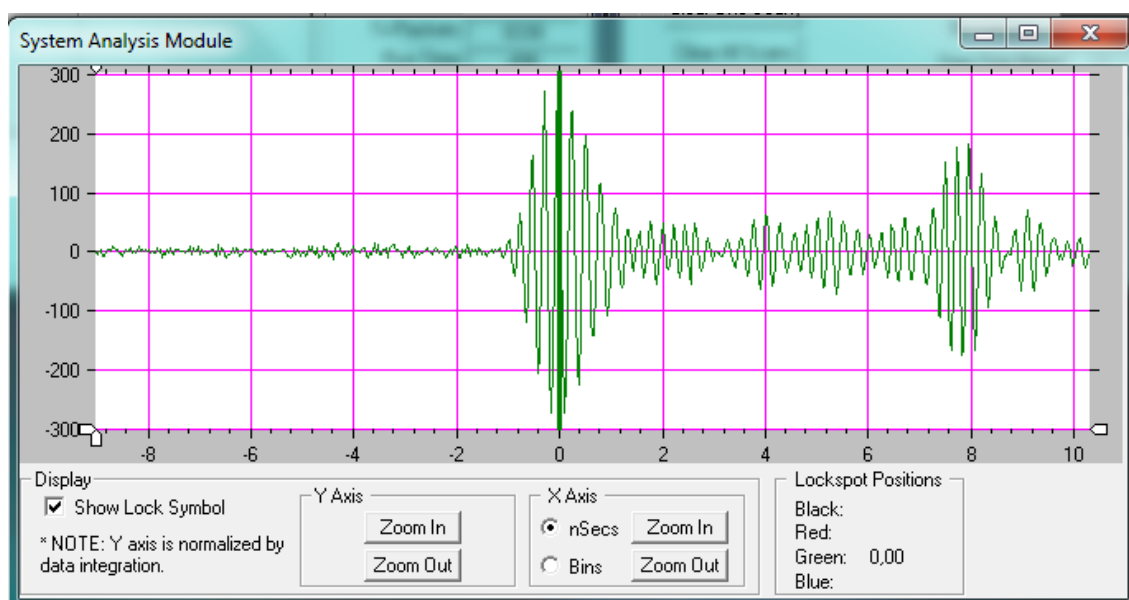


Fig. 5.27: Andamento forma d'onda ricevuta con trasmettitore e ricevitore distanziati di 3 m senza ostacoli. Asse delle ascisse: finestra di osservazione in ns. Asse delle ordinate: energia della forma d'onda ricevuta.

rappresenta la forma d'onda al ricevitore eccitato dalla trasmissione di impulsi UWB del trasmettitore. Ricevitore e trasmettitore sono posizionati alla distanza di 3 m senza la presenza di ostacoli lungo la linea di vista (line of sight) tra i due dispositivi. Le antenne sono allineate (non è presente un offset laterale tra loro) con le facce piane tra loro parallele. Essendo omnidirezionali le antenne non dovrebbero essere sensibili a eventuali offset laterali ma la documentazione tecnica a disposizione consigliano di lavorare, quando possibile, in questa configurazione. Si può presumere che il picco più alto, essendo in condizione Line Of Sight (LOS) rappresenti il segnale diretto trasmettitore-ricevitore. Nel segnale ricevuto sono presenti altri picchi in diverse posizioni della finestra temporale. Questi ulteriori picchi rappresentano tutti i segnali che dal trasmettitore non arrivano direttamente al ricevitore ma seguono percorsi diversi. I diversi percorsi derivano dalla presenza di ostacoli come muri, mobili, armadi, ecc. presenti nell'ambiente di prova sui quali i segnali

trasmessi vanno a rimbalzare (multipath). I segnali riflessi giungono poi al ricevitore ad un diverso istante e ad una diversa energia. La differenza temporale è causata dalla diversa lunghezza del percorso che i segnali compiono; il diverso valore energetico dall'attenuazione causata dalle riflessioni (difficilmente un segnale può subire un'amplificazione). In Fig. 5.27 è presente un picco di ampiezza considerevole ad una distanza temporale di circa 8 ns dal picco assunto come derivante dal segnale diretto. Un tempo di 8 ns rappresenta circa una distanza di 2.4 m . Questo picco, vista la disposizione dei dispositivi nell'ambiente di prova, con rappresenta il segnale riflesso dalla parete e ritrasmesso al ricevitore. Gli altri picchi più piccoli e più vicini al picco principale rappresentano segnali riflessi dal pavimento e dall'armadio laterale.

Sono state svolte molteplici misure nelle stesse posizioni che mostrano come il multipath misurato risulti sempre essere molto simile a verifica della stabilità dello strumento. Le lievi differenze possono essere imputabili ad un ambiente di lavoro non perfettamente controllabile.

