

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

- Sede di Forlì –

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe L-9

TESI DI LAUREA

in

Tecnica Delle Costruzioni Meccaniche

**Progettazione di un banco di prova per radar UWB per  
l'analisi non distruttiva dei danni sui materiali compositi**

CANDIDATO

Matteo Bernabè

Matricola: 0000480176

RELATORE

Prof. Ing. Enrico Troiani

Anno Accademico

2013/2014



# Ringraziamenti

---

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno permesso di proseguire nel mio percorso di studi e infine redigere questo lavoro di tesi. Il primo grande ringraziamento va al mio relatore Prof. Enrico Troiani che mi ha fatto conoscere il mondo, per me nuovo, dell'analisi strutturale. In questi mesi, dapprima durante il tirocinio per poi proseguire con lo sviluppo della tesi, ho potuto saggiare a pieno le sue qualità professionali e umane, sostenendomi in ogni mia difficoltà.

In secondo luogo colgo l'occasione per ringraziare i miei genitori, mio padre Bernabè Giampaolo e mia madre Morelli Fiorella i quali mi hanno sempre appoggiato durante questi anni di studio e mi hanno spronato e a volte guidato, nel raggiungere questo traguardo.



# Indice

---

Ringraziamenti.....	I
Introduzione .....	1
1 Il radar.....	3
1.1 Generalità sul radar.....	3
1.2 Cenni storici.....	4
1.3 Frequenze operative e tipi di segnali .....	5
1.4 Antenne radar e scansione .....	6
1.5 Parametri fondamentali di un radar impulsivo .....	8
1.6 Equazione del radar .....	8
1.7 Portata del radar reale.....	10
1.8 Portata del radar non ambigua.....	11
1.9 Risoluzione in distanza.....	11
2 Sistemi Ultra WideBand.....	13
2.1 Generalità sui sistemi UWB .....	13
2.2 Forme d'onda.....	17
2.3 Proprietà dei sistemi UWB .....	19
3 Controlli non distruttivi .....	21
3.1 Generalità sulle principali tecniche di controllo non distruttivo .....	21
3.2 Metodi ottici .....	22
3.3 Liquidi penetranti .....	24
3.3.1 Tecniche di esame .....	24
3.4 Particelle magnetiche.....	26
3.5 Radiografia e radioscopia .....	27
3.5.1 Tipologie di radiazione.....	28
3.5.2 Tecniche di esame .....	28
3.6 Ultrasuoni .....	30
3.6.1 Generalità sulle onde ultrasonore .....	30
3.6.2 Tecniche di esame .....	31
3.6.3 Rappresentazione dei risultati.....	33
3.7 Termografia .....	35
3.7.1 Tecniche di esame .....	35
3.8 Correnti indotte.....	38

3.9 Metodi acustici .....	38
4 Strumenti a supporto del lavoro: il radar UWB.....	39
4.1 Radar Novelda® NVA-R640 con chip NVA6000 .....	39
5 Progettazione del supporto per radar UWB.....	42
5.1 Layout della struttura.....	43
5.2 Sistema di movimentazione.....	45
5.3 Scelta dei carrelli e analisi strutturale.....	48
Conclusioni e sviluppi futuri .....	53
Bibliografia e sitografia.....	57

# 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. Esse presentano delle sottili differenze ma nell'uso comune vengono tutte usate come sinonimi, infatti secondo la ASNT (American Society for Nondestructive Testing):

*“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 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. Con il passare degli anni si è assistito 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 Tolerance (progettazione con accettazione del danno). Tutte e tre le metodologie non presuppongono più la durata infinita del componente o della struttura e quindi il controllo dell'integrità strutturale assume una rilevanza fondamentale. In tal senso la metodologia di progetto Damage Tolerance è quella che più richiede i CND proprio a causa delle ispezioni programmate sulla base dell'evoluzione del danno (Crack Growth) e della Residual Strength. I 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 consente un utilizzo intelligente del materiale in quanto sfrutta coefficienti di sicurezza più bassi e al contempo determina una maggiore sicurezza della struttura.

Nel medesimo contesto, la ricerca scientifica si sta orientando verso nuove metodologie di monitoraggio come la Structural Health Monitoring. Questa tecnica sfrutta informazioni provenienti da sensori (estensimetri e accelerometri) sparsi su tutta la struttura che consentono di monitorare in tempo reale il suo stato di salute. Un sistema simile, denominato Wind And Structural Health Monitoring System (WASHMS), è già stato applicato sulla struttura del ponte di Hong Kong.

Il limite principale delle tecniche di controllo non distruttivo è legato alla loro elevata selettività nei confronti dei materiali su cui devono essere effettuate le indagini ed al tipo di difetto riscontrabile. 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 di tipo ultra wideband. Questa tecnologia utilizza impulsi di durata molto ridotta a cui corrisponde un ampio spettro di frequenze e quindi una grande quantità di informazione ricevuta; pertanto i radar UWB permettono non solo l’individuazione di un oggetto, anche di piccole dimensioni, ma anche di ricostruirlo sotto forma di immagine tridimensionale. 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.

Scopo del presente lavoro è quello di ideare e progettare un movimentatore per il radar Novelda® NVA-R640 in grado di spostarsi di almeno 30 cm lungo due direzioni e che sia stabile, preciso e possibilmente anche economico. In prima analisi saranno trattate nella loro generalità le caratteristiche di funzionamento dei radar, con particolare riguardo ai sistemi di tipo UWB. In secondo luogo si parlerà delle tecniche di controllo non distruttivo esistenti. Infine si passerà al lavoro di tesi vero e proprio: dapprima elencando le scelte fatte per giungere all’idealizzazione del supporto mobile, per poi finire con una breve analisi strutturale atta a verificare la stabilità del sistema.



# 1 Il radar

---

## 1.1 Generalità sul radar

Il radar è un sistema che utilizza onde elettromagnetiche appartenenti allo spettro delle onde radio o microonde 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 detti target sia fissi che mobili, come aerei, navi, veicoli, formazioni atmosferiche o il suolo.

Un apparecchio radar è formato da un trasmettitore, un'antenna, un ricevitore e un indicatore. Il trasmettitore invia le radioonde per mezzo di un'antenna direzionale, che le concentra in un fascio puntato nella direzione desiderata. Quando il fascio colpisce un oggetto, viene riflesso sotto forma di eco; il fascio riflesso ripercorre il cammino di andata in direzione del trasmettitore e viene rivelato dall'antenna del ricevitore. Mediante un procedimento di amplificazione ed elaborazione computerizzata dell'eco, il ricevitore radar produce infine un segnale visivo su uno schermo.

Detto  $t$  il tempo misurato tra l'istante di emissione del segnale e la ricezione dell'eco e  $c$  la velocità di propagazione delle onde (come tutte le componenti dello spettro elettromagnetico, la velocità delle radioonde nel vuoto è di circa 299792.458 km/s), la distanza  $d$  tra l'oggetto e la stazione radar è:  $d = \frac{c \times t}{2}$

## 1.2 Cenni storici

Il termine "RADAR" fu coniato nel 1940 dalla marina militare degli Stati Uniti d'America come acronimo dell'inglese "radio detection and ranging" (traduzione letterale: "individuazione e misurazione di distanza via radio"). L'acronimo con il tempo è entrato a far parte non solo della lingua inglese ma anche delle lingue di molte altre nazioni, divenendo nome comune e perdendo la grafia maiuscola.

Numerosi inventori, scienziati e ingegneri contribuirono allo sviluppo del radar. Il primo ad usare le onde radio per segnalare la presenza di "oggetti metallici distanti" fu Christian Hülsmeyer, il quale nel 1904 dimostrò che era possibile rilevare la presenza di una nave nella nebbia, ma non ancora la sua distanza. Nell'agosto del 1917 Nikola Tesla fu il primo a stabilire i principi del funzionamento delle frequenze e del livello di potenza dei primi radar. Nel 1922 Guglielmo Marconi avanzò l'idea di un radiotelemetro per localizzare a distanza mezzi mobili e due anni dopo, nel 1924, Edward Victor Appleton effettuò il primo radiorilevamento a distanza determinando l'altitudine della ionosfera, lo strato ionizzato dell'alta atmosfera che riflette le radioonde più lunghe, per mezzo di echi. Il primo sistema radar vero e proprio fu realizzato nel 1935 dal fisico britannico Robert Watson-Watt, del Dipartimento Radio del National physical laboratory e fu il primo strumento di difesa antiaerea britannico. Nel 1939, due scienziati britannici, il fisico Henry Boot e il biofisico John T. Randall, furono artefici del più importante progresso raggiunto nella tecnologia del radar durante la seconda guerra mondiale con l'invenzione del tubo elettronico detto "magnetron a cavità risonante". Il dispositivo era in grado di generare impulsi a onde centimetriche, con potenze di picco e stabilità in frequenza nettamente superiori ai dispositivi usati in precedenza. Gli avanzati sistemi radar realizzati dai britannici negli anni Trenta svolsero un ruolo fondamentale nel corso della seconda guerra mondiale, in particolare nella battaglia d'Inghilterra, protrattasi dall'agosto all'ottobre del 1940 impedendo all'aviazione tedesca di conquistare il controllo dei cieli inglesi.

A partire dagli anni '50 i sistemi radar vennero utilizzati anche in campo civile: nei sistemi di controllo del traffico aereo (ATC, Air Traffic Control), nella radionavigazione, in meteorologia, nella rilevazione di mappe terrestri e in astronomia. Di notevole importanza fu, in quel periodo, sia l'introduzione di modelli teorici nella ricerca radar,

quali la teoria statistica della rivelazione, la “funzione di ambiguità”, le teorie sull’MTI (Moving Target Indicator), sia l’impiego di nuove tecnologie come la compressione degli impulsi, il radar Doppler, il perfezionamento degli indicatori video, l’impiego e lo sviluppo del klystron amplificatore. Dagli anni ‘60, lo sviluppo della tecnologia elettronica e dei sistemi di elaborazione permise di utilizzare nuovi tipi di magnetron e nuove tecniche di calcolo (quali la FFT); iniziarono allora gli studi sui SAR (Synthetic Aperture Radar). Successivamente l’impiego dell’informatica, dei microprocessori e dei sistemi di elaborazione ha permesso lo sviluppo dei radar a scansione totalmente elettronica, dei sistemi AWACS (Airborne Warning And Control System), dei radar d’immagine per l’osservazione dei pianeti a bordo di satelliti ecc.

### 1.3 Frequenze operative e tipi di segnali

Come in tutte le applicazioni di radiocomunicazioni o radiopropagazione la scelta delle frequenze radar utilizzate è operata sulla base dell’attenuazione del mezzo atmosferico, che varia da frequenza a frequenza e presenta picchi elevati in corrispondenza di determinate bande dello spettro elettromagnetico, le cosiddette “finestre trasmissive” localizzate nella banda delle microonde e onde radio, praticamente libere da assorbimento.

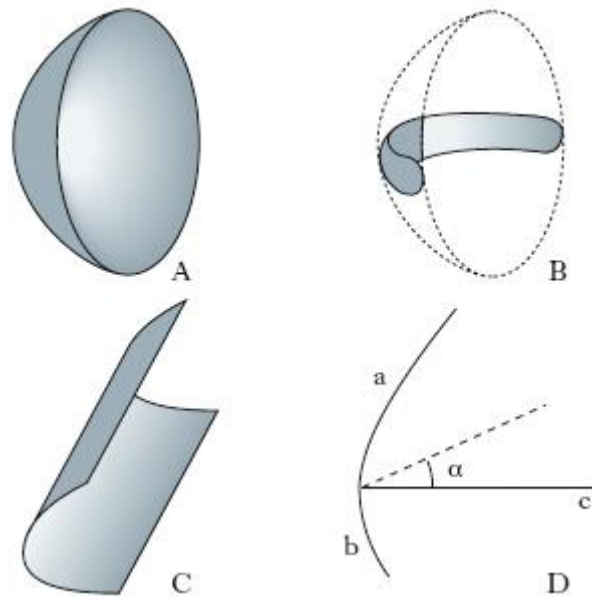
La forma d’onda può essere caratterizzata da potenze dell’ordine dei mW fino ai MW e comunque deve possedere sufficiente potenza affinché gli effetti di assorbimento che hanno luogo durante la propagazione e al momento della riflessione non riducano l’intensità del segnale a livelli non rivelabili. In generale l’intensità dell’eco può essere ridotta di diversi ordini di grandezza 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 tramite uno strumento chiamato duplexer. Vista la natura impulsiva del segnale trasmesso, il valore medio della potenza erogata nell'unità di tempo è sensibilmente inferiore rispetto alla potenza di picco.

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 dello slittamento in frequenza, detto appunto effetto Doppler, del segnale ricevuto rispetto a quello emesso permettendo in questo modo la misura della velocità radiale di un target. Per rilevare solo gli oggetti in movimento, il ricevitore radar viene regolato in modo da respingere gli echi che hanno la medesima frequenza del trasmettitore e amplificare quelli di frequenza diversa.

## 1.4 Antenne radar e scansione

Le antenne dei radar sono costituite generalmente da ampie superfici paraboliche che possono essere indirizzate verso la porzione di spazio da esplorare con un movimento detto scansione. Le caratteristiche di questo componente sono assai varie a seconda dello scopo: per radar genericamente localizzatori, cioè destinati a localizzare con la maggior precisione possibile oggetti situati nello spazio circostante, l'antenna tipica è a riflettore paraboloidico (Figura A). Antenne del genere, con apertura da qualche metro a qualche decina di metri, sono usate nei grandi radar per la scoperta lontana, per scopi sia civili sia militari. I radar utilizzati per la localizzazione di target nel piano orizzontale, come quelli per la navigazione marittima, non richiedono una grande risoluzione sul piano verticale e l'antenna allora può ridursi a una striscia di paraboloide (antenna a paraboloide troncato: Figura B). Anche le antenne cilindriche a profilo parabolico (Figura C) e quelle a cosecante quadrata (Figura D) hanno un diagramma di radiazione costituito, nel caso di antenne ad asse orizzontale, da un sottile ma ampio ventaglio verticale, e sono quindi atte a rivelare in azimuth aeromobili a diverse quote.



