

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

-Sede di Forlì-

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe LM-20

TESI DI LAUREA

in

Tolleranza al danno di strutture aeronautiche LM

STUDIO DI FATTIBILITA' DI APPLICAZIONE DI RADAR
UWB PER CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

CANDIDATO

Simone Gubinelli

RELATORE

Prof. Ing. Enrico Troiani

CORRELATORE

Prof. Ing. Enrico Paolini

Anno accademico 2012/2013

Sessione II^a

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno permesso di sviluppare questo progetto e infine redigere questo lavoro di tesi. Il primo grande ringraziamento va al mio relatore Prof. Enrico Troiani grazie al quale ho prima di tutto conosciuto il mondo, per me nuovo, dell'analisi strutturale. In questo lungo percorso ho potuto saggiare a pieno le sue qualità professionali e umane, sostenendomi in ogni mia difficoltà. Straordinario il rapporto che abbiamo costruito oltre gli impegni professionali, divenendo un vero e proprio "amico". Sono in debito di ringraziare anche il Prof. Enrico Paolini del polo didattico di Cesena, instancabile compagno di viaggio durante ogni esperimento e difficoltà. Mentirei se dicessi che non ho stretto un ottimo rapporto umano, prima che professionale, anche con lui. Grazie sentitamente per la pazienza e la professionalità mostratemi durante tutto il lavoro. Un ringraziamento va anche a Leandro Camargo il cui contributo è stato fondamentale per capire e imparare la programmazione in C++. Infine, non posso non ringraziare colui che quel giorno di fine agosto, chiamandomi, mi presentò la possibilità di sviluppare questo interessante progetto. In ordine temporale è la prima persona che ha dato il via al mio lavoro; ringrazio dunque il mio amico Andrea Rizzo, l'ideatore. Senza di lui probabilmente non sarei qui a parlare di tutto questo.

Indice

Elenco delle figure	vi
Elenco delle tabelle	x
Nomenclatura	xi
Introduzione	1
Capitolo 1: I metodi di controllo non distruttivo	5
1.1 Generalità sulle principali tecniche di controllo non distruttivo.....	5
1.2 Metodi ottici.....	6
1.3 Liquidi penetranti.....	7
1.3.1 Tecniche di esame	8
1.3.2 Vantaggi e svantaggi del metodo	9
1.4 Metodi magnetici	10
1.4.1 Vantaggi e svantaggi del metodo	11
1.5 Radiografia.....	12
1.5.1 Tipologie di radiazione	14
1.5.2 Vantaggi e svantaggi	14
1.6 Ultrasuoni.....	15
1.6.1 Generalità sulle onde ultrasonore.....	17
1.6.2 Tecniche di esame	18
1.6.3 Rappresentazione dei risultati	19
1.6.4 Vantaggi e svantaggi	21
1.7 Termografia	22
1.7.1 Tecniche di esame	23
1.7.2 Vantaggi e svantaggi	25

1.8	Correnti indotte.....	26
1.9	Metodi acustici	26
1.10	Conclusioni.....	27
Capitolo 2: Radar convenzionali e tecnologia UWB.....		29
2.1	Parti base e generalità di un sistema radar	30
2.2	Radar UWB.....	34
2.2.1	Impulsi utilizzati	36
2.2.2	Vantaggi dei sistemi radar UWB	40
2.2.3	Differenze tra radar convenzionali e radar UWB	42
2.2.4	Normativa Europea	45
Capitolo 3: Strumenti a supporto del lavoro.....		51
3.1	Il radar UWB	51
3.2	Il movimentatore.....	55
3.2.1	Costruzione del movimentatore: parte meccanica	56
3.2.2	Costruzione del movimentatore: parte elettronica	59
Capitolo 4: Rilevamento di difetti: decisione tra lastra sana o danneggiata.....		63
4.1	Scenario nel quale sono state effettuate le misurazioni	63
4.2	Software utilizzato per l'acquisizione.....	66
4.3	Forme d'onda acquisite e creazione del database	67
4.3.1	Errori di campionamento	68
4.4	Modelli matematici utilizzati	72
4.4.1	Quadrato della differenza campione per campione	72
4.4.2	Differenza semplice campione per campione	73
4.4.3	Differenza tra i valori assoluti dei segnali	73
4.4.4	Correlazione tra i segnali	73

4.5 Risultati	74
4.5.1 Discontinuità in materiale composito in lastra 300x300 mm.....	75
4.5.2 Inclusione di materiale metallico in lastra 300x300 mm	79
4.5.3 Foro passante di diametro 6 mm in lastra 300x300 mm	83
4.5.4 Inclusione di materiale metallico in Nomex 100x150 mm	87
4.5.5 Conclusioni	91
Capitolo 5: Costruzione dell'immagine del difetto	93
5.1 Modalità di scansione della lastra	93
5.2 Forme d'onda acquisite	95
5.3 Risultati ottenuti	97
5.3.1 Difetto foro 30 mm di diametro	98
5.3.2 Difetto volume di metallo	100
5.3.3 Difetto due volumi di metallo posti a 20 mm di distanza	102
5.3.4 Difetto due volumi di metallo posti a 5 mm di distanza	103
5.3.5 Difetto discontinuità dello stesso materiale	104
5.4 Conclusioni	105
Conclusioni e sviluppi futuri	107
Bibliografia	113
Sitografia	116

Elenco delle figure

Figura 1: Difetto rilevato con liquido penetrante rosso.	8
Figura 2: Difetto rilevato con liquido penetrante fluorescente.....	9
Figura 3: Andamento delle linee di campo magnetico in corrispondenza di una cricca.	10
Figura 4: Esame condotto con l'utilizzo delle particelle ferromagnetiche.....	11
Figura 5: Principio di funzionamento della radiografia.	13
Figura 6: Tecnica della stereo radiografia.	13
Figura 7: Esame condotto con la tecnica radiografica.	15
Figura 8: Diverse tipologie di sonde.	16
Figura 9: Tecnica per riflessione.	19
Figura 10: Tecniche di visualizzazione A-scan (a), B-scan (b), C-scan (c).....	21
Figura 11: Apparato per controllo termografico: termo camera sulla destra e pc per rielaborazione dati.	25
Figura 12: Principio di funzionamento di un radar.	30
Figura 13: Schema base di un sistema radar.	30
Figura 14: Tipica forma d'onda per un radar.	31
Figura 15: A sinistra diagramma di radiazione <i>pencil beam</i> ; a destra diagramma di radiazione <i>fan beam</i>	32
Figura 16: Spettro di un tipico segnale UWB	35
Figura 17: Impulso UWB ottenuto attraverso la modulazione di una oscillazione per mezzo di un involuppo conforme ad una gaussiana.....	37
Figura 18: Nella figura di sinistra è presentato un impulso di tipo gaussiano; nella figura di destra si ha lo spettro di potenza.....	38
Figura 19: Nella figura di sinistra è presentato un monociclo gaussiano; nella figura di destra si ha la densità di potenza.	38
Figura 20: Prime cinque derivate dell'impulso Gaussiano.	39
Figura 21: Confronto della larghezza di banda tra segnali Narrowband, Wideband e Ultrawideband.	39
Figura 22: Le due tipologie di chip a tecnologia CMOS che possono essere montati nel radar	52
Figura 23: Modello radar NVA-R640, completo di antenne e scheda I/O. [35]	52
Figura 24: Impulso generato dal chip NVA-R6000.....	53
Figura 25: Antenna con dielettrico (sinistra) e senza dielettrico (destra). [36]	54
Figura 26: Fresatrice industriale.	55
Figura 27: Guida lineare con carrello a ricircolo di sfere. [37]	56

Figura 28: Guide lineari asse x.....	57
Figura 29: Particolari di montaggio del sistema di movimentazione dell'asse z sul sistema di movimentazione dell'asse x.....	58
Figura 30: Particolare del sistema di spostamento (in figura dell'asse x, ma il sistema è lo stesso anche per l'asse z).	59
Figura 31: Particolare di montaggio del motore x.....	59
Figura 32: Principio di funzionamento di un motore passo-passo bipolare. [34]	60
Figura 33: PIC18F4550 della Microchip. [22].....	61
Figura 34: Elettronica di comando. Da sinistra a destra, la prima scheda contiene il microcontrollore PIC18F4550 e porta USB. Da qui il comando passa alle due schede successive, una per il motore x e l'altra per il motore z. Ogni scheda contiene l'integrato L297 e 4 transistor di potenza. L'alimentazione di potenza è garantita dall'alimentatore composto da trasformatore toroidale e raddrizzatore, il tutto raffreddato con una ventola.	62
Figura 35: Tipologie di lastre utilizzate, senza difetti.	64
Figura 36: Nuova configurazione del radar utilizzata per le prove.	65
Figura 37: Posizionamento radar-lastra.	66
Figura 38: Tipica forma d'onda relativa ad una lastra 300x300 mm.	68
Figura 39: Differenza tra due segnali relativi alla stessa lastra sana e acquisiti in maniera continuativa.....	69
Figura 40: Segnale ricampionato in Matlab relativo alla lastra sana 300x300 mm.	70
Figura 41: Autocorrelazione del segnale ricampionato relativo alla lastra sana.....	71
Figura 42: Differenza fra i due segnali ricampionati.....	71
Figura 43: Lastra 300x300mm con difetto in carbonio.	75
Figura 44: Difetto in carbonio - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.	76
Figura 45: Difetto in carbonio - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza semplice.	77
Figura 46: Difetto in carbonio - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.	77
Figura 47: Difetto in carbonio - Il grafico mostra la percentuale di correlazione tra i segnali della lastra danneggiata e quella sana (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali della stessa lastra sana (in rosso).....	78
Figura 48: Lastra 300x300 mm con difetto in metallo.	79

Figura 49: Difetto in metallo – Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.	80
Figura 50: Difetto in metallo – Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso) con il metodo della differenza semplice.	81
Figura 51: Difetto in metallo - Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.	81
Figura 52: Difetto in metallo - Il grafico indica la percentuale di correlazione tra i segnali della lastra danneggiata e quella sana (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali della stessa lastra sana (in rosso).	82
Figura 53: Lastra 300x300 mm con foro passante.	83
Figura 54: Difetto foro - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.	84
Figura 55: Difetto foro - Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso) con il metodo della differenza semplice.	85
Figura 56: Difetto foro - Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.	85
Figura 57: Difetto foro - Il grafico indica la percentuale di correlazione tra i segnali della lastra danneggiata e quella sana (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali della stessa lastra sana (in rosso).	86
Figura 58: Lastra in Nomex con difetto in metallo.	87
Figura 59: Difetto metallo - Il grafico mostra le differenze di segnale tra Nomex danneggiato e Nomex sano (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sullo stesso Nomex sano (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.	88
Figura 60: Difetto metallo - Il grafico indica le differenze di segnale tra Nomex danneggiato e Nomex sano (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sullo stesso Nomex sano (in rosso) con il metodo della differenza semplice.	89
Figura 61: Difetto metallo - Il grafico indica le differenze di segnale Nomex danneggiato e Nomex sano (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sullo stesso Nomex sano (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.	89

Figura 62: Difetto metallo - Il grafico indica la percentuale di correlazione tra i segnali del Nomex danneggiato e sano (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali dello stesso Nomex sano (in rosso).....	90
Figura 63: Modalità di scansione della parte di lastra interessata dal difetto.	94
Figura 64: Confronto fra forme d'onda relative alla zona senza difetto e alla zona in presenza del difetto. A sinistra è presentato lo zoom che mette in evidenza la differenza di intensità del "terzo picco".....	97
Figura 65: Risultato della scansione con difetto costituito da un foro passante di diametro 30 mm. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista "in pianta". Il foro è circoscritto nel cerchio bianco.	98
Figura 66: Risultato della correlazione dei segnali relativi alla lastra con il foro e al template della lastra sana. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista "in pianta".	100
Figura 67: Risultato della scansione con difetto costituito da un volumetto di metallo. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista "in pianta".....	101
Figura 68: Risultato della scansione con difetto costituito da due volumetti di metallo posti a 20 mm di distanza tra di loro. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista "in pianta".	102
Figura 69: Risultato della scansione con difetto costituito da due volumetti di metallo posti a 5 mm di distanza tra di loro. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista "in pianta".	103
Figura 70: Risultato della scansione con difetto costituito da cubetto di materiale composito 6x6 mm. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista "in pianta".	105
Figura 71: Array di antenne per un sistema phased-array. [28].....	109
Figura 72: Principio di trasmissione di un sistema phased-array; a sinistra viene emesso un fronte d'onda piano normale al piano trasmissivo; a destra un opportuno sfasamento tra le varie antenne consente di trasmettere il fronte d'onda inclinato rispetto al piano trasmissivo. [28]	110

Elenco delle tabelle

Tabella I: Confronto fra le principali tecniche di controllo non distruttivo.	28
Tabella II: Densità di EIRP massime consentite secondo la normativa europea.	47
Tabella III: Densità di EIRP massime consentite per sistemi BMA.	48
Tabella IV: Efficacia dell'interferenza elettromagnetica a 1-2 GHz in matrice di polietersulfone (PES) con varie tipologie di fibre, con spessore di 2,8 mm.	111

Nomenclatura

N.D.E.	NonDestructive Evaluation
N.D.T./C.N.D.	NonDestructive Testing / Controllo Non Distruttivo
N.D.I.	NonDestructive Inspection
A.S.N.T.	American Society for Nondestructive Testing
F.P.A.	Focal Plain Array
T.I.T.	Thermal Imaging Technique
P.P.T.	Pulse Phase Thermography
U.W.B.	Ultra Wide-Band
S.A.R.	Synthetic Aperture Radar
F.C.C.	Federal Communications Commission
R.C.S.	Radar Cross Section
P.R.F.	Pulse Repetition Frequency
P.S.D.	Power Spectral Density
E.I.R.P.	Equivalent Isotropic Radiated Power
R.M.S.	Root Mean Square
B.M.A.	Building Materials Analysis
C.E.P.T.	European Conference of Postal and Telecommunications
C.M.O.S.	Complementary Metal Oxide Semiconductor
F.I.R.	Finite Impulse Response

Introduzione

NonDestructive Evaluation (NDE), NonDestructive Testing (NDT) e NonDestructive Inspection (NDI) sono le tre denominazioni con cui generalmente vengono indicate le tecniche di controllo non distruttivo. Le tre denominazioni a rigore presentano delle sottili differenze ma nell'uso comune vengono tutte usate come sinonimi, infatti secondo la ASNT:

“Nondestructive testing (NDT) is the process of inspecting, testing, or evaluating materials, components or assemblies for discontinuities, or differences in characteristics without destroying the serviceability of the part or system. In other words, when the inspection or test is completed the part can still be used.”

La teoria e i quindi i principi base dei controlli non distruttivi nascono agli inizi del XX secolo ma cominciano ad assumere un ruolo fondamentale solo negli ultimi decenni grazie soprattutto allo sviluppo di nuovi settori di applicazione.

Uno dei settori in cui gli CND assurgono come pilastri è l'industria aerospaziale. Con il passare degli anni si è assistiti ad un graduale sviluppo delle filosofie di progetto, partendo dalla Safe-Life (vita finita), passando per la Fail-Safe (progettazione sicura rispetto al danno) fino ad arrivare alla moderna Damage Tolerance¹ (progettazione con accettazione del danno). Tutte e tre le metodologie non presuppongono più la durata infinita del componente o della struttura e quindi la previsione della loro vita operativa come il controllo dell'integrità strutturale assume una rilevanza fondamentale. In tal senso la metodologia di progetto Damage Tolerance è quella che richiede di più dai metodi CND. Questa in effetti prevede ispezioni con intervalli calcolati sulla base dell'evoluzione del danno (Crack Growth) e della Residual Strength. I

¹ Damage Tolerance: esprime l'abilità di un materiale, componente o struttura, di essere performante rispetto alle condizioni operative di progetto anche in presenza di uno stato di danno o di difettosità.

programmi ispettivi in campo aeronautico vengono classificati in tre diversi livelli:

- GVI (General Visual Inspection). Si tratta di un esame visivo per evidenziare condizioni non soddisfacenti della struttura.
- DET (Detailed Visual Inspection). Si tratta di un esame visivo più accurato per evidenziare eventuali difettosità.
- SDET (Special Detailed Inspection). Si tratta di un esame intensivo come quello richiesto dal DET ma utilizzando i CND.

Il Damage Tolerance è quindi una metodologia di progetto che permette un utilizzo intelligente del materiale in quanto permette di sfruttare coefficienti di sicurezza più bassi ma allo stesso tempo determina una maggiore sicurezza della struttura. Tutto questo ovviamente è proporzionale alla accuratezza delle ispezioni. Nel medesimo contesto, la ricerca scientifica si sta orientando verso nuove metodologie di monitoraggio. Un esempio è quello di sfruttare l'integrazione dei sistemi di controllo non distruttivo con la struttura stessa (Structural Health Monitoring), in grado di dare dei risultati in tempo reale sul suo stato di salute. Questa tecnica sfrutta informazioni provenienti da sensori (estensimetri, accelerometri) sparsi su tutta la struttura e soprattutto nei punti più sollecitati della stessa e si avvale di una catena di operazioni che include inoltre sistemi di acquisizione, rielaborazione e (più delicata) interpretazione di dati. Il sistema può essere applicato con le stesse accortezze sia in campo aeronautico, sia in campo civile; un esempio è lo Wind and Structural Health Monitoring System (WASHMS) sviluppato per il monitoraggio della struttura del ponte di Hong Kong.

In campo industriale l'evolversi dei CND ha permesso di effettuare indagini sempre più raffinate sui prodotti finiti e di adottare margini di sicurezza meno gravosi, incrementando le funzionalità ed abbassando i costi di produzione. Visto il marcato sviluppo e l'automazione di diverse tecniche di controllo, è già realtà la possibilità di effettuare una analisi automatica del prodotto direttamente a fine produzione, dando quindi già un primo feedback sul suo stato di salute. Il limite principale di questo tipo di controlli è legato alla loro

elevata selettività nei confronti dei materiali su cui devono essere effettuate le indagini ed al tipo di difetto riscontrabile. Questo richiede spesso l'uso di più controlli combinati sullo stesso prodotto finito, con conseguente aggravio economico. Inoltre, si deve tenere conto che, per particolari tecniche di indagine, è richiesta una grande esperienza da parte del personale addetto al controllo, poiché i risultati ottenuti sono difficilmente interpretabili, rendendo così più complessa la certificazione di alcuni manufatti.

Quindi, se da un lato è possibile contare su metodologie di controllo automatizzate e meno invasive, dall'altro permangono problemi legati prima di tutto alla scelta della particolare tecnologia che meglio si adatta al materiale dell'oggetto da visionare e al difetto da ricercare. Il fatto che “non esiste un metodo di controllo che vada bene per ogni situazione” è un dato certo, però è possibile lavorare su un metodo che risulti più “generale” degli altri. L'idea è quella di sfruttare la capacità penetrante di onde elettromagnetiche generate da apparati radar, in particolare radar UWB. Questa tecnologia sfrutta una larghezza di banda più ampia dei classici radar e ciò si ripercuote in maniera positiva sul contenuto informativo del segnale ricevuto come eco, proporzionale proprio alla larghezza di banda del segnale trasmesso. L'incremento nel contenuto informativo dei sistemi radar che impiegano segnali UWB è ottenuto riducendo la durata dell'impulso il che significa anche un aumento della risoluzione spaziale; pertanto i radar UWB permettono non solo l'individuazione di un difetto, anche di piccole dimensioni, ma anche di ricostruirlo sottoforma di immagine 3D. A tutto questo si accompagna una bassa potenza del segnale trasmesso e una apparecchiatura di piccole dimensioni che la rende adatta al trasporto e alla movimentazione automatica, magari a fine linea di produzione oltre che nell'ispezione di una parte di un velivolo o di qualsiasi altra struttura.

Scopo del presente lavoro è quello di studiare la fattibilità di un metodo di analisi di questo tipo, cercando di superare i problemi riguardanti soprattutto la grande risoluzione spaziale richiesta per l'individuazione e la formazione di immagini di difetti superficiali e sub-superficiali. In prima analisi si cercherà di

determinare un algoritmo e un metodo automatizzato che permetterebbe di controllare in tempo reale semplici manufatti a fine linea di produzione, come ad esempio lastre in materiale composito di diverse dimensioni. Il potenziale di questa tecnica sta nel fatto che al passaggio della lastra con difetto, quest'ultimo viene individuato dal radar opportunamente posizionato sopra la linea di produzione facendo scattare una specie di allarme o un percorso alternativo per la lastra in questione, separandola dalle altre che risultano invece sane². Tutto questo è possibile grazie al fatto che non vi è necessità di contatto tra radar e manufatto (caratteristica imprescindibile di altre metodologie di controllo come ad esempio gli ultrasuoni) ne tantomeno si sta parlando di una tecnica invasiva (come ad esempio i liquidi penetranti). Sempre in ambito industriale, la tecnica può essere utilizzata per la creazione di immagini di difetti superficiali e sub-superficiali, avendo così a disposizione una precisa informazione grafica sulla posizione, sulla tipologia e sulla grandezza del difetto riscontrato. Ci si occuperà di questo nella seconda parte del presente lavoro dove si è messo a punto un sistema di movimentazione automatico per la scansione di lastre di materiale composito di diverse dimensioni sulle quali sono stati opportunamente creati difetti di diversa natura. La tecnica mediante radar UWB usata per questo scopo è difficilmente adattabile al controllo in tempo reale a fine linea di produzione (il tempo necessario per la scansione rallenterebbe tutta la linea produttiva) ma risulterebbe efficace tutte quelle volte si debba ispezionare un manufatto, con a volte la possibilità di poterlo fare in loco senza smontarlo dalla struttura di appartenenza.

² Per “sano” si intende un manufatto che risulta essere conforme agli standard qualitativi richiesti per la particolare applicazione dello stesso. Nel seguito si continuerà ad usare l'aggettivo “sano” per indicare che il manufatto risulta essere conforme agli standard richiesti.

Capitolo 1

I metodi di controllo non distruttivo

1.1 Generalità sulle principali tecniche di controllo non distruttivo

Esistono differenti tipologie di controllo non distruttivo, ognuna delle quali differisce per i principi fisici su cui si basa e per la capacità di “individuazione” del difetto. Per quanto riguarda il principio fisico di base, una prima classificazione riguarda prove non distruttive che possono dividersi in attive o passive. Le prime riguardano tutte le tecniche che prevedono l’uso di una qualche forma di energia da immettere nel provino; in presenza di un difetto ci si aspetta un cambiamento macroscopico e rivelabile dell’energia immessa. Fanno parte di questa categoria i metodi magnetici, correnti parassite, ultrasuoni, radiografia e termografia attiva. Le tecniche passive invece non introducono nulla nel provino e si limitano solo alla sua osservazione, o durante l’azione di un carico ciclico oppure attraverso l’uso di speciali liquidi con cui se ne ricopre la superficie per evidenziare il difetto. Fanno parte di questa categoria ovviamente i metodi visivi, i liquidi penetranti, la termografia passiva.

Per quanto riguarda invece la capacità di individuazione del difetto, si assistono a tecniche superficiali, sottosuperficiali e volumetriche. Queste tre distinzioni si basano sulla capacità di penetrazione del provino e quindi sulla capacità di determinare il difetto ad una data profondità. I metodi visivi e i liquidi penetranti fanno parte delle tecniche superficiali in quanto sono in grado di “vedere” solo difetti affioranti in superficie. Altre tecniche, come le correnti

parassite e i metodi magnetici, possono essere considerate superficiali o appena sub-superficiali, in quanto sono in grado di spingersi appena sotto la superficie del provino. Ulteriori sviluppi su nuove tecniche, come la termografia, sta permettendo una maggiore penetrazione ma rimane sempre una netta differenza con i cosiddetti metodi volumetrici ossia quelli che permettono l'individuazione di difetti ad una certa profondità. Fanno parte di questo gruppo gli ultrasuoni, le emissioni acustiche e la radiografia.

E' bene precisare che non esiste un metodo che valga per tutte le tipologie di difetto e per tutti i materiali ma ognuno ha un suo pro e un suo contro e ogni volta in base al provino da esaminare va fatta la scelta sul metodo migliore per quella determinata situazione. Ci sono in effetti tanti fattori che determinano la scelta dell'operatore, come il tipo di materiale (considerando che ognuno presenta diverse caratteristiche come conduttività elettrica e termica, differenti proprietà fisiche e meccaniche), la dimensione del provino e soprattutto la sua forma. La scelta va ponderata anche in base al tipo di difetto da ricercare; un difetto più piccolo in generale prevede un metodo più sofisticato. In conclusione, anche il fattore umano risulta essere determinante per una corretta analisi. Nel seguito si passano in rassegna i principali metodi di controllo non distruttivo mettendone in evidenza le proprietà, campi di applicazione, pregi e difetti.

1.2 Metodi ottici

I metodi ottici fanno parte della categoria delle tecniche superficiali e la più semplice è senza dubbio l'ispezione visiva o a occhio nudo o con una lente. Si ricorda che l'occhio umano riesce a rilevare difetti di 1,5 – 2 mm di lunghezza mentre con una lente si può arrivare fino a 0,5 mm.

Esistono anche altre tecniche basate sull'utilizzo di nuove sorgenti di luce e rilevatori ottici. Tra questi strumenti si può citare il *profile projector* che usa un

fascio di luce collimato, con un sistema ottico che riflette sullo schermo l'immagine del profilo dell'oggetto osservato. La risoluzione può arrivare fino a 2,5 μm . Un altro sistema è la *scansione laser* in cui un raggio di luce concentrata viene fatto passare sulla superficie da analizzare; ogni difetto si mostra come cambiamento dell'intensità della luce riflessa. Altri metodi usano le cosiddette frange di interferenza come la *shadow moiré*, utile per studiare le deformazioni del provino sotto l'azione di carichi. Infine si segnalano le *tecniche olografiche* che sfruttano le proprietà di riflessione ottica del materiale analizzato; questa tecnologia è limitata all'applicazione solo su materiali riflettenti e quindi poco adatta per i composti in fibra di carbonio ma può essere tranquillamente utilizzata in campo metallurgico.

1.3 Liquidi penetranti

L'utilizzo di liquidi penetranti permette l'individuazione solo di difetti affioranti in superficie dove possono penetrare per capillarità particolari tipologie di liquidi o inchiostri. Il potere penetrante del liquido è una caratteristica molto importante dalla quale dipende in larga parte la sensibilità dell'esame. Successivamente, il liquido penetrato viene richiamato in superficie mediante apposite polveri, risultando in questo modo visibile lasciando traccia dell'estensione e della forma del difetto. Possono essere rilevati difetti in fusioni come giunzioni fredde, cricche da ritiro, etc., in saldatura come porosità, cricche a caldo, cricche a freddo etc., di fabbricazione come cricche di tempra, filature, sdoppiature di laminazione, etc., e di servizio come cricche di fatica, di tensocorrosione. Il metodo non è vincolato al tipo di materiale od alla sua struttura; il materiale tuttavia non deve essere poroso come certi materiali ceramici. Altra considerazione necessaria per l'applicazione del metodo è una superficie completamente sgombra di polvere, grassi o olio in generale; in caso contrario è da prevedere una operazione di sgrassaggio.

1.3.1 Tecniche di esame

Il liquido penetrante può essere applicato sulla parte da esaminare mediante nebulizzazione, pennello, umettazione o immersione. La superficie in esame deve rimanere bagnata per tutto il tempo in esame. Le tecniche di esame sono essenzialmente due: utilizzo di liquido penetrante rosso oppure liquido penetrante fluorescente.

- **Tecnica con liquido penetrante rosso:**

Viene usata generalmente per controllare pezzi ingombranti con superfici non perfettamente lisce. Dopo aver provveduto allo sgrassaggio del pezzo, questo viene cosparso di liquido penetrante che per capillarità penetra nelle cricche affioranti in superficie. Dopo un tempo fra i 5-10 minuti il pezzo viene lavato con acqua o con solvente e fatto asciugare. Si deposita quindi la polvere rivelatrice che mette in evidenza il liquido, lasciando un arrossamento ove sia penetrato.

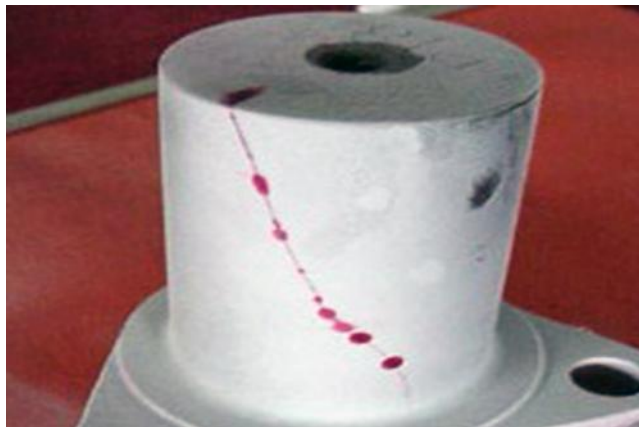


Figura 1: Difetto rilevato con liquido penetrante rosso.

- **Tecnica con liquido penetrante fluorescente**

Viene usata per individuare difetti di piccole dimensioni con superfici sufficientemente lisce. Una volta sgrassato il pezzo, questo viene cosparso di liquido penetrante che incorpora all'interno una sostanza fluorescente. Dopo aver lasciato il tempo necessario per la penetrazione, il pezzo viene

lavato con acqua o con solventi e poi asciugato. Si deposita quindi la polvere rivelatrice che risulta leggerissima e impalpabile, la quale non aderisce al pezzo ma si deposita solo in corrispondenza del difetto ove è penetrato il liquido. L'ispezione prosegue mediante l'esposizione a luce ultravioletta in camera oscura.