Per testare ulteriormente le capacità dei segnali UWB si è spostato il ricevitore dalla precedente posizione in modo tale che tra i due dispositivi fosse presente una parete. La distanza è rimasta la stessa (3 m) mentre si è stati costretti ad accettare un offset laterale (15 cm) tra le antenne per motivi logistici. L'andamento rilevato è riportato in Fig. 5.28. Rispetto a Fig. 5.27 l'andamento qualitativo del segnale non è cambiato. Una differenza

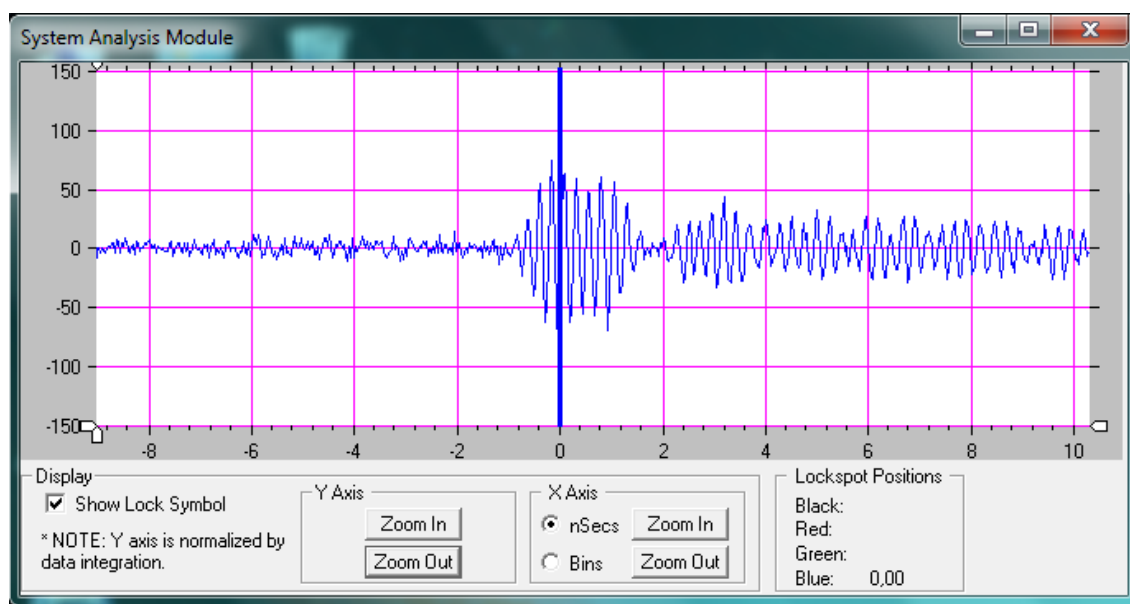


Fig. 5.28: Andamento forma d'onda ricevuta con trasmettitore e ricevitore distanziati di 3 m con parete; offset laterale di 15 cm . Asse delle ascisse: finestra di osservazione in ns ; Asse delle ordinate: energia della forma d'onda ricevuta.

è rappresentata dal valore dell'ampiezze dei segnali ricevuti. La presenza del muro, come intuibile, ha solo attenuato in parte i segnali presenti al ricevitore ma non ha influenzato il corretto funzionamento del dispositivo. Per meglio vedere ciò sono state riportate in Fig. 5.29 le due diverse misure, senza e con parete, nello stesso grafico. La possibilità di poter aumentare la potenza trasmessa in fase di trasmissione permetterebbe di avvicinarsi

