



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE

**DIPARTIMENTO
DI
INGEGNERIA ELETTRONICA**

Sistema ad ultrasuoni per la rivelazione dei difetti
nei materiali tecnologicamente avanzati:
un'applicazione per i materiali ceramici.

Dott.Ing. L. Capineri

Report n.911103 November 1991



Introduzione.

1. Descrizione generale del sistema.
2. Il modello del difetto.
3. Studio e simulazione al calcolatore del campo ultrasonico ricevuto su un'apertura sintetica diffratto da difetti (inclusioni).
4. Programma di ricostruzione di immagini tomografiche ad ultrasuoni per rivelazione e misura di difetti di volume in materiali metallici con estensione ai materiali ceramici.
5. Confronto dei risultati simulati e sperimentali.
6. Il tempo di calcolo.
7. Studio, simulazione e progetto di trasduttori ultrasonici con caratteristiche tali da ottimizzare le prestazioni del sistema.
8. Specifiche del sistema progettato per la ricostruzione di immagini ad ultrasuoni.
9. Conclusioni.
10. Bibliografia.

Introduzione.

Tra i vari settori della ricerca quello dei materiali tecnologicamente avanzati ha visto un crescente interesse da parte dei paesi più industrializzati del mondo, tra cui anche l'Italia. I materiali tecnologicamente avanzati sono materiali progettati per avere determinate proprietà fisico-chimiche che li rende insostituibili nelle diverse applicazioni.

Le principali iniziative italiane per progredire in questo settore sono identificate dal progetto finalizzato del C.N.R. "Materiali Speciali e Tecnologie Avanzate" che svolge una indispensabile attività coordinatrice della ricerca e dal programma promosso dal Ministero della Ricerca Scientifica e Tecnologica per i "Materiali Innovativi Avanzati", con un finanziamento quinquennale di 441 miliardi di lire. Questi progetti hanno lo scopo di progredire la ricerca di base e la formazione di persone altamente qualificate per operare in questo settore. A queste iniziative si aggiungono le importanti attività di ricerca di base ed applicata da parte di istituti di ricerca di base ed applicata da parte di istituti di ricerca ed industrie nazionali, come l'ENEA, l'ENI, l'Ansaldo Ricerche, il Centro di Ricerche FIAT.

Gli sforzi compiuti in questi ultimi anni devono essere visti nel senso di diminuire il divario che esiste tra l'Italia e gli altri paesi industrializzati che sono attivi in questo settore da più tempo. La competitività imposta da paesi leader come USA e Giappone da un lato, ed il crescente utilizzo da parte dell'industria di questi nuovi materiali, fa stimare un volume di affari di circa 16 e 30 miliardi di \$ per il 1995 (fonte USA e Giappone rispettivamente) [1].

Quindi un mercato ancora in forte espansione che non presenta fenomeni ciclici di saturazione del rapporto Offerta/Domanda come nel caso dei materiali tradizionali, nel quale l'aumento della produzione ad ogni costo sembra essere l'unico elemento regolatore delle leggi di mercato [2]. I materiali tecnologicamente avanzati sono ormai impiegati in larghi settori dell'industria come i

materiali strutturali per l'ingegneria, i materiali termomeccanici per il settore dei trasporti e dell'energia, i materiali bio-compatibili.

In ogni caso sono richieste specifiche di elevate prestazioni ed affidabilità durante il loro servizio. E' su questi due fattori che si misura il livello raggiunto dalla tecnologia e perciò l'interesse della progettazione di sistemi di controllo per aumentare la qualità del prodotto.

In particolare nel caso dei materiali "ceramici avanzati" che ormai sono impiegati in quasi tutti i settori all'avanguardia, l'Italia può vantare una esperienza qualificata in diversi centri di ricerca nazionali [3]. Inoltre esiste un potenziale produttivo sviluppato con i ceramici tradizionali che potrebbe essere convertito verso la produzione dei materiali ceramici avanzati.