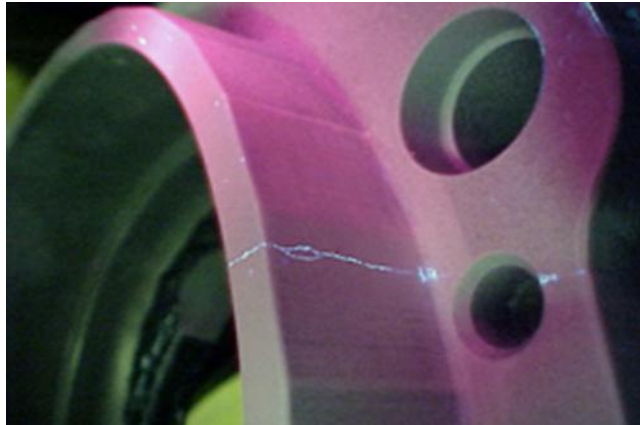


Figura 2: Difetto rilevato con liquido penetrante fluorescente.

1.3.2 Vantaggi e svantaggi del metodo

- Il metodo risulta essere economico e di facile impiego;
- Può essere applicato alla maggior parte dei materiali;
- Non è richiesta una particolare esperienza e formazione degli operatori in quanto il risultato è abbastanza oggettivo;
- Può essere usato solo per difetti affioranti in superficie;
- Non si possono rilevare difetti troppo grossi che quindi sono accessibili anche dall'acqua che quindi lava via il liquido;
- Non si possono rilevare difetti troppo piccoli dove il liquido non riesce a penetrare;
- Non è utilizzabile con materiali altamente porosi o con elevata rugosità superficiale.

1.4 Metodi magnetici

Il metodo sfrutta l'andamento delle linee di forza del campo magnetico che in corrispondenza di cricche o difetti in genere presentano delle irregolarità. Cospargendo il pezzo da esaminare con polveri magnetiche, i flussi del campo magnetico che si disperdono esternamente al pezzo per via di difetti interni (si veda la figura 3), attirano le particelle magnetiche evidenziando il difetto stesso. Questo metodo è chiaramente applicabile solo a materiali ferromagnetici e permette di individuare difetti anche sub-superficiali.

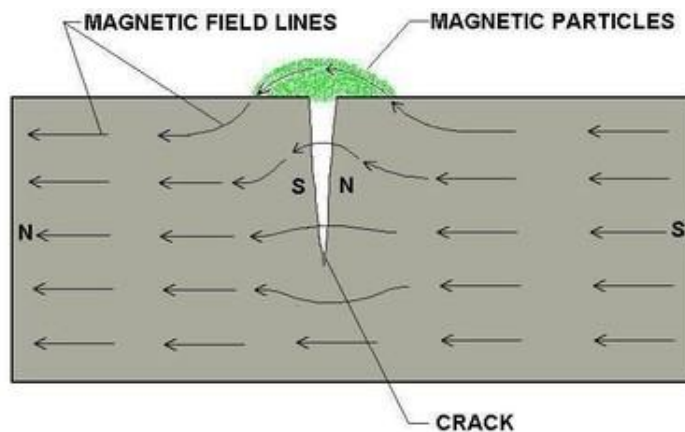


Figura 3: Andamento delle linee di campo magnetico in corrispondenza di una cricca.

E' chiaro che occorre preliminarmente magnetizzare il pezzo da esaminare; per fare questo possono essere usati magneti permanenti oppure elettromagneti o come spesso accade, si ricorre alla corrente continua o alternata. I campi generati dalla corrente continua penetrano molto più rispetto a quelli generati dalla corrente alternata che rimangono confinati sulla superficie del materiale. La corrente alternata ha il vantaggio di facilitare la disposizione delle particelle magnetiche ma di contro permette di individuare difetti solamente fino a 2-3 mm di profondità. L'utilizzo di corrente pulsante permette invece di disporre di tutti i vantaggi derivanti dalla corrente continua e da quella alternata.

Occorre tenere a mente che il difetto è rivelabile solo se le linee del campo magnetico sono perpendicolari ad esso, pertanto è di fondamentale importanza generare l'opportuna magnetizzazione (longitudinale o circolare)³. Nella pratica difetti disposti fino a 45° sono ancora rivelabili.

In ultima analisi occorre ricordare che il pezzo controllato con il metodo magnetico conserva sempre un residuo di magnetismo che deve essere tolto. La smagnetizzazione viene fatta o riscaldando il pezzo oltre la temperatura di Curie (per i materiali ferromagnetici è di circa 700°) oppure riducendo gradualmente il ciclo di isteresi.



Figura 4: Esame condotto con l'utilizzo delle particelle ferromagnetiche.

1.4.1 Vantaggi e svantaggi del metodo

Il metodo risulta essere economico e facile da utilizzare e non richiede una particolare esperienza dell'operatore visto che il risultato risulta abbastanza oggettivo. Uno dei limiti del metodo è che può essere usato solo con materiali

³ La magnetizzazione longitudinale si ottiene utilizzando un solenoide avvolto a spirale intorno al pezzo. Il campo magnetico da esso generato sarà disposto longitudinalmente al pezzo stesso.

La magnetizzazione circolare si ottiene facendo passare corrente all'interno del pezzo da analizzare. Il campo magnetico generato ha linee di forza circolari.

ferromagnetici, escludendo quindi l'uso per materiali compositi. Inoltre, riesce ad individuare difetti solo sub-superficiali e richiede prima la magnetizzazione e poi la smagnetizzazione del pezzo.

1.5 Radiografia

La tecnica radiografica permette di individuare difetti interni al pezzo in esame, qualunque sia la sua profondità dalla superficie, pertanto è un metodo volumetrico. Sfrutta un fascio di onde elettromagnetiche fortemente penetranti come raggi X e raggi γ i quali attraversando il materiale, vengono assorbiti dallo stesso con legge esponenziale in funzione dello spessore e della densità della materia attraversata. La radiazione passante e variamente attenuata impressiona una pellicola radiografica posta dietro l'oggetto da esaminare. Dopo lo sviluppo radiografico la pellicola annerirà nelle varie zone, più o meno intensamente in funzione della dose di radiazione ricevuta. Se c'è la presenza di un vuoto o di un difetto, i raggi verranno assorbiti di meno rispetto alle zone circostanti e sulla lastra ciò si manifesterà con una zona più scura; viceversa, la presenza di una discontinuità di materiale ad elevata densità, si manifesterà con una zona più chiara. Al posto della lastra è possibile anche utilizzare uno schermo rivelatore (radioscopia); lo schermo si illumina più o meno intensamente in funzione dell'intensità della radiazione ricevuta fornendo la stessa immagine, ma in positivo, della radiografia con lastra fotografica. Il potere di evidenziazione della radioscopia è inferiore a quello della radiografia perché la prima è una rilevazione istantanea⁴ mentre la seconda è una rilevazione integrata nel tempo. Inoltre, la bontà dell'esame radioscopico dipende dall'intensità della radiazione mentre la radiografia dipende dalla dose di radiazioni; questo fa sì che la luminosità di una immagine radioscopica è bassa. Tuttavia la radioscopia permette l'esame di parti in moto, quindi

⁴ Lo schermo si illumina di una luce giallo-verde solo nell'attimo dell'emissione della radiazione.

permette un esame dinamico del pezzo visto che è possibile avere una proiezione continua dell'oggetto sullo schermo e ha un costo inferiore rispetto alla radiografia.

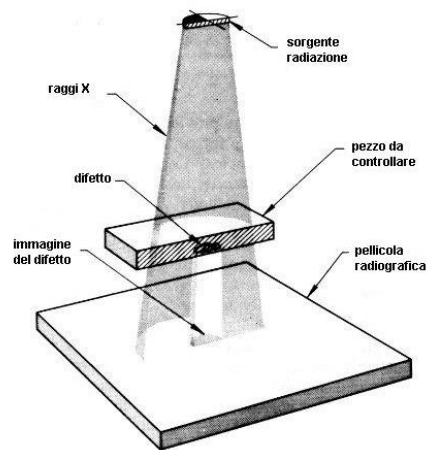


Figura 5: Principio di funzionamento della radiografia.

E' possibile anche ricostruire una immagine tridimensionale del pezzo da esaminare utilizzando la stereoradiografia; ciò è possibile realizzando due radiografie con angolature differenti. In questo modo è possibile calcolare a quale profondità si trova il difetto, semplicemente sfruttando la misura della parallasse⁵.

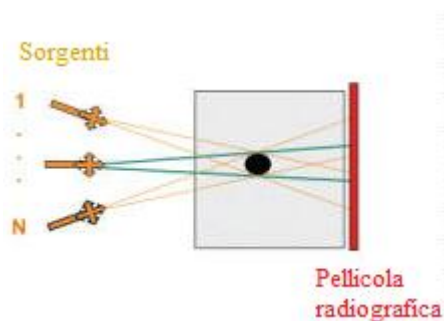


Figura 6: Tecnica della stereo radiografia.

⁵ Parallasse: fenomeno per cui un oggetto sembra spostarsi rispetto allo sfondo se si cambia il punto di osservazione.

1.5.1 Tipologie di radiazione

Le indagini radiografiche possono sfruttare raggi γ e raggi X. I raggi γ sono emessi naturalmente da isotopi radioattivi che continuano la loro emissione fino al decadimento del nucleo. In sostanza è una sorgente che permette di avere raggi con proprietà che dipendono dal particolare isotopo radioattivo a disposizione.

I raggi X sono invece generati artificialmente da particolari tubi catodici alimentati da energia elettrica. In sostanza questi tubi (tubo di Coolidge) sfrutta il fatto che se in esso viene creato il vuoto e da un catodo vengono lanciati elettroni a forte velocità costretti a impattare su una placca metallica (che funge da anodo), si ha l'emissione di onde elettromagnetiche. Le proprietà del raggio dipende dalla composizione del catodo utilizzato che generalmente è realizzato con un filo incandescente di tungsteno avvolto a spirale.

Oggi giorno gli apparecchi radiografici utilizzano sovente i raggi X per il semplice motivo che producono immagini ad alto contrasto con buon potere di evidenziazione e inoltre, a differenza della gammagrafia, è possibile interrompere l'emissione o renderla modulabile.

1.5.2 Vantaggi e svantaggi

La tecnica consente senza problemi di individuare difetti interni purché il materiale non sia opaco alla radiazione; fra questi si hanno l'alluminio, le leghe leggere, le leghe ferrose, i materiali compositi, le ceramiche e i polimeri. Tra gli svantaggi c'è da notare la scarsa trasportabilità delle attrezzature che risultano alquanto ingombranti e ovviamente la nocività delle radiazioni che obbliga operare in ambienti opportunamente schermati. Questo è un aspetto altamente limitativo della tecnologia, basti pensare che ciò rende difficoltoso l'esame di pezzi di natura complessa o comunque di notevole dimensioni,

come potrebbe per esempio accadere nel caso di un controllo manutentivo di un velivolo. Pur utilizzando impianti ad elevata energia di radiazione, non è possibile con i raggi X esaminare spessori di acciaio superiori ai 70 mm pertanto le limitazioni della tecnica radiografica sono legate anche allo spessore massimo e alla complessità della geometria da analizzare nonché alla forma e giacitura dei difetti.

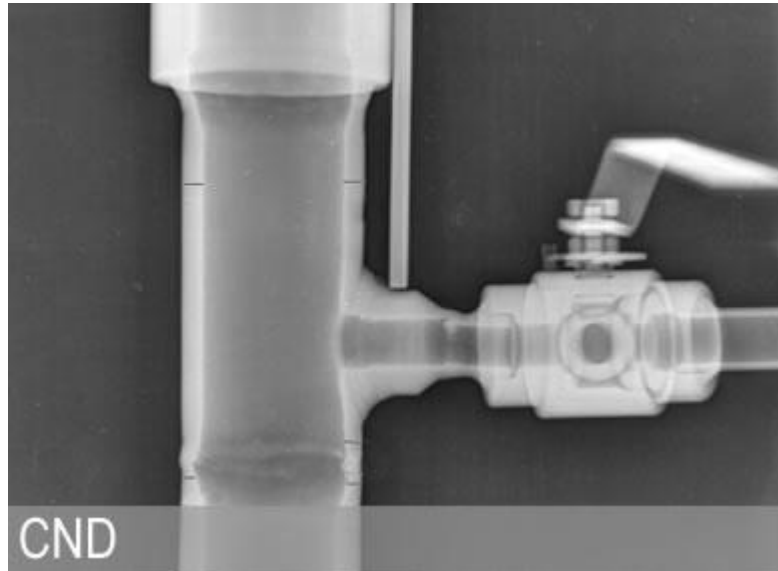


Figura 7: Esame condotto con la tecnica radiografica.

1.6 Ultrasuoni

L'ispezione mediante ultrasuoni è il metodo CND più utilizzato, che consente di evidenziare difetti superficiali e interni a qualunque profondità (è quindi una tecnica volumetrica), misurare lo spessore dei materiali, misurare la distanza e la dimensione delle difettosità. La tecnica si basa essenzialmente sul fenomeno della trasmissione di un'onda acustica nel materiale. Gli ultrasuoni sono onde elastiche vibrazionali con frequenza compresa tra 1 e 10 MHz (per certe applicazioni il campo si può estendere dai 20 KHz fino ad oltre 200 MHz). Le onde ultrasonore sono generate sfruttando le proprietà piezoelettriche di alcuni materiali (cristalli piezoelettrici); queste proprietà consistono nella

capacità di questi materiali di contrarsi e riespandersi quando sottoposti all'azione di un campo elettrico alternato. Se il campo elettrico alternato possiede una determinata frequenza, le vibrazioni del materiale producono onde elastiche di frequenza ultrasonora. Questi cristalli sono contenuti in un trasduttore, comunemente detto “sonda”; esistono diverse tipologie di sonde, ognuna delle quali ha un suo determinato campo di applicazione: sonda piana, angolata, doppia, ad immersione. Un singolo trasduttore può fare sia la fase di trasmissione che quella di ricezione.

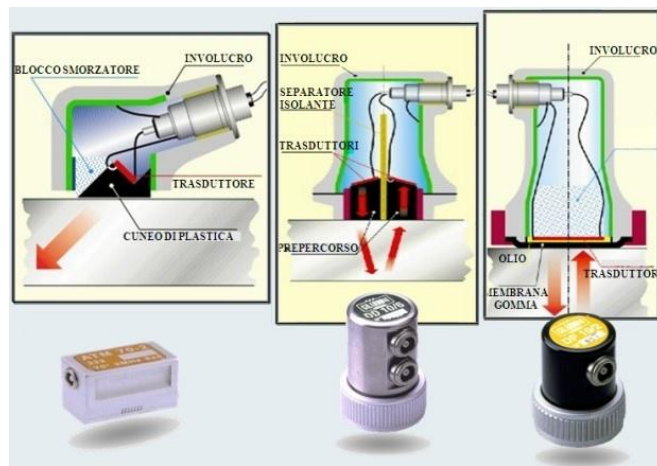


Figura 8: Diverse tipologie di sonde.

L'individuazione di difetti, superficiali o interni al pezzo, viene effettuata considerando che ogni discontinuità nel materiale esaminato, costituisce una superficie che riflette o attenua gli ultrasuoni e pertanto è possibile sfruttare o l'eco del difetto (tecnica ad eco), oppure sfruttare l'attenuazione delle onde nell'attraversare il pezzo da esaminare (tecnica per trasparenza).

Per ottenere un buon accoppiamento tra la sonda ed il materiale da esaminare è necessario eliminare l'aria che vi si interpone, cosa che viene ottenuta mediante l'utilizzo di un mezzo di accoppiamento da interporre tra la sonda e la superficie da esaminare. Il mezzo di accoppiamento deve avere buone caratteristiche di bagnabilità ed una buona trasparenza agli ultrasuoni (di solito vengono utilizzati gel, acqua, oli).

1.6.1 Generalità sulle onde ultrasonore

Le onde ultrasonore possono essere di tipo trasversale e di tipo longitudinale ed hanno una capacità di penetrazione nel materiale che è inversamente proporzionale alla loro frequenza. Naturalmente la capacità di penetrazione dipende anche dalle caratteristiche intrinseche del materiale che deve essere attraversato in particolare la principale caratteristica del mezzo che devono attraversare è l'impedenza acustica, a cui è legata anche la quantità di energia riflessa dal difetto⁶. In corrispondenza di una discontinuità (e quindi della presenza di materiali differenti), l'energia dell'onda incidente viene in parte riflessa e la restante parte trasmessa al secondo materiale; la parte di energia riflessa dipende dal coefficiente di riflessione che dipende dal rapporto tra le impedenze acustiche dei due materiali⁷. Se entrambi i materiali presentano simili valori di impedenza acustica ciò vuol dire che r tende a zero e quindi la riflessione risulterà minima (l'eco sarà debole).

Le onde ultrasonore possono essere inviate nel materiale da esaminare ed in esso si propagheranno con la stessa frequenza del generatore e con una velocità che dipende dal materiale attraversato. Il fascio ultrasonoro in uscita dal trasduttore è caratterizzato dalla sua forma geometrica (dimensioni e campo) mentre il segnale ultrasonoro in ricezione (riflesso o trasmesso) è caratterizzato da due parametri fondamentali:

- Ampiezza: corrisponde al valore di picco dell'impulso;
- Tempo di volo: ovvero il tempo intercorso tra l'impulso trasmesso e quello ricevuto; sullo schermo dell'apparecchio tale tempo è indicato dalla distanza tra i due impulsi. Il tempo di volo fornisce la misura indiretta del percorso effettuato dall'onda ultrasonora nel mezzo.

⁶ Impedenza acustica: $Z = \rho \cdot v$, dove ρ è la densità del materiale mentre v è la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo. In sostanza l'impedenza acustica descrive come un materiale si oppone al passaggio delle onde sonore.

⁷ Coefficiente di riflessione: $r = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2$.

1.6.2 Tecniche di esame

Come già detto, le tecniche di controllo ultrasonoro sono sostanzialmente due: per riflessione e per trasparenza.

- Tecnica per riflessione:

La tecnica per riflessione o metodo dell'impulso-eco si basa sulla proprietà del fascio ultrasonoro di essere riflesso ogni volta che incontra una discontinuità nel materiale in cui si propaga. Questa tecnica permette tra l'altro la localizzazione dei difetti nel pezzo in quanto dalla posizione nell'oscillogramma dell'eco consente una precisa determinazione della profondità del difetto. L'ampiezza e la forma dell'eco consentono invece la valutazione della tipologia e della forma del difetto stesso. Se si usa una sonda che gestisce entrambe le fasi emittente e ricevente, allora questa non può ricevere il segnale riflesso fino a che non sarà terminata la trasmissione del segnale e pertanto passerà un certo intervallo di tempo prima che la sonda possa passare all'ispezione del punto successivo. Questo intervallo di tempo dipende dalla velocità di propagazione del fascio nel materiale e dalla distanza della sonda dal provino. Il segnale di partenza degli ultrasuoni (chiamato "eco di partenza") e quello riflesso dalla superficie opposta a quella d'entrata (chiamato "eco di fondo"), vengono visualizzati sullo schermo dello strumento con dei picchi, la cui distanza risulta proporzionale al tempo che gli ultrasuoni impiegano per percorrere il viaggio di andata e di ritorno dalla sonda alla superficie riflettente presente all'interno del materiale. Se durante tale percorso il fascio ultrasonoro incontra delle discontinuità sarà riflesso, assorbito, deviato o diffratto secondo le leggi comuni a tutti i fenomeni di propagazione delle onde e sullo schermo, tra i due precedenti picchi (eco di partenza ed eco di fondo), ne compariranno altri che rappresentano delle indicazioni relative al tipo di discontinuità incontrate.

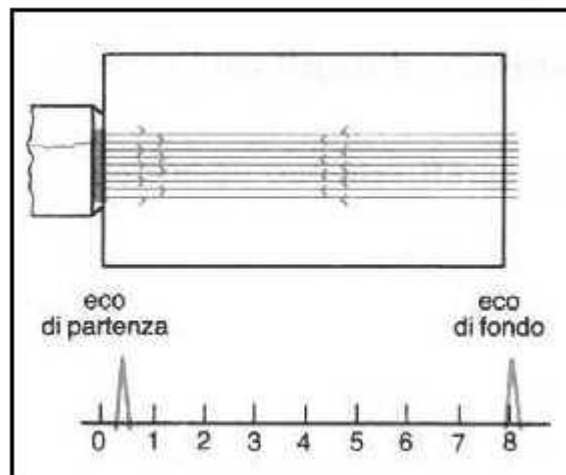


Figura 9: Tecnica per riflessione.

- Tecnica per trasparenza:

Nella tecnica per trasparenza vengono utilizzate due sonde distinte, una che trasmette il fascio ultrasonoro da una superficie del pezzo e un'altra che lo riceve dalla superficie opposta. La presenza di un difetto si manifesta con una diminuzione dell'energia ultrasonora che investe la sonda ricevente. Questa tecnica esige un accoppiamento solidale tra le due sonde (devono muoversi insieme per mantenere lo stesso asse ultrasonoro). La determinazione dei difetti risulta comunque essere meno sensibile e selettiva rispetto alla tecnica per riflessione e non consente nemmeno la determinazione della posizione del difetto. Il suo vantaggio sta nel dimezzare il tempo di percorrenza del fascio ultrasonoro (che non deve raggiungere, rimbalzare e tornare indietro) e proprio per questo motivo risulta efficace nei materiali ad alta attenuazione.

1.6.3 Rappresentazione dei risultati

La localizzazione ed il dimensionamento dei difetti avviene generalmente attraverso un processo di correlazione tra le caratteristiche del fascio ultrasonoro, le caratteristiche fisiche e geometriche del materiale, i parametri

ampiezza e tempo di volo precedentemente descritti e le coordinate della traiettoria di scansione. Esistono tre diverse metodologie di rappresentazione dei risultati:

- Metodo A-scan:

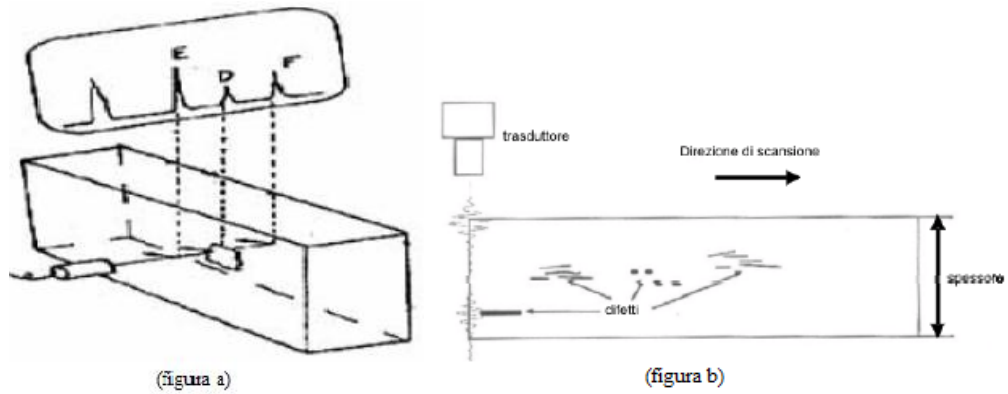
E' la rappresentazione nel dominio del tempo del segnale ultrasonoro ricevuto. L'A-scan di un segnale ottenuto con la tecnica per riflessione permette di ottenere informazioni sullo spessore del pezzo, profondità del difetto e il suo coefficiente di assorbimento.

- Metodo B-scan:

E' una rappresentazione sintetica degli A-scan ottenuti con la tecnica per riflessione lungo una linea di scansione. La rappresentazione visualizza una sezione del pezzo lungo una linea di scansione da cui si può ricavare il suo spessore, la planarità della superficie e i difetti nello spessore.

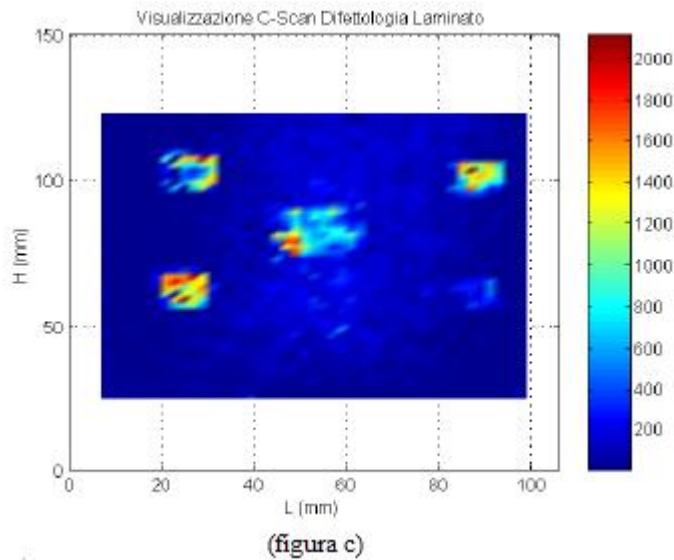
- Metodo C-scan:

E' la rappresentazione in due dimensioni (in pianta) dello stato interno del pezzo.



(figura a)

(figura b)



(figura c)

Figura 10: Tecniche di visualizzazione A-scan (a), B-scan (b), C-scan (c).

1.6.4 Vantaggi e svantaggi

La tecnica degli ultrasuoni viene principalmente utilizzata per ricercare difetti interni quali vuoti o materiale estraneo fino a grande profondità. Viene applicata a tutti i materiali metallici e non che sono in grado di far propagare le onde ultrasonore; tra questi materiali sono compresi i compositi dove la tecnica si rivela efficace nella ricerca di delaminazioni e scollaggi. L'utilizzo degli ultrasuoni risulta difficoltoso ovviamente con materiali ad alta attenuazione acustica e con elementi aventi geometrie complesse. Anche la finitura superficiale riveste un ruolo importante nell'analisi; la tecnica infatti richiede uno stato superficiale che consenta il passaggio degli ultrasuoni con il minimo

grado di attenuazione possibile. In tal senso è indispensabile avere una superficie liscia e ciò limita l'utilizzo della tecnica solo per prodotti finali e non grezzi o semilavorati. Non si dimentichi tra l'altro il fatto che vi è sempre bisogno di un elemento di accoppiamento tra sonda e materiale. Infine, nonostante il controllo sia facilmente automatizzabile, la velocità di scansione risulta bassa e l'interpretazione dei risultati richiede la presenza di un personale specializzato.

1.7 Termografia

La termografia (come dice il nome) sfrutta la capacità di alcuni dispositivi (come termo camere) di rivelare l'intensità della radiazione nella zona termica dello spettro elettromagnetico, cioè una regione dell'infrarosso. La tecnica nasce agli inizi del XX secolo sulla base della scoperta del campo infrarosso e della successiva formulazione della teoria dell'irraggiamento⁸. In sostanza la termo camera è in grado di rilevare le temperature dei corpi analizzati attraverso la misurazione dell'intensità della radiazione emessa dal corpo e permette di individuare eventuali anomalie considerando i difetti come variazioni locali delle proprietà termo fisiche dei materiali. La tecnica si rende efficace in più ambiti dell'analisi non distruttiva, come l'analisi termoelastica che permette di visualizzare e misurare le tensioni in componenti sotto sforzo dando modo di poter individuare i punti più sollecitati di un oggetto che tra l'altro sono i punti dove più facilmente si possono originare cricche.

⁸ La radiazione infrarossa fu scoperta dall'astronomo inglese Sir William Herschel (1738-1822). Volendo trovare un legame tra luce e calore, egli scompose la luce nelle sue componenti spettrali utilizzando un prisma e osservò che ogni componente possedeva una temperatura differente e in particolare la temperatura aumentava passando dal blu al rosso e continuava ad aumentare anche oltre, ossia dove non c'era più radiazione visibile (infrarosso). Successivamente Max Planck (1858-1947) formulò la teoria dell'irraggiamento secondo la quale ogni corpo emette radiazione elettromagnetica la cui lunghezza d'onda è proporzionale alla sua temperatura.

Esistono diverse tipologie di rilevatori termici; il più diffuso è il *sistema piroelettrico* in cui un cristallo di materiale ferroelettrico rilascia cariche elettriche se viene riscaldato. Questo fascio di elettroni viene infine convertito in una immagine termica. Un'altra tipologia risulta essere quella dei *rilevatori quantistici* (o photonic detectors) in cui l'energia incidente che viene assorbita sottoforma di fotoni, eccita gli atomi di un semiconduttore che emette elettroni creando una corrente misurabile. Esistono varie famiglie di fotocamere che si basano su questa tecnologia, tra cui i *sistemi fonorivelatori* che sfruttano una scansione meccanica per la formazione dell'immagine e i sistemi a *focal plane array* (FPA) in cui la scansione è di tipo elettronico. Quest'ultima presenta un buon rapporto segnale-rumore ma necessita di un adeguato sistema di raffreddamento. Da notare che l'atmosfera assorbe la radiazione infrarossa in certe bande e in particolare le termo camere funzionano solo nelle due finestre dello spettro 3-5 μm e 8-14 μm .

1.7.1 Tecniche di esame

Esistono diversi modi di classificare le tecniche termografiche; una prima suddivisione è quella tra termografia *statica* e *dinamica*. Nel primo caso il flusso termico che agisce sull'oggetto non dipende dal tempo e il parametro che si valuta è la resistenza termica; nel secondo caso il flusso termico varia nel tempo e il parametro che si valuta è l'inerzia termica. Un'altra suddivisione riguarda il modo con cui viene stimolato l'oggetto da analizzare ovvero si avranno metodi *attivi* se l'oggetto viene stimolato da una sorgente di calore esterna mentre si avranno metodi *passivi* se viene sfruttata la temperatura propria dell'oggetto stesso. Infine si ha una suddivisione in base alla procedura di osservazione che può essere *bilaterale* se l'oggetto si trova tra la sorgente di calore e il sistema di misura (analisi termica per trasmissione delle onde termiche) o *monolaterale* se la sorgente di calore e il rilevamento si trovano sullo stesso lato (analisi per riflessione delle onde termiche).