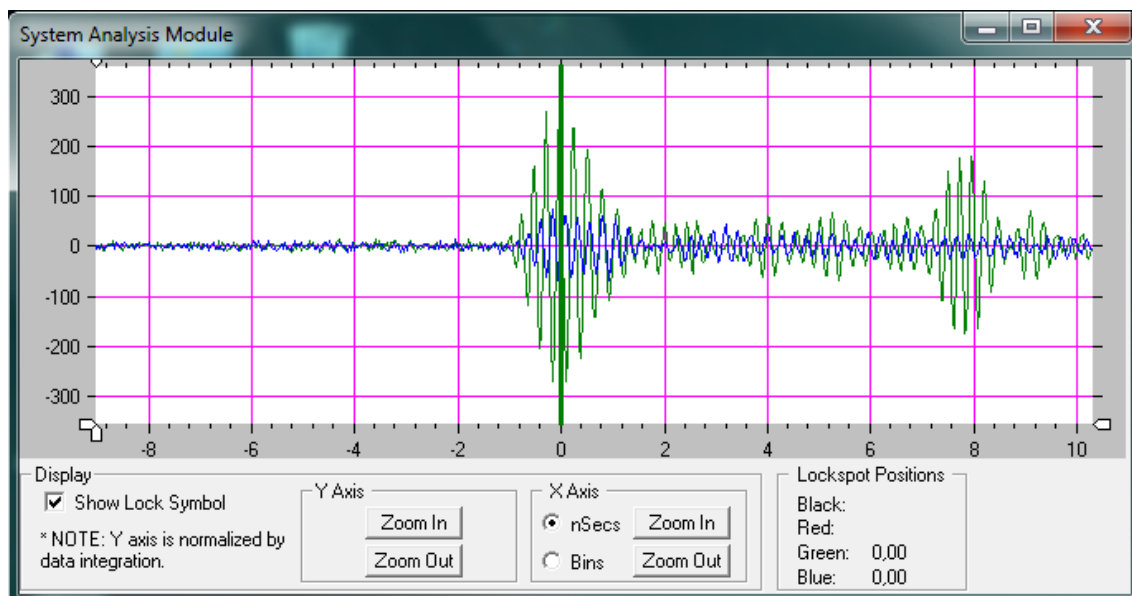


Fig. 5.29: Andamento forma d'onda ricevuta con trasmettitore e ricevitore distanziati di 3 m senza ostacoli (verde) e con parete (blu). Asse delle ascisse: finestra di osservazione in ns; Asse delle ordinate: energia della forma d'onda ricevuta.

ancor di più all'andamento di Fig. 5.27.

La sede dei test ha messo in evidenza un'ulteriore importante proprietà dei segnali UWB e cioè la loro capacità di non interferire con sistemi radio già presenti. I collegamenti wifi tra pc, stampanti, ecc. presenti non hanno subito variazioni. Discorso analogo per quanto concerne le comunicazioni tramite telefoni cellulari.

Ulteriori test sono stati fatti andando a modificare i valori di alcuni parametri per valutare il comportamento del dispositivo e per migliorare le statistiche del sistema. Non si è riscontrata nessuna particolare differenza nel funzionamento del dispositivo. Le variazioni dei valori dei parametri hanno invece causato sulle statistiche effetti in accordo con quanto riportato nella documentazione tecnica.

5.6 Possibili sviluppi

Il dispositivo PulsON 220 è stato utilizzato unicamente con i moduli software che la Time Domain mette a disposizione. La possibilità di esportare le misure in formato .scn (o .txt per l'applicazione BSR) rende possibile utilizzare i campioni delle forme d'onda come dati di ingresso per altri software quali OpenOffice e MatLab. È possibile passare dai campioni del file .scn ai valori dei campioni da utilizzare poi in altri software per ottenere le stesse forme d'onda visualizzate tramite Plot Window. Questo passaggio è realizzabile noti i valori di Bit Integration e Data Integration usati e con qualche elaborazione algebrica. A titolo di esempio si riporta la stessa forma d'onda mostrata in Fig. 5.27 ottenuta mediante il software Matlab in Fig. 5.30. I valori dei simboli contenuti nel file .scn ottenuto mediante PulsOn sono stati copiati in un vettore in MatLab ed elaborati secondo quanto specificato nelle note tecniche. Partendo dal valore del primo simbolo e procedendo, l'elaborazione consiste in una serie di sommatorie di lunghezza pari a Bit Integration dei valori che poi

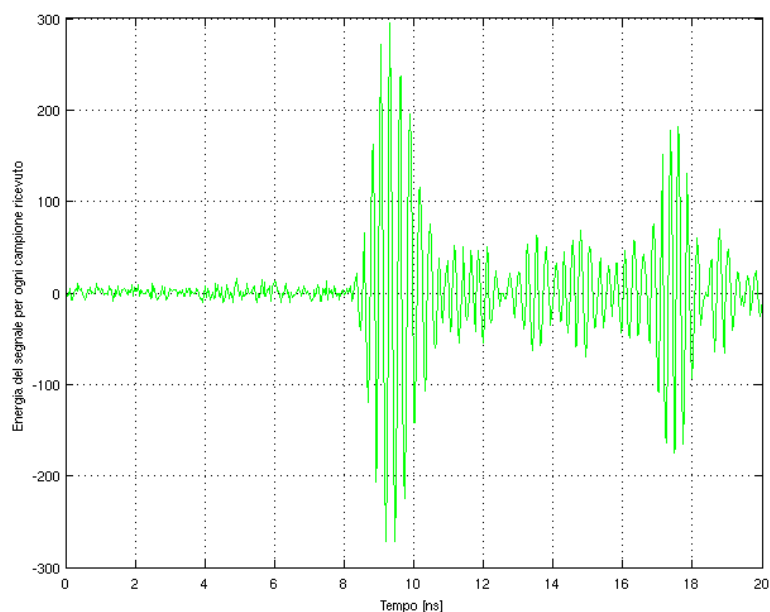


Fig. 5.30: Rappresentazione grafica mediante MatLab dei campioni acquisiti da misure effettuate mediante il dispositivo PulsON.

vengono divisi per il valore di Data Integration. In questo modo si ottengono i valori dei campioni che devono essere plottati. Il file .scn non riporta l'istante temporale assoluto dei vari campioni e l'asse delle ascisse è stato ricostruito come un vettore di istanti temporali noto il periodo di campionamento ($T_c = 31.79ps$).