*Tipologie di antenne per radar*

In generale la larghezza del fascio prodotto è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione e inversamente proporzionale all'ampiezza dell'antenna, il che implica che le antenne migliori sono quelle di grandi dimensioni. Nelle unità radar mobili, l'impossibilità di adoperare antenne di grandi dimensioni favorisce l'adozione dei radar a microonde, che sono caratterizzati tra l'altro da una minore suscettibilità al rumore e da una migliore risoluzione.

Infine, in base al numero di antenne possiamo dividere i sistemi radar in due categorie: radar monostatico, ovvero con un sola antenna trasmittente/ricevente, oppure bistatico o multistatico, ovvero con due o più antenne, di cui una preposta alla trasmissione del segnale e le altre preposte alla ricezione dell'eco scatterato e che possono essere sparse su un territorio, quindi anche molto distanti dalla prima.

## 1.5 Parametri fondamentali di un radar impulsivo

- $\tau$  : durata del singolo impulso;
- PRT (o “T”) : periodo di ripetizione del treno di impulsi;
- $PRF = \frac{1}{PRT}$  : frequenza di ripetizione degli impulsi, definita come;
- $\delta = \frac{\tau}{PRT}$  : ciclo di lavoro (o “duty cycle”), è la frazione di tempo che un sistema passa in uno stato attivo in proporzione al periodo totale;
- frequenza di lavoro : è la frequenza della portante;
- potenza di picco : è la potenza con la quale viene irradiato l’impulso. Ovviamente a parità di durata dell’impulso, maggiore è la potenza, maggiore sarà l’energia irradiata e quindi la possibilità di ricevere echi da bersagli lontani;
- potenza media : è la potenza che sarebbe emessa durante un intervallo di ripetizione se il radar irradiasse energia in modo continuo anziché impulsivo.

## 1.6 Equazione del radar

Nel caso di bersaglio singolo, la quantità di potenza  $P_r$  che ritorna all'antenna ricevente è data dall'equazione del radar che altro non è che l'equazione del bilancio di radiocollegamento applicata ad un sistema radar:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2 L}$$

Dove:

- $P_t$  : potenza del trasmettitore;
- $G_t$  : guadagno dell'antenna del trasmettitore;

- $A_r$  : area equivalente di antenna del ricevitore;
- $\sigma$  : superficie equivalente dell'oggetto o RCS (Radar Cross Section). Nel caso generale di target in moto essa rappresenta il valor medio nel tempo essendo essa propriamente una grandezza aleatoria nel tempo a causa della continua variazione di assetto dell'oggetto. Ne consegue che anche la potenza ricevuta  $P_r$  fluttua nel tempo in maniera aleatoria se il bersaglio cambia il suo assetto;
- $R_t$  : distanza del trasmettitore dall'oggetto;
- $R_r$  : distanza dell'oggetto dal ricevitore;
- $L_r$  : perdite di attenuazione del mezzo atmosferico, dell'antenna e della catena ricevente;
- $\lambda$  : lunghezza d'onda.

Nel caso più comune, in cui l'antenna trasmittente e quella ricevente coincidono fisicamente (radar monostatico), si hanno alcune semplificazioni:

- $R = R_t = R_r$  e quindi  $R_t^2 R_r^2$  può essere sostituito da  $R^4$ , dove  $R$  è la distanza dell'apparato radar all'oggetto;
- $A = A_t = A_r$  l'area efficace dell'antenna;
- $G_t = G_r = \frac{4\pi}{\lambda^2} A$  funzione di guadagno dell'antenna;

da cui:

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L}$$

La formula mostra come la potenza dell'onda riflessa diminuisce con la quarta potenza della distanza, quindi l'entità del segnale ricevuto è veramente esigua, a fronte di una potenza trasmessa tipicamente elevata. In generale la riflettanza radar, ovvero il coefficiente  $\sigma$ , dipende oltre che dall'area e dall'angolo di vista dell'oggetto anche dalla sua rugosità (una superficie liscia scattera meno di una rugosa) e dalla permittività elettrica del materiale scatterante.

## 1.7 Portata del radar reale

Invertendo rispetto a  $R$  la formula della potenza ricevuta e sostituendo  $P_r$  con  $P_{min}$  (livello minimo di potenza prefissata ricevibile dal ricevitore) si ottiene una stima iniziale della massima portata radar  $R_{max}$ :

$$R_{max} = \left[ \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min} L} \right]^{\frac{1}{4}}$$

La portata reale sarà poi influenzata da altri fenomeni aleatori che influiscono sulla radiopropagazione del segnale in atmosfera, come i disturbi prodotti dagli agenti atmosferici (precipitazioni e turbolenze) e ambientali (interferenze con superficie terrestre o marina) detti clutter oltre che dalla rumorosità intrinseca del ricevitore e la sua sensibilità, dalle caratteristiche del target e dalle interferenze con altri dispositivi e sistemi elettromagnetici.

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 elaborazione 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.



## 1.8 Portata del radar non ambigua

Altro parametro fondamentale è la massima portata radar non ambigua (o portata strumentale) ovvero la massima portata per cui l'eco ricevuto può essere univocamente associato all'impulso inizialmente trasmesso e non al successivo, nel caso di radar ad impulsi. Infatti il ricevitore non può essere azionato finché non viene spento il trasmettitore. La formula relativa è:

$$R_{max} = \frac{c \times PRT}{2}$$

## 1.9 Risoluzione in distanza

La distanza radiale minima tra due target per la rilevazione distinta di entrambi è pari a:

$$R_{min} = \frac{c \times \tau}{2}$$



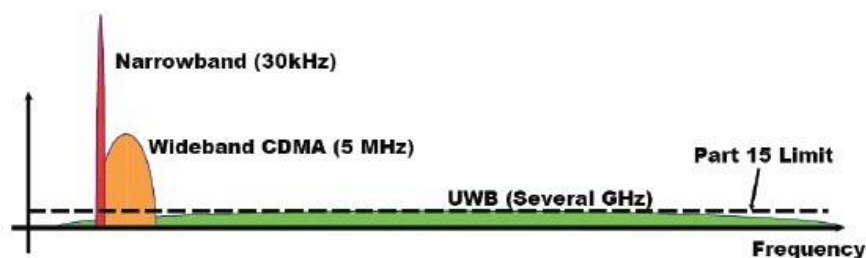
## 2 Sistemi Ultra WideBand

---

### 2.1 Generalità sui sistemi UWB

La tecnologia Ultra WideBand è nata principalmente per soddisfare la sempre maggiore richiesta di velocità di trasmissione e capacità di canale necessarie alle sempre più complesse operazioni di comunicazione. I sistemi UWB utilizzano un impulso di durata molto breve (0.25 – 1.25 ns) a cui corrisponde un ampio spettro di frequenze di dimensioni pari all'inverso della durata dell'impulso, come indicato nella formula:

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta T}.$$



*Confronto della larghezza di banda tra segnali Narrowband, Wideband e Ultrawideband*

La potenza dell'impulso si distribuisce quindi su una banda estremamente ampia dando luogo ad un segnale avente una bassa densità spettrale di potenza. La banda di frequenze utilizzate è così allargata che è difficoltoso identificare una frequenza centrale e non è più possibile effettuare la divisione dello spettro in bande da assegnare ai diversi sistemi e servizi come si fa per le tradizionali tecnologie; per forza di cose la banda di un sistema UWB dovrà coesistere con quella di altri sistemi. Per ottenere questo è di aiuto la bassissima densità di potenza e un sistema di trasmissione del segnale detto "time

hopping”. Questa tecnica consiste nel trasmettere l’impulso a intervalli di tempo irregolari e ha un duplice vantaggio: da un lato costituisce una tecnica di codifica (particolarmente utile nel campo delle comunicazioni), dall’altra permette di creare un treno di impulsi simile a un rumore (“noise-like”) che è difficilmente rilevabile da altri sistemi.

Una delle caratteristiche che rendono interessante questa nuova tecnologia è il fatto di avere innumerevoli aree di applicazione, in ognuna delle quali si sfruttano, tutti o in parte, i diversi pregi dell’UWB. Le aree principali sono:

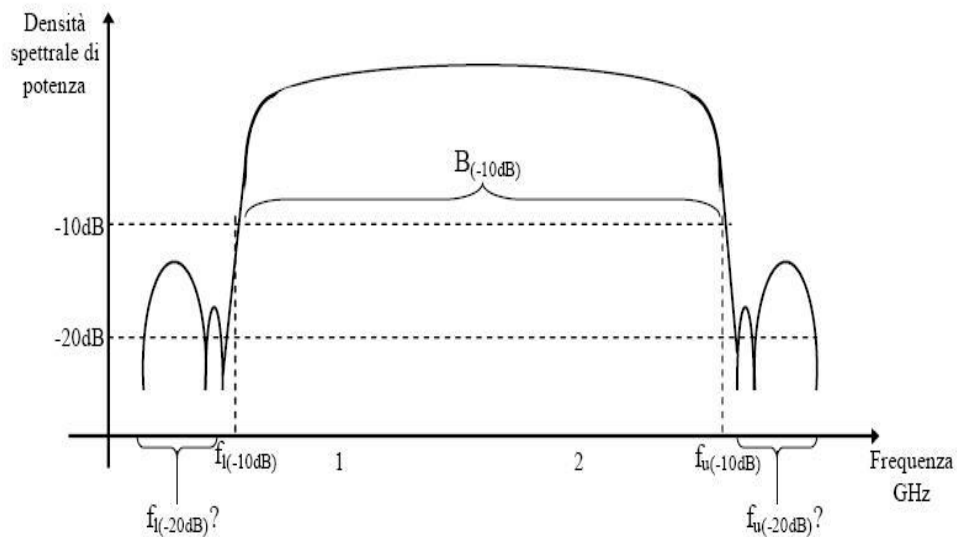
- radar;
- dispositivi di posizionamento;
- progetti in ambito militare;
- sistemi per la riproduzione di immagini;
- campionamento Ultra veloce;
- sistemi di scansione in ambito medico;
- comunicazioni W-PAN/LAN.

Gli enti che si occupano di regolamentazione e standardizzazione di nuove tecnologie nel mondo come la Federal Communications Commission (FCC) per l’America e la European Technical Standards Institute (ETSI) per Europa, hanno formulato diverse definizioni che hanno come obiettivo quello di identificare una trasmissione di tipo Ultra Wide Band; 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 banda maggiore di 500 MHz”*

Per capire questa definizione dobbiamo prima specificare alcuni parametri:

- $f_u$  : frequenza superiore, cioè la frequenza relativa al punto più alto a -10 dB dello spettro;
- $f_l$  : frequenza inferiore, cioè la frequenza relativa al punto più basso a -10 dB dello spettro;
- $f_c = \frac{f_u+f_l}{2}$  : frequenza centrale;
- $B = f_u - f_l$  : banda del segnale;
- $B_f = \frac{B}{f_c} = 2 \frac{f_u-f_l}{f_u+f_l}$  : banda frazionaria.



Quindi si possono definire tecnologie UWB quelle caratterizzate da una  $B_f \geq 0.20$  (banda frazionaria maggiore almeno del 20% della frequenza centrale).

Assieme a questa caratteristica, sono definite dalle normative delle restrizioni che relegano ad ogni tipo di applicazione UWB, una determinata finestra di frequenze:

- **imaging System** (che includono i Ground Penetrating Radars (GPRs), dispositivi medici, di sorveglianza e sistemi di analisi attraverso pareti): lo standard prevede l'utilizzo al di sotto dei 960 MHz o nella fascia 3.1 – 10.6 GHz e devono operare a contatto con il terreno al fine di individuare la presenza di oggetti;
- **sistemi di comunicazione e di misura**: che operano nella banda 3.1 – 10.6 GHz;
- **vehicular Radar System**: sistemi radar per automobili dove i limiti imposti sono di operare ad una frequenza centrale di 24 GHz e la banda di guadagno a -10 dB deve ricadere nell'intervallo di frequenze tra 22 – 29 GHz.

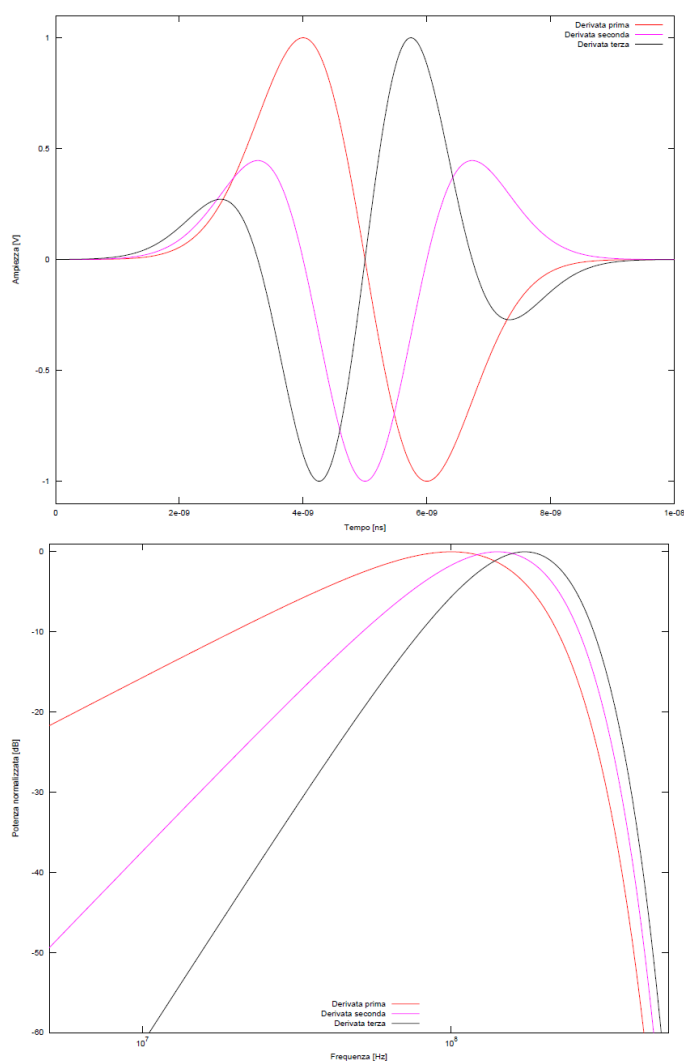
L'ultima limitazione imposta dalle normative è costituita dalla densità di potenza radio massima (EIRP, Equivalent Isotropic Radiated Power); anche questa varia in base alle frequenze utilizzate:

Frequenza (MHz)	EIRP (dBm)
960 – 1610	- 75.3
1610 – 22000	- 61.3
22000 – 29000	- 41.3
29000 – 31000	- 51.3
oltre 31000	- 61.3

Detto questo, gli enti regolatori lasciano piena libertà circa la modulazione e il tipo di segnale. 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.