Tuttavia l'industrializzazione dei ceramici avanzati è legata alla possibilità di garantire la ripetibilità delle loro caratteristiche fisico-chimiche mediante un accurato controllo del processo produttivo (ad esempio la fragilità) e del controllo dei difetti superficiali e di volume introdotti durante il processo di fabbricazione che ne compromettono l'affidabilità durante il servizio.

Quindi dal punto di vista delle applicazioni ingegneristiche nel settore dei controlli non distruttivi è importante lo sviluppo di nuove tecniche di indagine che siano allo stesso tempo affidabili e non eccessivamente complesse e quindi costose. In questo rapporto tecnico sono riportati alcuni risultati preliminari ottenuti con un sistema di misura non distruttivo ad ultrasuoni per la rivelazione di difetti di volume. E' stato progettato e realizzato un sistema con sonde ad immersione [4], con il quale sono stati misurati i segnali diffratti da difetti con dimensioni nell'ordine della lunghezza d'onda. Alcuni risultati sperimentali sono presentati e confrontati con quelli ottenuti da simulazioni al calcolatore, infine sono studiate le potenziali applicazioni di questa tecnica su materiali tecnologicamente avanzati come i ceramici.

Tale sistema implementa un metodo di ispezione avanzato rispetto alle tecniche standard che impiegano solo una o due sonde ad ultrasuoni, in quanto e' adatto a rivelare con buona accuratezza difetti di volume di dimensioni ridotte o con morfologia complessa.

Per il progetto di tale sistema e' stata necessaria una ricerca preliminare ed essenziale per lo studio del problema fisico dell'interazione tra campo emesso da sorgenti ultrasonore e difetti di volume all'interno di un materiale ospite. Per la valutazione degli effetti di tale interazione sul segnale impulsivo trasmesso e' stato messo a punto un programma di simulazione al calcolatore. Dai risultati ottenuti in questa prima fase e' stato possibile progettare un sistema di misura che essendo basato sugli ultrasuoni ed avvalendosi di un front-end dedicato (elettronica e trasduttori), raggiunge buone prestazioni con costi sicuramente inferiori rispetto ad altri sistemi per i controlli non distruttivi come quelli basati sui raggi X. Su questi ultimi ha inoltre il vantaggio di essere facilmente utilizzabile in assoluta sicurezza anche da personale non altamente qualificato.

E' quindi auspicabile che la disponibilita' di nuovi sistemi di ispezione avanzati come quello proposto possa aumentare il livello di affidabilita' di questi nuovi materiali, facilitandone la loro industrializzazione e quindi stimolando nuove attivita' ed interessi industriali in questo promettente settore.

1. Descrizione generale del sistema.

L'attività di ricerca è stata rivolta nella sua prima fase allo studio dei problemi di carattere fisico coinvolti nella indagine con ultrasuoni di materiali metallici e ceramici.

Molti dei problemi relativi alla propagazione degli ultrasuoni in mezzi non omogenei erano stati affrontati per applicazioni nel campo della biomedica [5].

Nei materiali solidi, a differenza dei tessuti biologici, esistono complessità aggiuntive dovute alla generazione di diversi tipi di onde superficiali, longitudinali, trasversali. Tuttavia alcuni problemi affrontati nel campo biomedico sono trasferibili al campo dei controlli non distruttivi.

Per esempio da risultati sperimentali è stato mostrato chiaramente come le tecniche di imaging ad ultrasuoni basate sulla validità della ottica geometrica (tipo tomografia assiale o ecografie) non sono estendibili all'indagine di oggetti di dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda [6].

Per definire un criterio di controllo non distruttivo sui materiali metallici o ceramici e' necessaria la ricostruzione dei difetti con una certa accuratezza in modo da stimare le loro dimensioni e possibilmente la loro forma, per poi decidere se accettare o scartare il pezzo.

Essendo la velocità di propagazione degli ultrasuoni in questi materiali superiore a quella dei tessuti biologici (mediamente nel range 2000-10000 m/s contro i 1500 m/s dei tessuti biologici), implica che nel campo di frequenze comunemente utilizzate 5-50 Mhz si hanno lunghezze d'onda paragonabili alle dimensioni dei difetti che si vogliono rivelare e quindi lo studio del fenomeno di propagazione in termini di diffrazione e diffusione.