La possibilità di poter elaborare i campioni ottenuti in modo tale da poterli impiegare in ingresso ad altri software rende il dispositivo PulsON molto più versatile e utilizzabile in applicazioni diversificate. Le possibili applicazioni possono esser molteplici.

La prima vedrebbe l'impiego dell'applicazione BSR come possibile metodo di monitoraggio e rilevamento del battito cardiaco e frequenza respiratoria di un individuo. Rendendo le antenne direzionali (o almeno il più possibile) e posizionando l'individuo ad una distanza d nota è possibile in linea teorica monitorare le sue funzioni respiratorie e cardiache. Tramite l'impiego del dispositivo è possibile acquisire le forme d'onda derivanti dal monitoraggio e mediante algoritmi software estrarre le informazioni cercate. L'ipotetico algoritmo dovrebbe come prima operazione cercare di rimuovere tutte le riflessioni statiche causate dall'area di test e rendere più "pulito" possibile il segnale. Un secondo passo potrebbe consistere nell'andare a rilevare, se c'è, il periodo del segnale analizzato.

Un secondo sviluppo del modulo SAM, in questo caso in ambito di localizzazione, è rappresentato dal poter creare delle ellissi rappresentanti il range della distanza di uno o più target dai dispositivi. Il ritardo temporale con cui i segnali arrivano al trasmettitore rispetto il segnale diretto può essere correlato ad una distanza dal dispositivo, noto il valore della velocità della luce ($3 * 10^8 m/s$). In Fig. 5.31 è riportata graficamente questa modalità di lavoro. Mediante software si può passare da un'ipotetica forma d'onda mostrata in Fig. 5.27 in cui l'asse temporale è riferito alla particolare finestra di osservazione di quella scansione ad una come quella riportata in Fig. 5.31 in cui i ritardi non sono espressi

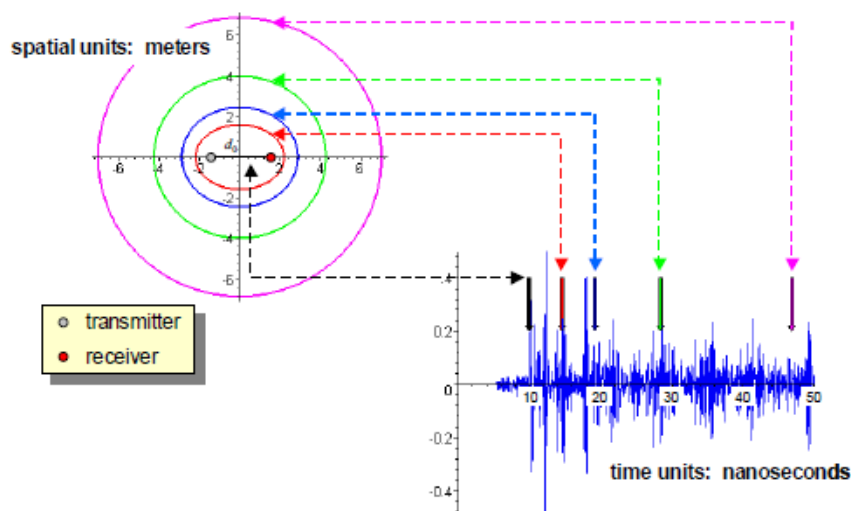


Fig. 5.31: Range ellittico correlato ai ritardi temporali con cui i segnali giungono al ricevitore.

rispetto ad un riferimento interno del dispositivo ma rispetto uno zero assoluto. L'impiego poi di più coppie trasmettitore-ricevitore o l'uso di un solo trasmettitore e più ricevitori permetterebbe poi di eliminare l'incertezza della posizione del target. La capacità che ogni coppia Tx-Rx ha di tracciare un'ellisse dà la possibilità, con un minimo di tre coppie, di localizzare un target nello spazio. Il problema da affrontare, come già detto, sta nella sincronizzazione dei due dispositivi. Oltre a questo sono sicuramente presenti problemi di filtraggio.