## 2.2 Forme d'onda

Le forme d'onda tipiche per sistemi UWB sono quelle ottenute dalla famiglia di impulsi gaussiani, ovvero quella famiglia di monocicli che corrispondono a trasformazioni lineari di funzioni gaussiane e sue derivate nel tempo. Le funzioni gaussiane sono di classe  $C^\infty$  ma generalmente vengono considerate solo le prime due derivate. L'occupazione spettrale di tali funzioni risulta essere ampia e al crescere del numero di derivazioni si ha un restringimento verso l'alto di tale banda riducendo quindi le componenti a più bassa frequenza che riducono, a loro volta, l'efficienza del sistema di trasmissione.

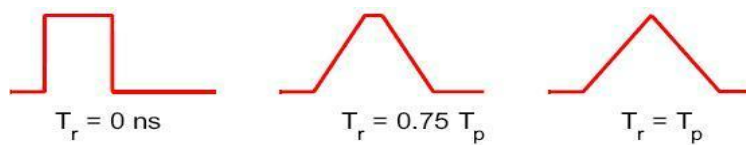


*Fig. sopra: impulsi gaussiani nel tempo; Fig. sotto: impulsi gaussiani in frequenza*

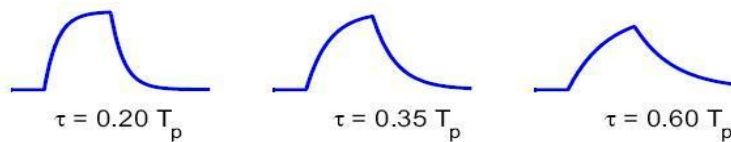
Tra gli impulsi appartenenti a questa famiglia il più utilizzato è quello a doppia gaussiana che corrisponde alla derivata seconda dell'impulso gaussiano:

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

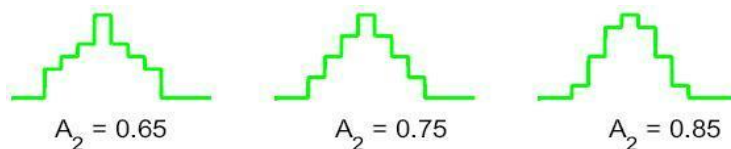
Solitamente nei sistemi UWB si utilizza una potenza di trasmissione di circa 1mW e una banda pari a 7.5 GHz; questo permette, come precedentemente detto, di avere una PSD (Power Spectral Density) molto bassa, pari circa a 0.013 mW/GHz. L'impulso a doppia gaussiana viene spesso utilizzato perché è molto semplice da generare tuttavia si possono utilizzare impulsi con forme molto diverse che possiamo raggruppare in tre gruppi: impulsi trapezoidali (Figura a), esponenziali (Figura b) e costanti a tratti (Figura c).



*Figura a*



*Figura b*



*Figura c*



## 2.3 Proprietà dei sistemi UWB

La tecnologia Ultra Wideband gode delle seguenti proprietà:

- **elevato numero di informazioni trasmesse:** il fatto di operare con segnali a banda larga è sinonimo di grande contenuto informativo;
- **grande risoluzione spaziale:** per un qualsiasi impulso radar la risoluzione spaziale è  $R_{\min} = \frac{c \times \tau}{2}$  (vedi primo capitolo). Com'è ormai noto, i sistemi UWB utilizzano impulsi di durata molto breve a cui corrisponde un  $R_{\min}$  molto piccolo; per esempio riducendo la durata di un impulso irradiato da 1s a 1ns si aumenta la risoluzione dell'impulso radar da 300 cm a 0.3 cm;
- **grande risoluzione temporale (robustezza al multipath):** gli impulsi stretti nel tempo consentono un'alta risoluzione dei cammini multipli. Infatti, a causa della breve durata dell'impulso, difficilmente un eco non desiderato andrà ad interferire con il segnale diretto. Da notare che questa proprietà dei segnali UWB rappresenta il principale motivo per cui tale tecnologia viene utilizzata nella localizzazione degli oggetti in ambienti chiusi o ad alta densità di ostacoli;
- **comunicazione e localizzazione nello stesso tempo:** solitamente l'applicazione contemporanea in sistemi di comunicazione di localizzazione e trasmissione dati comporta la presenza di numerose collisioni tra i due flussi di traffico, con la conseguenza di ottenere un basso data rate e un'alta imprecisione nella stima delle distanze. Utilizzando bande di frequenze estremamente larghe, come avviene nei sistemi UWB, è possibile riconoscere i flussi di traffico ed evitare le collisioni;
- **capacità di penetrazione attraverso gli ostacoli:** i segnali UWB, a differenza degli altri segnali a banda stretta, non vengono fortemente attenuati dagli ostacoli. Questo perché si osserva che i picchi di assorbimento di diversi materiali (in particolare i metalli) sono concentrati su bande di frequenza ristrette. Utilizzando quindi segnali UWB, il problema non si presenta;
- **bassa densità di potenza spettrale:** caratteristica che ha il duplice vantaggio di impedire a un sistema UWB di interferire con altri sistemi e di non costituire una minaccia per la salute;

- **abilità di rilevare gli oggetti fino a pochi centimetri di distanza dal trasmettitore;**
- **basso costo della tecnologia:** grazie alla semplicità di implementazione.

## 3 Controlli non distruttivi

---

### 3.1 Generalità sulle principali tecniche di controllo non distruttivo

I controlli non distruttivi (CND) sono il complesso di esami, prove e rilievi finalizzati alla ricerca di eventuali difetti nell'oggetto e realizzati in modo tale da non compromettere le funzionalità per le quali l'oggetto stesso è stato costruito. Spesso sono identificati anche con la sigla NDT dall'inglese "Non Destructive Testing" o PND derivata dall'espressione "Prove Non Distruttive".

Esistono differenti tipologie di controllo non distruttivo, ognuna delle quali differisce per i principi fisici su cui si basano e per la capacità di "individuazione" del difetto. Possiamo dividere i CND in due macrocategorie: controlli attivi e controlli passivi. I primi riguardano tutte le tecniche che prevedono l'uso di una qualche forma di energia da immettere nel provino e in presenza di un difetto ci si aspetta un cambiamento rivelabile nell'energia immessa. Fanno parte di questa categoria i metodi magnetici, radiografia, ultrasuoni, termografia attiva, correnti indotte e i metodi acustici. 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 evidenziarne il difetto. Fanno parte di questa categoria i metodi ottici, i liquidi penetranti, la termografia passiva.

Per quanto riguarda invece la capacità di penetrazione nel provino si hanno tre possibili tecniche: tecniche superficiali, sotto-superficiali e volumetriche. I metodi visivi e i liquidi penetranti fanno parte delle tecniche superficiali in quanto sono in grado di "vedere" solo i difetti affioranti in superficie. Altre tecniche, come le correnti indotte 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 quelle

tecniche che permettono l'individuazione di difetti a maggiori profondità; fanno parte di questo gruppo la radiografia, gli ultrasuoni e le emissioni acustiche.

E' bene precisare che non esiste un metodo che valga per tutte le tipologie di difetto e per tutti i materiali ma ognuno ha il proprio campo di applicazione con i relativi vantaggi e svantaggi. La scelta della tecnica "migliore" va fatta tenendo conto di un insieme di fattori quali il tipo di materiale, la dimensione del provino e la sua forma, il tipo di difetto da ricercare, il fattore umano (l'esperienza dell'operatore è cruciale quando il difetto non è oggettivamente rilevabile) e infine, il costo. Nel seguito si passano in rassegna i principali metodi di controllo non distruttivo riassumendone principio di funzionamento, campi di applicazione, pregi e difetti.

### 3.2 Metodi ottici

I metodi ottici fanno parte della categoria delle tecniche passive superficiali e la più semplice è senza dubbio l'ispezione visiva a occhio nudo o per mezzo di strumenti quali endoscopi o microscopi. 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. Le cose sono ben diverse con i microscopi elettronici che permettono ingrandimenti molto maggiori. Esistono anche altre tecniche basate sull'utilizzo di sorgenti di luce e rilevatori ottici. Tra questi strumenti si può citare:

- **Profile projector:** si basa sull'utilizzo di 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  $\mu\text{m}$ .
- **Scansione laser:** un raggio di luce concentrata viene fatto passare sulla superficie da analizzare; ogni difetto si mostra come cambiamento dell'intensità della luce riflessa.
- **Metodo a frange d'interferenza ("shadow moirè"):** utile per studiare le deformazioni del provino sotto l'azione di carichi.

- **Tecniche olografiche:** 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.



*Ispezione visiva con endoscopio dei palettamenti di una turbina aeronautica*



*Esame con profile projector*

### 3.3 Liquidi penetranti

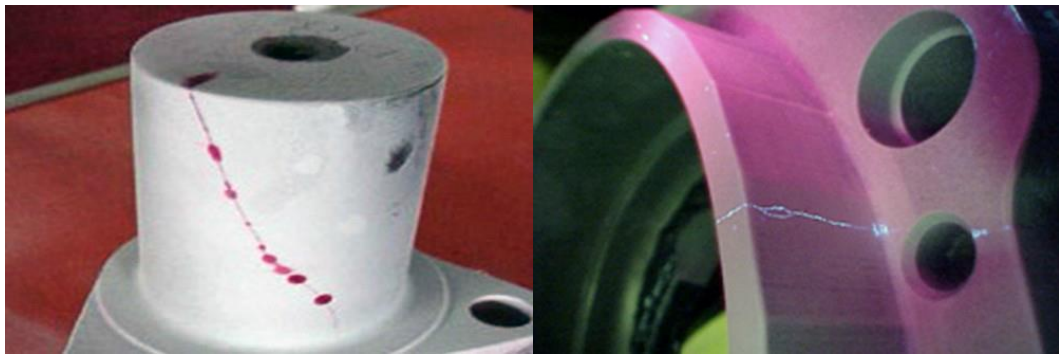
L'utilizzo di liquidi penetranti permette l'individuazione solo di difetti affioranti in superficie dove possono penetrare per capillarità particolari tipologie di liquidi o inchiostri, anche questa è quindi una tecnica superficiale. Il potere penetrante del liquido è una caratteristica molto importante 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 e 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 o alla sua struttura, il materiale tuttavia non deve essere poroso come certi materiali ceramici e deve essere inerte ai prodotti impiegati per l'indagine. Altra considerazione necessaria per l'applicazione del metodo è una superficie completamente sgombra di polvere, grassi o olio, in caso contrario è da prevedere un'operazione di pulizia e sgrassaggio.

#### 3.3.1 Tecniche di 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 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.

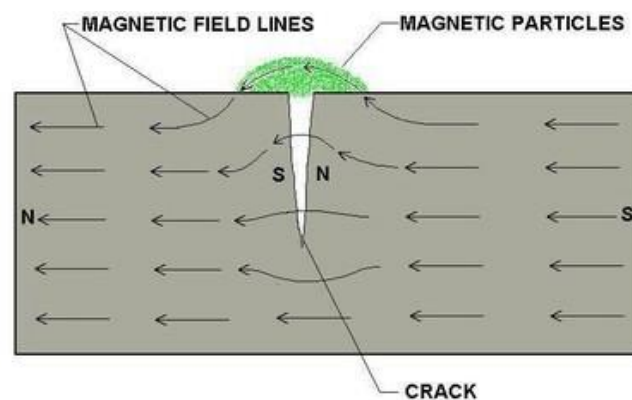
- **Tecnica con liquido penetrante fluorescente:** viene usata per individuare difetti di piccole dimensioni con superfici sufficientemente lisce. Una volta sgrassato il pezzo, questo viene cosparso di liquido penetrante che incorpora all'interno una sostanza fluorescente. Dopo aver lasciato il tempo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



*Difetto rilevato con liquido penetrante fluorescente*

### 3.4 Particelle magnetiche

Il metodo sfrutta l'andamento delle linee di forza del campo magnetico che in corrispondenza di cricche o difetti presentano delle irregolarità. Quindi il pezzo da esaminare viene cosparso con polveri magnetiche che si dispongono sulla superficie evidenziando il difetto. Questo metodo è chiaramente applicabile solo a materiali ferromagnetici e permette di individuare difetti anche sub-superficiali. 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 di più rispetto a quelli generati dalla corrente alternata che ha il vantaggio invece di facilitare la disposizione delle particelle. L'utilizzo di corrente pulsante permette invece di disporre di tutti i vantaggi derivanti dalla corrente continua e da quella alternata. Occorre però tenere a mente che il difetto è rivelabile solo se le linee del campo magnetico sono perpendicolari ad esso, o al massimo disposte a 45°, pertanto è di fondamentale importanza generare l'opportuna magnetizzazione (longitudinale o circolare). 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°C) oppure riducendo gradualmente il ciclo di isteresi.