Da queste considerazioni è nata l'idea di applicare una tecnica ad apertura sintetica che ricostruisce l'oggetto basandosi sulle misure di tempo di volo dei segnali generati dall'interazione del con il difetto; in particolare ci si riferisce ai fenomeni di diffrazione. Le principali caratteristiche di questa tecnica

possono essere così riassunte:

- 1) La tecnica ad apertura sintetica proposta permette di ottenere valori teorici di risoluzione laterale nell'ordine della lunghezza d'onda. Combinando i segnali acquisiti secondo due scansioni ortogonali si riesce ad avere una risoluzione pressochè uniforme su tutta l'immagine.
- 2) Adottando la teoria della diffrazione di impulsi a banda larga si riescono ad ottenere informazioni relative a oggetti con dimensioni paragonabili alla lunghezza d'onda.

Adottando questa scala d'indagine macroscopica si possono così trascurare in prima analisi altre forme d'interazione del campo ultrasonico con la struttura del materiale come ad esempio l'anisotropia la quale porta ad effetti misurabili solo per lunghezze d'onda vicine alle dimensioni dei cristalli.

2. Il modello del difetto.

Con le ipotesi semplificative di mezzi elastici isotropi sono stati sviluppati da diversi autori modelli teorici basati su diverse assunzioni che forniscono il campo diffratto da difetti di forma relativamente semplice come ellissoidi e cilindri [7]-[8].

Il problema di scattering diretto consiste nel trovare il campo di scattering una volta assegnate le sorgenti, la forma e le caratteristiche del difetto. In generale questo problema non ha soluzioni analitiche in forma non chiusa e per la soluzione viene comunemente accettata in letteratura l'approssimazione di Born al primo ordine, la quale rappresenta il miglior compromesso tra limiti di validità e semplicità del modello per programmi di simulazione al calcolatore [9].

L'approssimazione di Born assume l'ipotesi di difetti debolmente scatteratori che permette così di considerare il campo

ultrasonico totale all'interno dell'oggetto uguale a quello incidente.

Tra i vari modelli teorici basati sull'approssimazione di Born ed applicati sia nel campo della biomedica che nei controlli non distruttivi, è stato adottato un modello in cui il campo all'interno dell'oggetto si propaga alla velocità caratteristica del materiale del difetto invece che quella del materiale circostante.

Con il programma sviluppato, si possono calcolare i coefficienti di diffrazione per vari tipi di inclusioni al variare dell'angolo di incidenza e per varie frequenze del segnale. In Fig.1A e B sono riportati i grafici dei coefficienti di scattering per la conversione da onda longitudinale ad onda longitudinale (Fig.1A) e da onda longitudinale ad onda trasversale (Fig.1B), relativi ad inclusioni sferiche di Si in SiC. Il diametro delle inclusioni è rispettivamente di 0.2 e 0.4 mm, i coefficienti sono calcolati nel campo di frequenze da 3 a 20 MHz con angoli di incidenza da 0° a 180° (180° corrisponde alla condizione di segnale eco ricevuto nella stessa direzione dell'onda piana incidente).

3. Studio e simulazione al calcolatore del campo ultrasonico ricevuto su un'apertura sintetica diffratto da difetti (inclusioni).

Nel modello utilizzato per la simulazione i coefficienti di scattering delle onde longitudinali e trasversali sono calcolati nel dominio della frequenza; il primo passo è stato quello di valutare come veniva modificato l'impulso a banda larga di eccitazione da una serie di difetti di forma sferoidale di varie dimensioni. L'altro scopo della simulazione è quello di indagare difetti con diverse caratteristiche fisiche (densità, velocità di propagazione, costanti elastiche) e l'effetto sui segnali ricevuti

assumendo trasduttori di diversa forma e dimensioni.