In ambito di identificazione, in linea teorica, è possibile l'impiego del sistema PulsON 220. Il modulo SAM permette di visualizzare le forme d'onda inviate e ricevute. Una caratteristica dei segnali UWB è che il segnale di eco presenta una forma d'onda diversa dal segnale inviato. La diversità è causata dalla riflessione che il segnale subisce. È possibile, come visto in alcune applicazioni riportata nel Capitolo 2, andare a creare un database con le forme d'onda riflesse da particolari target con cui si vuole lavorare. Le forme d'onda possono essere acquisite tramite PulsON. Confrontando la forma d'onda incognita acquisita con quelle presenti nel database è possibile non solo localizzare il target ma individuare cos'è (sempre se è presente nel database creato). Anche in questo caso, l'impiego del modulo SAM, si limiterebbe alla sola acquisizione delle forme d'onda dal campo. Filtraggio, adattamento, elaborazione, confronto sarebbero completamente a carico del software impiegato per gestire i segnali acquisiti.

5.6.1 Sincronizzazione dei segnali

I possibili sviluppi dell'utilizzo del dispositivo PulsON prima descritti richiedono l'implementazione di opportuni programmi (ad esempio in codice MatLab) per l'elaborazione dei dati acquisiti. La sincronizzazione tra trasmettitore e ricevitore risulta essere fondamentale per l'implementazione di questi algoritmi. L'acquisizione tramite PulsON pone importanti limiti alla possibilità di determinare il tempo di arrivo, in quanto vi è mancanza di sincronizzazione dei dispositivi e risulta quindi assente un istante di riferimento.

Nelle interfacce grafiche delle applicazioni software testate (BSR e SAM) non sono presenti opzioni di setup per quanto riguarda la sincronizzazione. Si può supporre che il processo di sincronizzazione sia eseguito da una routine all'avvio dei dispositivi dal kernel dell'applicazione senza possibilità di interventi esterni.

L'andamento di Fig. 5.30 ottenuto tramite elaborazione e visualizzazione dei dati mediante MatLab presenta un asse delle ascisse costruito in base al periodo di campionamento. Le differenze temporali relative (ad esempio tra i due picchi più alti) sono corrette ma manca un riferimento assoluto. Questo problema limita fortemente i campi di impiego del dispositivo o quanto meno richiede dei programmi di elaborazione dei dati più complessi dovendo anche affrontare il problema di sincronizzazione. I programmi devono infatti essere in grado di determinare un riferimento in modo autonomo. Le possibili scelte su che riferimento prendere sono molteplici.

Una possibile proposta di soluzione al problema di sincronizzazione è rappresentata dal prendere come riferimento l'inizio del segnale. Nota la distanza tra trasmettitore e ricevitore e preso come riferimento l'istante di ricezione del primo campione è possibile in linea teorica rappresentare il segnale in una scala temporale assoluta. La scala temporale verrebbe creata meno i tempi richiesti e derivanti dall'elaborazione del PulsON. Un'altra possibile soluzione è scegliere come segnale di riferimento il segnale che presenta l'ampiezza maggiore e che quindi si suppone non derivare da un cammino multiplo (il primo ad arrivare in ordine di tempo). Una tale scelta può essere corretta ma solamente in un ambiente Line Of Sight (LOS) in quanto in una situazione NLOS l'ampiezza tra i segnali diretti e riflessi sono molto più simili e quindi non c'è certezza nell'affermare che il picco più grande rappresenti il segnale diretto. La conoscenza a priori di essere in un ambiente LOS o NLOS può essere vera in un ambiente di test e analisi sperimentale ma non certo in un'applicazione pratica.

Conclusioni

I sistemi radar offrono la possibilità di rilevare, localizzare e identificare target e, come visto dalle applicazioni riportate, natura del target e dell'ambiente di osservazione possono essere molto diverse. I metodi mediante i quali un sistema radar localizza un target sono suddivisi in tre categorie: metodi basati sul parametro tempo (Time based Methods), metodi basati sulla direzione di arrivo (Direction of Arrival Methods) e metodi basati sull'ampiezza del segnale ricevuto (Signal Strength Methods). I primi, per l'operazione di localizzazione, basano il proprio funzionamento sulla misura della differenza temporale che intercorre tra il segnale trasmesso e il segnale ricevuto; i secondi localizzano il target determinando la direzione da cui il segnale arriva al ricevitore; i terzi basano l'operazione di localizzazione sulla differenza tra le ampiezze del segnale trasmesso e l'eco di ritorno. Ciascun metodo permette di tracciare un luogo dei punti che rappresenta tutte le possibili posizioni del target. Il luogo tracciato dipende dal tipo di radar e dal metodo impiegato nella localizzazione. Per determinare univocamente la posizione del target i sistemi radar utilizzano lo stesso metodo "più volte" o, come più spesso riscontrato in letteratura, metodi di localizzazione differenti impiegati unitamente. L'intersezione dei luoghi generati rappresenta la posizione del target osservato. Dalla ricerca bibliografica svolta i Signal Strength Methods, fondamentali nella fase di rilevamento, non costituiscono praticamente mai il metodo di localizzazione principale. Vengono solamente utilizzati per migliorare la localizzazione con gli altri due metodi visti.