Ecco le principali tecniche di analisi termografica nei controlli non distruttivi:

- Thermal imaging technique (TIT): Si basa sull'osservazione passiva dell'emissione infrarossa della superficie di un corpo.
- Transient thermography: In queste tecniche il provino viene sollecitato con una sorgente di calore per un certo periodo di tempo. Inizialmente il provino si scalda, poi per diffusione avviene il raffreddamento. Durante questa fase, osservando il fenomeno con una termo camera, eventuali difetti presenti nell'oggetto si manifestano come macchie di temperatura diversa rispetto al resto della superficie. Dall'istante in cui appare l'area a diversa temperatura è possibile risalire alla profondità del difetto.
- Photothermal techniques: Sono tecniche basate sulla sollecitazione termica periodica nel tempo. In sostanza, dopo un tempo sufficiente a stabilizzare il regime termico, osservando le immagini infrarosse in modo sincrono con la sorgente di calore periodica, è possibile ricavare ampiezza e sfasamento tra i due segnali in ogni punto della superficie del corpo. Un difetto genera una differenza di ampiezza e di fase rispetto alla zona integra. Se la fonte di calore è generata da una lampada a flash si parla di *lock-in thermography* mentre se la fonte di calore è una sorgente ultrasonica si parla di *lock-in ultrasonic thermography*.
- Pulse phase thermography (PPT): L'oggetto da esaminare viene sottoposto un breve impulso di energia con lampade a flash. Visto che un impulso può essere visto come sovrapposizione di infinite componenti sinusoidali con frequenze multiple della fondamentale, allora anche la temperatura superficiale può essere vista come sovrapposizione degli effetti delle singole componenti sinusoidali. In questo modo è come se l'oggetto venisse sottoposto ad infiniti controlli modulati. A differenza della lock-in dove il controllo avveniva aspettando una stabilizzazione termica, la PPT permette il controllo in transitorio ed è quindi più rapido.

- Microwave techniques: Questa tecnica sfrutta come riscaldamento la conversione di energia elettromagnetica in energia termica. La fonte primaria di energia deriva da un generatore di microonde associato al pezzo da controllare tramite una guida d'onda. In questo modo si riesce a riscaldare il pezzo internamente a differenza di quello che accade con le tecniche foto termiche. Il metodo risulta estremamente efficace con materiali contenenti molecole polari come l'acqua e pertanto viene utilizzato nella ricerca di umidità all'interno di strutture a nido d'ape.



Figura 11: Apparato per controllo termografico: termo camera sulla destra e pc per rielaborazione dati.

1.7.2 Vantaggi e svantaggi

La tecnica permette una grande varietà di analisi come l'analisi termoelastica e può essere applicata alla maggior parte dei materiali compresi i compositi dove tra l'altro è l'unica in grado di poter individuare umidità, all'interno per esempio di strutture a nido d'ape. Di contro, come l'analisi a ultrasuoni, la termografia necessita di una superficie liscia il che limita il suo utilizzo al solo pezzo finito e non grezzo. Infine, la tecnica necessita di frequente calibrazione e l'interpretazione dei risultati non è sempre immediata il che richiede anche qui la presenza di personale qualificato.

1.8 Correnti indotte

Questo metodo è noto anche come Eddy Current e si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica ed è applicabile tutti i materiali conduttori compresi i compositi in fibra di carbonio (restano invece esclusi i compositi in fibra di vetro o aramidica). In sostanza, il campo magnetico generato da una bobina alimentata con corrente alternata produce, nel pezzo da esaminare, delle correnti indotte. Tali correnti influenzano il valore di impedenza della bobina che le ha generate. La presenza di una qualsiasi discontinuità modifica l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e quindi l'impedenza del circuito, la cui variazione (confrontata con la risposta di un pezzo integro) è indice di possibile difettosità. Il metodo dà buoni risultati ma è complicato da usare soprattutto nei pezzi di forma complessa, dove le correnti parassite possono avere una disposizione difficile da interpretare ed è per questo che il metodo necessita di una precisa messa a punto. Visto che le correnti indotte si concentrano vicino alla superficie, la tecnica consente di individuare difetti solo superficiali o sub-superficiali (al massimo 10-15 mm di profondità).

1.9 Metodi acustici

Il metodo consiste nel rilevare i segnali acustici o ultrasonici generati dalla deformazione di un materiale sotto l'effetto di un carico. In sostanza applicando un carico ad un provino questo dapprima si deforma elasticamente accumulando energia, poi potrebbe raggiungere uno stato di rottura dove parte dell'energia accumulata viene rilasciata. Parte di questa energia si disperde aumentando la superficie di rottura mentre la restante parte produce attività acustica sottoforma di onde di sforzo che possono essere rilevate, amplificate e rielaborate per ottenere informazioni circa la tipologia e l'entità del danno. La

tecnica è molto sensibile alle caratteristiche dei materiali e nei compositi presenta il problema della corretta interpretazione del tracciato dell'onda.

1.10 Conclusioni

Come già detto nell'introduzione al presente capitolo, dopo un veloce sguardo alle principali tecniche di controllo non distruttivo si è potuto constatare come non esista una tecnica migliore di un'altra o una tecnica migliore in assoluto. La scelta della migliore dipende da tanti fattori quali tipologia di difetto da rilevare, caratteristiche del materiale di cui è costituito il pezzo da esaminare, il grado di sensibilità richiesto e non ultimo la geometria del pezzo.

E' possibile racchiudere le principali caratteristiche, pregi e difetti delle principali tecniche di controllo non distruttivo nella seguente tabella I.

	Ispezione visiva	Liquidi penetranti	Particelle magnetiche	Correnti indotte	Radiografia	Ultrasuoni	Termografia
Caratteristica rilevata	Difettologie visibili superficialmente e/o caratteristiche di aspetto e deformazione visibili sulla superficie.	Penetrazione di un liquido a bassa densità dentro ad una discontinuità presente e visualizzazione della stessa attraverso sviluppatori dell'immagine.	Andamento del campo magnetico e variazioni dello stesso in prossimità di una difettologia	Variazione nella conduttività elettrica causate da cricche, vuoti o inclusioni.	Variazioni di densità originate dalla presenza di vuoti, inclusioni o materiali differenti.	Variazione di impedenza acustica causata dalla presenza di cricche, interfacce, inclusioni, ecc..	Andamento della dispersione termica e influenza di questa dovuta ad una discontinuità presente nel componente.
Elemento penetrante	Vista e immagine visiva.	Fluido fluorescente o visibile.	Campo magnetico.	Corrente elettrica.	Radiazione con raggi X o γ .	Onde ultrasonore.	Calore e dispersione termica.
Elemento rilevante	Occhio dell'operatore o lente.	Lampada di Wood o luce bianca.	Polvere magnetica.	Oscilloscopio.	Pellicole radiografiche.	Oscilloscopio.	Termo camera.
Vantaggi	Economico e può essere automatizzato. Consente l'ispezione ove è difficile accedere.	Poco costoso facile da applicare, portatile e sensibile a piccoli difetti superficiali.	Costo medio - basso e sensibile a difetti superficiali e sub superficiali. Rileva anche difetti presenti sotto a sottili strati protettivi come vernici.	Costo moderato rapidità di impiego e possibilità di controllare i pezzi in modo automatico.	Versatile in quanto a materiali e spessori testabili. La pellicola fornisce una registrazione permanente della prova.	Può penetrare elevati spessori eccellente per l'individuazione di cricche, automatizzabile	Veloce, permette inoltre di individuare umidità nelle strutture a nido d'ape.

Svantaggi	Accessibilità della zona.	I difetti devono affiorare in superficie e richiedono una rigorosa pulizia del pezzo.	Può essere applicato solo su componenti ferromagnetici e magnetizzabili, pulizia delle superfici e smagnetizzazione.	Profondità di penetrazione limitata, applicabilità ai materiali conduttori.	Elevato costo di controllo, pericolosità delle radiazioni, limitazione di ispezione per componenti di difficile accesso e di elevati spessori, informazioni bidimensionali sul difetto.	Necessità di accoppiamento acustico tra il pezzo e la sonda-trasduttore acustico.	Non si rilevano discontinuità molto piccole.
Difetti rilevabili	Caratteristiche superficiali quali graffi, cricche o variazioni cromatiche. Corrosione, deformazioni nei materiali plastici.	Difetti superficiali quali: cricche, porosità, ripiegature.	Difetti superficiali quali: cricche, cavità, inclusioni, variazioni strutturali e porosità.	Difetti superficiali e sub superficiali variazioni chimico - strutturali e spessori di rivestimento.	Difetti interni quali cricche, inclusioni e penetrazioni.	Difetti sub superficiali e/o interni quali: cricche, inclusioni danni da corrosione, difetti di saldatura.	Difetti interni quali cricche, inclusioni e penetrazioni.
Esempi di impiego	Esame superficiale su qualsiasi tipo di materiale.	Esame superficiale su qualunque tipo di materiale, esclusi quelli porosi.	Controlli superficiali e sub superficiali su tutti i materiali ferromagnetici.	Controlli superficiali e sub superficiali di materiali conduttori.	Controlli volumetrici di tutti materiali purché in un campo di spessore compatibile con il tipo di sorgente disponibile.	Controlli volumetrici di tutti materiali.	Controlli volumetrici di tutti materiali.

Tabella I: Confronto fra le principali tecniche di controllo non distruttivo.

Capitolo 2

Radar convenzionali e tecnologia UWB

Il termine “radar”, coniato nel 1940 dalla marina militare statunitense come acronimo dell’inglese “Radio Detection And Ranging”, è un sistema che utilizza onde elettromagnetiche appartenenti allo spettro delle onde radio per il rilevamento e la determinazione (in un certo sistema di riferimento) della posizione (coordinate in distanza, altezza e azimuth) ed eventualmente della velocità di oggetti (comunemente definiti bersagli o target) sia fissi che mobili. La principale applicazione dei sistemi radar è quella di *rilevamento* che comprende i seguenti ambiti di applicazione:

- Radar di sorveglianza;
- Radar di inseguimento;
- Radar ad altissima risoluzione per la formazione di immagini;
- Radar altimetri;
- Radar meteorologici.

La tipologia di rilevamento definisce i metodi e le modalità con i quali è possibile acquisire informazioni su oggetti o sull’ambiente circostante. Esistono due macro categorie di sistemi di rilevamento:

- Attivi: le informazioni vengono ottenute stimolando i target mediante la trasmissione di determinati segnali;
- Passivi: le informazioni vengono ottenute da segnali emessi dal target stesso.

Sistemi passivi sono ad esempio telecamere, sonar passivi e radiometri mentre i radar sono da considerare a tutti gli effetti sistemi attivi. In particolare il radar irradia energia elettromagnetica da una antenna che la propaga nello spazio; se

è presente un bersaglio, parte dell'energia trasmessa viene intercettata dallo stesso e re-irradiata in più direzioni. Parte dell'energia re-irradiata (definita come eco) viene quindi ricevuta dall'antenna del radar e da questo segnale, opportunamente amplificato ed elaborato, è possibile ottenere informazioni sull'eventuale target rilevato.

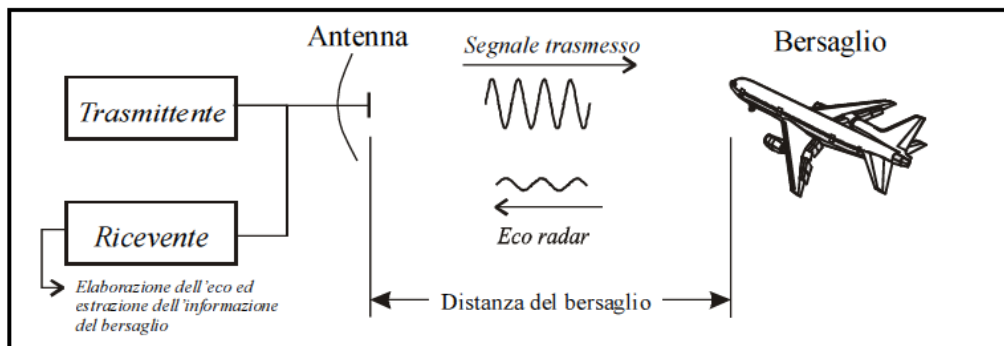


Figura 12: Principio di funzionamento di un radar.

2.1 Parti base e generalità di un sistema radar

Lo schema a blocchi di un apparato radar viene presentato in figura 13. Il trasmettitore è costituito dai blocchi *waveform generator* e *power amplifier* e ha il compito di generare una precisa forma d'onda in funzione della particolare applicazione per cui il radar viene impiegato.

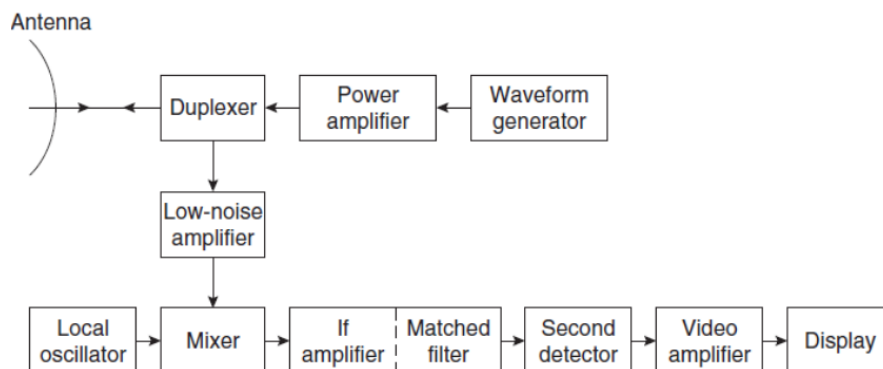


Figura 13: Schema base di un sistema radar.

La forma d'onda può essere caratterizzata da potenze dell'ordine dei mW fino ai MW e comunque deve possedere sufficiente potenza affinché gli effetti di assorbimento che hanno luogo durante la propagazione e al momento della riflessione non riducano l'intensità del segnale a livelli che non ne permetterebbero il rilevamento. In generale l'intensità dell'eco può essere ridotta di diversi ordini di grandezza (decine) rispetto a quella del segnale trasmesso. Il rilevamento di un'eco così tenue, in presenza del fortissimo segnale trasmesso, pone un problema tecnico solitamente risolto con il sistema a impulsi. Il trasmettitore emette impulsi di durata molto breve (variabile fra qualche nanosecondo a qualche microsecondo), intervallati da periodi di alcune centinaia o migliaia di microsecondi di "silenzio". Per evitare interferenze tra il segnale trasmesso e l'eco, durante l'emissione dell'impulso viene isolato il ricevitore e, tra un impulso e l'altro, viene scollegato il trasmettitore. Vista la natura impulsiva del segnale trasmesso, il valore medio della potenza erogata nell'unità di tempo è sensibilmente inferiore rispetto alla potenza di picco⁹.

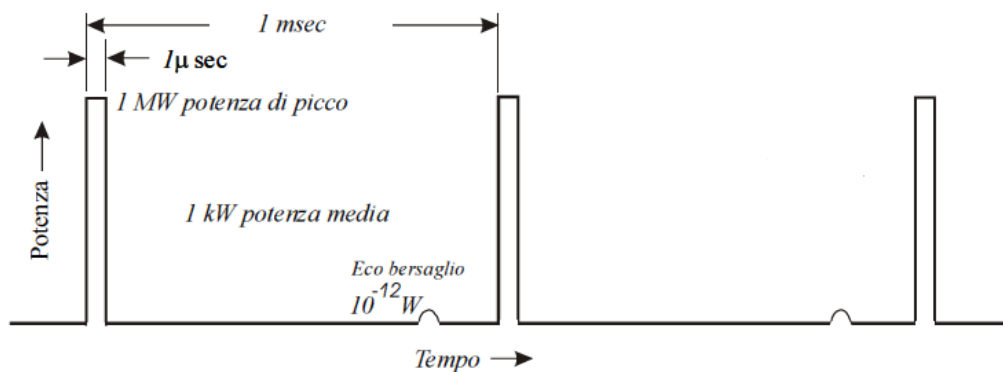


Figura 14: Tipica forma d'onda per un radar.

Esistono però anche radar a onde persistenti, che trasmettono un segnale continuo, non a impulsi. Il radar Doppler, ad esempio, è un radar a onde persistenti che sfrutta l'effetto Doppler per misurare la velocità di oggetti in movimento.

⁹ Come si può osservare dalla figura 14, la potenza di picco è la massima potenza trasmessa dal segnale (il picco di potenza appunto). Visto che il segnale è di tipo impulsivo (in figura la durata è di 1 μs), la potenza media del segnale è sensibilmente più bassa della potenza di picco (1kW contro 1MW).

L'antenna è il dispositivo che permette la trasmissione e la ricezione delle forme d'onda, interfacciando l'apparato radar al mondo esterno. Spesso le antenne radar sono direttive ovvero sono caratterizzate da diagrammi di radiazione tali da poter direzionare l'energia irradiata, concentrando la potenza, sul target; questo ovviamente permette un sensibile miglioramento nella capacità di individuazione del target, ottenendo inoltre una maggiore accuratezza dei parametri stimati dallo stesso. Tipi di antenna a fascio stretto sono ad esempio le *pencil beam* (fascio a matita) e antenne *fan beam* (fascio a bandiera) riportate in figura 15.

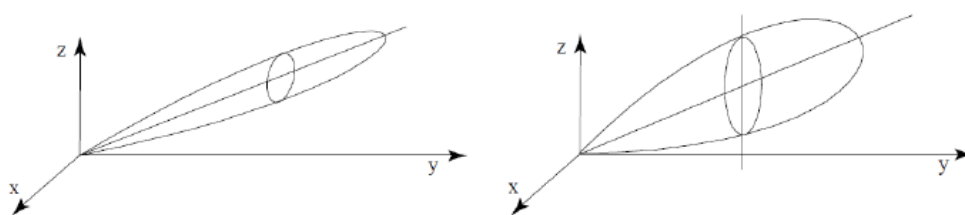


Figura 15: A sinistra diagramma di radiazione *pencil beam*; a destra diagramma di radiazione *fan beam*.

Le antenne pencil beam permettono elevata precisione di misura e risoluzione angolare su entrambi i piani orizzontale e verticale; le antenne fan beam presentano invece un fascio stretto solo sul piano orizzontale e vengono usate in tutte quelle situazioni dove non viene richiesta una particolare precisione sul piano verticale. Sistemi caratterizzati da stretti fasci direttivi in trasmissione generalmente permettono il rilevamento dei segnali di eco di bassa potenza provenienti anche da target lontani.

A valle dell'antenna è presente un dispositivo di disaccoppiamento tra il sottosistema di trasmissione e quello di ricezione (rispettivamente i sottoblocchi in alto e in basso di figura 13); questo dispositivo è chiamato *duplexer* e consente di utilizzare la stessa antenna sia in trasmissione che in ricezione.

Per quanto riguarda il sottosistema di ricezione, il segnale ricevuto deve essere amplificato ad un livello sufficiente per poter essere rilevato, cercando di

separare il segnale utile dal rumore ambientale. Oltre al rumore, le prestazioni dei sistemi radar possono essere limitate dalla presenza di echi indesiderati detti *clutter*. Esistono diversi tipi di clutter come quello prodotto da agenti atmosferici (pioggia, grandine...), o clutter di terra o di mare ovvero prodotti quando il fascio di antenna è radente o incidente la superficie terrestre o marina. In sostanza, ogni scenario applicativo presenta diverse tipologie di clutter, basti pensare ad una applicazione radar in ambiente indoor dove al segnale utile possono sovrapporsi echi generati da pareti o oggetti circostanti. 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 garantisce lo stesso funzionamento. 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. Al ricevitore vengono effettuate diverse operazioni di processamento del segnale tra cui il matched filter e il doppler processing. Il primo massimizza il rapporto segnale/rumore eseguendo la correlazione tra il segnale trasmesso e quello ricevuto. Il secondo massimizza il rapporto segnale/clutter di un target in movimento, separando un target mobile da altri target in movimento o dal clutter. I fattori esterni al sistema che possono condizionare le prestazioni di un radar sono molteplici tra cui le più importanti sono:

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

Gli effetti provocati da questi fattori devono essere presi in considerazione in fase di progettazione e applicazione di un sistema radar.

2.2 Radar UWB

La tecnologia Ultra Wideband è una tecnologia nata principalmente per soddisfare la sempre maggiore richiesta di velocità di trasmissione e capacità di canale necessaria alle sempre più complesse operazioni di comunicazione. Inoltre sistemi UWB hanno la capacità di coesistere con altri sistemi a banda stretta preesistenti.

I sistemi UWB devono rispettare severe restrizioni in termini di potenza trasmessa in modo da non interferire con altri sistemi di comunicazione. I valori di potenza trasmissibili sono determinati (come per tutti i sistemi radio) da agenzie di regolamentazione come la FCC negli Stati Uniti o le direttive della Comunità Europea¹⁰.

Sono state formulate e tuttora coesistono diverse definizioni che hanno come obiettivo quello di identificare una trasmissione radio di tipo Ultra Wideband; secondo la FCC (sezione 15.503 parte 47):

“un trasmettitore UWB è un qualsiasi schema trasmissivo avente banda frazionaria uguale o maggiore di 0.2 o larghezza di banda¹¹ maggiore di 500 MHz”

La banda frazionaria BW_f è definita come il rapporto tra la larghezza di banda BW e la frequenza centrale f_c ¹²:

$$BW_f = \frac{BW}{f_c} \quad (2.1)$$

¹⁰ Direttiva della Comunità Europea 2009/343/CE del 21 aprile 2009. Per maggiori dettagli si veda il paragrafo 2.2.4.

¹¹ Si veda anche la figura 16. La larghezza di banda di un segnale UWB è la banda di frequenza limitata dai punti a -10dB rispetto alla massima densità di potenza del segnale. Il limite superiore è definito come f_H mentre il limite inferiore è definito come f_L . La frequenza in corrispondenza della massima emissione del segnale è definita come f_M . In sostanza la larghezza di banda di un segnale UWB è definita come $BW_{UWB} = (f_H - f_L)$.

¹² La frequenza centrale f_c è definita come: $f_c = \left(\frac{f_H + f_L}{2}\right)$. In generale non coincide necessariamente con la frequenza di picco f_M .

Nello specifico, secondo la definizione della FCC risulta che il segnale per essere classificato come UWB debba soddisfare la condizione:

$$BW_f = 2 \frac{f_h - f_l}{f_h + f_l} \geq 0.2 \quad (2.2)$$

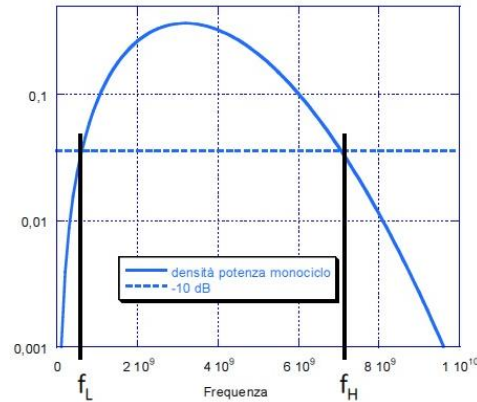


Figura 16: Spettro di un tipico segnale UWB

L'interesse nei sistemi radar UWB ha avuto una forte crescita negli anni Ottanta grazie alla capacità di rilevare target di medie dimensioni meglio dei tradizionali radar operanti a banda stretta. La prima area di applicazione per questi apparati radar è stata il rilevamento di oggetti nascosti e ciò equivale ad una alta capacità di penetrare gli ostacoli.

La seconda area di applicazione per sistemi radar UWB riguarda le operazioni di rilevamento e sorveglianza di target a brevi distanze (dell'ordine della decina di metri). La necessità di queste tipologie di radar è alta e ciò è dimostrato oggi dall'alto numero di radar militari e civili di questo tipo applicati per operare in vari tipi di scenario. 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.

La terza area applicativa per sistemi radar UWB è la formazione di immagini. Il grande aumento nella quantità e qualità di informazioni ricevute dagli echi permette la formazione di "immagini" radar del target. I radar SAR (Synthetic-Aperture Radar) possono impiegare 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.

La quarta area di applicazione è la sorveglianza di aree di diversa natura. Aree marine, aeroporti, foreste, città ne sono solo alcuni esempi.

2.2.1 Impulsi utilizzati

La necessità dei sistemi UWB di garantire che la potenza del segnale venga confinata in una durata temporale molto breve e quindi in un intervallo di frequenze molto ampio, suggerisce due possibili strategie di generazione della forma d'onda che corrispondono a due architetture di generazione e trasmissione del segnale sostanzialmente differenti:

- La prima strategia consiste nel generare un impulso in banda base con occupazione spettrale pari alla metà della banda permessa, traslando poi alle frequenze di interesse, attraverso la moltiplicazione dell'impulso per l'uscita di un oscillatore locale e frequenza pari al centro banda. La forma d'onda ottenuta è un segnale sinusoidale modulato in ampiezza (figura 17). I trasmettitori che usano questa tecnica presentano una architettura relativamente semplice ma di solito non permettono di minimizzare i consumi di potenza, a causa della presenza dell'oscillatore locale, il cui assorbimento di corrente cresce all'aumentare della frequenza operativa.

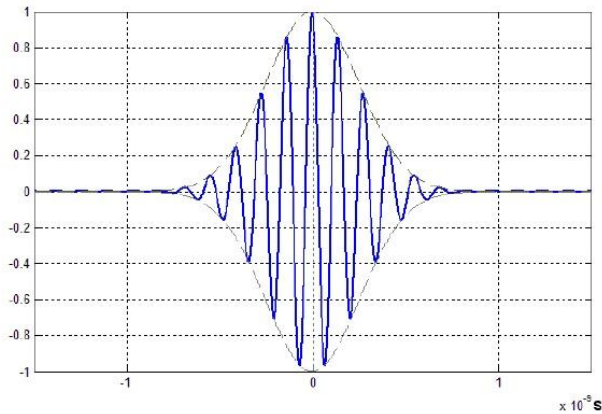


Figura 17: Impulso UWB ottenuto attraverso la modulazione di una oscillazione per mezzo di un inviluppo conforme ad una gaussiana

- La seconda strategia prevede di generare forme d'onda in banda base, il cui contenuto spettrale rientri nelle specifiche dettate dalla normativa. Questo solitamente si ottiene derivando impulsi gaussiani, in modo da far comparire oscillazioni che concentrino il contenuto spettrale dell'impulso nella banda UWB. Un impulso gaussiano è un segnale di breve durata (nelle applicazioni UWB generalmente tra i 0,25 ns e i 1,25 ns) del tipo:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_0}{\sigma}\right)^2} \quad (2.3)$$

La trasformata di Fourier dell'impulso gaussiano è pari a:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt = \sqrt{2\pi}\sigma e^{-2(\pi f\sigma)^2} \quad (2.4)$$

Il quadrato di questo segnale fornisce lo spettro di densità di potenza. Per $f = (1/3) \cdot \sigma$ il valore dello spettro di potenza diventa 0,01 volte quello di bassa potenza, ovvero si riduce di 20dB.

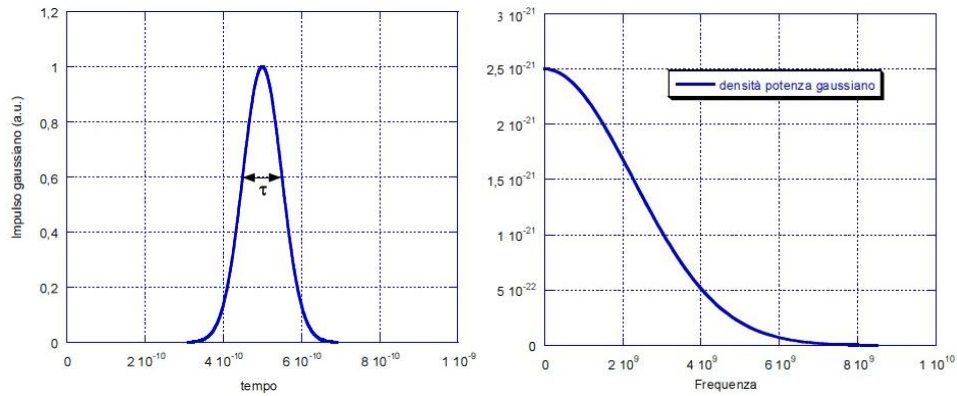


Figura 18: Nella figura di sinistra è presentato un impulso di tipo gaussiano; nella figura di destra si ha lo spettro di potenza.

La scelta della gaussiana è dettata dalle caratteristiche di regolarità che contraddistinguono il suo andamento e quello delle sue derivate. Tale proprietà rende possibile aumentare le oscillazioni del segnale tramite semplici operazioni di derivazione, senza perdere in continuità e regolarità della forma d'onda. Molti trasmettitori UWB che rientrano in questa seconda categoria fanno ricorso ad un circuito di shape dell'impulso, che opera un filtraggio per correggere ulteriormente il profilo spettrale del segnale trasmesso, qualora il generatore non riesca a produrre una forma d'onda che rispetti le limitazioni sulla densità di potenza.

In base all'ordine della derivata adottata, si ottengono differenti tipologie di segnale. Alla derivata prima corrisponde il monociclo gaussiano.