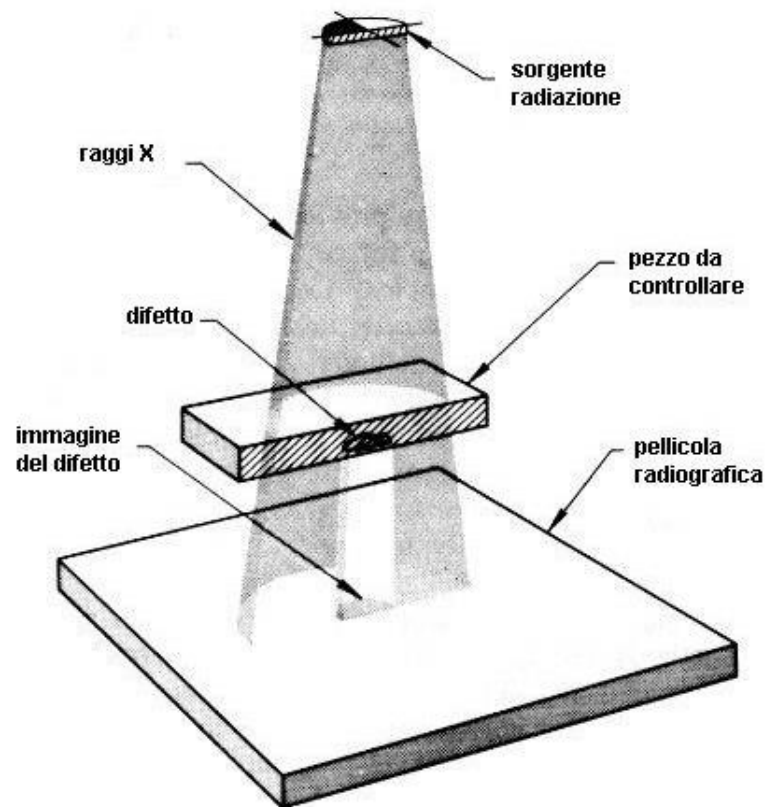


*Schematizzazione del metodo a particelle magnetiche*



### 3.5 Radiografia e radioscopia

La tecnica radiografica è una tecnica di controllo di tipo attivo e volumetrico perché permette di individuare difetti interni al pezzo in esame, qualunque siano le loro profondità dalla superficie. Sfrutta un fascio di onde elettromagnetiche fortemente penetranti come raggi X e raggi  $\gamma$  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 quindi attenuata, impressiona una superficie sensibile. L'eventuale presenza di difetti nel pezzo si manifesteranno con delle aree più chiare o più scure in proporzione all'assorbimento che il raggio ha subito.



*Principio di funzionamento della radiografia*

### 3.5.1 Tipologie di radiazione

Le indagini radiografiche possono sfruttare raggi X e raggi  $\gamma$ .

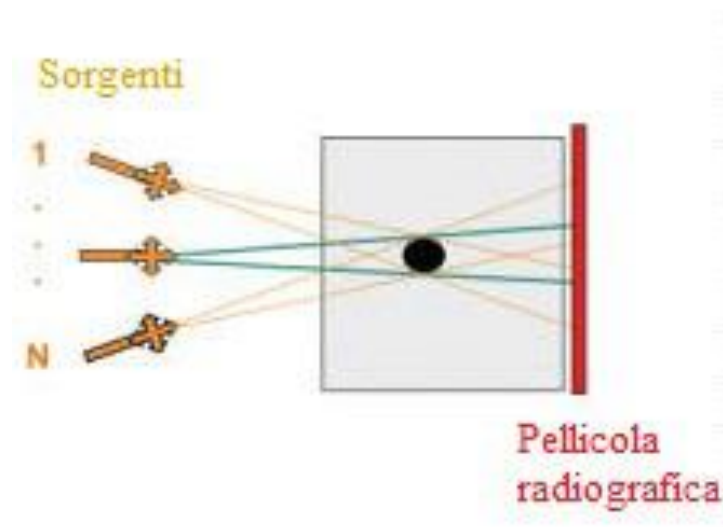
- **Raggi X:** sono generati artificialmente da particolari tubi catodici alimentati da energia elettrica. Il principio di funzionamento è semplice: all'interno del tubo viene creato il vuoto e da un catodo vengono lanciati elettroni a forte velocità costretti ad impattare su una placca metallica che funge da catodo e che genera onde elettromagnetiche. Le proprietà del raggio dipendono dalla composizione del catodo utilizzato che generalmente è costituito da un filo incandescente di tungsteno avvolto a spirale.
- **Raggi  $\gamma$ :** a differenza dei raggi X, 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.

Oggigiorno gli apparecchi radiografici utilizzano sovente i raggi X per il semplice motivo che producono immagini ad alto contrasto con una buona capacità di evidenziazione ed hanno il principale vantaggio di poter interrompere l'emissione o renderla modulabile.

### 3.5.2 Tecniche di esame

Le tecniche di esame si differenziano in base alla superficie sensibile utilizzata:

- **radiografia:** è ottenuto applicando dietro all'oggetto da esaminare una pellicola radiografica la quale sarà più chiara dove i raggi sono stati maggiormente assorbiti (maggiore densità del materiale) mentre sarà più scura nel caso opposto;
- **radioscopia:** in questo esame si utilizza lo schermo rivelatore che si illuminerà più o meno intensamente in funzione dell'intensità della radiazione ricevuta fornendo la stessa immagine, ma in positivo, di quella fornita dalla radiografia con lastra fotografica;
- **stereografia:** è una tecnica radiografica che permette di ricostruire un'immagine tridimensionale del provino realizzando due radiografie con angolature differenti. In questo modo è possibile calcolare a quale profondità si trova il difetto, semplicemente sfruttando la misura della parallasse.



### *Tecnica della stereografia*

Il potere di evidenziazione della radioscopia è inferiore a quello della radiografia perché la prima è una rilevazione istantanea 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 sia bassa. Tuttavia la radioscopia 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.

## 3.6 Ultrasuoni

L'ispezione mediante ultrasuoni è il metodo CND più utilizzato. E' una tecnica volumetrica perché consente di evidenziare difetti superficiali e interni a qualunque profondità misurandone la distanza e la dimensione. La tecnica si basa essenzialmente sul fenomeno della trasmissione di onde acustiche ad alta frequenza, dette ultrasuoni, all'interno del 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) e sono generati sfruttando le proprietà di particolari materiali chiamati cristalli piezoelettrici che sono in grado di contrarsi ed espandersi quando sottoposti all'azione di un campo elettrico alternato e, a determinate frequenze, le vibrazioni del materiale producono onde elastiche di frequenza ultrasonora. Questi cristalli sono contenuti in un trasduttore detto "sonda" il quale è in grado di fare sia la fase di trasmissione che quella di ricezione. 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. Per ottenere un buon accoppiamento tra la sonda ed il materiale è tuttavia necessario eliminare l'aria che vi si interpone, cosa che viene ottenuta mediante l'utilizzo di un mezzo di accoppiamento. Quest'ultimo è costituito generalmente da gel, acqua o oli e deve avere buone caratteristiche di bagnabilità ma soprattutto non deve assorbire le onde ultrasonore.

### 3.6.1 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 di cui tener conto è l'impedenza acustica a cui è imprescindibilmente legata la capacità di riflessione di energia del difetto. 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 materiali. Se entrambi i materiali presentano simili valori di impedenza 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, sia esso riflesso o diretto (che cioè ha attraversato l'intero materiale), è caratterizzato da due parametri fondamentali:

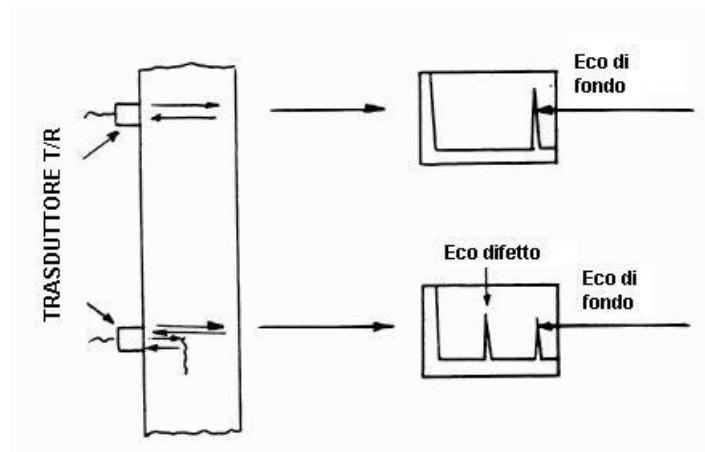
- ampiezza: corrisponde al valore di picco dell'impulso;
- tempo di volo: ovvero il tempo intercorso tra l'impulso di trasmesso e quello ricevuto; sullo schermo dell'apparecchio tale tempo è indicato dalla distanza tra i due impulsi.

### 3.6.2 Tecniche di esame

Ci sono principalmente due tecniche d'esame che sfruttano le capacità degli ultrasuoni di essere riflessi dalle discontinuità e di attraversare i materiali.

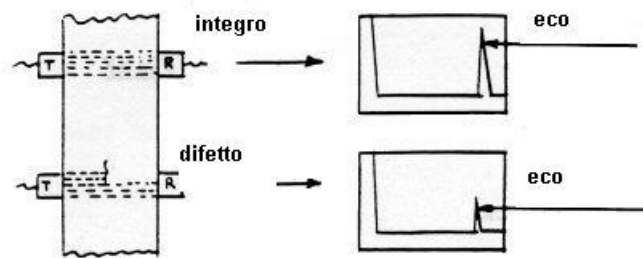
- **Tecnica per riflessione:** la tecnica per riflessione o metodo dell'impulso-eco si basa sulla proprietà del fascio ultrasonoro di essere riflesso ogni volta che incontra una discontinuità nel materiale in cui si propaga. Questa tecnica permette la localizzazione dei difetti nel pezzo in quanto, dalla posizione nell'oscillogramma dell'eco, si ha 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.



*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) e la determinazione dei difetti risulta comunque essere meno efficace rispetto al metodo precedente non riuscendo a determinare la 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.

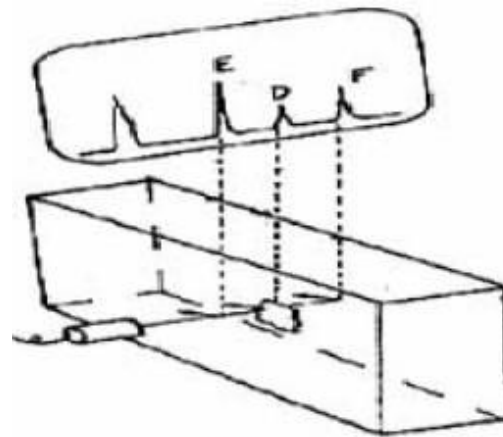


*Tecnica per trasparenza*

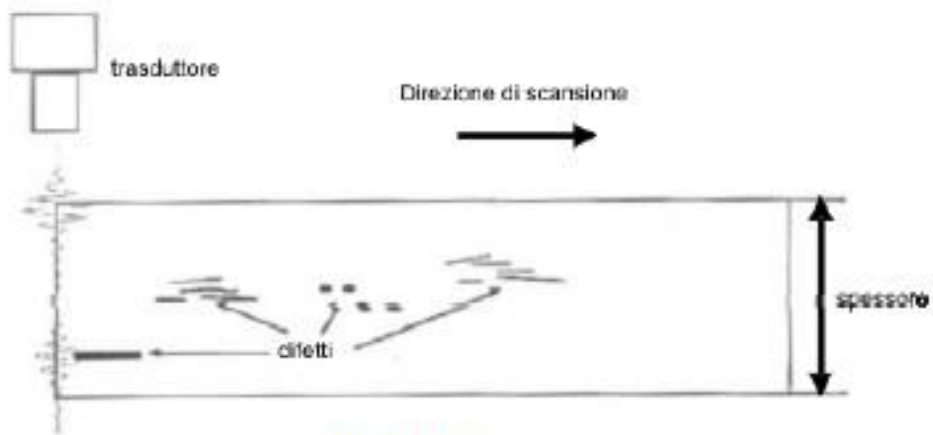
### 3.6.3 Rappresentazione dei risultati

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

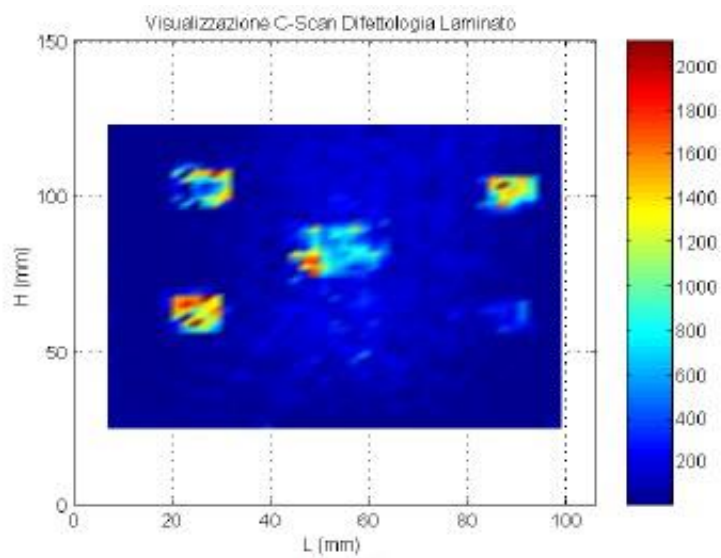
- **Metodo A-scan:** è la rappresentazione nel dominio del tempo del segnale ultrasonoro ricevuto. L'A-scan di un segnale ottenuto con la tecnica per riflessione permette di ottenere informazioni sullo spessore del pezzo, profondità del difetto e il suo coefficiente di assorbimento.
- **Metodo B-scan:** è una rappresentazione sintetica degli A-scan ottenuto con la tecnica per riflessione lungo una linea di scansione. Come risultato si avrà la rappresentazione di una sezione del pezzo lungo una linea di scansione da cui si può ricavare il suo spessore, la planarità della superficie e gli eventuali difetti.
- **Metodo C-scan:** è la rappresentazione in due dimensioni (in pianta) dello stato interno del pezzo.



(figura a)



(figura b)



(figura c)

*Tecniche di visualizzazione A-scan (a), B-scan (b), C-scan (c)*



## 3.7 Termografia

La termografia sfrutta la capacità di dispositivi come le termocamere di rivelare l'intensità della radiazione infrarossa emanata da un'oggetto opportunamente riscaldato 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 delle tensioni che permette di visualizzare e misurare le tensioni in componenti sotto sforzo individuando i punti più sollecitati di un oggetto che spesso sono i punti dove più facilmente si possono originare cricche.