I radar permettono, oltre alla localizzazione, anche l'identificazione del target. L'identificazione si basa sulla dipendenza dello RCS da parametri quali la frequenza del segnale irradiato dal radar e le sue caratteristiche polarimetriche. L'RCS dipende anche dalla posizione relativa tra il target ed il sistema radar che lo illumina. Nel caso di identificazione di target umani, l'impiego degli spettrogrammi basati sull'effetto Doppler, rappresentano il metodo migliore e più utilizzato. Nel processo di identificazione la necessità di avere a disposizione un database con cui confrontare le misure ottenute è una necessità comune a tutti i metodi descritti e applicazioni riportate.

Tecnologie nate, sviluppate e utilizzate in applicazioni di telecomunicazione stanno interessando gli ambienti radar. I sistemi MIMO ed i segnali UWB sono le due tecnologie studiate in questo lavoro. I sistemi MIMO, ormai largamente usati in applicazioni di comunicazione, offrono interessanti vantaggi che possono risultare utili in sistemi radar. Non è ancora possibile parlare di una larga diffusione di sistemi radar MIMO; il numero sempre crescente di documenti presenti in letteratura come, articoli, riviste, libri, ecc. fanno supporre che i sistemi radar MIMO possano rappresentare una possibile evoluzione dei radar tradizionali. La certezza di avere in futuro un'ampia presenza di sistemi radar MIMO non si può ad oggi confermare. I vantaggi che questa tecnologia comportano sono però sufficienti a giustificare un lavoro di studio e ricerca maggiormente dettagliato.

La tecnologia UWB, come i sistemi MIMO, nasce in ambito delle telecomunicazioni. Anche essa, causa caratteristiche uniche, ha interessato il mondo radar. A differenza dei sistemi MIMO, i radar UWB sono ad oggi già presenti. Pubblicazioni scientifiche ma soprattutto

applicazioni commerciali di radar operanti con segnali UWB testimoniano come questa tecnologia sia oggi già largamente impiegata soprattutto in applicazioni vicine alla vita di “tutti i giorni”. La sperimentazione con il sistema radar UWB ha permesso di verificare molti dei vantaggi che la tecnologia UWB comporta quali l’alta risoluzione spaziale e la capacità dei sistemi UWB di coesistere con sistemi radio preesistenti. Il sistema in questione, il PulsOn 220, mette a disposizione diversi software che permettono l’impiego del dispositivo per applicazioni tra loro molto diverse. Nella scelta del suo impiego per eventuali future ricerche e sperimentazioni per applicazioni di tipo radar bisogna tenere in considerazione l’impossibilità di un monitoraggio continuo dell’ambiente e soprattutto i limiti riscontrati in fase di sincronizzazione tra trasmettitore e ricevitore.

Bibliografia

- [1] M. I. Skolnik, *RADAR HANDBOOK*, terza ed., McGraw-Hill, Ed., 2008.
- [2] G. Galati, F. Mazzenga, and M. Naldi, *Elementi di Sistemi Radar*, ARACNE, Ed., 1996.
- [3] V. C. Chen, F. Li, S.-S. Ho, and H. Wechsler, “Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Jan. 2006.
- [4] F. Vincent and O. Besson, “Estimating Time-Varying DOA and Doppler Shift in Radar Array Processing,” *Ieee proceedings-Radar, Sonar Navig.*, pp. 194–292, Jul. 2000.
- [5] A. Lin and H. Ling, “Doppler Direction of Arrival (ddoa) Radar for Multiple Mover Sensing,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Mar. 2007.
- [6] F. Ahmad and M. G. Amin, “Noncoherent Approach to Through-the-Wall Radar Localization,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 4, Oct. 2006.
- [7] E. Paolini, A. Giorgetti, M. Chiani, R. Minutolo, and M. Montanari, “Localization Capability of Cooperative Anti-Intruder Radar Systems,” *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Mar. 2008.
- [8] K. R. Czuchelewski and J. K. Weissel, “Synthetic Aperture Radar (SAR)-based mapping of wildfire burn severity and recovery,” *IEEE*.
- [9] B. Zhang, S. Primak, J. LoVetri, and S. Kashyap, “Joint Physical Optics and FDTD Analysis of Microwave Scattering,” *IEEE*.
- [10] P. A.A. and Y. F.J., “Identification of the Meteorological Objects on Doppler-Polarimetric Radar Data by Using Fuzzy Logical Based Algorithm,” *IEEE*.
- [11] A. Yarovoy, L. Lightart, J. Matuzas, and B. Levitas, “UWB Radar for Human Being Detection,” *IEEE AES MAGAZINE*, May 2008.
- [12] R. H. Price, H. T. Davis, and S. A. Dunn, “Radar System and Method for Detecting and Discriminating Targets from a Safe Distance,” *United States Patent*, Jan. 1997.
- [13] K. Soshi and T. Nakane, “Animal Body Detecting System Utilizing Electromagnetics Waves,” *United States Patent*, May 1998.
- [14] M. S. Andric, B. P. Bondzulich, and B. M. Zrnica, “Feature Extraction Related to Target Classification for a Radar Doppler Echos,” *18th Telecommunications forum TELFOR 2010*, Nov. 2010.