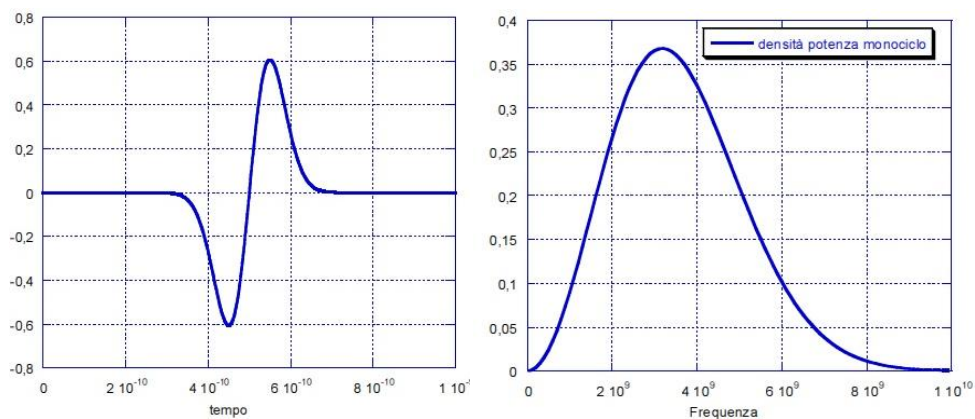


Figura 19: Nella figura di sinistra è presentato un monociclo gaussiano; nella figura di destra si ha la densità di potenza.

In figura 20 si presenta l'andamento delle prime cinque derivate dell'impulso gaussiano:

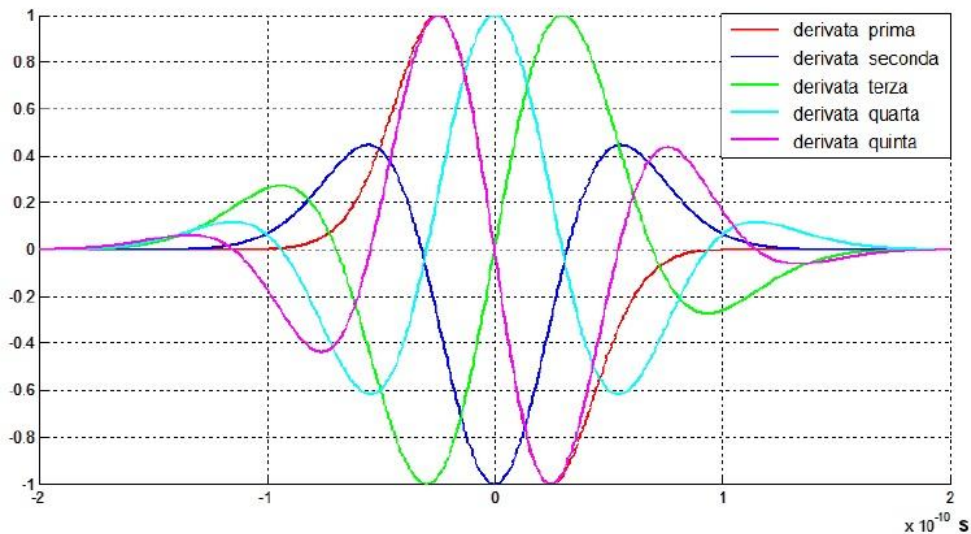


Figura 20: Prime cinque derivate dell'impulso Gaussiano.

Si può notare che sottoponendo l'impulso Gaussiano a operazioni di derivazione, compaiono nuove oscillazioni che però preservano sempre la regolarità del segnale.

L'utilizzo di segnali di breve durata permette di ottenere uno spettro estremamente ampio rispetto a quello ottenibile dai segnali convenzionali. In effetti, "quello che è breve nel dominio del tempo è ampio nel dominio delle frequenze", quindi l'uso di segnali di breve durata temporale determina uno spettro in frequenza ampio. Nella figura 21 si osserva lo spettro di un segnale UWB confrontato con quello di radar convenzionali.

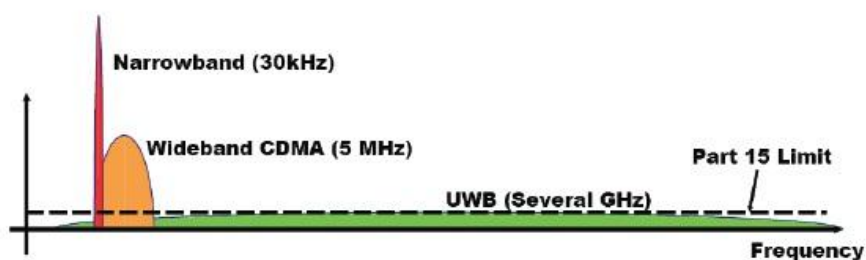


Figura 21: Confronto della larghezza di banda tra segnali Narrowband, Wideband e Ultrawideband.

Quanto detto è il punto forte dei sistemi UWB; l'utilizzo di spettri (e quindi di densità spettrali) limitati permette di confondere i segnali UWB con il rumore di fondo. Ciò rende minimo l'effetto dell'interferenza del segnale UWB qualora ci siano altri segnali che siano stati trasmessi all'interno della banda occupata dal sistema UWB, come segnali a banda stretta (narrowband) e a banda larga (wideband).

2.2.2 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) per trasmettere le informazioni. La ragione di tale scelta è dovuta alla facilità con la quale è possibile implementare il sistema. La loro limitata larghezza di banda rende possibile il rilevamento e la localizzazione del target ma limita le possibilità di estrarre dagli eco ulteriori informazioni inerenti il target stesso 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'incremento del contenuto informativo dei sistemi radar che impiegano segnali UWB è ottenuto riducendo la durata dell'impulso il che significa anche un aumento della risoluzione spaziale. Per un qualsiasi impulso radar, la lunghezza dell'impulso è $c \cdot \tau$ e la risoluzione spaziale è

$$\Delta r = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (2.5)$$

dove c è la velocità della luce e $\tau = 1/\Delta f$.

Per esempio, riducendo la durata di un impulso irradiato da 1 s a 1 ns si aumenta la risoluzione dell'impulso radar da 300 cm a 0.3 cm. Per tale motivo si può dire che lo strumento usato per osservare lo spazio diventa più raffinato. Sotto le condizioni di radar UWB vale la relazione

$$c \cdot \tau = \frac{c}{\Delta f} \ll L \quad (2.6)$$

dove L è la lunghezza dell'obiettivo lungo la direzione radiata.

L'elevata risoluzione temporale dei segnali UWB (ovvero basso τ) 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. La stessa breve durata dell'impulso previene il fenomeno di "fading" del segnale che corrisponde a fluttuazioni indesiderate nella potenza del segnale ricevuto.

Riassumendo, la tecnologia UWB gode delle seguenti proprietà:

- 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;
- 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 della RCS¹³ del target;
- maggiore affidabilità nel tracking di target per bassi valori degli angoli di elevazione; avendo a disposizione una maggiore risoluzione è

¹³ La Radar Cross Section è la misura dell'abilità del target di riflettere i segnali radar nella direzione dell'antenna ricevente del radar stesso [m²].

possibile infatti distinguere gli eco provenienti direttamente dal target e quelli invece generati dalle riflessioni sul terreno;

- I segnali UWB grazie all'ampio range di frequenze occupate mostrano una elevata capacità di penetrazione dei materiali. 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 agli ostacoli.
- 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.

2.2.3 Differenze tra radar convenzionali e radar UWB

La principale differenza tra radar convenzionali e radar UWB è il concetto di “frequenza operativa”. Nei sistemi UWB ciò che viene trasmesso non è un segnale sinusoidale operante con una certa portante ma una serie di brevi impulsi elettromagnetici. Il tutto quindi si basa sulla trasmissione di un impulso, la cui durata dipende come già detto dalla risoluzione spaziale desiderata, e questo impulso viene ripetuto nel tempo secondo una certa frequenza di ripetizione (PRF); maggiore è la frequenza di ripetizione e maggiore è il quantitativo informativo che si riesce ad ottenere.

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 sia minore dell'apertura dell'antenna o

delle dimensioni del target. I radar basati su segnali a banda stretta godono infatti di una importante proprietà: nel loro funzionamento la forma d'onda irradiata non subisce modifiche sostanziali. Sotto la condizione $c \ll L$ 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. 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. L'impulso 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 avviene quando il segnale è irradiato da

un elemento di una antenna costituita da N radiatori con distanza d tra di essi. Ogni elemento antenna vede il target ad un differente angolo (angolo ϑ tra la normale all'array di antenne ed il target); questo provoca un ritardo (ritardo pari a $\frac{d}{c}\sin\theta$) di irradiazione rispetto all'elemento adiacente dell'antenna. Il quarto cambiamento avviene a causa della riflessione del target. I target possono essere sempre modellati come un insieme di singoli riflettori. 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. Questa sequenza di impulsi è detta "immagine del target" (target image). La quinta trasformazione avviene durante la propagazione del segnale nell'atmosfera, dovuto alle attenuazioni nelle varie bande di frequenza. Il sesto cambiamento della forma del segnale avviene durante la ricezione del segnale; il campo elettromagnetico ai vari elementi dell'antenna ricevente genera segnali di corrente ritardati tra di loro.

- variazioni temporali della 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 frequenza. Nel caso di segnali UWB non è quindi possibile utilizzare l'equazione canonica;
- 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.

2.2.4 Normativa Europea

In Europa, l'ultima delibera riguardante la regolamentazione dello spettro radio da parte delle apparecchiature che utilizzano tecnologia UWB risale al 21 aprile 2009 (decisione 2009/343/CE). Questa delibera va a modificare la decisione 2007/131/CE del 21 febbraio 2007. Già nel 2007 era stato recepito il potenziale utilizzo delle apparecchiature UWB in differenti ambiti riguardanti applicazioni mediche, comunicazione, misura, localizzazione, controllo e trasferimento di immagini grazie al fatto che le irradiazioni di potenza sono molto basse e si sviluppano su una larghezza di banda molto ampia (considerazione n° 3).

La modifica con la decisione 2009/343/CE si è resa necessaria per “rispecchiare la rapida evoluzione di questa tecnologia e dell'uso dello spettro radio, affinché la società europea benefici dell'introduzione di applicazioni innovative basate su tale tecnologia, senza ledere gli altri utenti dello spettro” (considerazione n° 2).

Di seguito sono riportate alcune definizioni che sono parte integrante della normativa (articolo 1, 2009/343/CE):

- **Apparecchiatura che utilizza la tecnologia a banda ultralarga:** un'apparecchiatura che contiene, come parte integrante o come accessorio, una tecnologia per le radiocomunicazioni a corto raggio, che genera e trasmette in modo intenzionale radiofrequenze che si diffondono su una banda di frequenze di ampiezza superiore a 50 MHz e può coprire più bande di frequenze attribuite ai servizi di radiocomunicazione.
- **EIRP:** potenza equivalente irradiata isotropicamente.
- **Densità di EIRP media:** la potenza media misurata con una larghezza di banda pari a 1 MHz, un rilevatore RMS (root mean square) e un tempo medio pari a 1ms al massimo.
- **Densità di EIRP di picco:** il livello di picco della potenza di trasmissione contenuta in una banda di 50 MHz centrata sulla frequenza in cui si registra la massima potenza media irradiata. Se viene misurata in un'ampiezza di banda pari a "x" MHz, il valore limite deve essere ridotto di un fattore pari a $20\log(50/x)$ dB.
- **Densità di EIRP massima:** il valore massimo misurato in qualsiasi direzione, a qualsiasi frequenza all'interno di una banda di frequenza definita.

La delibera 2009/343/CE permette anche l'utilizzo di spettri radio con limiti di EIRP più elevati, purchè si applichino tecniche di mitigazione appropriate descritte nel seguito (punto 1.2 della delibera):

- **Mitigazione "low duty cycle" (LDC):** Una densità di EIRP media massima di - 41,3 dBm/MHz e una densità massima di EIRP di picco di 0 dBm misurata a 50 MHz sono consentite nelle bande da 3,1 a 4,8 GHz a condizione che sia applicata una restrizione "low duty cycle" in base alla quale la somma di tutti i segnali trasmessi sia inferiore al 5 %

del tempo ogni secondo e sia inferiore allo 0,5 % del tempo ogni ora e a condizione che ogni segnale trasmesso non superi i 5 millisecondi.

Banda di frequenza (GHz)	Densità di e.i.r.p. media massima (dBm/MHz)	Densità massima di e.i.r.p. di picco (dBm/50 MHz)
Inferiore a 1,6	- 90,0	- 50,0
Da 1,6 a 2,7	- 85,0	- 45,0
Da 2,7 a 3,4	- 70,0	- 36,0
Da 3,4 a 3,8	- 80,0	- 40,0
Da 3,8 a 4,2	- 70,0	- 30,0
Da 4,2 a 4,8	- 41,3 <i>(fino al 31 dicembre 2010)</i> - 70,0 <i>(dopo il 31 dicembre 2010)</i>	0,0 <i>(fino al 31 dicembre 2010)</i> - 30,0 <i>(dopo il 31 dicembre 2010)</i>
Da 4,8 a 6,0	- 70,0	- 30,0
Da 6,0 a 8,5	- 41,3	0,0
Da 8,5 a 10,6	- 65,0	- 25,0
Oltre 10,6	- 85,0	- 45,0

Tabella II: Densità di EIRP massime consentite secondo la normativa europea. [19]

- **Mitigazione “detect and avoid” (DAA):** Una densità di EIRP media massima di - 41,3 dBm/MHz e una densità massima di EIRP di picco di 0 dBm misurata a 50 MHz sono consentite nelle bande da 3,1 a 4,8 GHz e da 8,5 a 9,0 GHz a condizione che sia utilizzata una tecnica di mitigazione “detect and avoid” quale descritta nelle norme armonizzate pertinenti adottate nell’ambito della direttiva 1999/5/CE.

La delibera introduce anche un aspetto innovativo, ovvero una regolamentazione per i sistemi di immagine per analisi dei materiali da costruzione (Building Material Analysis - BMA). Si cita testualmente (considerazione n° 7): “I sistemi di immagine per analisi dei materiali da costruzione (Building Material Analysis - BMA) possono offrire una serie di applicazioni innovative nel rilevamento o nella ripresa di immagini di condotte,

cavi e altre strutture presenti all'interno dei muri di edifici residenziali o commerciali. Le imprese che intendono fornire servizi professionali che si avvalgono di tali applicazioni in tutto il territorio comunitario devono poter contare su una serie di condizioni comuni d'accesso allo spettro per le apparecchiature BMA”.

Inoltre, nella considerazione n° 9 viene precisato che: “gli studi tecnici realizzati dalla CEPT nell'ambito dei mandati della Commissione sulle applicazioni BMA presuppongono l'uso di queste ultime in strutture sufficientemente dense e spesse da assorbire la maggior parte dei segnali trasmessi dal sistema di immagine. Questi studi di compatibilità si fondano altresì sull'ipotesi che le apparecchiature BMA cessino di emettere segnali nei dieci secondi successivi all'interruzione del funzionamento normale. Inoltre, sebbene i dispositivi BMA possano essere venduti come prodotti di consumo, gli studi sull'interferenza complessiva presuppongono l'utilizzo di una densità massima di 6,7 unità BMA/km²”.

Banda di frequenza (MHz)	Densità di e.i.r.p. media massima (dBm/MHz)	Densità massima di e.i.r.p. di picco (dBm/50 MHz)
Inferiore a 1 730	- 85	- 45
Da 1 730 a 2 200	- 65	- 25
Da 2 200 a 2 500	- 50	- 10
Da 2 500 a 2 690	- 65	- 25
Da 2 690 a 2 700	- 55	- 15
Da 2 700 a 3 400	- 82	- 42
Da 3 400 a 4 800	- 50	- 10
Da 4 800 a 5 000	- 55	- 15
Da 5 000 a 8 000	- 50	- 10
Da 8 000 a 8 500	- 70	- 30
Oltre 8 500	- 85	- 45

Tabella III: Densità di EIRP massime consentite per sistemi BMA. [19]

Sempre riguardo ai sistemi BMA viene precisato che: “il funzionamento delle apparecchiature BMA che utilizzano tecniche di mitigazione delle interferenze

che garantiscono prestazioni almeno equivalenti alle tecniche descritte nelle norme armonizzate pertinenti adottate nell'ambito della direttiva 1999/5/CE è permesso nelle bande di frequenze da 1,215 a 1,73 GHz, con una densità di EIRP media massima pari a - 70 dBm/MHz e nelle bande di frequenza da 2,5 a 2,69 GHz e da 2,7 a 3,4 GHz con una densità di EIRP media massima pari a - 50 dBm/MHz, purché le apparecchiature offrano un livello di protezione almeno equivalente a quello corrispondente ai limiti riportati nella tabella III”.

Capitolo 3

Strumenti a supporto del lavoro

Nel presente capitolo verranno illustrati i principali strumenti utilizzati e costruiti *ad hoc* per effettuare le analisi. Il cuore del progetto risulta essere senza dubbio l'apparato radar, utilizzato in tutte le fasi del lavoro, di cui nel seguito verrà data una esaustiva descrizione per presentarne le caratteristiche, potenzialità e limiti. Per effettuare alcune tipologie di prove, però, il solo radar non sarebbe stato sufficiente in quanto occorreva un particolare tipo di supporto in grado di muoverlo con precisione millimetrica. Nasce così la necessità di costruire un movimentatore *ad hoc* in grado accogliere il radar e muoverlo in due dimensioni, con controllo remoto in ambiente Matlab[®]. Nel presente capitolo verrà dato largo spazio anche a questo prezioso strumento.

3.1 Il radar UWB

Il radar a disposizione è il modello NVA-R640 prodotto dalla norvegese Novelda[®]. Questo è un prodotto “general-purpose” ovvero è utilizzabile e adattabile a diverse applicazioni e ambiti grazie al fatto che può essere configurato ad hoc, consentendo di ottenere risoluzioni spaziali fino a 4 mm e può coprire una “detection range” fino a 60 m. Il cuore di questo radar è rappresentato dal chip a tecnologia CMOS NVA6000 di dimensioni 2x2 mm, contenuto in un package di 5x5 mm. Il chip è montato su una scheda a circuito stampato alla quale sono collegate le due antenne trasmittente e ricevente e una ulteriore scheda per il modulo I/O. Il tutto è interfacciato al PC tramite collegamento USB, dal quale il radar è anche alimentato.

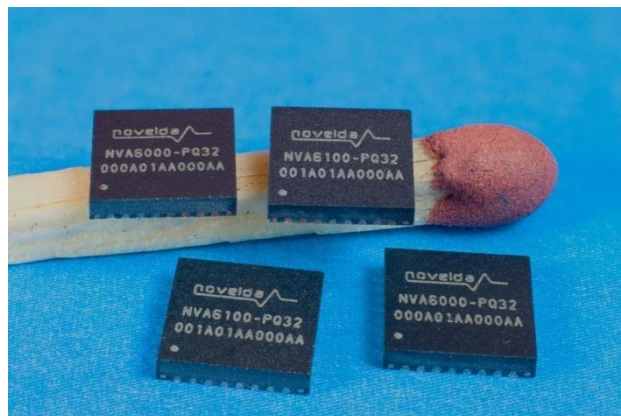


Figura 22: Le due tipologie di chip a tecnologia CMOS che possono essere montati nel radar NVA-R640. [35]

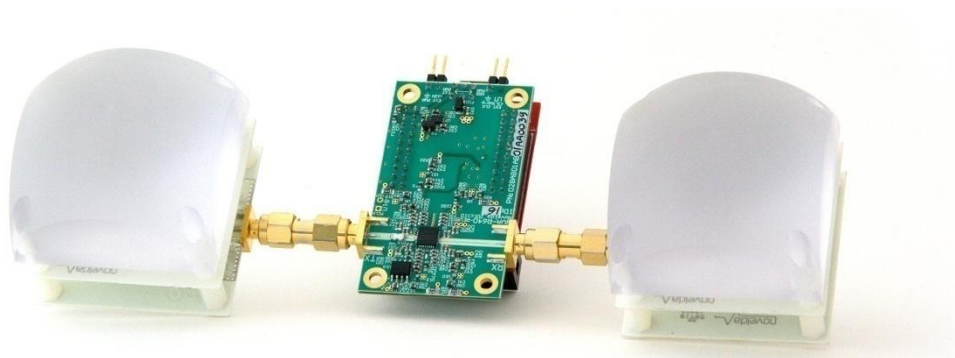


Figura 23: Modello radar NVA-R640, completo di antenne e scheda I/O. [35]

Il chip NVA6000 è in grado di generare un segnale equivalente alla derivata settima dell'impulso di Gauss (si veda la figura 24) con una larghezza di banda programmabile dai 6.0 a 8.5 GHz. La scheda di acquisizione riesce ad acquisire contemporaneamente fino a 512 campioni ed è possibile scegliere il tempo di campionamento fra tre differenti valori: 26 ps, 52 ps e 280 ps; la frequenza di campionamento può quindi arrivare fino a 39 GHz. Il radar Novelda è in grado di offrire un consumo energetico pari a 113mW grazie all'utilizzo dell'architettura CTBV¹⁴ che consente di eliminare l'utilizzo dei convenzionali clock utilizzati per regolare i processi di timing e di misura.

¹⁴ CTBV: Continuous Time Binary Value

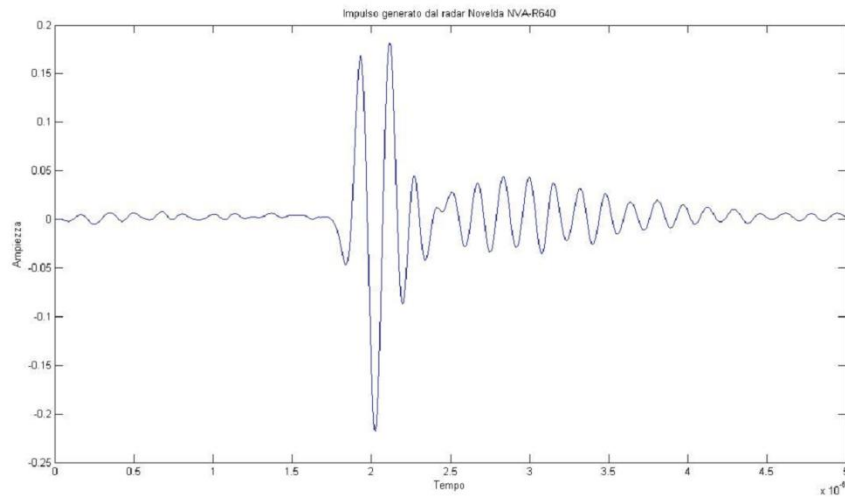


Figura 24: Impulso generato dal chip NVA-R6000.

Il radar invia periodicamente impulsi UWB con una certa frequenza di ripetizione (*PRF*) e raccoglie i campioni del segnale riflesso dall'ambiente circostante in una finestra di osservazione limitata, di durata T_f , a partire da un tempo selezionabile (frame offset¹⁵). La *PRF* può arrivare fino a 48 MHz e scegliendo il tempo di campionamento più basso (26 ps come già descritto), la finestra di osservazione ha durata pari a circa $T_f = 13,3$ ns (considerando 512 campioni acquisibili contemporaneamente) che corrisponde a circa 2 metri di osservazione:

$$d = \frac{c \cdot \text{campioni} \cdot t_c}{2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 512 \cdot 26 \cdot 10^{-12}}{2} = 1,99 \text{ [m]}$$

dove:

- c = velocità della luce
- t_c = tempo di campionamento

Il radar è provvisto di due antenne, una trasmittente e una ricevente (di dimensioni 45 x 45 x 15 mm), entrambe con dielettrico per aumentarne la direttività. In questo modo il cono di apertura risulta essere 40° (verticale) x

¹⁵ Frame offset: controlla l'offset sull'asse orizzontale ed è un parametro regolabile. Questo valore indica il punto dal quale il radar inizia a rilevare il segnale di eco.

35° (orizzontale) con guadagno di 6,7 dB. Senza i dielettrici il cono di apertura risulta essere 65° (verticale) x 85° (orizzontale) con guadagno di 6 dB. Presentano impedenza di 50 Ohm, polarizzazione lineare e potenza massima di emissione pari a 1W EIRP.

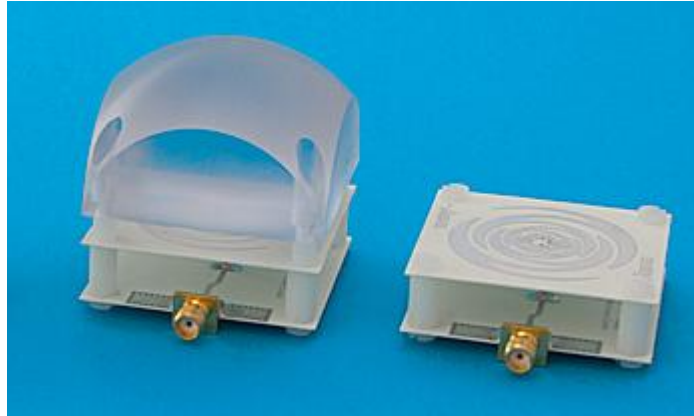


Figura 25: Antenna con dielettrico (sinistra) e senza dielettrico (destra). [36]

Il radar è interfacciabile al PC tramite cavo USB ed è gestibile direttamente attraverso il software Radar Scope, distribuito da Novelda insieme al radar. Il software permette la configurazione manuale dei parametri di funzionamento del radar ed è provvisto di 2 schermate principali di cui una consente di osservare l'eco ricevuto dal radar in tempo reale mentre l'altra è una gray map che visualizza il segnale scelto come sorgente in scala di grigi.

Novelda offre anche utili script per interfacciare il radar con ambiente Matlab, dando quindi la possibilità di rielaborare il segnale ricevuto senza pregiudicare la possibilità di effettuare la configurazione manuale dei parametri di funzionamento.

3.2 Il movimentatore

Come si vedrà nei capitoli seguenti, si è reso necessario avere a disposizione un supporto in grado di alloggiare il radar e muoverlo in maniera precisa, lungo due direzioni (orizzontale e verticale). Ecco dunque che la costruzione del movimentatore è stata parte integrante del presente lavoro di tesi.

Il sistema migliore per permettere un preciso movimento lungo due direzioni è quello che ricorda una fresatrice industriale (figura 26) “semplificata” considerando in effetti che questo macchinario è in grado di spostare un utensile in tutte e tre le dimensioni spaziali. Per lo scopo del presente lavoro di tesi, il movimentatore risulterebbe anche meno sofisticato in quanto necessita solo di due movimenti spaziali e non prevede lo spostamento di un utensile con motore elettrico annesso ma basta un supporto dove alloggiare il radar (un semplice piano di appoggio).



Figura 26: Fresatrice industriale.

Vista la necessità di automatizzare lo spostamento del radar, consentendo scansioni 2D o lungo una linea di una lastra di materiale, la movimentazione non deve essere manuale. Probabilmente è questa la parte più impegnativa

della costruzione: utilizzare dei motori elettrici e interfacciarli con il PC per il loro controllo.

3.2.1 Costruzione del movimentatore: parte meccanica

Per quanto riguarda la mera parte “meccanica” del movimentatore, l’idea dunque è quella di costruire un supporto concettualmente simile alla fresatrice di figura 26, senza utensile e con solo due assi. Per minor costi e per facilità di lavorazione si è scelto di costruire il telaio in legno compensato, con spessore variabile in relazione delle caratteristiche della parte da costruire. Lo spostamento lungo una linea retta, e la sua precisione, sono permessi grazie all’uso di guide lineari con carrelli a ricircolo di sfere come in figura 27:



Figura 27: Guida lineare con carrello a ricircolo di sfere. [37]

In particolare si sono scelte guide lineari con carrello modello SHS-15C della THK[®]. E’ il modello più piccolo della famiglia ma ampiamente sufficiente per lo scopo in questione; ogni carrello è in grado di reggere un carico statico di 14,7 kN ben al di sopra dei 300 grammi del peso del radar Novelda. Ottime anche prestazioni in termini di momento statico di ogni singolo carrello anche

se riguardo questo aspetto è stata fatta la scelta di adoperare due guide (e quindi due carrelli) per ogni asse di spostamento. In questo modo si garantisce rigidità su tutta la lunghezza di spostamento (sia orizzontale che verticale) soprattutto riguardo l'asse orizzontale che deve reggere il peso contemporaneo del sistema di movimentazione verticale ad esso appoggiato, e del radar. Come mostrato in figura 28, le due guide lineari sono avvitate su tavola di compensato di spessore 15 mm. L'escursione massima lungo l'asse orizzontale (a cui si darà il nome di asse x) è di 380 mm; per fare questo si sono adoperate 4 guide lineari da 240 mm ognuna che, accostate di testa a due a due, danno una lunghezza complessiva di 480 mm.



Figura 28: Guide lineari asse x.

Sopra i due carrelli è stata fissata una lastra 100x200 mm di alluminio di spessore 10 mm. Questa ha il compito di reggere tutto il sistema di spostamento dell'asse verticale (a cui si darà il nome di asse z). L'asse z è concepito allo stesso modo dell'asse x; ovviamente occorrerà aggiungere ulteriori supporti per mantenere la rigidità del piano verticale di compensato che deve rimanere ortogonale alla piastra di alluminio posta sopra i carrelli

dell'asse x. L'escursione massima lungo l'asse z è di 340 mm; per fare questo si sono adoperate 2 uniche guide lineari di lunghezza 340 mm.