Il più diffuso rilevatore termico è costituito da un cristallo di materiale ferroelettrico che quando viene riscaldato rilascia fasci di elettroni i quali vengono convertiti in un'immagine. Un'altra tipologia è costituita dai rilevatori quantistici (o photonic detectors) che rilevano l'energia sotto forma di fotoni i quali eccitano gli atomi di un semiconduttore che a sua volta 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 che le termocamere funzionano solo nelle due finestre dello spettro 3 – 5  $\mu\text{m}$  e 8 – 14  $\mu\text{m}$ .

### 3.7.1 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.

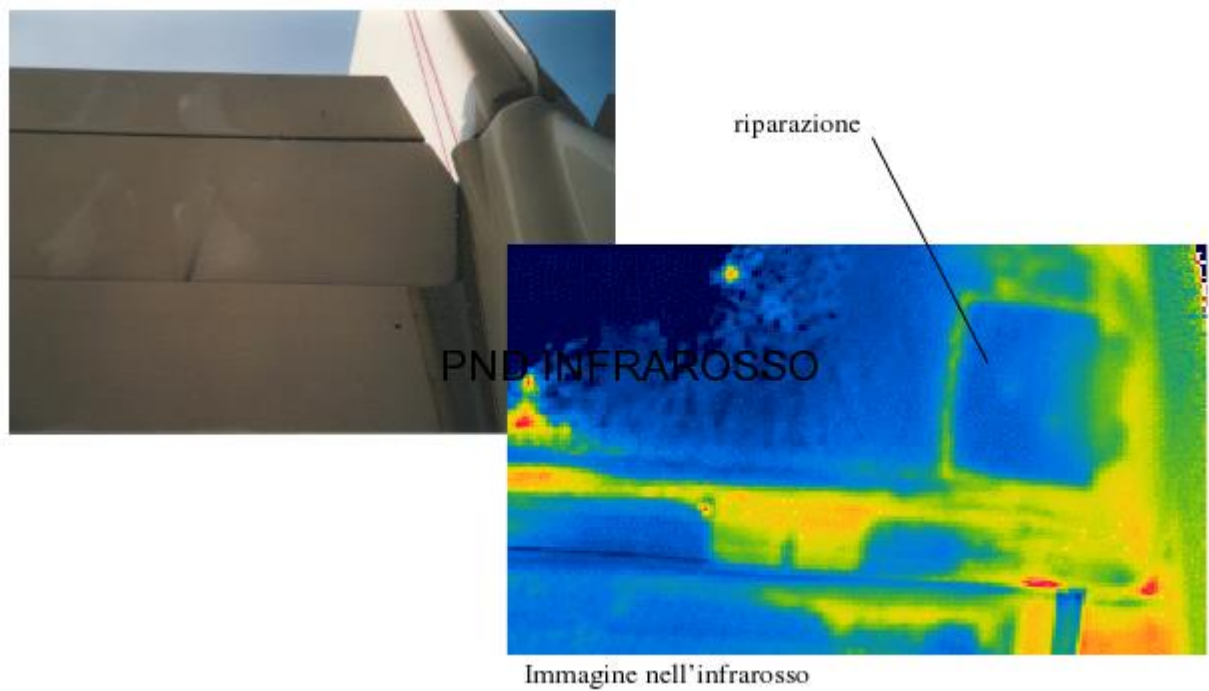
Un'altra suddivisione riguarda il modo con cui viene stimolato l'oggetto da analizzare: si avranno metodi attivi se l'oggetto viene stimolato da una sorgente di calore esterna

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 trova 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:** dopo essere stato riscaldato il provino viene fatto raffreddare per diffusione. 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 ad 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. 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 metodo di 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. A differenza delle altre tecniche fototermiche, in questa è possibile riscaldare il pezzo internamente. 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.



*Rilevazione con tecnica termografica di una riparazione effettuata su una superficie mobile di un piccolo aereo da turismo in fibra di vetro*

### 3.8 Correnti indotte

Questo metodo è noto anche come Eddy Current e si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica pertanto è applicabile a tutti i materiali conduttori compresi i compositi in fibra di carbonio (restano invece esclusi i compositi in fibra di vetro o aramidica). Il campo magnetico generato da una bobina alimentata con corrente alternata produce, nel pezzo da esaminare, delle correnti indotte. In presenza di difetti, tali correnti avranno una diversa intensità a causa del cambiamento di percorso e quindi si avrà un diverso valore di impedenza sulla bobina rispetto allo stesso circuito collegato ad un pezzo integro. Visto che le correnti indotte si concentrano vicino alla superficie, questa tecnica consente di individuare difetti solo superficiali o sub-superficiali (al massimo 10-15 mm di profondità). In definitiva 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.

### 3.9 Metodi acustici

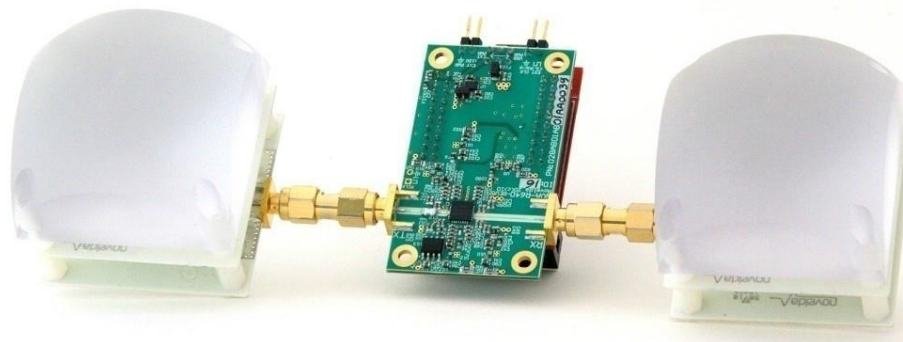
I metodi acustici consistono nel rilevare i segnali acustici o ultrasonici generati dalla deformazione di un materiale sotto l'effetto di un carico. Applicando una forza al provino questo dapprima si deforma elasticamente accumulando energia poi, nel caso in cui esso contenga difetti che possono indebolirlo, potrebbe raggiungere uno stato di rottura. Se questo avviene, parte dell'energia liberata si disperde aumentando la superficie di rottura mentre la restante parte produce attività acustica sotto forma 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.

## 4 Strumenti a supporto del lavoro: il radar UWB

---

### 4.1 Radar Novelda® NVA-R640 con chip NVA6000

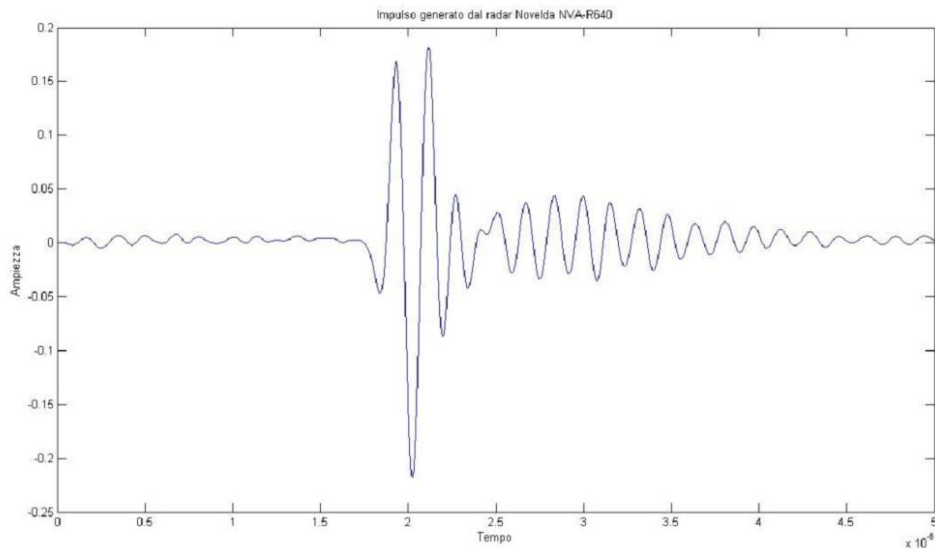
Il radar a disposizione è il modello NVA-R640 prodotto dalla norvegese Novelda®. Si tratta un prodotto “general-purpose” ovvero è utilizzabile e adattabile a diverse applicazioni e ambiti grazie al fatto che può essere configurato ad hoc, consentendo di ottenere risoluzioni spaziali fino a 4mm e ha un raggio d’azione di 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 un’ulteriore scheda per il modulo I/O. Il sistema è interfacciato al PC tramite collegamento USB che provvede anche alla sua alimentazione.



*Modello radar NVA-R640, completo di antenne e scheda I/O*

Il chip NVA6000 è in grado di generare un segnale equivalente alla derivata settima dell’impulso di Gauss 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 ( $t_c$ ) fra tre differenti valori: 26, 52 e

280 ps; utilizzando il valore più basso, la frequenza di campionamento può quindi arrivare fino a 39 GHz. Il radar Novelda® ha un consumo energetico pari a 113 mW grazie all'utilizzo dell'architettura CTBV (Continuous Time Binary Value) che consente di eliminare l'utilizzo dei convenzionali clock utilizzati per regolare i processi di timing e di misura.



*Impulso generato dal chip NVA-R6000*

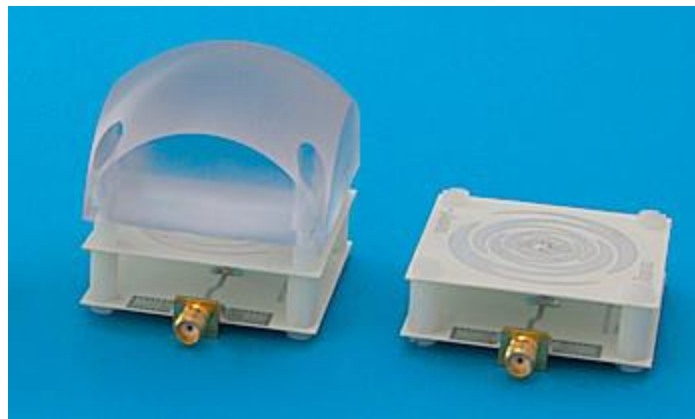
La frequenza di ripetizione (PRF) può arrivare fino a 48 MHz e scegliendo di rilevare tutti i 512 campioni acquisibili nel tempo di campionamento più piccolo (26 ps come nel caso precedente), la finestra di osservazione avrà durata pari a circa:

$$t_f = t_c \times \text{campioni} = 26 \times 10^{-12} \times 512 = 13.3 \text{ ns}$$

Questo corrisponde a una distanza di osservazione di:

$$d = \frac{c \times t_f}{2} = \frac{299792458 \times 512 \times 26 \times 10^{-12}}{2} = 1.99 \text{ m}$$

Il radar è provvisto di due antenne, una trasmittente e una ricevente (di dimensioni 45 x 45 x 15 mm), entrambe provviste di dielettrico per aumentarne la direttività. In questo modo il cono di apertura è 40° (verticale) x 35° (orizzontale) con guadagno di 6.7 dB mentre, senza i dielettrici, il cono di apertura risulterebbe essere 65° (verticale) x 85° (orizzontale) con guadagno di 6 dB. Inoltre esse presentano impedenza di 50 Ohm, polarizzazione lineare e potenza massima di emissione pari a 1 W EIRP.



*Antenna con dielettrico (sinistra) e senza dielettrico (destra)*

Il radar è interfacciabile al PC tramite cavo USB e grazie al software “Radar Scope”, distribuito da Novelda<sup>®</sup>, è possibile configurare manualmente i parametri di funzionamento. Novelda<sup>®</sup> offre anche utili script per interfacciare il radar con l’ambiente Matlab, dando quindi la possibilità di rielaborare il segnale ricevuto senza pregiudicare la possibilità di configurare manualmente i parametri.

## 5 Progettazione del supporto per radar UWB

---

Per ottenere un'ampia superficie di scansione, i sistemi radar utilizzano soluzioni talvolta molto differenti. Come abbiamo detto precedentemente, per ottenere una buona risoluzione spaziale è necessario che il fascio di onde sia il più ristretto possibile ma questo significa che sarà ristretta anche l'area che si andrà ad analizzare; in base al tipo di utilizzo sono previste diverse configurazioni che differiscono principalmente per numero, disposizione e movimentazione delle antenne e tipo di segnale.

Anche nel nostro caso si è reso necessario avere a disposizione un supporto in grado di alloggiare il radar e di muoverlo con precisione, lungo due direzioni (orizzontale e verticale) con lo scopo di poter rivolgere le antenne sull'intero pezzo da scansionare ed evidenziarne i difetti. Il sistema migliore per permettere un preciso movimento lungo due direzioni è quello che ricorda una fresatrice industriale (come quella nella figura sottostante) “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 ancor 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.