- [15] I. Immoreev and J. D. Taylor, "Ultrawideband Radar Special Features and Terminology," *IEEE AES Systems Magazine*, May 2005.
- [16] I. Immoreev and J. Taylor, "Future of Radars," *IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*.
- [17] I. Immoreev, "About uwb," *IEEE AES Systems Magazine*, Nov. 2003.
- [18] E. Biglieri, R. Calderbank, A. constantinides, A. Goldsmith, A. Paulrai, and H. V. Poor, *MIMO Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2007.
- [19] J. Li and P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing*, Wiley, Ed., 2009.
- [20] G. Falciasecca, C. Carciofi, V. D. Esposito, and F. Fuschini, "Tecniche Elettromagnetiche per la Localizzazione ed il Controllo Ambientale LS," *Appunti di Lezione*.
- [21] A. M. Guarnieri, *Radar systems e localization*.
- [22] M. I. Skolnik, "An Analysis of Bistatic Radar," *IRE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, Mar.
- [23] E. Brookner, R. J. Doviak, R. T. Hill, E. f. Knott, and D. G. Loughton, *ASPECT OF MODERN RADAR*, E. Brookner, Ed., 1988.
- [24] S. Haykin, "Radar array processing for angle of arrival estimation," *Nasa*, pp. 194–292.
- [25] A. Spizzichino, J. Delcourt, A. Giraud, and I. Revah, "A New Type of Continuous Wave Radar for the Observation of Meteor Trails," *Ieee Proceedings*, vol. 53, pp. 1084–1086, May 1965.
- [26] W. D. White, "Low-Angle Radar Tracking in the Presence of Multipath," *Ieee Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 6, pp. 194–292, Nov. 1974.
- [27] J. Reilly, J. Litva, and P. Bauman, "New Angle-off-Arrival."
- [28] A. Lin and H. Lin, "Through Wall Measurements of a Doppler and Direction of Arrival (DDOA) Radar for Tracking Indoor Movers," *IEEE*.
- [29] A. Li and H. Ling, "Human tracking using two element antenna array," *SPIE*.
- [30] N. J. Willis, *Bistatic Radar*. Scitec.
- [31] D. E. Manolakis and C. C. Lefas, "Aircraft geometric height computation using secondary surveillance radar range differences," *IEEE Processing*, Mar. 1994.
- [32] D. L. Sharpin, J. B. Y. Tsui, and R. L. Shaw, "Angle-of-arrival measurement via spectral estimation of radar time-of-arrival periodicities," *United States Patent*.

- [33] S. Zaugga, G. Saporta, E. van Loon, H. Schmaljohann, and F. Liechti, "Automatic identification of bird targets with radar via patterns produced by wing flapping," *Journal of the royal society*.
- [34] C. Zhenping, Z. Zhaowen, and G. Guirong, "Correlation methods for aircraft identification from fully polarized radar range profiles," *IEEE*.
- [35] K. Rosenbach and J. Schiller, "Identification of Aircraft on the Basis of 2-d Radar Images," *IEEE*.
- [36] R. B. Cosgrove, P. Milanfar, and J. Kositsky, "Trained Detection of Buried Mines in SAR Images via the deflection-optimal criterion," *IEEE*.
- [37] "Oil Spill Identification Based on Textural Information of SAR Image," *IEEE*.
- [38] R. Colburn, "Synthetic aperture radar," *IEEE History center*.
- [39] C. Tintin-Schnaider and P. Brouard, "Full-Polarimetric Analysis of MERIC Air Targets Data," *NATO*.
- [40] S. Guillaso, L. Ferro-Famil, A. Reigber, and E. Pottier, "Building Characterization Using L-Band Polarimetric Interferometric SAR Data," *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, vol. 2, no. 3, 2005.
- [41] E. S. Li, "Millimeter-wave Polarimetric Radar System As an Advanced Vehicle Control and Warning Sensor," *National Penghu University*.
- [42] M. Vahidpour and K. Sarabandi, "Millimeter Wave RCS and Doppler Spectrum of Walking Human and Dog," *IEEE*.
- [43] D. Tahmoush and J. Silvius, "Radar Polarimetry for Secutity Applications," *EuMa*, Oct. 2010.
- [44] A. A. Ksienski, Y.-T. Lin, and L. J. White, "Low-Frequency Approach to Target Identification," *Proceedings of the IEEE*, vol. 63, no. 12, Dec. 1975.
- [45] J. D. Young, "Radar Imaging from Ramp Response Signatures," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. 63, no. 12, May 1976.
- [46] "Development of two-dimensional parametric radar signal modeling and estimation techniques with application to target identification," *NASA*, 1992.
- [47] S. Z. Gürbüz, W. L. Melvin, and D. B. Williams, "Detection and Identification of Human Targets in Radar Data," *Proc. of SPIE*.
- [48] S. S. Ram and H. Ling, "Simulation of Human MicroDopplers Using Computer Animation Data," *IEEE*.
- [49] D. Tahmoush, J. Silvius, and D. A. Wikner, "Compact Radar Surveillance for Aided Traget Recognition," *IEEE*.