Le caratteristiche del programma di simulazione al calcolatore che è stato sviluppato si possono così riassumere :

- a) il modello teorico impiegato è basato sull'approssimazione di Born, ovvero oggetti debolmente scatteratori con dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda e piccoli salti di impedenza acustica
- b) si possono simulare difetti con geometria sferica o ellissoidale ed introdurre le caratteristiche fisiche del materiale e dei difetti
- c) diversi impulsi reali di eccitazione possono essere adottati, introducendo le relative trasformate di Fourier
- d) aperture sintetiche di varie dimensioni e forme di trasduttori reali possono essere simulate in modo da tenere conto delle reali condizioni sperimentali
- e) i segnali ricevuti sull'apertura sintetica sono calcolati nel dominio della frequenza ed alla fine dell'elaborazione sono invertiti nel dominio del tempo per ottenere un file di segnali simulati campionati a radiofrequenza con 8 bit (tipicamente la frequenza di campionamento è di 20 o 50 MHz).

Nella seguente tabella sono riportati i valori dei parametri fisici dei materiali ceramici usati nell'esempio.

TABELLA

	ρ [g/cm ³]	λ [10 ¹¹ dyne/cm ²]	μ [10 ¹¹ dyne/cm ²]	Clong. [m/s]	Ctran. [m/s]
SiC (ospite)	3.01	7.64	16.1	11500	7320
Si (inclusione)	2.34	5.27	6.8	8980	5390

4. Programma di ricostruzione di immagini tomografiche ad ultrasuoni per rivelazione e misura di difetti di volume in materiali metallici con estensione ai materiali ceramici.

Una volta che è stato creato un insieme di segnali ultrasonici simulati con il programma descritto nel paragrafo 3, si può ricostruire con essi un'immagine tomografica. La ricostruzione dell'immagine è basata su misure di tempo di volo su segnali campionati a radiofrequenza.

L'immagine tomografica è realizzata con un metodo di propagazione all'indietro diretto, ovvero i segnali nel dominio del tempo sono utilizzati per definire una funzione di ricostruzione nello spazio. Lo stesso programma di ricostruzione accetta in ingresso dati provenienti da misure sperimentali con un formato del file uguale a quello fornito dalla strumentazione di laboratorio.

La ricostruzione dell'immagine a radiofrequenza conserva l'informazione di ampiezza e fase del campo ultrasonico ricevuto sull'apertura sintetica e quindi è stato implementato un filtro inverso di Wiener ricavato dalla stima della Point Spread Function per la ricostruzione della forma dell'oggetto. L'applicazione del filtro inverso sulle immagini ricostruite a radiofrequenza ha dimostrato i vantaggi di questo metodo per la stima del diametro dei difetti.

In figura 2 è mostrata l'immagine tomografica a radiofrequenza (lato 10mm 64x64 pixel), corrispondente alle due inclusioni considerate precedentemente, con distanza relativa di 1mm e situate alla profondità di 15mm. In basso la visione prospettica ed in alto l'immagine rivelata con curve di livello.

La scansione è stata simulata su un'apertura di lunghezza 30mm con trasduttori rettangolari con dimensione lungo la direzione della scansione pari a 0.5mm e frequenza centrale 10MHz, corrispondente ad una $\lambda=1.15\text{mm}$ nel SiC.

In figura 3 la stessa immagine di figura 2 dopo avere applicato il filtro inverso di Wiener; su tale immagine si possono misurare i diametri trasversali dei difetti; il difetto a sinistra con

diametro reale di 0.4 mm viene stimato con 0.46 mm con un errore relativo del 15%, mentre per quello a destra è stato misurato un diametro di 0.22 mm con un errore relativo del 10%. Per ottenere prestazioni ancora migliori si può aumentare il numero di pixel dell'immagine a parità delle sue dimensioni, a discapito di un maggiore tempo di calcolo. Il limite alla dimensione dei pixel è poi dato dal campo di frequenze utilizzato. Inoltre una risoluzione spaziale costante è ottenibile ripetendo la scansione in direzione perpendicolare [6], anche se in molti casi non è possibile a causa delle diverse forme dell'oggetto da investigare.