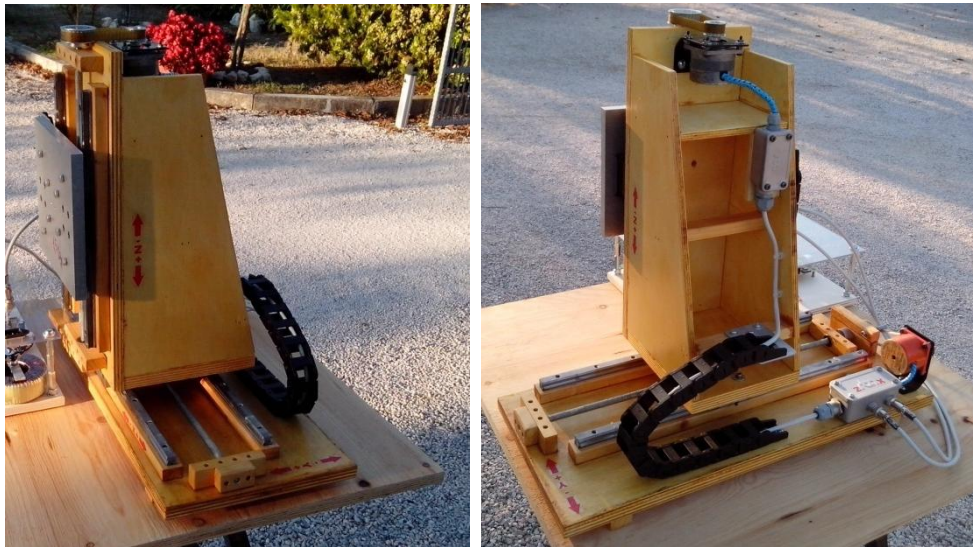


Figura 29: Particolari di montaggio del sistema di movimentazione dell'asse z sul sistema di movimentazione dell'asse x.

Sui due carrelli che costituiscono il sistema di movimentazione dell'asse z viene fissata una lastra di alluminio 200x200 mm di spessore 10 mm sulla quale verrà fissato il supporto per il radar.

Per quanto riguarda la tecnica di spostamento, il tutto si basa su utilizzo di vite senza fine di diametro 8 mm che percorre tutta la lunghezza del proprio asse di utilizzo. La vite senza fine è libera di ruotare su due cuscinetti a sfera fissati su basetta di legno (comunque smontabili). Sotto la piastra di alluminio dell'asse x e sotto la piastra di alluminio dell'asse z, è stato fissato un "cubo" di alluminio con foro opportunamente filettato, dove scorre la vite senza fine. Girando, la vite si trascina dietro il "cubo" (in figura 30 il cubo è arancione) il quale a sua volta sposta la piastra di alluminio e quindi i carrelli. La vite senza fine è solidale ad una puleggia che viene azionata (tramite cinghia) da un motore passo-passo.



Figura 30: Particolare del sistema di spostamento (in figura dell'asse x, ma il sistema è lo stesso anche per l'asse z).

3.2.2 Costruzione del movimentatore: parte elettronica

Come già accennato nel paragrafo precedente, il moto è possibile grazie all'impiego di due motori elettrici di tipo passo-passo, uno per ogni asse di moto. I due motori passo-passo sono di tipo bipolare e compiono un giro completo in 200 step e quindi presentano una precisione angolare di $1,8^\circ$ per step. Sia il motore x (relativo all'asse x), sia il motore z (relativo all'asse z) assorbono 1,1 Ampere e 3,3 Volt per fase.

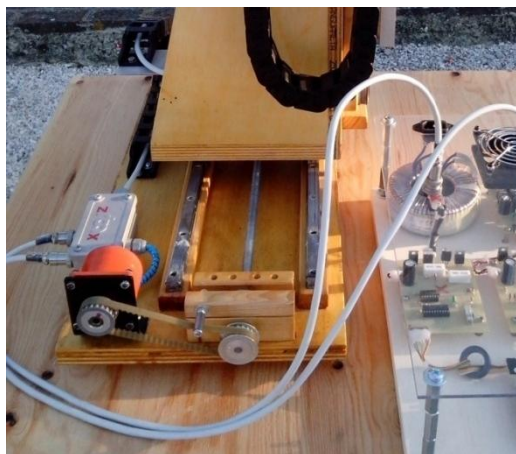


Figura 31: Particolare di montaggio del motore x.

I motori passo-passo presentano una grande precisione anche perché, come dice il nome stesso, si muovo di un passo alla volta ed è proprio il numero di passi per giro che ne determinano la precisione; per migliorarne la qualità si può adottare anche un rapporto di trasmissione diverso da 1, come fatto per il motore z dove il rapporto di trasmissione tra motore e puleggia è di 1,6 mentre per il motore x si è mantenuto un rapporto unitario. Di contro questo tipo di motori hanno bisogno di una logica di controllo non banale ma vista la loro ampia diffusione, in letteratura si trovano diverse soluzioni, alcune più antiche altre più recenti. Innanzitutto la logica dipende dal tipo di motore passo-passo; come già detto i motori x e z sono di tipo bipolare e, come si può vedere dalla figura 32, presentano 4 fasi ovvero per far compiere al rotore un giro completo occorre alimentare in sequenza prima la fase 1, poi la fase 2, la fase 3 e infine la fase 4; in un motore bipolare quindi lo statore è costituito da 4 avvolgimenti (A_1 , A_2 , B_1 , B_2) ognuno dei quali genera una fase.

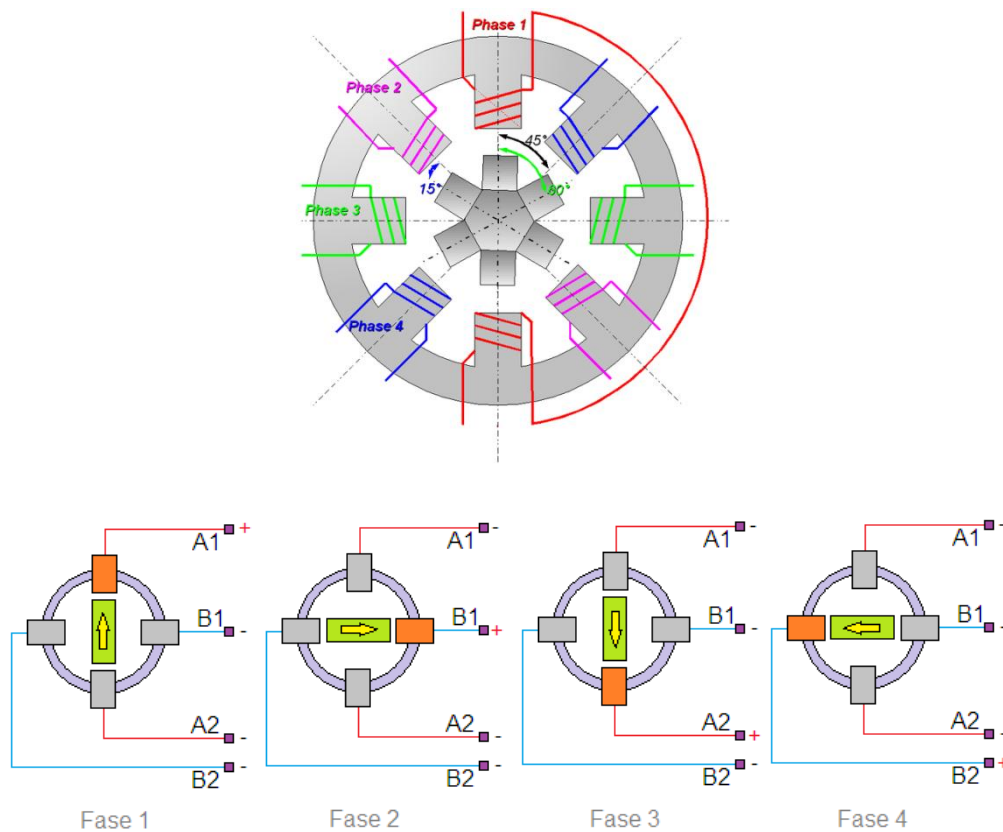


Figura 32: Principio di funzionamento di un motore passo-passo bipolare. [34]

L'architettura logica più semplice e diffusa utilizza la coppia di integrati L297-L298 opportunamente studiati per i motori passo-passo. L'integrato L297 genera il segnale di pilotaggio per attivare gli avvolgimenti del motore bipolare mentre l'integrato L298 è un integrato di potenza ovvero prende il segnale di pilotaggio di bassa potenza e in base a questo lascia passare il segnale di alta potenza necessario per alimentare il motore¹⁶. Visto l'alto costo dell'integrato L298, si è provveduto a costruire un circuito di potenza utilizzando componenti discreti; il nocciolo di questo circuito sono 4 transistor MOSFET ognuno dei quali riceve sul proprio gate il segnale di pilotaggio. Ogni volta che il gate viene eccitato, il transistor lascia passare corrente tra source e drain; in sostanza il transistor si comporta come un interruttore che lascia passare corrente di alimentazione ogni qualvolta al suo gate arriva il segnale di pilotaggio generato dal L297.

L'integrato L297 genera un preciso segnale di pilotaggio interpretando i comandi di direzione e velocità che riceve; questi comandi possono essere generati manualmente attraverso un interruttore (per la direzione) e un segnale di onda quadra che scandisce il clock e quindi la velocità con cui far muovere i motori.



Figura 33: PIC18F4550 della Microchip. [22]

¹⁶ I motori passo-passo adoperati assorbono 3,3 Ampere di corrente e quindi hanno bisogno di una alimentazione “di potenza” in quanto il segnale di pilotaggio generato dal L297 della logica di controllo risulta insufficiente per alimentare direttamente i motori. Il circuito di potenza non fa altro che alimentare i motori con la giusta corrente, in base al segnale di pilotaggio.

Data la necessità di rendere il sistema controllabile da PC attraverso Matlab, si è scelto di utilizzare un microcontrollore che, opportunamente programmato, sia in grado di comunicare con il PC attraverso porta USB e sia in grado di interpretare i comandi inviati da Matlab, in comandi da inviare all'integrato L297 per azionare i motori. Si è scelto di adoperare il microcontrollore PIC18F4550 della Microchip® (figura 33). La Microchip fornisce inoltre tutta la strumentazione hardware e software necessaria per la programmazione nonché programmi già impostati per diverse esigenze come l'interfacciamento microcontrollore-PC tramite USB. La programmazione viene effettuata in ambiente C++ grazie al compilatore MPLABC18 fornito dalla casa. La comunicazione USB avviene secondo protocollo seriale ovvero si utilizza fisicamente la porta USB ma viene emulata la porta seriale, più facile da gestire, che tra l'altro è già implementata in Matlab.

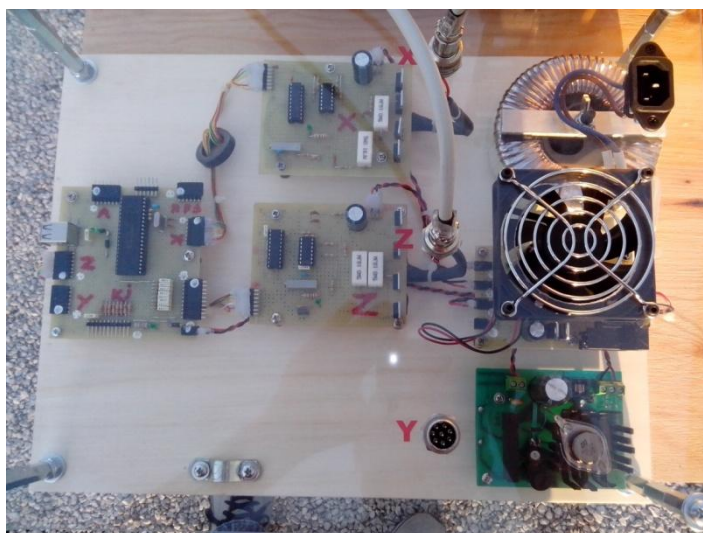


Figura 34: Elettronica di comando. Da sinistra a destra, la prima scheda contiene il microcontrollore PIC18F4550 e porta USB. Da qui il comando passa alle due schede successive, una per il motore x e l'altra per il motore z. Ogni scheda contiene l'integrato L297 e 4 transistor di potenza. L'alimentazione di potenza è garantita dall'alimentatore composto da trasformatore toroidale e raddrizzatore, il tutto raffreddato con una ventola.

Capitolo 4

Rilevamento di difetti: decisione tra lastra sana o danneggiata

Come già specificato nell'introduzione, l'obiettivo è quello di determinare un algoritmo e una metodologia in base alla quale sia possibile determinare se un manufatto presenta o meno una certa difettologia. Verranno effettuate prove utilizzando lastre di materiale composito di diverse dimensioni e con diverse tipologie di difetti ricreati.

Il principio di base su cui poggiare il ragionamento è utilizzare il radar UWB Novelda per osservare una serie di lastre poste ad una certa distanza dallo stesso e confrontare le differenti forme d'onda che ogni lastra può presentare. Ovviamente le lastre sane presenteranno una stessa forma d'onda, anche ripetendo l'analisi più volte (ma mantenendo le stesse condizioni di base come distanza dal radar e dimensioni della lastra); lastre con difetti differenti presenteranno forme d'onda differenti. L'algoritmo da sviluppare in ambiente Matlab deve essere in grado di valutare la differenza fra la forma d'onda della lastra sana (che sarà il *template*, ovvero la forma d'onda di confronto) e quella della lastra danneggiata. Quando la differenza supererà un certo valore (o soglia) da determinare in maniera opportuna, vuol dire che la lastra in esame presenta una "differenza" e quindi un difetto rispetto alla lastra sana.

4.1 Scenario nel quale sono state effettuate le misurazioni

Sono stati preparati differenti tipologie di provini che comprendono lastre in materiale composito in fibra di carbonio di dimensioni 300x300 mm con spessore 4 mm e lastre in Nomex 100 x 150 mm di spessore 8 mm. Il Nomex è

una particolare struttura a nido d'ape utilizzata in questo caso come core tra due skin in fibra di carbonio, costituito da una sostanza a base di meta-aramide, derivante dal kevlar.



Figura 35: Tipologie di lastre utilizzate, senza difetti.

Per ogni tipologia di lastra se ne è lasciata una senza alcun tipo di difetto che funge da template, ovvero da confronto per le altre che presentano difettologie riprodotte di varia natura. I difetti riprodotti nei provini comprendono foro da 6 mm, inclusione costituita da volumetto cilindrico di materiale metallico di diametro 6 mm, difetto superficiale costituito da materiale composito in fibra di carbonio di dimensioni 6 x 6 mm. Per il Nomex si è ricreato solo il difetto costituito dal volumetto di materiale metallico posto tra le due skin, annegato nel core ma comunque affiorante in superficie.

I difetti riprodotti hanno dimensioni ben più grandi di quelle riscontrabili nei materiali compositi per il semplice motivo che il radar a disposizione presenta una risoluzione spaziale di 4 mm; sarebbe stato inutile riprodurre difetti più piccoli della risoluzione spaziale del radar.

Durante le misurazioni il radar non è stato utilizzato nella sua configurazione classica (come mostrato nel capitolo 3) ma si è cercato di ridurre la distanza tra le antenne in modo che i coni di irradiazione trasmittente e ricevente si

intersechino ad una distanza, di fronte al radar, inferiore rispetto a quella di default¹⁷.

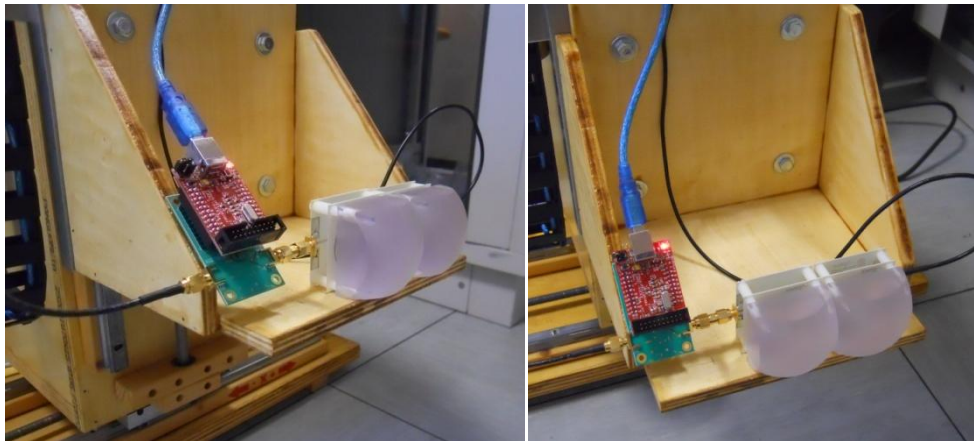


Figura 36: Nuova configurazione del radar utilizzata per le prove.

Come si vede dalla figura 36, l'antenna ricevente è stata smontata dalla sua posizione iniziale e collocata vicino all'antenna trasmittente; il collegamento è ripristinato con cavo coassiale.

Si ricorda che l'obiettivo del lavoro presentato in questo capitolo è quello di illuminare l'intera lastra con un fascio di onde radar UWB e confrontare il relativo segnale di ritorno con quello relativo alla lastra sana (template) per scorgere eventuali differenze che sono sintomo della presenza di difetti. Non bisogna fare quindi alcuna scansione e l'obiettivo è quello di fare in modo che il fascio di onde UWB investa completamente la lastra da visionare. La distanza tra radar e lastra sarà quindi dipendente dalle dimensioni della lastra in questione, considerando che, come già osservato, l'antenna trasmittente irradia il segnale in un cono di apertura 40° verticale e 35° orizzontale. Il radar è fermo ed è posizionato sul movimentatore posto in modo tale da rispettare le caratteristiche di cui sopra; ovviamente il radar è in posizione centrale rispetto alla lastra da visionare.

¹⁷ Bisogna fare attenzione perché questo può portare comunque a problemi di accoppiamento dalle antenne (Lickage).

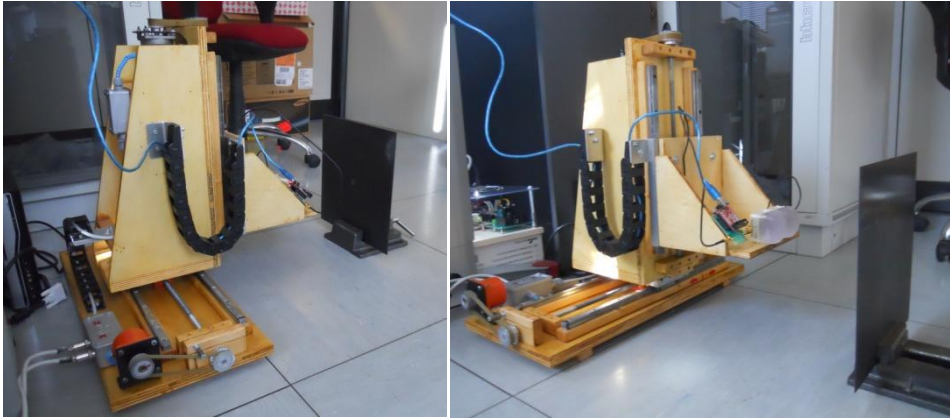


Figura 37: Posizionamento radar-lastra.

Le prove utilizzando la lastra in Nomex prevedono quindi una distanza radar-lastra di 200 mm mentre le prove utilizzando la lastra 300 x 300 mm prevedono una distanza radar-lastra di 400 mm. Il radar, come detto, è posto in posizione centrale; nella nuova configurazione ciò corrisponde a porre le antenne simmetricamente rispetto alla linea centrale di osservazione.

4.2 Software utilizzato per l'acquisizione

Il software utilizzato per raccogliere le forme d'onda è in ambiente Matlab e consente di gestire in maniera semplice tutti i parametri per il controllo del sistema di trasmissione, come la frequenza di ripetizione degli impulsi, il numero di campioni da acquisire ecc. I parametri principali per gestire il radar sono:

```
Variables('AveragingFactor') = 100;  
Variables('Gain') = 6;  
Variables('ZoomMin') = 0;  
Variables('ZoomMax') = 100;  
Variables('FrameOffset') = 0;  
Variables('SamplingRate') = 0;
```

Il parametro *Averaging Factor*, è l'indice che definisce la media interna fatta dal radar per la ricostruzione del segnale in ricezione. Con il valore pari a 100, la forma d'onda ricostruita dal radar è frutto della media di 100 echi di ritorno. Il parametro *Gain*, controlla il fattore di guadagno dell'amplificatore in ricezione; 6 è il massimo valore utilizzabile. I parametri *ZoomMin* e *ZoomMax*, controllano la dimensione verticale della finestra in cui si osservano i segnali. Entrambi possono essere settati con valori compresi tra 0 e 100. Il parametro *Frame Offset*, controlla l'offset sull'asse orizzontale ovvero il punto dal quale il radar inizia a rilevare gli echi di ritorno. Il parametro *Sampling Rate*, controlla l'intervallo di campionamento; il valore 0 impone il passo di campionamento più piccolo pari a 26 ps. In tutte le prove presentate in questo capitolo, i parametri sono settati come sopra.

4.3 Forme d'onda acquisite e creazione del database

Per ogni osservazione vengono raccolte di continuo 1000 forme d'onda, ognuna costituita da 512 campioni. A fine osservazione quindi si viene a formare una matrice di 1000 righe e 512 colonne. Da questa si otterrà una unica forma d'onda. Per fare ciò si farà una media per colonna della matrice; per esempio, il primo campione della forma d'onda finale sarà ottenuto come media di ogni primo campione delle mille onde costituenti la matrice. La forma d'onda finale è del tipo presentata in figura 38:

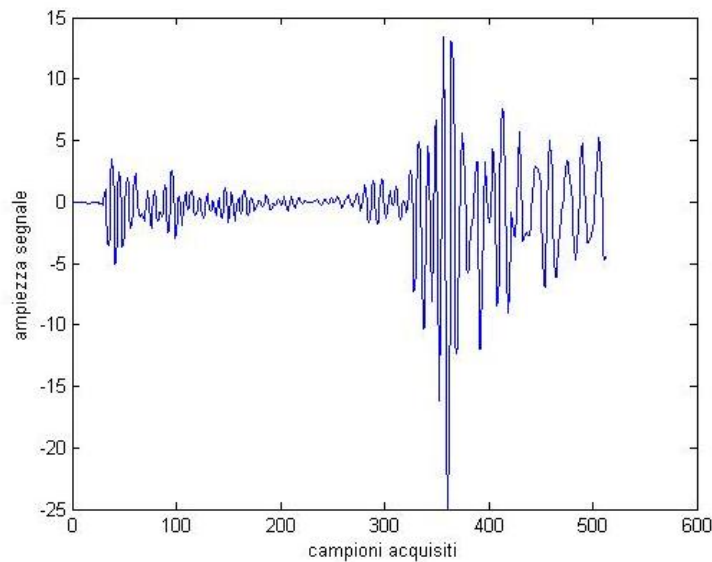


Figura 38: Tipica forma d'onda relativa ad una lastra 300x300 mm.

Ciò che si vede fino al campione 100 è l'accoppiamento tra le antenne, che rimane fisso per ogni acquisizione. Il segnale proveniente dalla lastra è compreso tra i campioni 300 e 400 mentre tutto ciò che si trova a valle è clutter insignificante ai fini dell'osservazione.

4.3.1 Errori di campionamento

La scheda di acquisizione del radar campiona con passo (scelto) di 26 ps che corrispondono a circa 4 mm spaziali. La risoluzione del radar dipende quindi da questo valore e non è sbagliato affermare che la tolleranza del radar risulti essere di ± 4 mm. In prima analisi si potrebbe pensare che ciò non comporti alcun tipo di problema in quanto se si effettuano più misurazioni sulla stessa lastra, sotto le medesime condizioni, ci si aspetta che il segnale di ritorno sia lo stesso ogni volta. In realtà c'è da considerare il fatto che mentre il segnale irradiato dall'antenna trasmittente e il rispettivo eco di ritorno sono "continuativi", la loro acquisizione può essere sfalsata di un tempo pari a ± 26 ps. Nelle misurazioni effettuate questo fenomeno comporta alcuni errori di

misura soprattutto dove il segnale ha un rateo di salita e di discesa marcato ovvero cambia l'ampiezza in un intervallo di campioni ristretto come accade per il segnale in corrispondenza della lastra (tra i campioni 300 e 400). Basti pensare in effetti che uno sfalsamento di ± 26 ps sul campionamento di un segnale analogico, comporta, per lo stesso campione, un valore di ampiezza di segnale totalmente differente. A riprova di questo si veda la figura 39 dove è stata calcolata la differenza, campione per campione, di due segnali acquisiti in maniera continuativa dalla stessa lastra senza difetti:

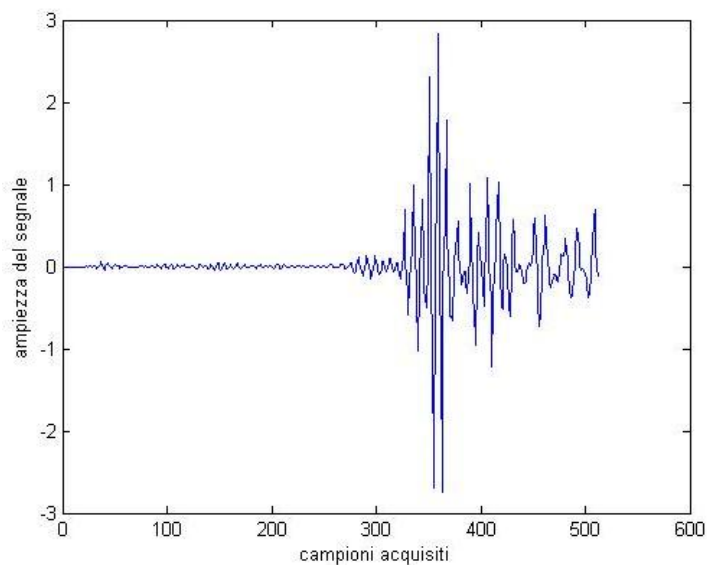


Figura 39: Differenza tra due segnali relativi alla stessa lastra sana e acquisiti in maniera continuativa.

In particolare, uno dei due segnali acquisiti dalla lastra sana è quello presentato in figura 38. Osservando la figura 39 si nota come a monte del campione numero 300, dove inizia il segnale di ritorno della lastra, la differenza è pressoché nulla, mantenendo un valore diverso dallo zero per via soprattutto di rumori nella misurazione; nel segnale in corrispondenza della lastra si riscontrano differenze ben più marcate, i cui valori raggiungono anche il 30% del segnale di partenza.

Per ovviare a questo problema si è pensato di effettuare un resampling e una interpolazione “via Matlab” del segnale. Si è adottato un rapporto di

ricampionamento pari a 7 (si è utilizzato il comando *resample*) e si è quindi proceduto alla ricostruzione del segnale che ora avrà 3584 campioni dai 512 di partenza (figura 40).

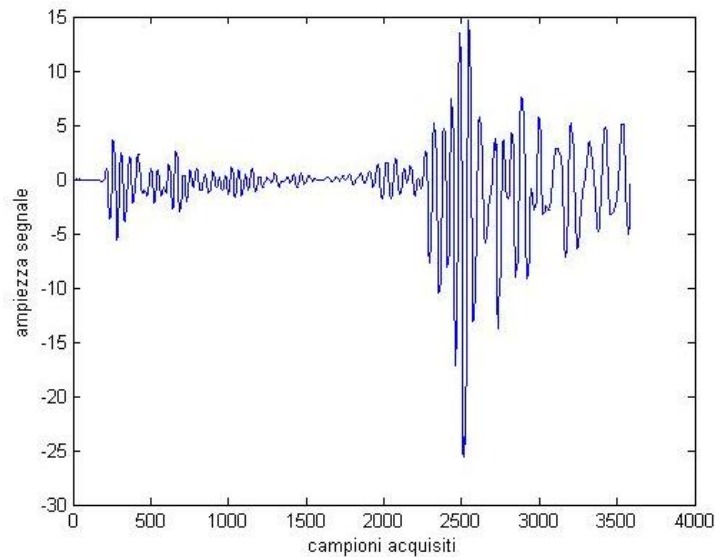


Figura 40: Segnale ricampionato in Matlab relativo alla lastra sana 300x300 mm.

Prima di ricalcolare la differenza, si è calcolata la posizione del picco della correlazione dei due segnali; se il picco di correlazione è spostato per esempio di un campione rispetto al valore “centrale” di autocorrelazione¹⁸, allora significa che i due segnali ricampionati sono “shiftati” di un campione e si procederà quindi al loro riallineamento. Come mostrato in figura 41, l’autocorrelazione del segnale ricampionato presenta un numero di campioni pari a 7168, ovvero il doppio del segnale ricampionato; ciò risponde alla proprietà dell’autocorrelazione in quanto si sta confrontando lo stesso segnale.

¹⁸ L’autocorrelazione fornisce in questo caso un segnale che si sviluppa intorno ad un picco massimo sul campione 3584 come in figura 41. Se il picco di correlazione è spostato rispetto a questa posizione, allora i due segnali sono shiftati di un numero di campioni pari allo spostamento del picco di correlazione dalla posizione 3584.

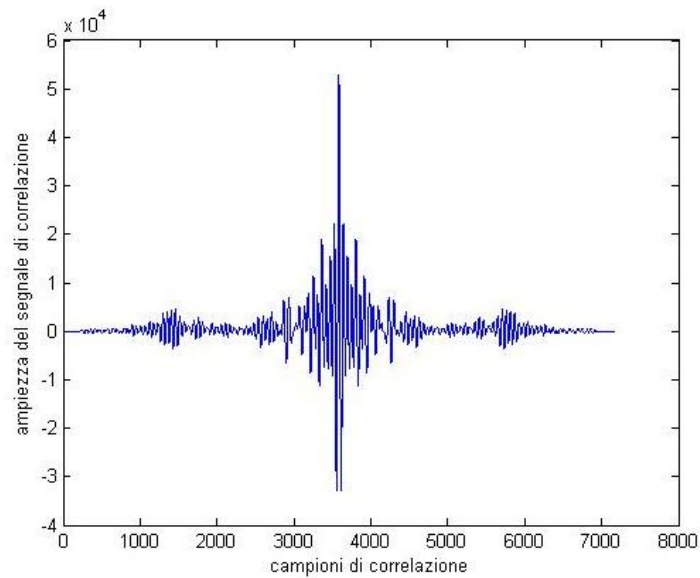


Figura 41: Autocorrelazione del segnale ricampionato relativo alla lastra sana.

La differenza fra i due segnali ricampionati non ha tuttavia risolto il problema come illustrato in figura 42.