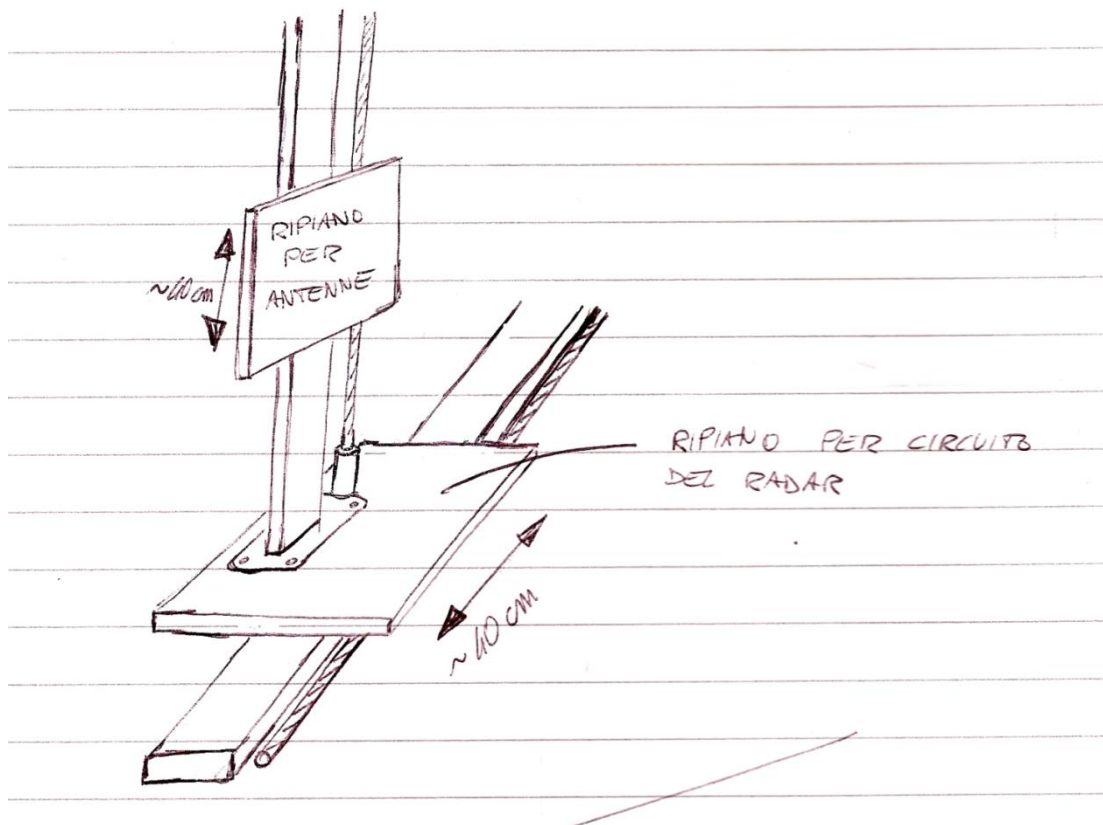
*Fresatrice industriale*



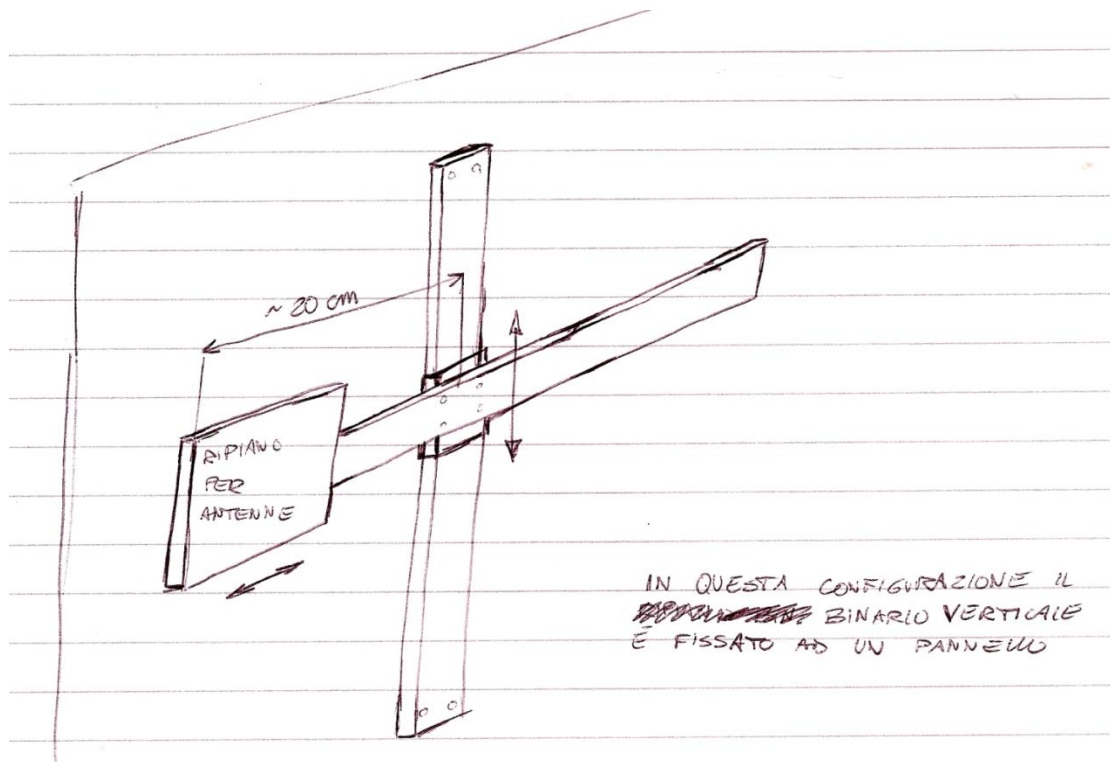
## 5.1 Layout della struttura

Per prima cosa è stata scelta il tipo di struttura tenendo conto principalmente di due caratteristiche: semplicità di costruzione, e minimizzazione del carico strutturale al fine di utilizzare guide più piccole e quindi meno costose. Tra quelle prese in considerazione ricordiamo:

- struttura a sbalzo;
- struttura a due colonne;
- struttura con base mobile;
- struttura a croce.



*Schema di struttura con base mobile*



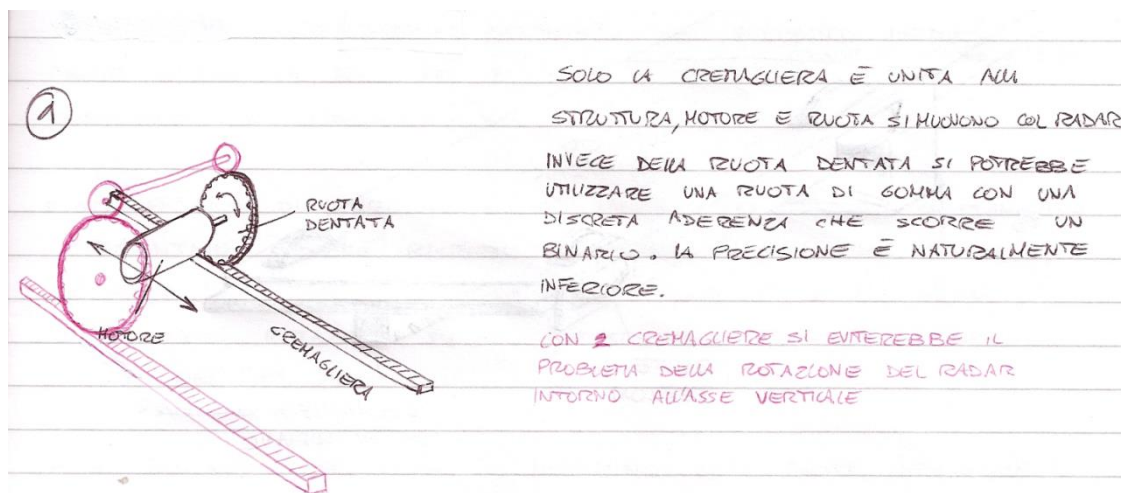
*Schema di struttura a croce*

La scelta è ricaduta sulla struttura a base mobile perché è meno sollecitata della prima e al contempo più semplice della soluzione a due colonne. La struttura a croce invece è stata scartata a causa del grande ingombro in quanto per poter funzionare deve essere fissata a parete o ad un pannello verticale di dimensioni pari alla lunghezza delle guide.

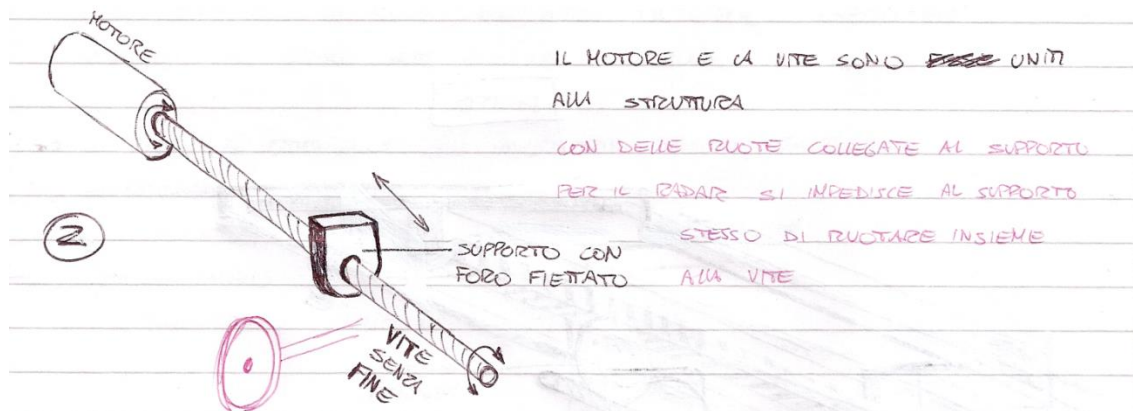
## 5.2 Sistema di movimentazione

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. Fin da subito sono stati presi in considerazione tre sistemi:

- ruota dentata e cremagliera;
- vite senza fine;
- cinghia.



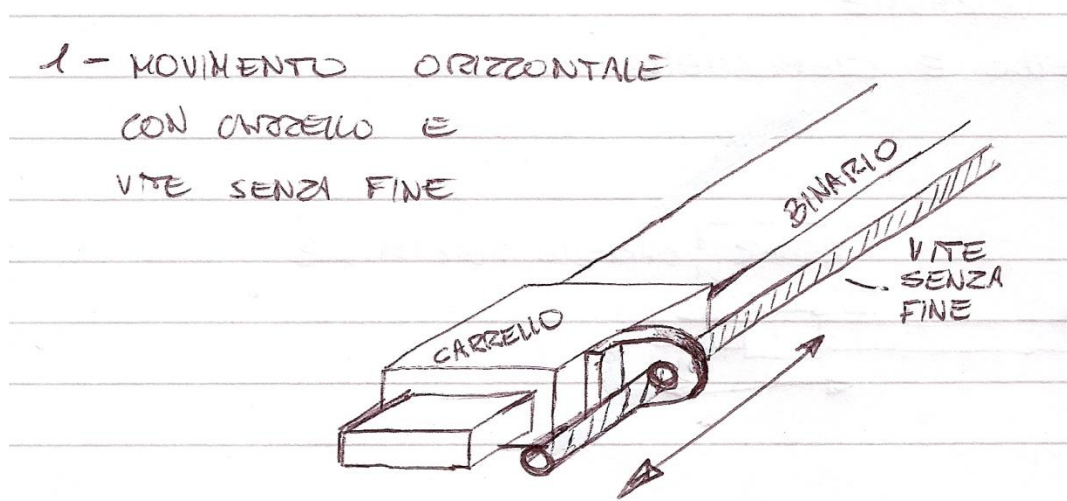
Schema di movimentazione a ruota dentata e cremagliera

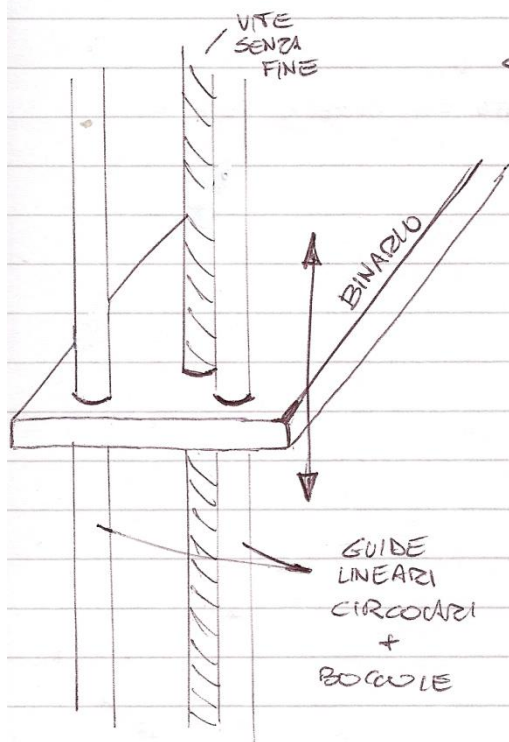


Schema di movimentazione con vite senza fine

Tra questi la movimentazione a vite senza fine è risultato il migliore per ingombro, facilità di realizzazione (è composta da soli tre elementi: motorino elettrico, vite senza fine e foro filettato), precisione e costi. Inoltre il fatto di non aver bisogno di grandi velocità di movimento (sicuramente più elevata negli altri sistemi) ha reso ancora più facile la scelta.

Di seguito riporto alcuni schizzi che mi sono stati utili in fase di idealizzazione del progetto in cui sono rappresentati possibili accoppiamenti tra struttura e sistema di movimentazione.





2 - MOVIMENTO VERTICALE

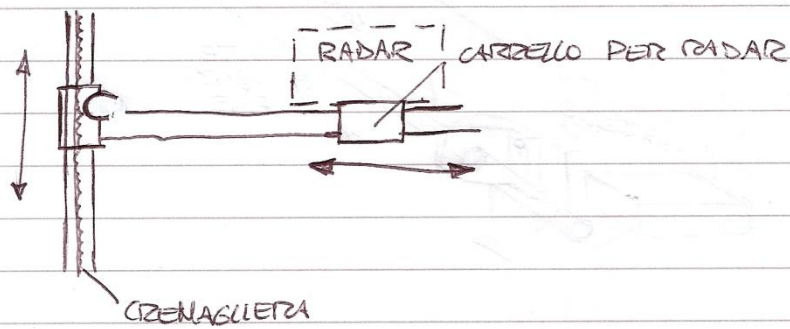
CON 1 O 2 GUIDE CIRCOLARI  
E VITE SENZA FINE

IL MOTORE NON ~~S~~ MUOVE CON  
TUTTA LA STRUTTURA E IL BINAZIO

GUIDE  
LINEARI  
CIRCOLARI  
+  
BOCCOLE

3 - MOVIMENTO VERTICALE

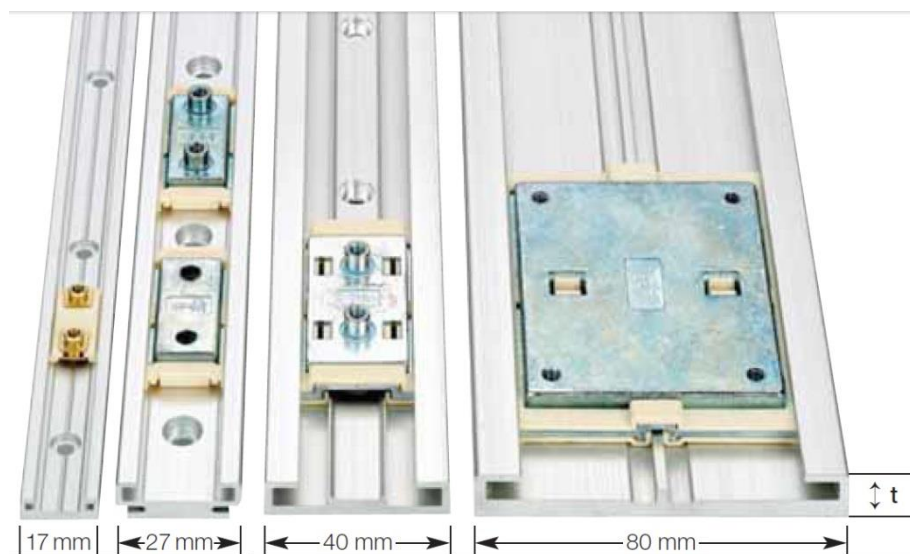
CON CARRELLI E CREMAGLIERA



QUI IL MOTORE PASSO-PASSO È FISSATO SUL CARRELLI PER IL  
MOVIMENTO VERTICALE

### 5.3 Scelta dei carrelli e analisi strutturale

Per quanto riguarda i carrelli la scelta è ricaduta sulla linea igus® DryLin® N in quanto vantano resistenze a carico e a momenti superiori a quelli di cui necessitiamo, piccole dimensioni, pesi ridotti, basso attrito, assenza di manutenzione e costi contenuti.