- [50] M. Otero, "Application of a continuous wave radar for human gait recognition," *NASA*.
- [51] G. Greneker, "Very low cost stand-off suicide bomber detection system using human gait analysis to screen potential bomb carrying individuals," *Proc. of SPIE*.
- [52] L. Vignaud, A. Ghaleb, J. L. Kerneq, and J.-M. Nicolas, "Radar High resolution Range and Micro-Doppler Analysis of Human Motions," *IEEE*.
- [53] H. Arslan, Z. N. Chen, and M.-G. di Benedetto, *Ultra Wideband Wireless Communication*, Wiley, Ed.
- [54] I. Immorev, "Main Possibilities and Main Features of Ultra-Wideband (UWB) Radars," *IEEE*.
- [55] A. Cacciatori, L. Colalongo, and Z. M. K. Vajna, "On the Design of Ultra Wideband FCC Compliant Integrated Radars," *IEEE*.
- [56] J. D. Taylor, Ed., *Ultra-wideband Radar Technology*, 2000.
- [57] E. M. Staderini, "Radars in Medicine," *IEEE AESS Systems Magazine*, Jan. 2002.
- [58] I. Y. Immorev, "New Practical Application of Ultra Wideband Radars," *Proceedings of the 4th European Radar Conference*, Oct. 2007.
- [59] I. Immorev, "Practical Application of Ultra Wideband Radars," *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 2006.
- [60] G. Ossberger, T. Buchegger, E. Schimberk, A. Stelzer, and R. Weigel, "Non-Invasive Respiratory Movement Detection and Monitoring of Hidden Humans using Ultra Wideband Pulse Radar," *IEEE*.
- [61] "Ultra Wideband Short Range Radars for Automotive Applications," *Australia Communications and Media Authority*, Nov. 2005.
- [62] I. Gresham, A. Jenkins, M. Robert Egri, C. Eswarappa, N. Kinayman, M. Nitin Jain, R. Anderson, F. Kolak, R. Wohlert, S. P. Bawell, J. Bennett, and J.-P. Lanteri, "Ultra Wideband Radar Sensor For Short Range Vehicular Applications," *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. 52, no. 9, Sep. 2004.
- [63] "The Impact of Object Discrimination and Characterization (ODC) Applications using Ultra-Wideband (UWB) Technology on Radio Services," *Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT)*, Nov. 2005.
- [64] E. Greneker, "Radar flashlight for through-the-wall detection of humans," *Proceedings SPIE*.

-
- [65] H. Burchett, "Advances in Through Wall Radar for Search, Rescue and Security Applications," *The Institution of Engineering and Technology Conference*, pp. 511–525, Jun. 2006.
- [66] F. Ahmad and M. Amin, "Noncoherent approach to through-the-wall radar localization," *IEEE Trans. AES*, vol. 42, no. 4, pp. 1405–1419, Oct. 2006.
- [67] C.-P. Lai and R. M. Narayanan, "Through-wall imaging and characterization of human activity using ultra wideband (UWB) random noise radar," *Proceedings SPIE*.
- [68] J. Zhu and Y. Hong, "An Analysis of Through-Wall Radar Based on UWB Impulse Technique," *IEEE*.
- [69] W. Zheng, Z. Zhao, and Z. Nie, "Application of TRM in the UWB Through Wall Radar," *Progress In Electromagnetics Research, PIER*, pp. 279–296.
- [70] H. Burchett, "Advances in Through Wall Radar for Search, Rescue and Security Applications," *IET*.
- [71] A. Beeri and R. Daisy, "High-resolution through wall imaging," *Proc. SPIE*, vol. 6201.
- [72] T. Domain, "Pulson 220, documentazione tecnica."
- [73] M. Z. Win and R. A. Scholtz, "Impulse Radio: How It Works," *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, vol. 2, no. 2, Feb. 1998.
- [74] K. Takizawa, H.-B. Li, and R. Kohno, "Precise Leading Edge Detection using a Forward Error Correction Coding," *IEEE*.