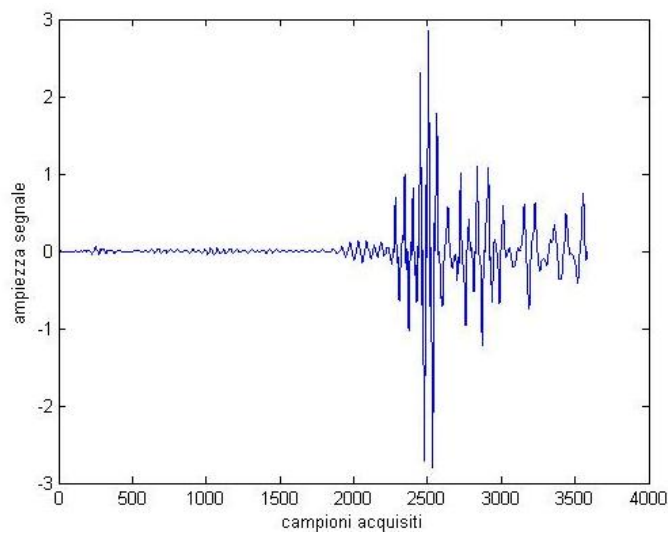


Figura 42: Differenza fra i due segnali ricampionati.

Per verificare che quanto detto avesse potuto apportare un miglioramento dei risultati finali, questa procedura è stata adottata in tutte le prove presentate nel seguito ma non si sono riscontrati dei miglioramenti e anzi, a volte si è assistito

ad un peggioramento. C'è in effetti da considerare che anche la ricostruzione del segnale ricampionato comporta degli errori. Nei capitoli seguenti quindi i risultati presentati non dipenderanno dalla procedura sopra descritta.

4.4 Modelli matematici utilizzati

Per confrontare le lastre danneggiate con quelle sane, sono stati adottati alcuni modelli matematici che verranno presentati nel seguito. Alcune delle tecniche adottate sono ottenibili applicando la teoria della decisione, altre sono invece euristiche). Analizzando poi i risultati delle prove si suggerirà la bontà di ognuno. Il principio su cui si sta lavorando è quello di determinare la differenza tra il segnale relativo alla lastra sana con quello relativo alla lastra danneggiata.

4.4.1 Quadrato della differenza campione per campione

Come recita il titolo del paragrafo, si procede a sommare di volta in volta il quadrato della differenza delle ampiezze di segnale relative allo stesso campione delle due onde. Da un punto di vista matematico:

$$\sum_{k=1}^{512} (d_k - s_k)^2 \quad (4.1)$$

Dove:

- d = segnale relativo alla lastra danneggiata
- s = segnale relativo alla lastra sana
- k va da 1 a 512 in quanto ogni onda è costituita da 512 campioni

La 4.1 restituirà un valore che rappresenta la somma di tutti i quadrati delle differenze campione per campione tra le due onde.

4.4.2 Differenza semplice campione per campione

In sostanza si procede a sommare di volta in volta la differenza campione per campione tra i due segnali. Da un punto di vista matematico:

$$\sum_{k=1}^{512} (d_k - s_k) \quad (4.2)$$

La 4.2 restituirà un valore che rappresenta la somma di tutte le differenze campione per campione tra le due onde.

4.4.3 Differenza tra i valori assoluti dei segnali

In sostanza si procede a calcolare dapprima il valore assoluto dei due segnali che corrisponde a “ribaltare” ogni picco negativo nel semipiano positivo; si procede poi a sommare l’ampiezza di segnale campione per campione. Da ogni onda si otterrà quindi un valore dai quali infine si calcolerà la loro differenza. Da un punto di vista matematico:

$$\sum_{k=1}^{512} |d_k| - \sum_{k=1}^{512} |s_k| \quad (4.3)$$

4.4.4 Correlazione tra i segnali

La correlazione o cross-correlazione (o inter-correlazione) è un interessante strumento per l’analisi dei segnali nel dominio del tempo, in particolare per stabilirne il loro grado di somiglianza. Dati due segnali discreti $d(n)$ e $s(n)$, di n campioni ($n = 512$ per quanto detto precedentemente), la loro correlazione è definita come:

$$R_{ds} \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} (d[m] + s[m + n]) \quad (4.4)$$

Se i due segnali $d(n)$ e $s(n)$ sono in realtà lo stesso segnale, si parla di autocorrelazione. In Matlab la correlazione di due segnali si calcola con il comando *xcorr*.

4.5 Risultati

Nel seguito verranno presentati i risultati relativi al confronto fra lastre danneggiate e lastre sane, utilizzando i procedimenti matematici descritti precedentemente. Le prove sono state effettuate nel laboratorio di Elettronica e Telecomunicazioni del polo scientifico e didattico di Cesena, Università di Bologna.

Vengono effettuate 10 rilevazioni sulla lastra danneggiata e 10 rilevazioni sulla lastra sana; le 10 rilevazioni sulla lastra danneggiata vengono ogni volta messe a confronto con una delle 10 rilevazioni della lastra sana. Nei grafici che seguiranno, in nero saranno rappresentati i valori relativi al confronto (in base al modello matematico in questione) fra le 10 acquisizioni sulla lastra danneggiata con le 10 acquisizioni sulla lastra sana; ogni volta, le 10 acquisizioni relative alla lastra danneggiata vengono confrontate con una delle 10 rilevazioni relative alla lastra sana. In totale quindi, in nero, saranno rappresentati 100 valori di confronto. In rosso, sono rappresentati i valori relativi al confronto (in base al modello matematico in questione) fra le stesse 10 acquisizioni relative alla lastra sana. Questo ha lo scopo di mettere in luce eventuali errori di misura e rumori presenti nell'ambiente che, di volta in volta, alterano il reale template, ovvero alterano il segnale relativo alla lastra sana (e ovviamente anche quello della lastra danneggiata). In sostanza, non basta fare una singola rilevazione sulla lastra sana e prendere questa come template per ogni prova; per validare ancora di più i metodi matematici adottati è necessario considerare anche le differenze di segnale che per via di rumori ed errori di misura si vengono a creare sulla stessa rilevazione ripetuta nel tempo.

I risultati ottenuti invece tramite correlazione dei segnali relativi alla lastra sana con quelli relativi alla lastra danneggiata, sono presentati in forma percentuale in funzione del picco di autocorrelazione del segnale relativo alla lastra sana utilizzato per il confronto. In sostanza, i picchi di correlazione derivanti dalla correlazione tra i 10 segnali relativi alla lastra danneggiata con (per esempio) il segnale della prima acquisizione della lastra sana, sono stati “normalizzati” rispetto al picco di autocorrelazione del segnale del template di riferimento (che, nell’esempio citato è il primo segnale relativo alla lastra sana).

4.5.1 Discontinuità in materiale composito in lastra 300x300 mm

Si consideri la lastra 300x300 mm in cui è stato ricreato un difetto che riproduce una discontinuità sempre del medesimo materiale. In sostanza è stato posto un cubetto di materiale composito in fibra di carbonio annegato nella lastra e affiorante in superficie.

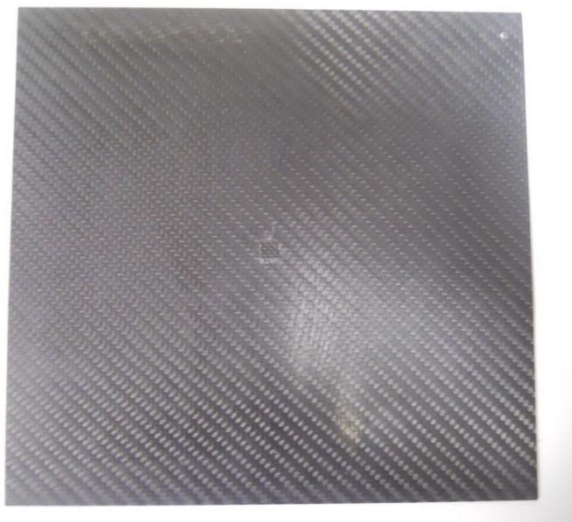


Figura 43: Lastra 300x300mm con difetto in carbonio.

Come template per il confronto viene presa una lastra di materiale composito in fibra di carbonio di dimensioni 300x300 mm senza alcun difetto.

1) *Quadrato della differenza campione per campione*

Come si può vedere dalla figura 44, la differenza fra lastra sana e lastra danneggiata risulta essere di più di un ordine di grandezza rispetto alle differenze di segnale tra le varie acquisizioni del template.

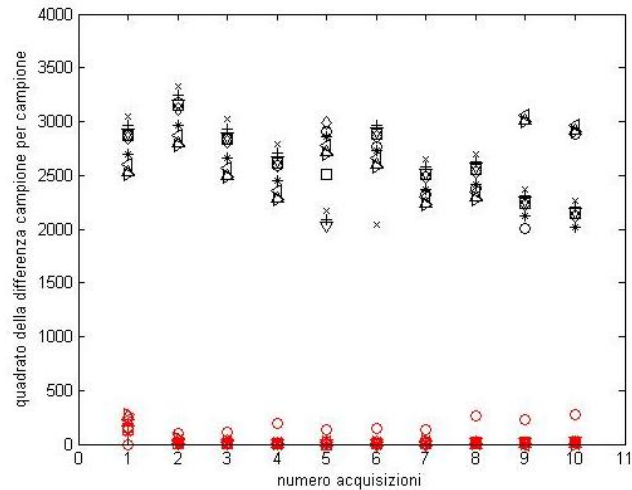


Figura 44: Difetto in carbonio - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.

2) *Differenza semplice campione per campione*

Come si può vedere dalla figura 45, la differenza fra lastra sana e lastra danneggiata utilizzando la sola differenza campione per campione risulta essere meno robusta agli errori di misura e al rumore infatti, la differenza di segnale che si riscontra tra le varie acquisizioni del template risulta essere dello stesso ordine di grandezza e anzi, di poco inferiore alla differenza di segnale tra lastra sana e lastra danneggiata.

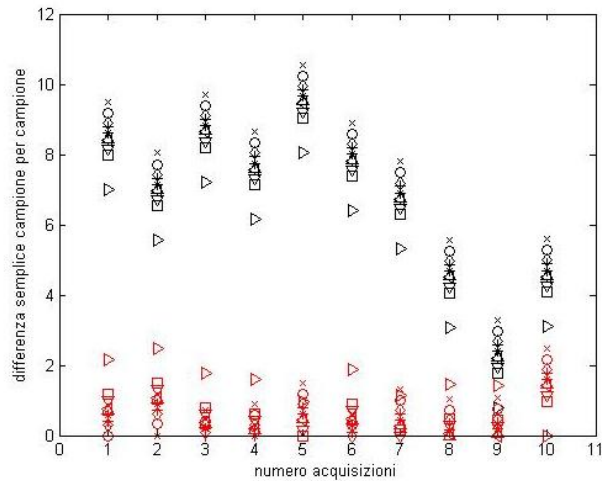


Figura 45: Difetto in carbonio - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza semplice.

3) Differenza fra i valori assoluti dei segnali

Dalla figura 46 si nota come il metodo risulti essere totalmente inadeguato per garantire una corretta individuazione della lastra danneggiata in questione.

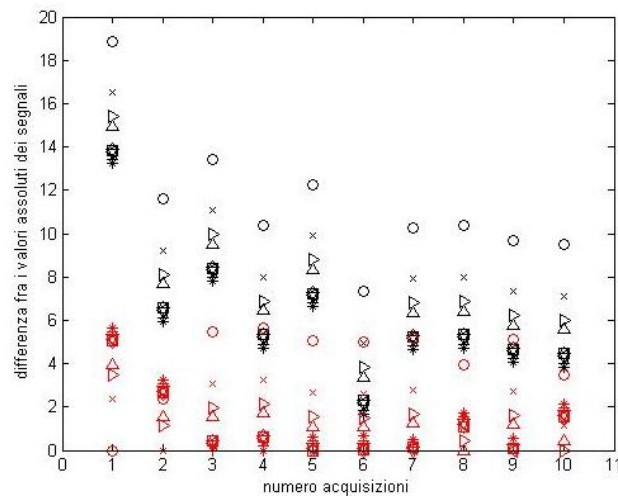


Figura 46: Difetto in carbonio - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.

4) *Correlazione tra i segnali*

In figura 47 è presentato il grafico che racchiude le differenze tra il segnale relativo alla lastra sana e quello relativo alla lastra danneggiata (in nero) e le differenze tra le diverse acquisizioni relative alla stessa lastra sana (in rosso) in termini di percentuale di correlazione. Si nota come correlando tra di loro i segnali provenienti dalla stessa lastra sana, il risultato è valori prossimi al 100% ovvero questi 10 segnali sono tra di loro molto simili (in rosso nel grafico). Confrontando di volta in volta i 10 segnali relativi alla lastra danneggiata con ognuno dei segnali relativi alla lastra sana, si nota (in nero nel grafico) come la correlazione si attesti in media intorno al 94% il che denota la differenza esistente tra lastra sana e danneggiata.

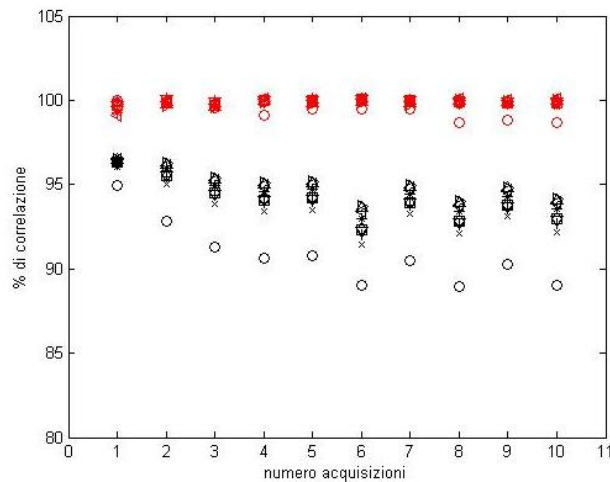


Figura 47: Difetto in carbonio - Il grafico mostra la percentuale di correlazione tra i segnali della lastra danneggiata e quella sana (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali della stessa lastra sana (in rosso).

Inoltre, calcolando la posizione del picco di correlazione tra i segnali relativi alla lastra danneggiata con i segnali relativi alla lastra sana, questo è shiftato di un campione (campione 511 invece che 512) il che sottolinea ancora la presenza di una differenza marcata tra i segnali in questione.

4.5.2 Inclusione di materiale metallico in lastra 300x300 mm

Si consideri la lastra 300x300 mm in cui è stato ricreato un difetto rappresentato da un volumetto di materiale metallico annegato nella lastra e affiorante in superficie.



Figura 48: Lastra 300x300 mm con difetto in metallo.

Come template per il confronto viene utilizzata sempre la lastra sana 300x300 mm in materiale composito che viene nuovamente acquisita, pertanto i dati relativi alla lastra sana presenteranno alcune differenze rispetto a quanto visto nell'analisi precedente.

1) Quadrato della differenza campione per campione

Come si può vedere dalla figura 49, la differenza fra lastra sana e lastra danneggiata risulta essere di più di un ordine di grandezza rispetto alle differenze di segnale tra le varie acquisizioni del template. Rispetto all'analisi condotta precedentemente con il difetto in carbonio si vede come il difetto metallico viene "visto" in maniera più limpida.

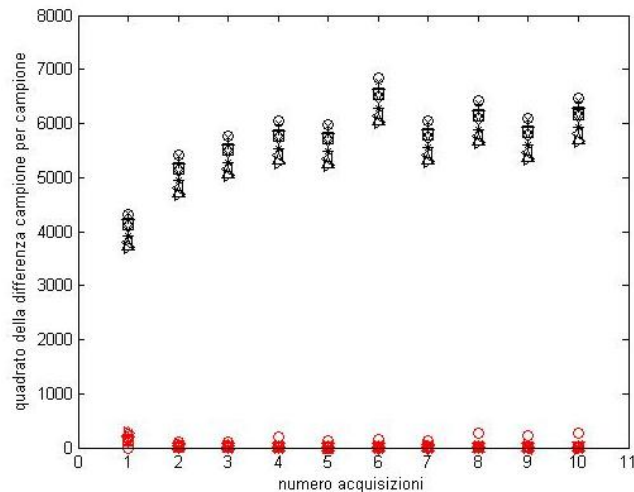


Figura 49: Difetto in metallo – Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.

2) *Differenza semplice campione per campione*

Come si può vedere dalla figura 50, la differenza fra lastra sana e lastra danneggiata con difetto in metallo presenta una differenza più marcata rispetto al caso di difetto in carbonio (figura 45). Comunque anche in questo caso, nonostante il difetto sia visibile adottando questo modello matematico, occorre constatare che il quadrato della differenza campione per campione offre una robustezza maggiore ai rumori e agli errori di misura.

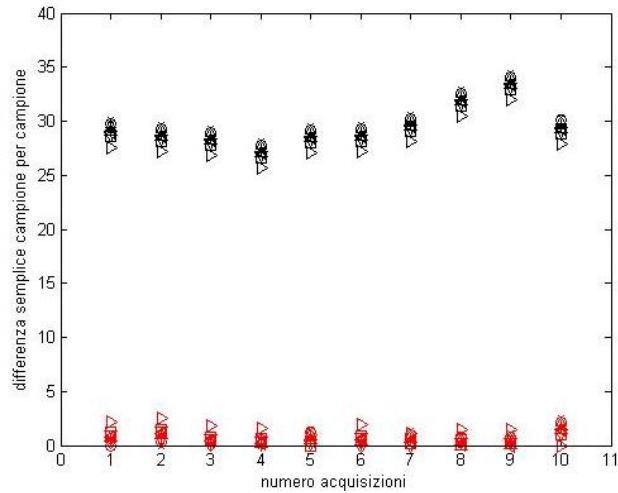


Figura 50: Difetto in metallo – Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso) con il metodo della differenza semplice.

3) Differenza fra i valori assoluti dei segnali

Dalla figura 51 si nota come il metodo, a differenza della prova con il difetto in carbonio, risulti essere efficace per la corretta individuazione della lastra danneggiata.

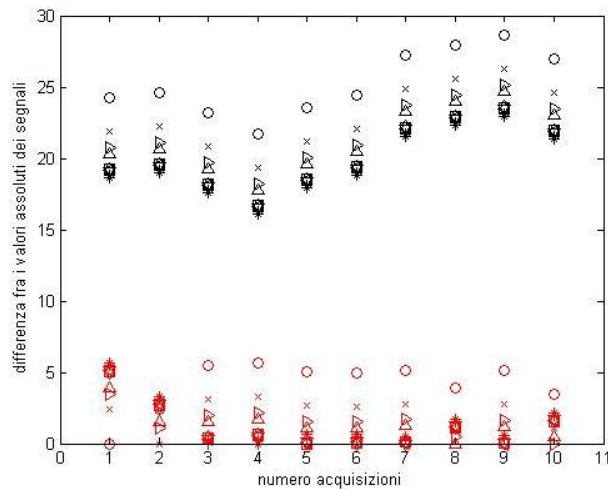


Figura 51: Difetto in metallo - Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.

4) Correlazione tra i segnali

In figura 52 è presentato il grafico che racchiude le differenze tra il segnale relativo alla lastra sana e quello relativo alla lastra danneggiata (in nero) e le differenze tra le diverse acquisizioni relative alla stessa lastra sana (in rosso) in termini di percentuale di correlazione. Si nota come correlando tra di loro i segnali provenienti dalla nuova acquisizione sulla lastra sana, il risultato è valori prossimi al 100% ovvero questi 10 segnali sono tra di loro molto simili (in rosso nel grafico).

Confrontando di volta in volta i 10 segnali relativi alla lastra danneggiata con ognuno dei segnali relativi alla lastra sana, si nota (in nero nel grafico) come la correlazione si attesti in media intorno al 90%; rispetto al difetto in carbonio il difetto in metallo amplifica la differenza con la lastra sana.

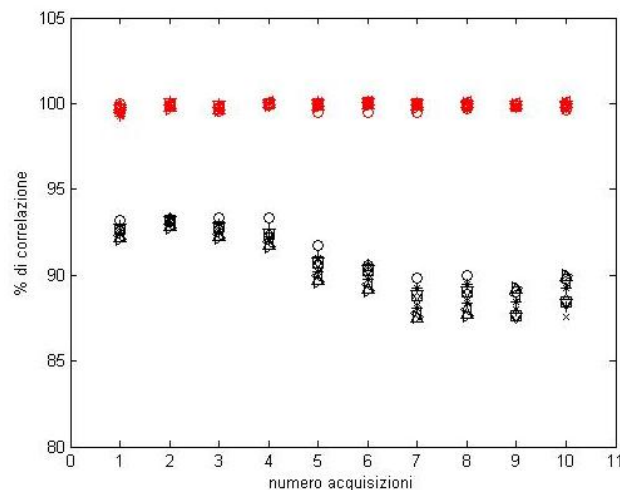


Figura 52: Difetto in metallo - Il grafico indica la percentuale di correlazione tra i segnali della lastra danneggiata e quella sana (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali della stessa lastra sana (in rosso).

Inoltre, anche in questo caso, calcolando la posizione del picco di correlazione tra i segnali relativi alla lastra danneggiata con i segnali relativi alla lastra sana, questo è shiftato di un campione (campione 511 invece che 512) il che

sottolinea ancora la presenza di una differenza marcata tra i segnali in questione.

4.5.3 Foro passante di diametro 6 mm in lastra 300x300 mm

Si consideri la lastra 300x300 mm in cui il difetto è rappresentato da un foro passante di diametro 6 mm al centro della lastra stessa.



Figura 53: Lastra 300x300 mm con foro passante.

Come template per il confronto viene utilizzata sempre la lastra sana 300x300 mm in materiale composito che viene nuovamente acquisita, pertanto i dati relativi alla lastra sana presenteranno alcune differenze rispetto a quanto visto nell'analisi precedente.

1) *Quadrato della differenza campione per campione*

Come si può vedere dalla figura 54, la differenza fra lastra sana e lastra danneggiata risulta essere di più di un ordine di grandezza rispetto alle differenze di segnale tra le varie acquisizioni del template.

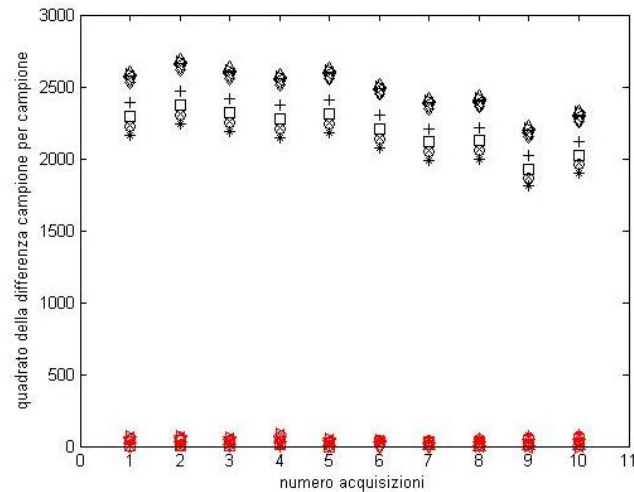


Figura 54: Difetto foro - Il grafico mostra le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.

2) *Differenza semplice campione per campione*

Come si può vedere dalla figura 55, la differenza semplice campione per campione fra lastra sana e lastra danneggiata con il foro non è in grado di determinare con certezza la presenza o meno del difetto.

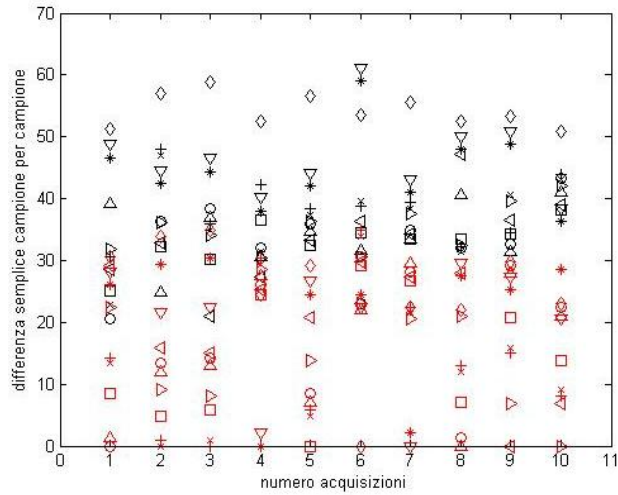


Figura 55: Difetto foro - Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso) con il metodo della differenza semplice.

3) Differenza fra i valori assoluti dei segnali

Dalla figura 56 si nota come il metodo, risulti essere efficace per la corretta individuazione della lastra danneggiata.

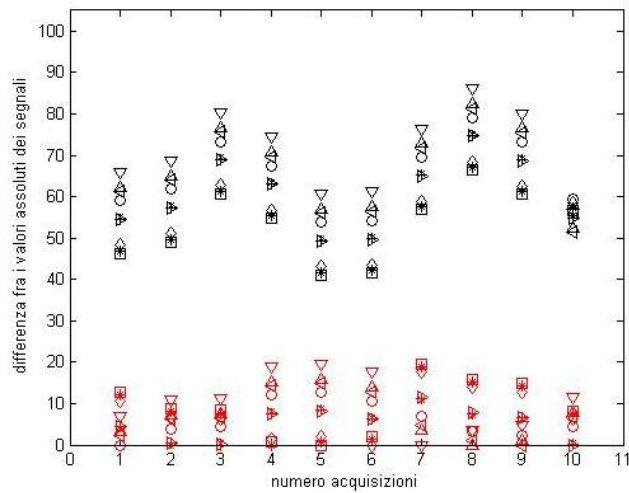


Figura 56: Difetto foro - Il grafico indica le differenze di segnale tra lastra danneggiata e lastra sana (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sulla stessa lastra sana (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.

4) Correlazione tra i segnali

In figura 57 è presentato il grafico che racchiude le differenze tra il segnale relativo alla lastra sana e quello relativo alla lastra danneggiata (in nero) e le differenze tra le diverse acquisizioni relative alla stessa lastra sana (in rosso) in termini di percentuale di correlazione. Si nota come correlando tra di loro i segnali provenienti dalla nuova acquisizione sulla lastra sana, il risultato è valori prossimi al 100% ovvero questi 10 segnali sono tra di loro molto simili (in rosso nel grafico).

Confrontando di volta in volta i 10 segnali relativi alla lastra danneggiata con ognuno dei segnali relativi alla lastra sana, si nota (in nero nel grafico) come la correlazione si attesti in media intorno al 88,7%.

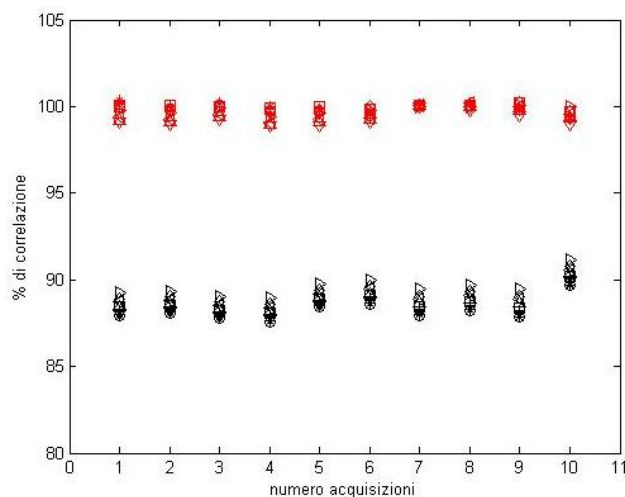


Figura 57: Difetto foro - Il grafico indica la percentuale di correlazione tra i segnali della lastra danneggiata e quella sana (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali della stessa lastra sana (in rosso).

Inoltre, anche in questo caso, calcolando la posizione del picco di correlazione tra i segnali relativi alla lastra danneggiata con i segnali relativi alla lastra sana, questo è shiftato di un campione (campione 511 invece che 512) il che sottolinea ancora la presenza di una differenza marcata tra i segnali in questione.

4.5.4 Inclusione di materiale metallico in Nomex 100x150 mm

Si consideri la lastra in Nomex di dimensioni 100x150 mm e spessore 8 mm. E' stato ricreato un difetto rappresentato da un volumetto di materiale metallico annegato nella lastra e affiorante in superficie. Viste le dimensioni più piccole della lastra in questione, la distanza di acquisizione si riduce a 200 mm (come già accennato).



Figura 58: Lastra in Nomex con difetto in metallo.

Come template per il confronto viene utilizzata una lastra in Nomex delle stesse dimensioni e ovviamente senza alcun difetto.

1) Quadrato della differenza campione per campione

Come si può vedere dalla figura 59, anche la differenza fra Nomex sano e Nomex danneggiato risulta essere di più di un ordine di grandezza rispetto alle differenze di segnale tra le varie acquisizioni del template. Anche in questo caso quindi il metodo risulta essere efficace per individuare il difetto.

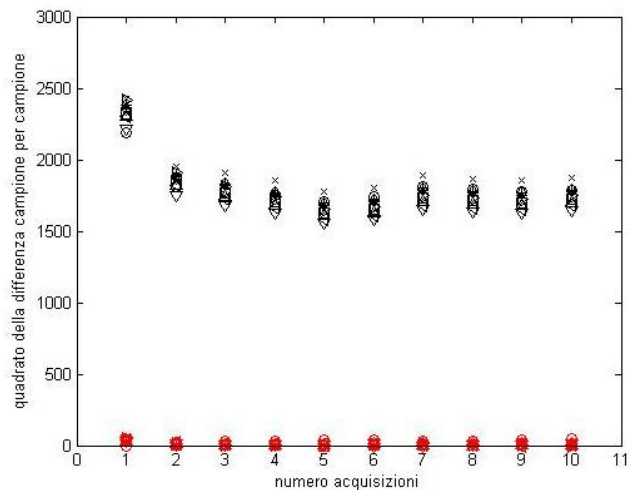


Figura 59: Difetto metallo - Il grafico mostra le differenze di segnale tra Nomex danneggiato e Nomex sano (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sullo stesso Nomex sano (in rosso), con il metodo del quadrato della differenza.