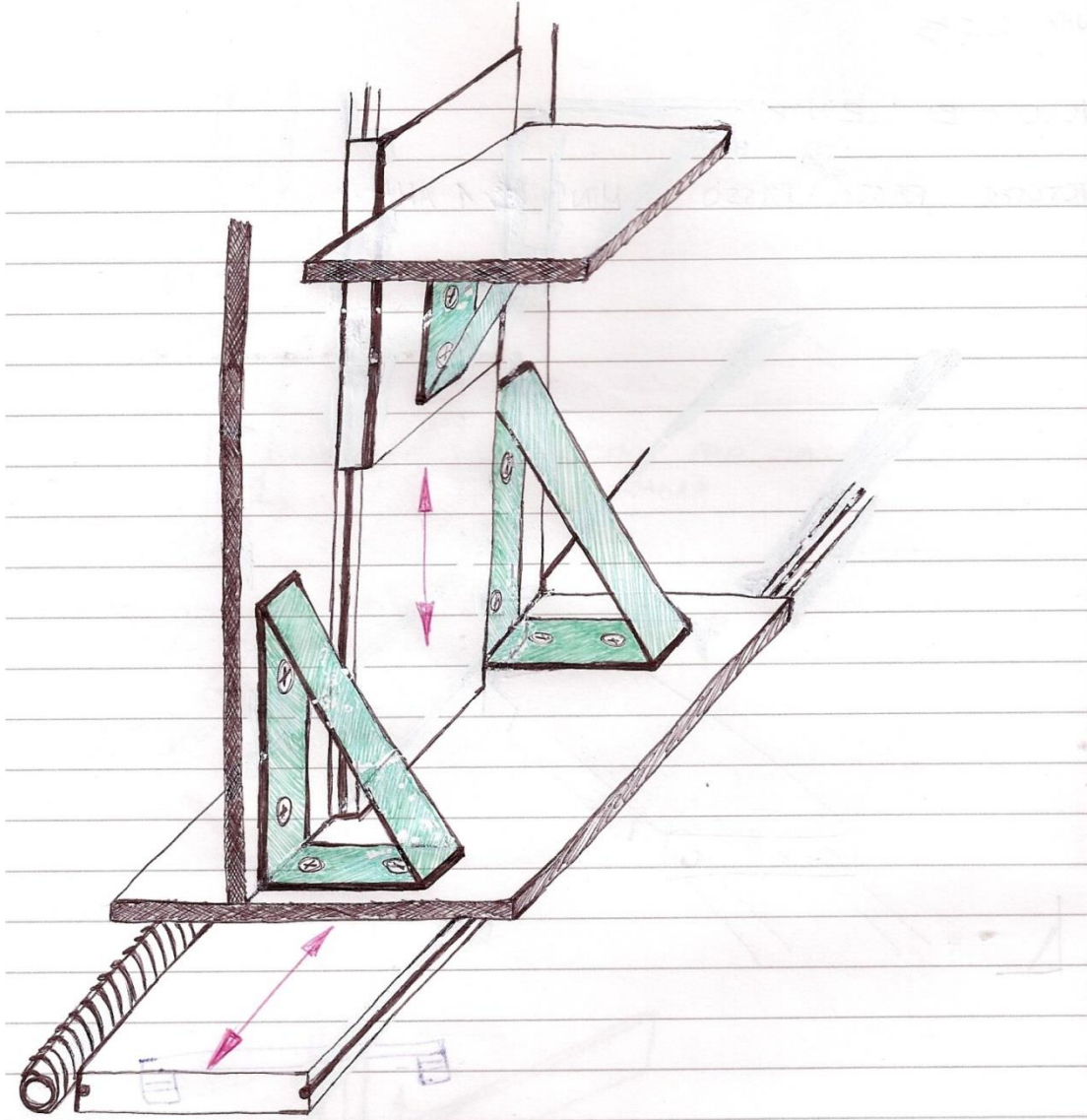


DryLin® N	Height t (mm)
N17	6.0
N27	9.5
N40	9.5
N80	12

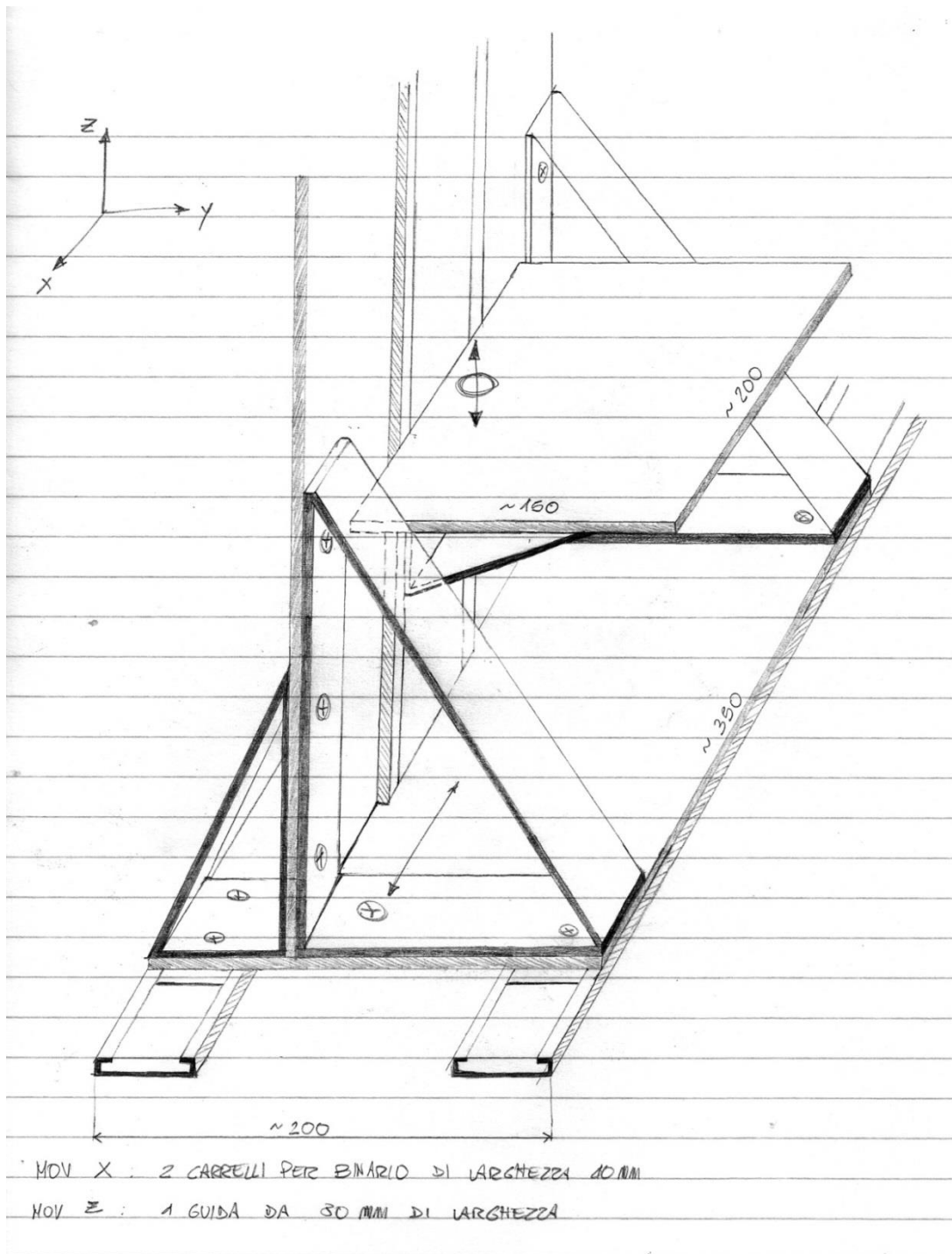
*Guide lineari igus® DryLin® linea N e tabella con rispettive altezze dei binari*



Da qui erano possibili due ulteriori opzioni: utilizzare due guide da 80 mm (una per direzione di movimento), oppure utilizzare due guide da 40 mm per il movimento orizzontale e una da 80 mm per quella verticale.



*Schizzo della struttura con due guide lineari da 80 mm*



*Schizzo della struttura con una guida da 80 mm e due da 40 mm*

La scelta è ricaduta sulla seconda configurazione perché è quella in grado di conferire una maggiore stabilità e quindi precisione durante la scansione, riducendo al minimo le oscillazioni.

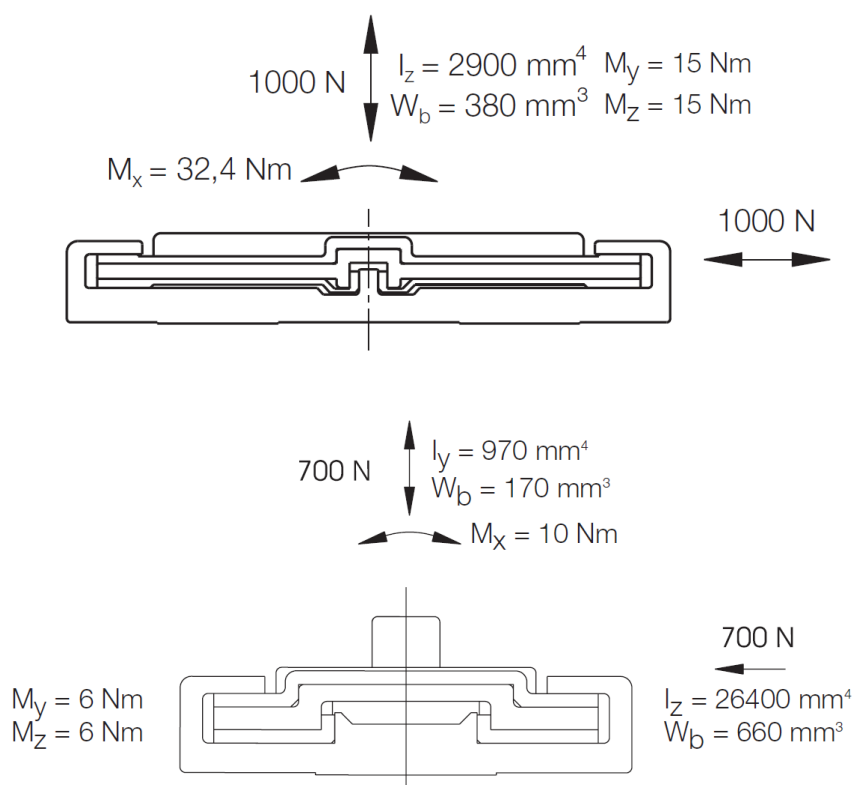


A questo punto sono state calcolate, in maniera approssimativa, forze e momenti agenti sulla struttura per poterli confrontare con i carichi massimi ammissibili dalle guide lineari.

Il calcolo del momento sul carrello verticale è relativamente semplice: considerando il peso specifico del compensato di  $420 \text{ kg/m}^3$  e il peso del radar pari a  $0.3 \text{ kg}$  ( $2.943 \text{ N}$ ) troviamo che il peso sospeso totale è di  $0.465 \text{ kg}$  ( $4.562 \text{ N}$ ). Con una distanza del baricentro dal carrello intorno ai  $67 \text{ mm}$  si avrà un momento:

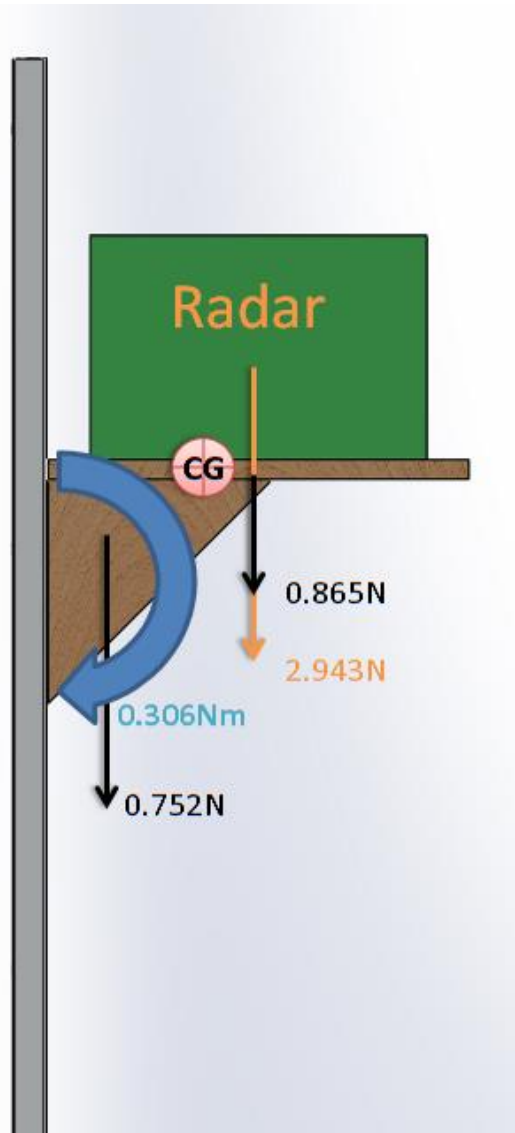
$$M_z = m_{tot} \times g \times d_{ycg} = 0.465 \times 9.81 \times 0.067 = 0.306 \text{ Nm}$$

di gran lunga inferiore al massimo ammissibile di  $15 \text{ Nm}$ .