2) *Differenza semplice campione per campione*

Come si può vedere dalla figura 60, la differenza fra Nomex sano e Nomex danneggiato, utilizzando la sola differenza campione per campione, risulta essere efficace per determinare il difetto in questione; è chiaro che, come nel caso dello stesso difetto nella lastra in composito, un ruolo importante viene giocato dalla natura “metallica” del difetto ricreato. Infatti tanto più la differenza di impedenza elettromagnetica dei due materiali a contatto è differente, tanto più si avrà una riflessione in prossimità della zona di contatto. In parole povere il metallo è “più riflettente” sul carbonio a differenza di aria o altri materiali.

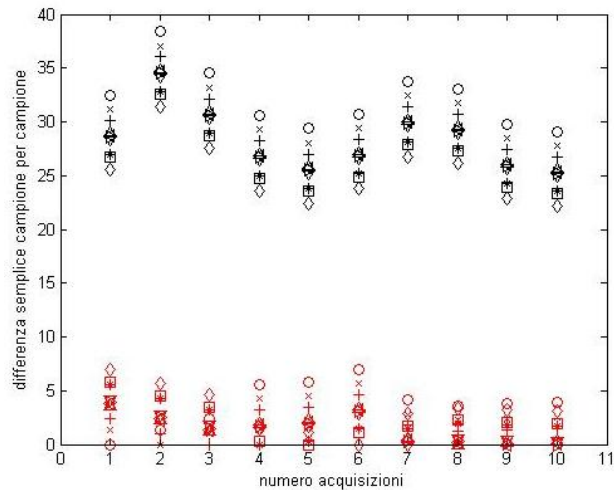


Figura 60: Difetto metallo - Il grafico indica le differenze di segnale tra Nomex danneggiato e Nomex sano (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sullo stesso Nomex sano (in rosso) con il metodo della differenza semplice.

3) Differenza fra i valori assoluti dei segnali

Dalla figura 61 si nota come il metodo, a differenza della prova con il difetto in carbonio, risulti essere efficace per la corretta individuazione del Nomex danneggiato.

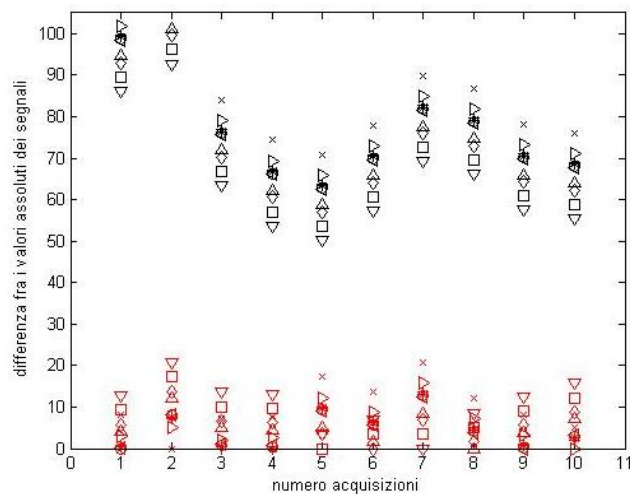


Figura 61: Difetto metallo - Il grafico indica le differenze di segnale Nomex danneggiato e Nomex sano (in nero) e differenze di segnale tra le diverse acquisizioni sullo stesso Nomex sano (in rosso), con il metodo della differenza tra i valori assoluti dei segnali.

4) Correlazione tra i segnali

In figura 62 è presentato il grafico che racchiude le differenze tra il segnale relativo al Nomex sano e quello relativo al Nomex danneggiato (in nero) e le differenze tra le diverse acquisizioni relative allo stesso Nomex sano (in rosso) in termini di percentuale di correlazione. Si nota come correlando tra di loro i segnali provenienti dalla nuova acquisizione sul Nomex sano, il risultato è anche questa volta valori prossimi al 100% ovvero questi 10 segnali sono tra di loro molto simili (in rosso nel grafico).

Confrontando di volta in volta i 10 segnali relativi al Nomex danneggiato con ognuno dei segnali relativi al Nomex sano, si nota (in nero nel grafico) come la correlazione si attesti in media intorno al 81%.

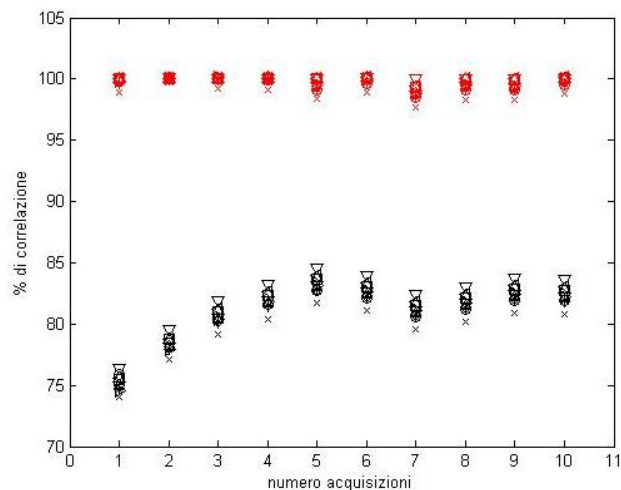


Figura 62: Difetto metallo - Il grafico indica la percentuale di correlazione tra i segnali del Nomex danneggiato e sano (in nero) e la percentuale di correlazione tra i segnali dello stesso Nomex sano (in rosso).

Inoltre, anche in questo caso, calcolando la posizione del picco di correlazione tra i segnali relativi al Nomex danneggiato con i segnali relativi al Nomex sano, questo è shiftato di un campione (campione 511 invece che 512) il che sottolinea ancora la presenza di una differenza marcata tra i segnali in questione.

4.5.5 Conclusioni

Dalle prove effettuate si può concludere che il radar riesce a “vedere” difetti di dimensione paragonabile alla sua risoluzione. Confrontando i modelli matematici utilizzati per l’analisi delle forme d’onda acquisite si può osservare come quello più robusto a errori dovuti a misura e rumore, siano il metodo del quadrato della differenza campione per campione e la correlazione. Per entrambi è facile individuare una soglia oltre la quale si può dire che vi sia il difetto. Osservando i grafici delle varie prove relativi al metodo del quadrato della differenza campione per campione si può fissare la soglia a 5 volte la differenza massima tra le varie acquisizioni sulla lastra sana. Per quanto riguarda la correlazione si può imporre la soglia al 95% ovvero, se il valore del picco di correlazione tra lastra sana e danneggiata è in percentuale inferiore o uguale al 95% del picco di autocorrelazione della lastra sana di riferimento, allora c’è la presenza di un difetto.

In questo modo quindi è possibile progettare un hardware e un software automatico di rilevazione di lastre danneggiate.

Capitolo 5

Costruzione dell'immagine del difetto

L'obiettivo del presente capitolo è quello di presentare la seconda parte del lavoro di tesi ovvero quello riguardante la scansione di lastre di materiale composito in fibra di carbonio di dimensione 300x300 mm in cui sono stati ricreati opportuni difetti. La scansione è necessaria per la ricostruzione dell'immagine della lastra con il difetto, dando modo di vedere dimensione, posizione e entità dello stesso in maniera univoca. Se prima quindi lo scopo è stato quello di determinare la presenza o meno del difetto, ora si passa ad uno step successivo.

5.1 Modalità di scansione della lastra

Per effettuare la scansione della lastra con il difetto è necessario utilizzare il movimentatore, costruito appositamente per questo scopo. L'idea è quella di fare la scansione 2D con step di 2 mm ovvero, il radar acquisisce e poi ci si sposta di 2 mm e si prosegue con una nuova scansione. In sostanza si acquisisce una forma d'onda ogni 2 mm; anche lungo la dimensione z ci si sposta di passi di 2 mm tra una "riga" e la successiva. Il tempo necessario per effettuare acquisizione e spostamento di 2 mm risulta essere di circa 4 secondi. La risoluzione finale quindi risulta essere di 2x2 mm. Il punto di partenza della scansione e la modalità di spostamento sono mostrate in figura 63.

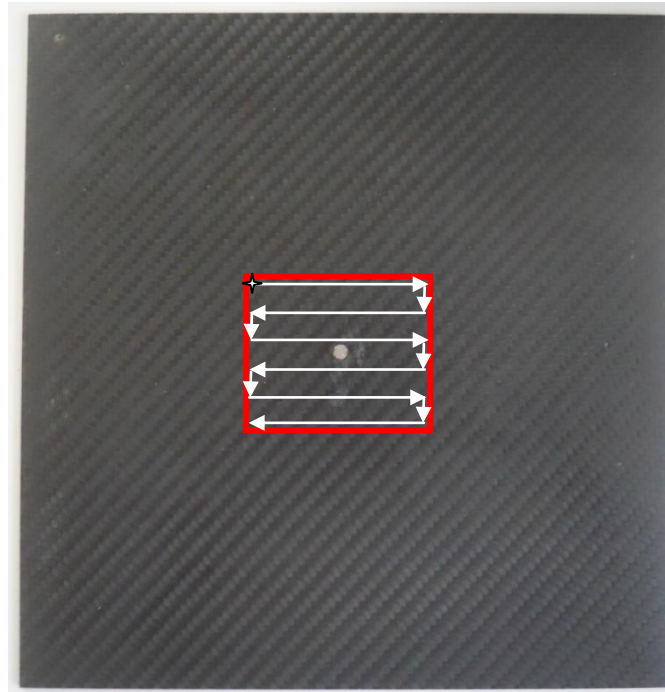


Figura 63: Modalità di scansione della parte di lastra interessata dal difetto.

Per cercare di ovviare al tempo di scansione che altrimenti risulterebbe troppo lungo, questa viene confinata alla sola regione dove è presente il difetto. Per esempio, un “rettangolo” di scansione di dimensioni 60x60 mm occupa un tempo complessivo di circa 64 minuti. Vedendo la lastra frontalmente il punto di partenza è in alto a sinistra nel rettangolo di scansione (viene indicato con la stella in figura 63).

Il radar viene utilizzato nella stessa configurazione già vista al capitolo 4, ovvero con le due antenne poste vicine tra di loro (come in figura 36). Per rendere il segnale trasmesso focalizzato in una regione ancora più circoscritta, la distanza tra radar e lastra di dimensioni 300x300 mm viene ridotta a 200 mm.

Dei parametri principali del software di gestione del radar, rispetto alle prove effettuate al capitolo 4, si modifica solo l'*Averaging Factor* che da 100 viene posto a 10000.

```
Variables('AveragingFactor') = 10000;  
Variables('Gain') = 6;
```

```
Variables('ZoomMin') = 0;  
Variables('ZoomMax') = 100;  
Variables('FrameOffset') = 0;  
Variables('SamplingRate') = 0;
```

Questo significa che ogni forma d'onda acquisita è già stata mediata dal radar su 10000 forme d'onde ricevute, al fine di aumentare il rapporto segnale-rumore.

Il programma di acquisizione e movimentazione, implementato dal candidato in ambiente Matlab, gestisce tutto il processo di scansione (e quindi anche la movimentazione del radar) e creazione del database. Il database delle forme d'onda acquisite viene costruito come se si stesse lavorando con una matrice; la prima forma d'onda acquisita, relativa quindi al punto di partenza, sarà immagazzinata come *onda(1,1)* mentre per esempio la prima forma d'onda acquisita nella terza riga sarà immagazzinata come *onda(3,1)*. In sostanza, se la scansione si trova alla riga *m* e colonna *n*, il segnale acquisito verrà immagazzinato come *onda(m,n)*.

5.2 Forme d'onda acquisite

La forma d'onda acquisita ad ogni step di scansione varia in funzione della posizione del radar in funzione della posizione del difetto; ovviamente se non c'è presenza di difetto la forma d'onda acquisita ad ogni step risulterà molto simile alle altre, a meno del rumore. Variazioni di segnale si segnalano solo in prossimità del bordo della lastra, dove intervengono appunto effetti di bordo. Scansionando una regione limitata della lastra, come visto nel paragrafo precedente, si evitano indesiderati disturbi dovuti all'effetto bordo; la procedura rimane comunque valida anche se si dovesse scansionare l'intera lastra.

Per quanto riguarda la costruzione dell'immagine, occorre valutare cosa cambia nel segnale acquisito ad ogni step in presenza del difetto, rispetto al

segnale acquisito nelle zone in assenza dello stesso. In linea generale sarebbe opportuno effettuare una correlazione fra ciascuna forma d'onda presente nel database di scansione ed un template di riferimento, riferito alla lastra sana, ovvero senza alcun difetto¹⁹. In sostanza con la correlazione si andrebbe a correlare la forma d'onda relativa ad ogni step di scansione con la forma d'onda relativa alla lastra sana (acquisita con una lastra sana delle medesime dimensioni e stessa distanza dal radar). Ci si aspetta che in presenza del difetto il picco di correlazione abbia una ampiezza differente rispetto al caso di correlazione in assenza di esso. In base a questo ragionamento si può ricostruire una immagine basandosi sulla variazione dell'ampiezza del picco di correlazione. Questo procedimento però dipende, come già ampiamente discusso nel capitolo precedente, dal giusto posizionamento della lastra sana prima e dalla lastra danneggiata poi, durante l'acquisizione, relativamente, del template e delle forme d'onda di scansione. Questo significa che per ogni tipologia di lastra che si vuole scansionare occorre avere a disposizione in archivio il relativo template. Inoltre, ogni volta che si dà il via alla scansione, le condizioni al contorno da rispettare devono essere le stesse di quelle utilizzate durante l'acquisizione del template (stessa distanza tra lastra sana e danneggiata, nonché stessa forma e dimensione). Si è cercato quindi un metodo più robusto in situazioni quali quelle di lavoro, in cui non è possibile soddisfare in modo corretto le precedenti condizioni. Per completezza di informazione, nel paragrafo 5.3.1, verrà comunque presentata e discussa una immagine ricostruita effettuando la correlazione come sopra specificato.

Si osservi la figura 64; osservando le forme d'onda acquisite lungo la "riga" di scansione che interseca il difetto, si nota che dove questo è presente, il terzo picco positivo è "più alto" rispetto a dove il difetto non è presente. Questa differenza si riscontra in tutte le scansioni e in tutte le tipologie di difetti analizzati. Inoltre, l'entità di questa differenza è più alta rispetto alle variazioni di segnale dovute per effetto di rumori ed errori di campionamento. Da notare anche che in entrambi i casi, tutti i picchi (negativi e positivi) sono sempre in

¹⁹ In questo caso il template relativo alla lastra sana è rappresentato da una unica forma d'onda acquisita con il radar che illumina il centro della stessa, con averaging factor pari a 10000.

corrispondenza dello stesso campione. Le immagini quindi vengono costruite in base alla variazione di ampiezza del terzo picco delle forme d'onda acquisite durante la scansione.

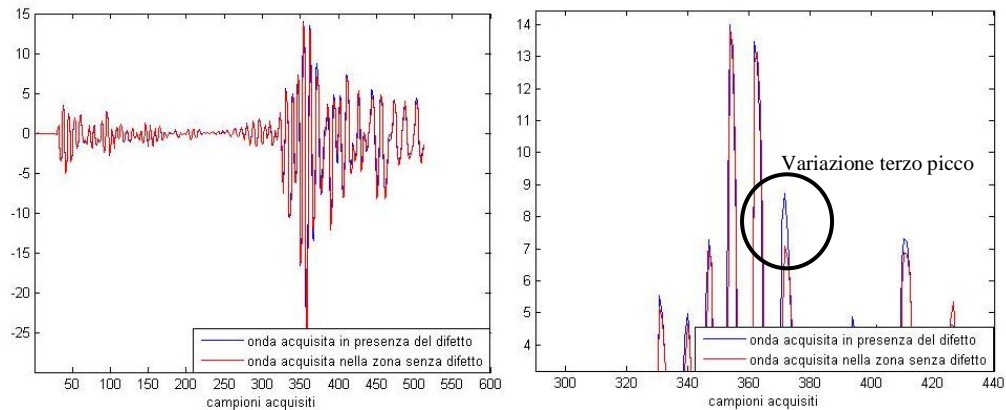


Figura 64: Confronto fra forme d'onda relative alla zona senza difetto e alla zona in presenza del difetto. A sinistra è presentato lo zoom che mette in evidenza la differenza di intensità del “terzo picco”.

5.3 Risultati ottenuti

Nel seguito vengono presentate le immagini relative alla scansioni con differenti tipologie di difetti. Le immagini non sono il frutto di alcun tipo di filtraggio o smooth, proprio perché si cerca di presentare il risultato su dati “grezzi”, sapendo che da questi è possibile poi adottare qualsiasi tipologia di rielaborazione. La finestra di scansione ha dimensioni 60x60 mm con il difetto posizionato al suo centro. Solo nella prima scansione, relativa alla lastra con un foro di 30 mm di diametro, la finestra di osservazione ha dimensioni 150x90 mm dando modo di osservare anche eventuali effetti di bordo. C'è da osservare il fatto che il giusto punto di partenza della scansione (dal quale poi dipende il “centraggio” del difetto nella finestra di osservazione) è difficile in quanto il fascio di onde radar trasmesso non intercetta la lastra in un punto ma in una “zona” che è una vera e propria superficie di dimensioni 10x10 mm.

5.3.1 Difetto foro 30 mm di diametro

Solo per questa prima prova, data l'entità del difetto, viene effettuata una scansione in una finestra di dimensioni 150x90 mm, occupando un tempo complessivo di circa 3 ore e 54 minuti. Il difetto ricreato è un foro passante di diametro 30 mm al centro della lastra 300x300 mm. La scansione è presentata in figura 65.

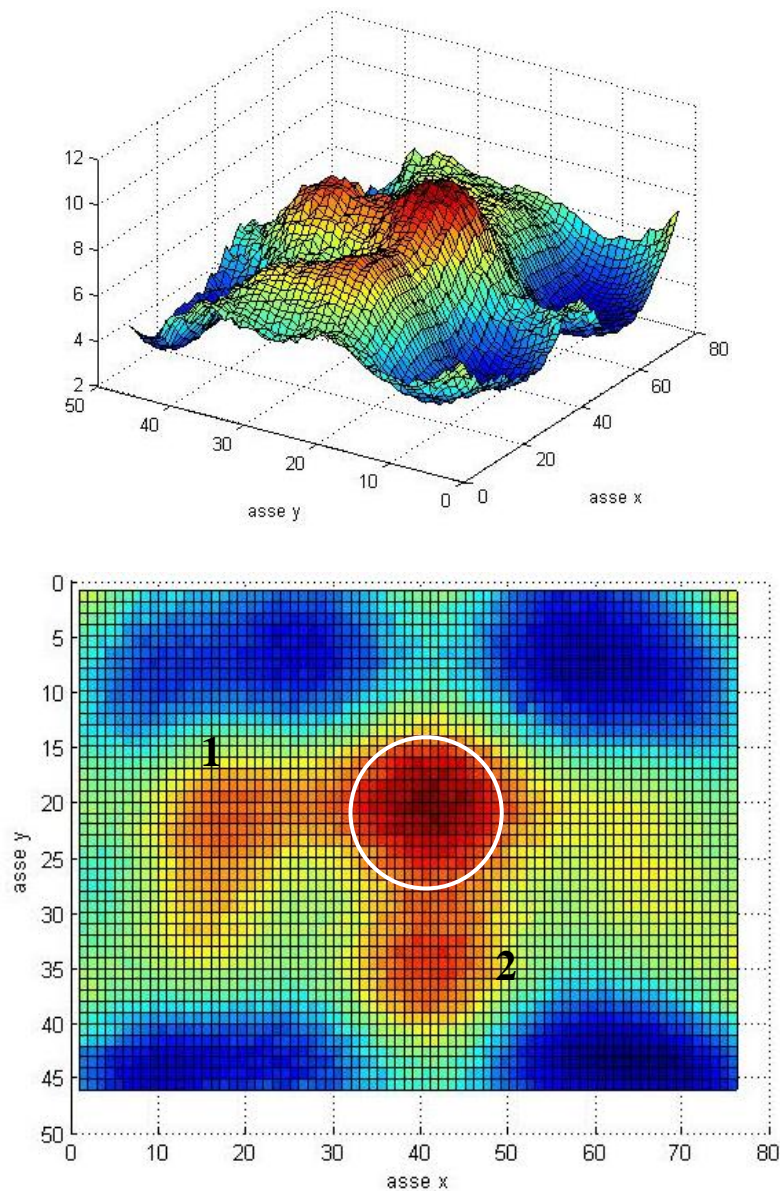
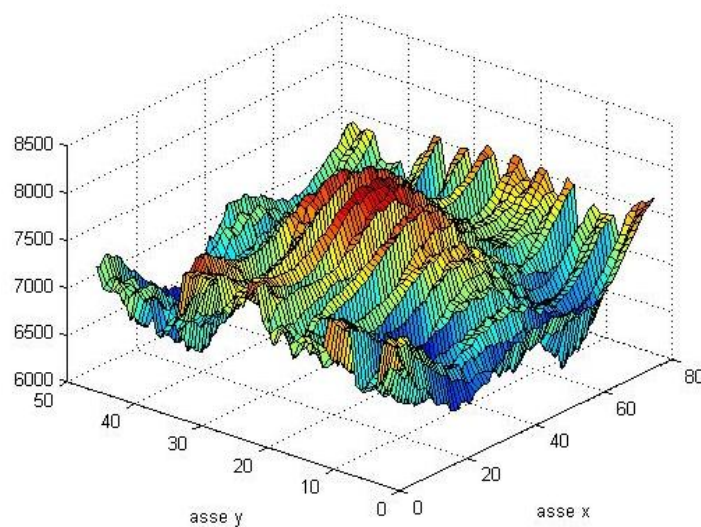


Figura 65: Risultato della scansione con difetto costituito da un foro passante di diametro 30 mm. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista “in pianta”. Il foro è circoscritto nel cerchio bianco.

Si osservi la figura 65 in pianta. Oltre al foro individuato al centro della figura e circoscritto nel cerchio bianco (si ricorda che ogni “scacco” ha dimensione 2x2 mm), sono presenti altri due “rigonfiamenti” che possono far pensare ad altri due difetti. Il rigonfiamento numero 1 riguarda con molta probabilità un effetto di bordo della lastra congiunto con il foro stesso; in questa zona si può supporre che si sovrappongano da un lato l’effetto del bordo della lastra e dall’altro l’effetto dell’eco del segnale che si sta per avvicinare alla zona in cui è presente il foro. Il rigonfiamento numero 2 riguarda invece l’effetto provocato dal sostegno della lastra che, come si è già potuto vedere nel capitolo precedente (figura 37) è costituito da una morsa in ghisa, la cui presa occupa circa 100x20 mm della porzione inferiore della lastra. C’è da osservare che quanto mostra il rigonfiamento in questione non è il reale posizionamento del supporto lungo l’asse y (dovrebbe essere 60 mm più in basso in figura 65 in pianta). Non è ben chiaro perché l’effetto sia visibile in quella posizione.

Solo per questa tipologia di difetto viene presentata anche la ricostruzione dell’immagine sfruttando la correlazione fra ciascuna forma d’onda presente nel database di scansione ed il template di riferimento, riferito alla lastra delle stesse dimensioni ma senza alcun difetto.



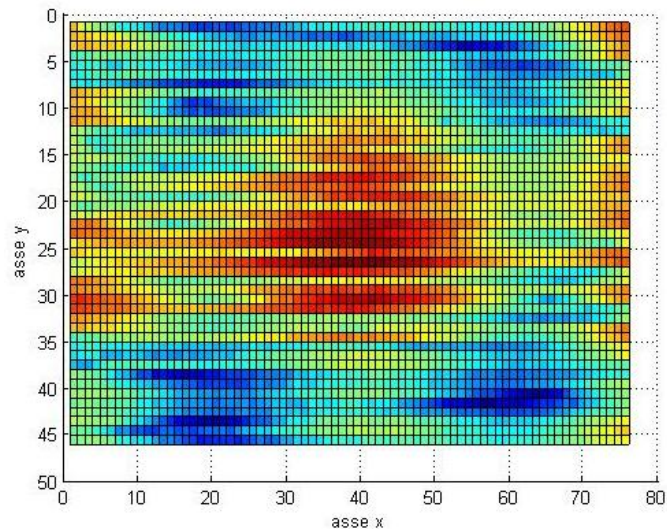


Figura 66: Risultato della correlazione dei segnali relativi alla lastra con il foro e al template della lastra sana. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista “in pianta”.

Dalla figura 66 in pianta è possibile osservare solo un “rigonfiamento” centrale in corrispondenza del foro ovvero dove i segnali relativi alla lastra forata e al template relativo alla lastra sana sono ovviamente differenti. Le immagini mostrano una particolare caratteristica a righe; questo si spiega considerando che la scansione si muove appunto per “righe” lungo y.

5.3.2 Difetto volume di metallo

Nel seguito viene presentata la scansione relativa alla lastra in cui è stato ricreato un difetto costituito da un volumetto di metallo di diametro 6 mm annegato nella lastra stessa ma affiorante in superficie (come in figura 48).

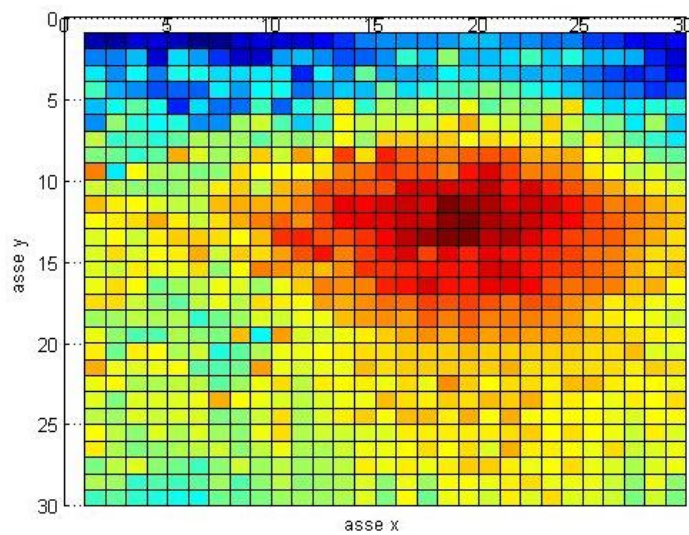
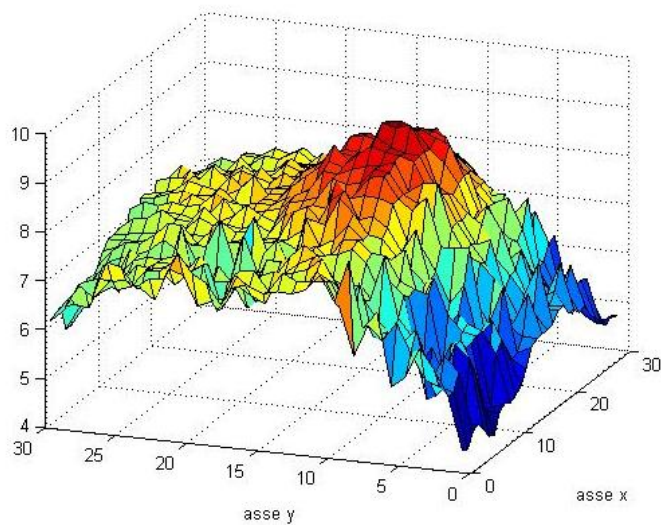


Figura 67: Risultato della scansione con difetto costituito da un volumetto di metallo. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista “in pianta”.

Il difetto è riconoscibile in entrambe le immagini di figura 67 dal picco (in colore rosso scuro) che risulta non centrato rispetto alla finestra di osservazione di circa 8 mm lungo x e di 6 mm lungo y. Si ricorda che ogni “scacco” è di dimensione 2x2 mm.

5.3.3 Difetto due volumi di metallo posti a 20 mm di distanza

Nel seguito viene presentata la scansione relativa alla lastra in cui è stato ricreato un difetto costituito da due volumetti entrambi di diametro 6 mm posti a 20 mm di distanza tra di loro lungo y, annegati nella lastra e affioranti in superficie.

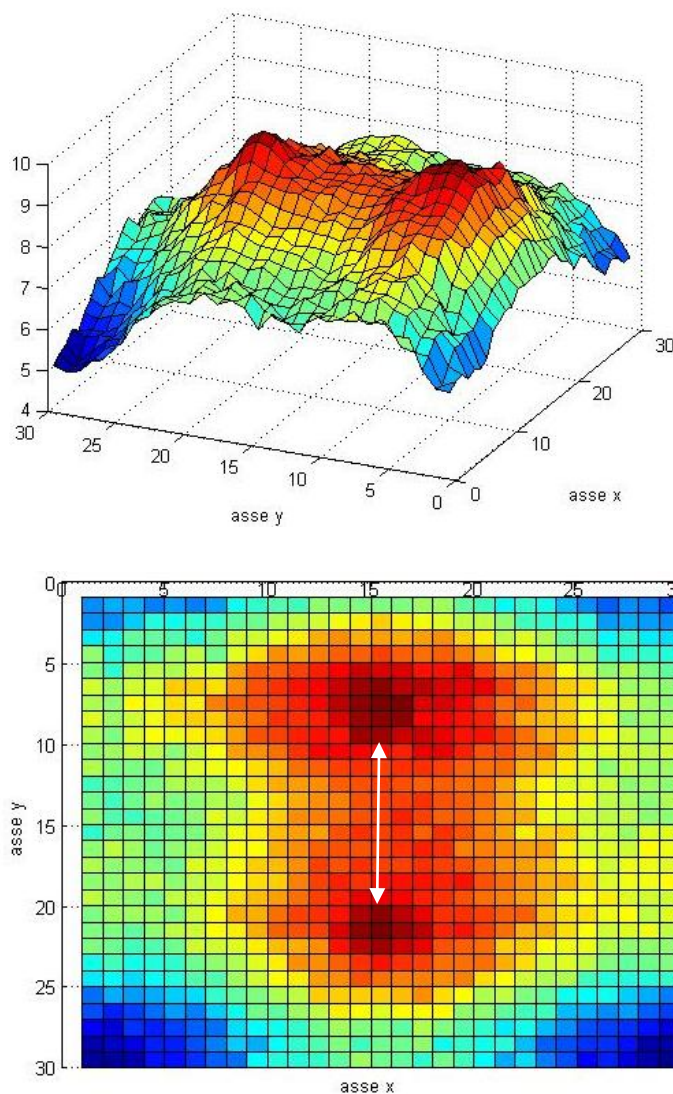


Figura 68: Risultato della scansione con difetto costituito da due volumetti di metallo posti a 20 mm di distanza tra di loro. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista “in pianta”.

Questa volta il centraggio lungo x è corretto; inoltre, è corretta anche la distanza rilevata tra i due difetti (indicata in figura 68 con la freccia bianca).

5.3.4 Difetto due volumi di metallo posti a 5 mm di distanza

Nel seguito viene presentata la scansione relativa alla lastra in cui è stato ricreato un difetto costituito da due volumetti entrambi di diametro 6 mm posti a 5 mm di distanza tra di loro lungo y, annegati nella lastra e affioranti in superficie. L'obiettivo di questa prova è capire se il radar è in grado di discriminare i due oggetti posti ad una distanza comparabile con i 4 mm di risoluzione del radar Novelda a disposizione.

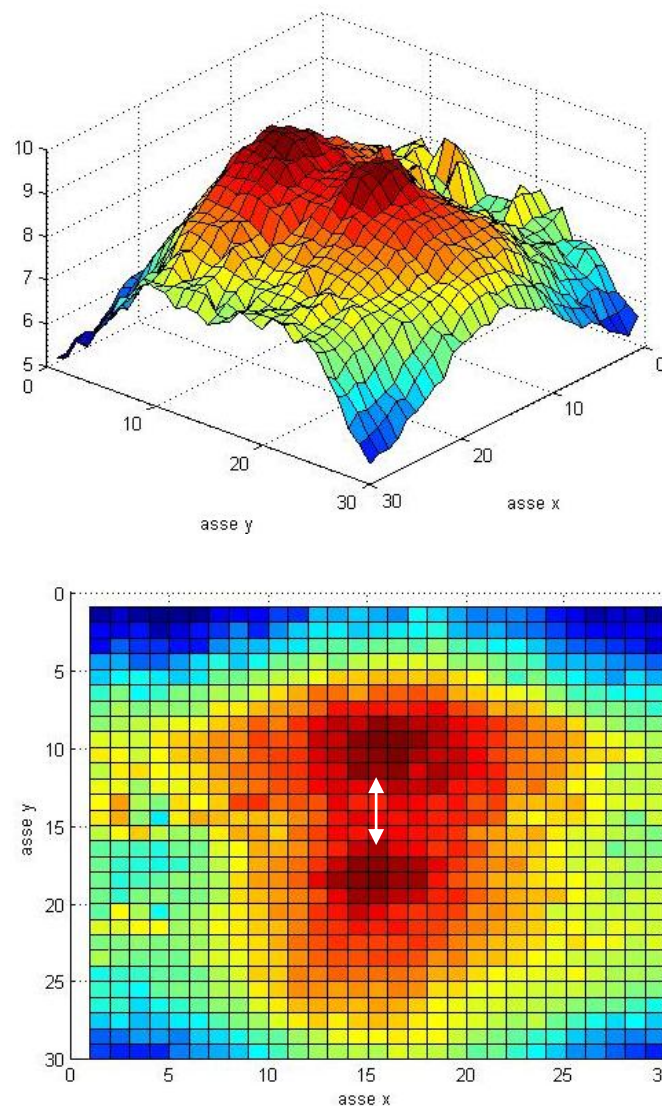
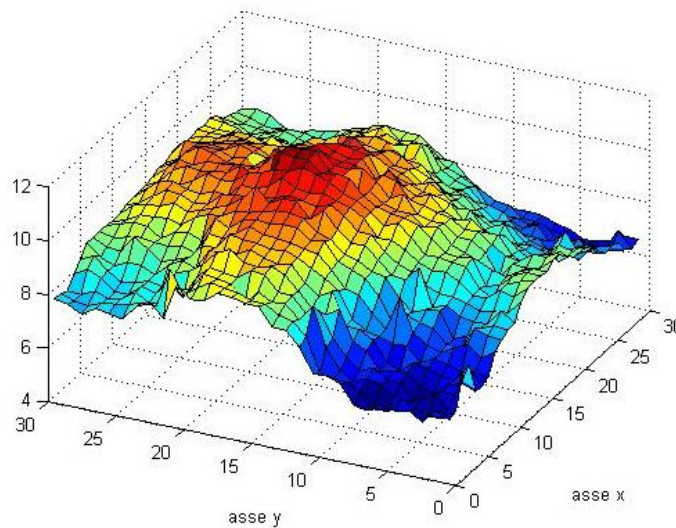


Figura 69: Risultato della scansione con difetto costituito da due volumetti di metallo posti a 5 mm di distanza tra di loro. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista “in pianta”.

Anche in questo caso il centraggio lungo x è corretto; è invece sbagliata la distanza rilevata dalla scansione tra i due difetti che in figura 69 (indicata dalla freccia bianca) risulta essere di 8 mm.

5.3.5 Difetto discontinuità dello stesso materiale

Nel seguito viene presentata la scansione relativa alla lastra in cui è stato ricreato un difetto costituito da un cubetto di carbonio di dimensioni 6x6 mm annegato nella lastra e affiorante in superficie, come già visto in figura 43. In sostanza si ricrea un difetto che rappresenta una discontinuità dello stesso materiale; la prova è necessaria per capire se il radar riesce a determinare la discontinuità costituita dallo stesso materiale.



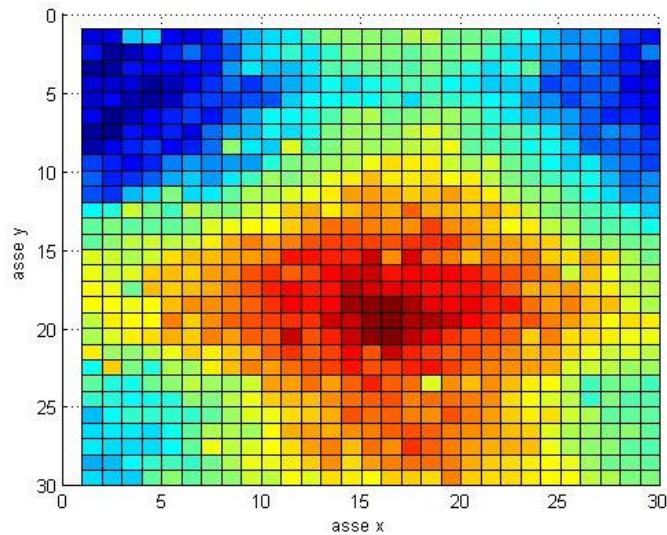


Figura 70: Risultato della scansione con difetto costituito da cubetto di materiale composito 6x6 mm. In alto è mostrata la figura in 3D mentre in basso è mostrata la stessa figura ma vista “in pianta”.

Il centraggio lungo x è corretto mentre c'è una discrepanza di circa 8 mm verso il basso, lungo l'asse y. Il difetto è visibile, anche se il “contrasto” non è come nel caso di difetto costituito da materiale metallico. Il radar riesce a determinare la discontinuità dello stesso materiale.

5.4 Conclusioni

Il metodo mostra risultati promettenti, comparabili con quelli ottenibili tramite ultrasuoni attraverso la visualizzazione C-scan (come in figura 22 c). Per prima cosa occorre sottolineare il fatto che i 6 mm di diametro del difetto in questione viene effettivamente “visto” dal radar e quindi vengono rispettate le attese riguardo la risoluzione del radar di 4 mm. Per quanto riguarda la discriminazione in distanza, nella penultima prova (paragrafo 5.3.4), si osserva un errore di circa 4 mm. Ovviamente bisogna sottolineare che la risoluzione dell'immagine risulta essere di 2 mm e quindi ciò inficia negativamente nella

determinazione di piccole dimensioni e piccole distanze come nel caso analizzato.

Per quanto riguarda la prima prova con difetto rappresentato dal foro di diametro di 30 mm, si riscontrano alcune imprecisioni del metodo dovute ad effetti di bordo e a particolari accoppiamenti di echi provenienti da più direzioni. Da notare come anche la tipologia e dimensione del difetto non aiuti in questo. Per quanto riguarda l'immagine costruita dalla correlazione, questa "filtra" in qualche modo gli effetti indesiderati di cui sopra ma non riesce comunque a dare una buona risoluzione del foro stesso. Si rimarca inoltre il fatto che per poter usufruire di una corretta informazione proveniente dalla correlazione, occorre avere a disposizione il template della lastra sana di ogni tipologia di lastra che si vorrà scansione, nonché particolare precisione nell'effettuare la scansione stando attenti a rispettare le stesse condizioni di misura e tutto ciò rappresenta un chiaro limite. Infine, per quanto riguarda l'ultima prova (paragrafo 5.3.5), il metodo risulta essere efficace per la determinazione del difetto costituito dalla discontinuità dello stesso materiale e questo risulta essere un ottimo risultato visto che difetti come delaminazioni o vuoti interni presuppongono proprio una discontinuità nello stesso materiale. Da sottolineare come inoltre l'eco prodotto da discontinuità dello stesso materiale sia molto più debole rispetto ad una superficie di contatto costituita da materiali differenti (come per esempio carbonio-metallo), pertanto, il risultato visto nel paragrafo 5.3.5 rafforza la bontà del metodo.

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro ha avuto lo scopo di studiare e sviluppare la fattibilità di un nuovo metodo di analisi per controlli non distruttivi, principalmente per materiali compositi. La domanda principale riguarda la fattibilità o meno di un sistema basato su onde UWB. L'idea nasce cercando di soddisfare la sempre maggiore richiesta di semplicità ed economicità, mantenendo sempre uno standard qualitativo elevato. Il continuo sviluppo di apparati radar UWB in particolare nel campo della comunicazione (trasmissione di dati), della rilevazione militare e in campo medico, ha permesso un notevole passo in avanti sia in termini di costi che di capacità risolutiva. Già esistono applicazioni che sfruttano tale tecnologia per la rilevazione del sottosuolo (Ground Penetrating Radar) e, in edilizia, all'interno di murature per individuare eventuali tubazioni o cavi elettrici. Nel caso dei CND la precisione richiesta aumenta considerevolmente basti pensare che un difetto come la delaminazione, inclusione o presenza di vuoti ha in generale dimensioni dell'ordine di qualche decina o centinaia di micron.

Il radar messo a disposizione dal Polo Scientifico didattico di Cesena, Università di Bologna, presenta una risoluzione spaziale di circa 4 mm che è ben lontana dalle dimensioni dei reali difetti presenti nei materiali compositi. Nuovi apparati radar stanno nascendo, arrivando anche a risoluzioni sub millimetriche. Preso atto dei limiti del radar Novelda a disposizione, lo scopo principale del lavoro è stato quello di sviluppare algoritmi ad hoc da applicare in una metodologia di controllo automatizzata per la determinazione di difetti presenti in lastre di materiale composito di diverse dimensioni. L'idea di base è stata quella di pensare all'applicazione industriale finale, ovvero a fine linea di produzione delle lastre in materiale composito; il fatto che il controllo tramite onde radar non necessiti di contatto con il manufatto ne tantomeno un suo

speciale trattamento, consente di visionare una lastra a fine percorso produttivo e dare un feedback real time sul suo stato di salute. L'algoritmo deve essere capace di riconoscere la lastra danneggiata e quindi scartarla dal lotto delle lastre sane. Il difetto viene riscontrato effettuando un confronto fra un template costituito da lastre sane a disposizione come database e la lastra danneggiata che di volta in volta viene visionata. Questo metodo presenta l'unico svantaggio che ogni lotto di lastre delle stesse caratteristiche (dimensione e materiale) deve possedere il rispettivo template della lastra sana in database perché altrimenti il confronto sarebbe "falsato"; in effetti, devono essere messe a confronto lastre della stessa dimensione, forma e materiale. Ovviamente devono sussistere anche le medesime condizioni al contorno sulla misurazione ovvero distanza radar-lastra e posizione della lastra sempre in riferimento al radar. Sono tutti problemi che dal punto di vista industriale si possono superare con l'utilizzo di movimentazioni e loop di controllo a ciclo chiuso che posizionano la lastra di volta in volta a fine linea produttiva nella posizione corretta.

Per quanto riguarda l'algoritmo di confronto, analizzando i dati relativi alle varie prove effettuate risulta chiaro che la correlazione e il quadrato della differenza campione per campione tra i segnali relativi al template e alla lastra danneggiata offrono la migliore soluzione per mettere in risalto il difetto. Questi metodi risultano anche robusti a errori di misura e rumori presenti nell'ambiente. A tal proposito occorre precisare che tutte le prove sono state effettuate in ambiente "normale", senza l'uso di camera anecoica; tale scelta motiva l'idea di poter applicare in un futuro il metodo in ambiente industriale non privo di rumori e disturbi elettromagnetici. L'utilizzo di camera anecoica eliminerebbe la capacità di visionare una lastra a fine ciclo produttivo, perdendo quindi la possibilità di feedback "real time" dello stato di salute della stessa.

Risulta altresì importante la possibilità di poter mappare il difetto, avendo informazioni sulla sua dimensione e posizione. Nella seconda parte del presente lavoro si è reso quindi ancora più necessario l'uso di un sistema di

movimentazione in grado di scansionare automaticamente la lastra e avere infine l'immagine 2D della stessa con posizione e dimensione del difetto. Anche in questo caso, visti i limiti del radar, i difetti ricreati sono ben più grandi di quelli realmente riscontrabili nei materiali compositi; il sistema rispetta comunque le previsioni mappando con la risoluzione che ci si aspettava. L'inconveniente resta il tempo di scansione che con l'approccio adottato risulta essere abbastanza lungo; ogni scansione e spostamento di 2 mm occupa circa 4 secondi. Il metodo è facilmente sviluppabile attraverso l'uso di apparati radar phased-array. Il principio dei phased-array è quello di generare un fronte d'onda da un gran numero di elementi trasmissivi, controllati in ampiezza e fase; il vantaggio di questa tecnologia sta nel fatto che il puntamento del fascio sulle differenti direzioni del volume di copertura è realizzato elettronicamente (scansione elettronica) con tempi di commutazione trascurabili. Mentre un sistema SAR utilizza una unica antenna trasmittente che deve essere spostata per effettuare la scansione, un sistema phased-array possiede un "vettore" o una "matrice" di antenne che permette di "spostare" il fascio trasmissivo in modo tale da illuminare tutto il piano da visionare.

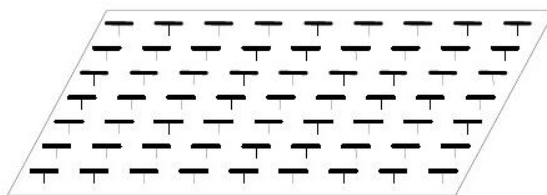


Figura 71: Array di antenne per un sistema phased-array. [28]

Avendo a disposizione un array di antenne disposte su una superficie piana ed alimentati in fase (figura 72), i fronti dei segnali dei singoli trasmettitori si combinano a formare un'onda piana che si propaga in direzione normale al piano del trasmettitore. Nel caso i segnali che alimentano i trasmettitori siano progressivamente sfasati l'uno rispetto all'altro, la combinazione dei fronti d'onda darà sempre luogo ad un'onda piana, ma che si propagherà in direzione diversa rispetto alla normale al piano, e dipendente dallo sfasamento esistente tra i singoli emettitori.

Controllando opportunamente le fasi dei singoli trasmettitori, è dunque possibile “costruire” fronti d'onda che si propagano in direzioni diverse, controllando quindi elettronicamente l'orientamento del fascio d'antenna (tipicamente entro circa $\pm 45^\circ$). Ciò viene realizzato utilizzando opportuni dispositivi *sfasatori* (*phase shifters*) controllati elettronicamente, (per esempio alimentando i trasmettitori attraverso diverse lunghezze elettriche e variando la frequenza, e di conseguenza le fasi relative). Questa tecnica di sintesi del fascio d'antenna può essere utilizzata sia su un solo piano mantenendo la scansione meccanica sull'altro (l'antenna è quindi costituita da svariate “righe” di trasmettitori alimentati insieme) sia su due piani (in questo caso, l'antenna è costituita da una matrice di trasmettitori ognuno con controllo di fase indipendente, come in figura 71) in modo da eliminare la necessità della scansione meccanica, almeno nel settore che può essere coperto tramite la scansione elettronica.

Per scansioni 2D quindi non occorre alcuna movimentazione meccanica e da ciò si capisce il vantaggio di applicare questa tecnologia in primis nell'abbattimento del tempo di scansione, nonché sulla qualità e precisione del segnale trasmesso che può essere opportunamente controllato elettronicamente. Di contro aumentano i costi in quanto si avrà a che fare non più con uno ma con molteplici apparati radar insieme.

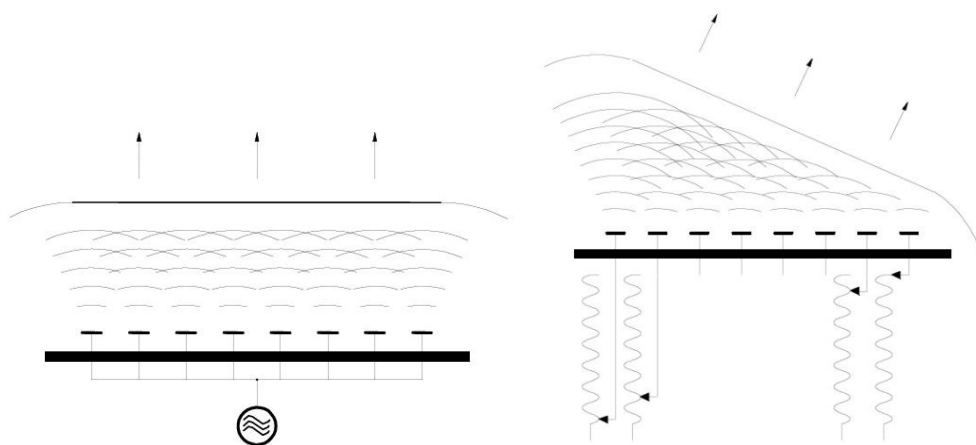


Figura 72: Principio di trasmissione di un sistema phased-array; a sinistra viene emesso un fronte d'onda piano normale al piano trasmissivo; a destra un opportuno sfasamento tra le varie antenne consente di trasmettere il fronte d'onda inclinato rispetto al piano trasmissivo. [28]

Occorre infine citare il fatto che durante le prove preliminari è stato riscontrato che le onde radar non riuscivano ad oltrepassare una lastra di materiale composito in fibra di carbonio di spessore 1 mm. Questo risultato è stato osservato direttamente con il software Novelda Radar Scope che permette una visione real time del segnale ricevuto. Ponendo il radar di fronte alla lastra in questione e cercando di muovere dietro la stessa del materiale metallico, il segnale ricevuto non subiva alcuna modifica. Le spiegazioni sono sostanzialmente due:

- 1) il materiale composito in fibra di carbonio è così riflettente che le onde radio “rimbalzano” completamente sulla sua superficie o al massimo riescono a penetrare solo nella sub-superficie;
- 2) parte delle onde radio riescono ad attraversare la lastra ma l’eco dell’oggetto a valle della stessa è così debole che non riesce poi a riattraversare la lastra per essere ricevuto dall’antenna ricevente.

Studi dimostrano come in effetti le fibre di carbonio presentano una grande capacità riflettente nei confronti delle onde elettromagnetiche; in particolare minore è il loro diametro, maggiore è la capacità riflettente a pari volume delle stesse (volume di fibre su matrici polimeriche) come mostra la tabella IV:

Filler	Vol. %	EMI shielding effectiveness (dB)
Al flakes (15×15×0.5 μm)	20	26
Steel fibers (1.6 μm dia. ×30~56 μm)	20	42
Carbon fibers (10 μm dia. ×400 μm)	20	19
Ni particles (1~5 μm dia.)	9.4	23
Ni fibers (20 μm dia. ×1 mm)	19	5
Ni fibers (2 μm dia. ×2 mm)	7	58
Carbon filaments (0.1 μm dia. ×>100 μm)	7	32
Ni filaments (0.4 μm dia. ×>100 μm)	7	87

Tabella IV: Efficacia dell’interferenza elettromagnetica a 1-2 GHz in matrice di polietersulfone (PES) con varie tipologie di fibre, con spessore di 2,8 mm. [28]

La tabella mostra l’attenuazione (in dB) dovuta alle differenti tipologie di fibre utilizzate. Da notare che la frequenza di emissione delle onde

elettromagnetiche a cui i dati in tabella si riferiscono è piuttosto bassa (il radar Novelda ha una larghezza di banda programmabile da 6.0 a 8.5 GHz); maggiori frequenze si traduce in minore capacità penetrativa delle onde elettromagnetiche, quindi per il radar Novelda i dati presentati in tabella IV sono solo un limite inferiore per quanto riguarda l'attenuazione.

I risultati in tabella IV hanno quindi avuto un riscontro nelle prove preliminari svolte in questo lavoro di tesi. In conclusione quindi c'è da notare come le onde elettromagnetiche "fatichino" ad attraversare il materiale composito e ciò potrebbe limitare l'uso di questa tecnologia applicata ai controlli non distruttivi solo per difetti superficiali o al massimo sub-superficiali, considerando che per determinare i reali difetti che affliggono questi materiali, la larghezza di banda del segnale radio dovrebbe aumentare considerevolmente rispetto a quella del radar Novelda utilizzato.

Bibliografia

- [1] G. Sala, “Misurazioni, Analisi e Controlli non Distruttivi”. In G. Sala, *TECNOLOGIE E MATERIALI AEROSPAZIALI – Ver. 0.1*. Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano

- [2] Andrea Rizzo, “ADVANCED N.D.T: ANALISI E STUDIO DI COMPONENTI IN MATERIALE COMPOSITO”, *Seconda Facoltà di Ingegneria sede di Forlì, Università di Bologna*, AA. 2011/2012

- [3] Immorev, J.D. Taylor, “Ultrawideband Radar Special Features and Terminology”, *IEEE AES Systems Magazine*, Vol, 20, NO, 5, pp. 13-15, May 2005

- [4] Andrea Zaccomer, “SISTEMI RADAR PER LA LOCALIZZAZIONE ED IL RICONOSCIMENTO: STATO DELL’ARTE E ANALISI SPERIMENTALE DI APPLICAZIONI UWB”, *Università degli studi di Padova*, AA. 2010/2011

- [5] E. Paolini, A. Giorgetti, M. Chiani, R. Minutolo, M. Montanari, “Localization Capability of Cooperative Anti-Intruder Radar Systems”, *EURASIP Journal of Advances in Signal Processing*, March 2008

- [6] B. Levitas, J. Matuzas, “UWB Radar High Resolution Isar Imaging”, *Geozondas JSC*, Vilnius, Lithuania, 2009

- [7] Antonio del Conte, “IL RADAR PENETRANTE (GPR)”, Ancona, Gennaio 2004

- [8] Nicola Nanna, “RILEVAMENTO DI ATTIVITA’ UMANA IN PRESENZA DI OSTACOLI MEDIANTE SEGNALI UWB”, *Seconda Facoltà di Ingegneria sede di Cesena, Università di Bologna*, AA. 2009/2010

- [9] Stanislav Vitebskiy, Lawrence Carin, Marc A. Ressler, Francis H. Le, “Ultra-Wideband, Short Pulse Ground-Penetrating Radar: Simulation and Measurement”, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 35, NO. 3, pp. 762-772, May 1997

- [10] R. Zetik, J. Sachs, R. Thoma, “Modified Cross-Correlation Back Projection for UWB Imaging: Numerical Examples”, *IEEE International Conference on Ultra-Wideband*, pp. 650-654, March 2005
- [11] S. Kidera, T. Sakamoto, T. Sato, “Accurate UWB Three-Dimensional Imaging Algorithm for a Complex Boundary without Range Point Connections”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, NO. 4, pp. 1993-2004, April 2010
- [12] J.D. Taylor, “Introduction to Ultrawideband Radar Applications and Design”. In J.D. Taylor, “*ULTRAWIDEBAND RADAR, APPLICATIONS AND DESIGN*”, CRC Press, pp.1-20, May 2012
- [13] J.D. Taylor, “American and European Regulations on Ultrawideband Systems”. In J.D. Taylor, “*ULTRAWIDEBAND RADAR, APPLICATIONS AND DESIGN*”, CRC Press, pp. 106-157, May 2012
- [14] J.D. Taylor, “Principles of Materials-Penetrating Ultrawideband Radar Systems”. In J.D. Taylor, “*ULTRAWIDEBAND RADAR, APPLICATIONS AND DESIGN*”, CRC Press, pp. 159-172, May 2012
- [15] J.D. Taylor, Dag T. Wisland, “Novel Nanoscale Impulse Radar”. In J.D. Taylor, “*ULTRAWIDEBAND RADAR, APPLICATIONS AND DESIGN*”, CRC Press, pp. 373-387, May 2012
- [16] Stanislav Licul, “Ultra-Wideband Antenna Characterization and Measurements”, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, Virginia*, September 2004
- [17] D.J. Daniels, “Ground Penetrating Radar”, 2nd edition, *Institution of Electrical Engineers*, 2004
- [18] Decisione CE 21 febbraio 2007, n 2007/131/CE, in materia di “Autorizzazione sull’uso armonizzato dello spettro radio da parte delle apparecchiature che utilizzano la banda ultralarga nella Comunità”
- [19] Decisione CE 21 aprile 2009, n 2009/343/CE, in materia di “Modifica della decisione 2007/131/CE che autorizza l’uso armonizzato dello spettro radio da parte delle apparecchiature che utilizzano la tecnologia a banda ultralarga nella Comunità”

- [20] Mauro Laurenti, “C18 Step by Step, Imparare a programmare i PIC 18”, seconda edizione, 2009
- [21] Martin Bates, “PIC Microcontrollers, an Introduction to Microelettronics”, 3rd edition, *Newnes*, 2011
- [22] Microchip, “18F4550 Data Sheet”, *Microchip Technology*, 2009
- [23] STMicroelectronics, “L297 Stepper Motor Controllers Data Sheet”, *STMicroelectronics*, December 2001
- [24] Paul Acarnley, “Stepping Motors, a guide to theory and practice”, 4th edition, *IET Control Engineering Series 63*, London, 2007
- [25] Fabio Campi, “Elettronica dei Sistemi Digitali”, Dispense del corso, *Seconda facoltà di ingegneria sede di Cesena, Università di Bologna*, AA. 2003/2004
- [26] Michele Scarpiniti, “Il Progetto di Filtri in Matlab”, *Dipartimento INFOCOM, Sapienza, Università di Roma*, AA. 2012/2013
- [27] Ulrich Nickel, “Fundamentals of Signal Processing for Phased-Array Radar”, *Research Institute for High-Frequency Physics and Radar Techniques*, Wachtberg, Germany, pp.1-22, n.d.
- [28] D.D.L. Chung, “Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials”, *Composite Materials Research Laboratory*, University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, USA, pp. 279-285, July 2000

Sitografia

- [29] ASNT, “*Introduction to Nondestructive Testing*”, Retrieved from <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Introduction%20to%20Nondestructive%20Testing>

- [30] Renato Croci, “*Introduzione al Radar*”, Retrieved from http://www.alpha.org/radar/intro_i.html

- [31] Mauro Laurenti, “*Progetti Elettronici*”, Retrieved from <http://www.laurtec.it/progetti-elettronici>

- [32] Elettronica Open Source, “*Come creare dispositivi USB usando un microcontrollore PIC18F*”, Retrieved from <http://it.emcelettronica.com/come-creare-dispositivi-usb-usando-microcontrollore-pic18f-14>

- [33] Logica Programmabile, “*Motore passo passo bipolare e driven L298N*”, Retrieved from <http://www.logicaprogrammabile.it/motore-passo-passo-bipolare-driver-l298n/>

- [34] Elettronica Open Source, “*Motori passo-passo (Stepper Motor)*”, Retrieved from <http://it.emcelettronica.com/motori-passo-passo-stepper-motor>

- [35] Novelda, “*Novelda Nanoscale Impulse Radar ICS*”, Retrieved from <https://www.novelda.no/content/radar-ics>

- [36] Novelda, “*Novelda Nanoscale Impulse Radar Antennas*” Retrieved from <https://www.novelda.no/content/antennas>

- [37] THK, “*Caged Ball LM Guide, Model SHS*”, Retrieved from <https://tech.thk.com/en/products/thkdlinks.php?id=314>

- [38] Electronics-DIY, “*Control Stepping Motor via USB Interface*”, Retrieved from http://electronics-diy.com/electronic_schematic.php?id=498

- [39] Giovanni Bernardo, “*Corso Programmazione PICMicro in C*”, Retrieved from <http://www.settozero.com/wordpress/picmicro/pic10-pic12-pic16/>

- [40] Giovanni Bernardo, “*Appunti di Programmazione per PIC18*”, Retrieved from <http://www.settorezero.com/wordpress/picmicro/pic18/>
- [41] Microchip, “*Emulating RS-232 over USB using PIC18F4550*”, Retrieved from http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1824&appnote=en528378
- [42] Microchip, “*Pickit2*”, Retrieved from http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=1406&dDocName=en023805&part=DV164120