*Fig. sopra: carichi ammissibili per guida lineare igus® DryLin® N da 80 mm;*

*Fig. sotto: carichi ammissibili per guida lineare igus® DryLin® N da 40 mm*



*Rappresentazione dei carichi agenti sul carrello verticale*

Per quanto riguarda il carico sulle due guide orizzontali consideriamo per prima cosa di avere il baricentro di tutta la struttura posizionato a circa metà strada tra i due binari in modo che il carico sia ripartito in egual misura. Al peso ottenuto precedentemente dobbiamo aggiungere quello della guida verticale (1140 g/m) del suo carrello (100 g) della base in compensato (2.74 kg) e del sistema di movimentazione (motore passo passo e vite senza fine, circa 1 kg) per un totale di 5 kg (49.05 N). Considerando che il peso di tutta la struttura si distribuisce su ben quattro carrelli ognuno dei quali è in grado di sostenere un peso di 700 N possiamo dire che non solo abbiamo un certo margine di sicurezza, ma la struttura è ampiamente sovradimensionata.

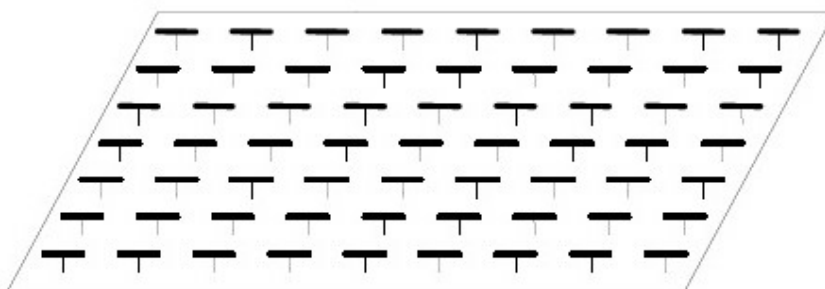
## Conclusioni e sviluppi futuri

---

Il presente lavoro svolto insieme al mio collega Simone Gubinelli, è nato con lo scopo di studiare e sviluppare la fattibilità di un nuovo metodo di analisi per controlli non distruttivi su materiali compositi. La domanda è: “perché utilizzare un radar UWB?”. L’idea è quella di soddisfare la sempre maggiore richiesta di semplicità ed economicità, mantenendo uno standard qualitativo elevato. Il continuo sviluppo di apparati radar UWB, in particolare nel campo della comunicazione, della rilevazione militare e in campo medico, ha permesso un notevole passo in avanti sia in termini di costi che di capacità risolutiva arrivando a risoluzioni sub millimetriche; caratteristica questa fondamentale nel caso dei CND: basti pensare che un difetto come la delaminazione, inclusione o presenza di vuoti ha, in generale, dimensioni dell’ordine del millesimo di millimetro. Il radar messo a disposizione dall’Università di Bologna presenta una risoluzione spaziale di circa 4 mm che è ben lontana dalle dimensioni dei reali difetti presenti nei materiali compositi, per questo motivo per i nostri esperimenti sono stati creati appositamente difetti più grandi e i risultati sono stati soddisfacenti.

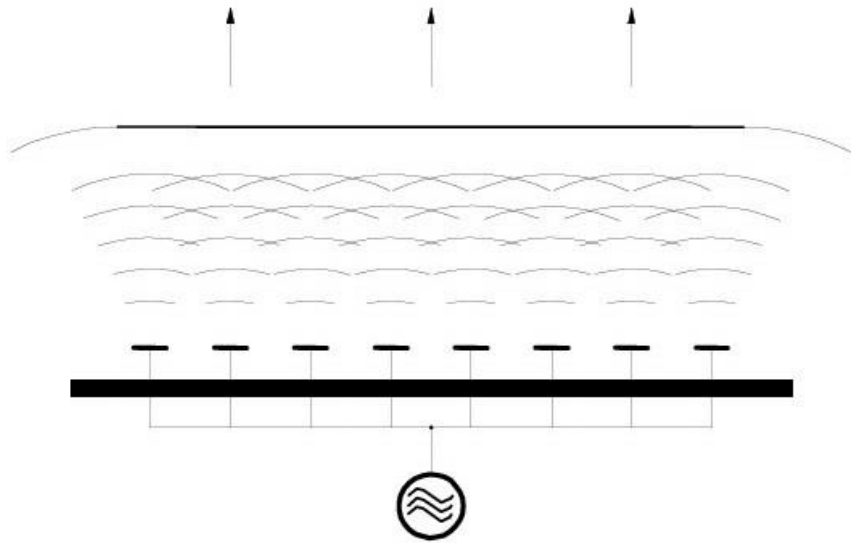
Come già detto, si è reso necessario l’uso di un sistema di movimentazione in grado di scansionare automaticamente tutto il pezzo e di avere un’immagine bidimensionale dello stesso con posizione e dimensione del difetto.

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. Una possibile soluzione a questo problema è l’utilizzo 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 nelle differenti direzioni è realizzato elettronicamente (scansione elettronica) con tempi di commutazione trascurabili. Quindi, mentre un sistema SAR (Synthetic Aperture Radar) utilizza un’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.

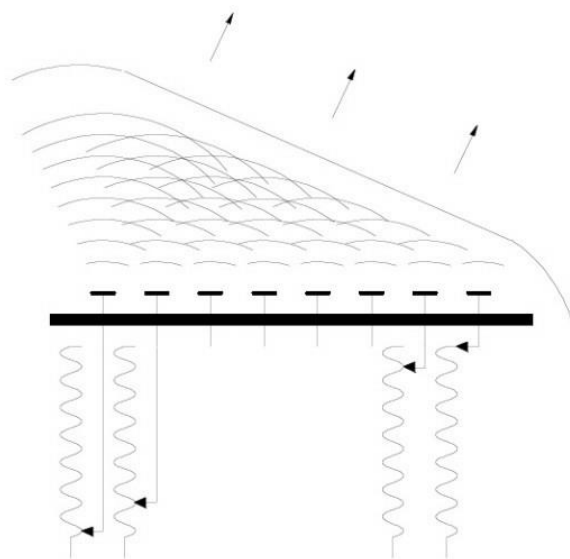


*Array (matrice) di antenne per un sistema phased-array*

Avendo a disposizione un array di antenne disposte su una superficie piana ed alimentati in fase, 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 propagerà in direzione diversa rispetto alla normale al piano, e dipendente dallo sfasamento esistente tra i singoli emettitori. E' dunque possibile controllare elettronicamente l'orientamento del fascio d'antenna (tipicamente entro circa  $\pm 45^\circ$ ) agendo opportunamente sulle fasi dei singoli trasmettitori utilizzando dispositivi sfasatori (phase shifters). 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) in modo da eliminare la necessità della scansione meccanica, almeno nel settore che può essere coperto tramite la scansione elettronica. Per scansioni bidimensionali quindi non occorrerebbe alcuna movimentazione meccanica con vantaggi in termini di tempo, qualità e precisione.



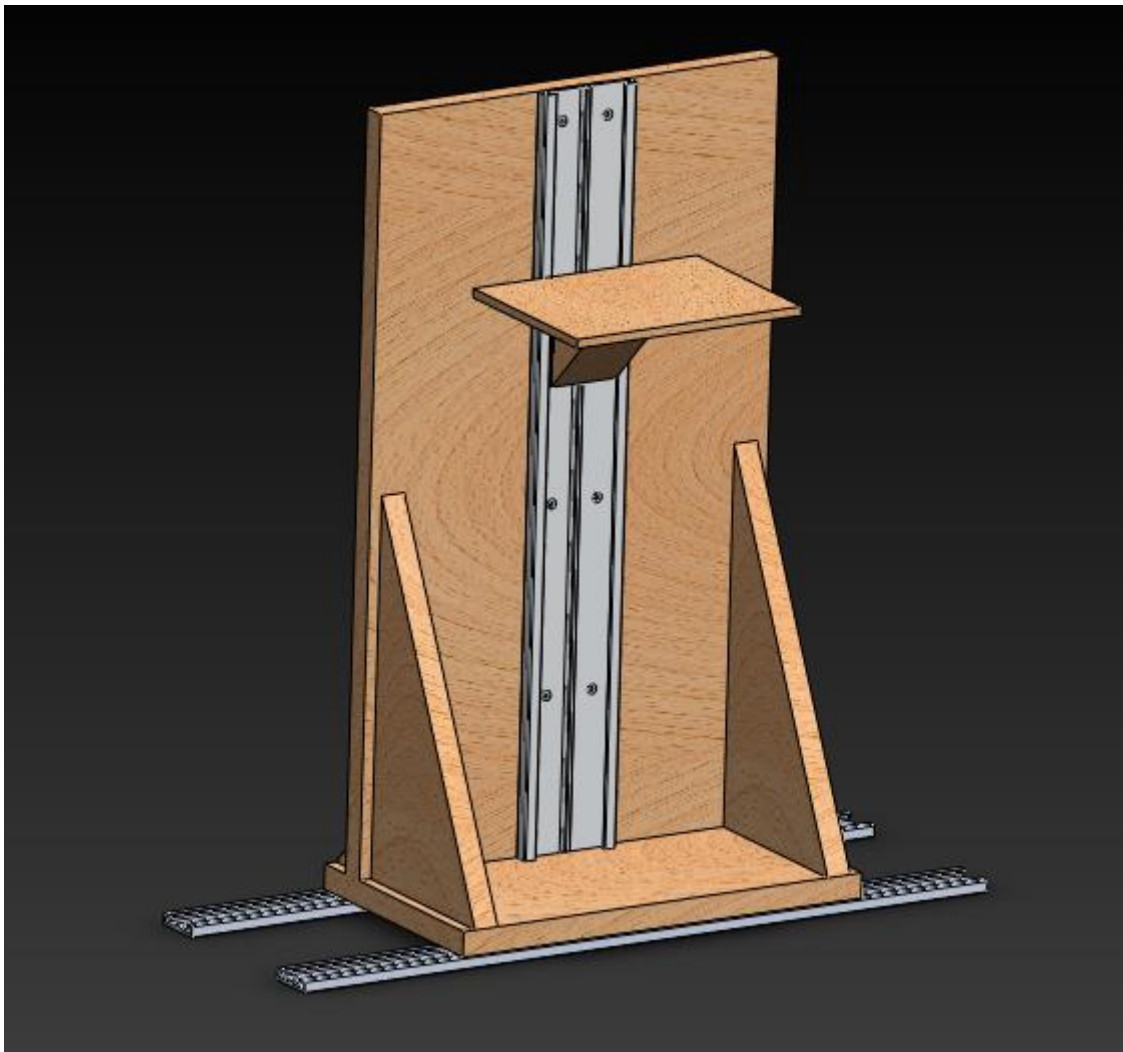
*Principio di trasmissione di un sistema phased-array con fronte d'onda normale al piano trasmissivo*



*Principio di trasmissione di un sistema phased-array con fronte d'onda inclinato rispetto al piano trasmissivo*

In conclusione, la tecnica di movimentazione progettata in questo lavoro risulterebbe 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 che si debba ispezionare un manufatto con la possibilità di poterlo fare in loco senza smontarlo dalla struttura di appartenenza.

Di seguito ho tentato di riprodurre, sfruttando il software SolidWorks, un'immagine 3D della struttura completata.



# Bibliografia e sitografia

---

## 1 Il radar

- Università di Roma, “*Teoria e tecnica radar*”, retrieved from <http://radarlab.disp.uniroma2.it/>
- Documenti open source, “*Il radar*”, retrieved from <http://users.libero.it/i3ltt/prova/fisica.htm>
- Enciclopedia online Treccani, “*Radar*”, retrieved from <http://www.treccani.it/enciclopedia/radar/>
- Wikipedia, “*Radar*”, retrieved from <http://it.wikipedia.org/wiki/Radar#Applicazioni>

## 2 Sistemi UltraWideband

- Giovanni Passalacqua, “*Sviluppo di algoritmi per il calcolo della risposta di un bersaglio per applicazioni Radar Automotive UWB*”, Università degli Studi di Siena, AA. 2004/2005
- Mariano Di Noia, “*Algoritmi di localizzazione in sistemi ultra wideband*”, Università degli Studi di Padova, AA. 2009/2010
- Andrea Vico, “*Localizzazione tramite UWB*”, AA. 2011/2012
- Marta Cavagnaro, “*Strumentazione medica II, Radar UWB*”

## 3 Controlli non distruttivi

- Prof. Ing. Giuseppe Acciani, “*Prove e diagnostica non distruttiva sui materiali*”, Politecnico di Bari, AA. 2005/2006
- Massimiliano Pau, “*Cenni sui Controlli Non Distruttivi*”, Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DIMECA)

- Wikipedia, “*Controllo non distruttivo*”, retrieved from [http://it.wikipedia.org/wiki/Controllo\\_non\\_distruttivo](http://it.wikipedia.org/wiki/Controllo_non_distruttivo)

#### **4 Strumenti a supporto del lavoro: il radar UWB**

- Simone Gubinelli, “*Studio di fattibilità di applicazione di radar UWB per Controlli Non Distruttivi*”, Università di Bologna, AA. 2012/2013

#### **5 Progettazione del supporto per radar UWB**

- igus<sup>®</sup>, <http://www.igus.de/>