5. Confronto dei risultati simulati e sperimentali.

I risultati relativi alla ricostruzione tomografica ottenuta da una sola scansione parallela alla superficie di un difetto cilindrico del diametro di 2mm in acciaio alla profondità di 35 mm, sono riportati nelle figure 4-6. Le caratteristiche principali del sistema sono riportate nel paragrafo 8. L'apertura sintetica di 70 mm è scandita su 30 posizioni. Il progetto al calcolatore della sonda trasmittente, con apertura rettangolare di 3X10 mm e frequenza centrale 5 MHz (lunghezza d'onda longitudinale in acciaio pari a circa 1.18 mm), è descritto brevemente nel paragrafo 7. La sonda ricevente scelta è del tipo ad apertura circolare con diametro di circa 6mm e frequenza centrale 5MHz.

In figura 4 sono riportati i segnali ultrasonici misurati relativi a 3 posizioni centrali del trasmettitore (posizioni 14-15-16), con rappresentazione binaria (0 segnale campionato con ampiezza ≤ 0 , 1 segnale campionato con ampiezza > 0). I segnali sono stati acquisiti alla frequenza di 20 MHz ed ogni traccia contiene 512 campioni. Si sono scelti i segnali relativi alle posizioni centrali in quanto si possono osservare tre diversi tipi di segnali: il primo gruppo di segnali in alto è quello riflesso dall'interfaccia acqua-blocco di acciaio, il secondo gruppo rappresenta la diffrazione dalla parte superiore del difetto con andamento iperbolico dovuto all'equazione caratteristica del tempo di volo. Infine il terzo gruppo di segnali è relativo alle onde di creep che hanno percorso la superficie del difetto e poi sono retro diffratte verso l'apertura sintetica.

In figura 5 la ricostruzione tomografica di una immagine 128X128 pixel con lato 15 mm centrata sul centro del foro cilindrico. In figura 5A l'immagine ottenuta da un set di segnali simulati con le le stesse condizioni sperimentali, in figura 5B l'immagine ottenuta con i segnali misurati. Come si può notare esiste un buon accordo tra le due immagini, ed in figura 5C è mostrato il confronto tra le sezioni trasversali passanti per il centro del difetto. I valori simulati (linea continua) e

sperimentali (linea tratteggiata) forniscono rispettivamente una risoluzione laterale di 1.0λ e 1.34λ ($\lambda=1.18\text{mm}$ in acciaio). L'estensione del metodo ai materiali ceramici presenta alcuni problemi. Il primo aspetto è l'attenuazione di questi materiali che nel campo di frequenze 10-50 MHz non è trascurabile. Inoltre il metodo ad immersione provoca una perdita di energia del segnale, in quanto vi è la riflessione all'interfaccia fluido-solido. Pensando quindi ad un sistema di misura non ad immersione, si dovrà verificare sperimentalmente se le sonde a contatto di piccole dimensioni disponibili commercialmente, sono approssimabili a sorgenti puntiformi con buona efficienza, oppure adottare altre tecniche per realizzare sorgenti isotropiche [10]-[11]. Il programma di simulazione può aiutare a capire i limiti imposti al rapporto segnale/rumore nell'applicazione di questo metodo ai materiali ceramici.

6. Il tempo di calcolo.

Il programma di ricostruzione tomografica basato su misure di tempo di volo era stato sviluppato in linguaggio Fortran e provato su calcolatori tipo mainframe o workstation, dove l'impiego efficiente delle risorse della macchina è prevalentemente affidato al compilatore del sistema. Data la disponibilità di nuovi potenti personal computer, con accessi veloci al disco fisso tramite memoria cache, dischi virtuali su RAM, CPU funzionanti nella fascia di frequenze di clock $>25\text{MHz}$, si è pensato di portare tale programma sul personal computer. Il motivo di questa scelta è che molto spesso il sistema di scansione ed acquisizione è gestito dallo stesso personal computer e quindi non c'è la necessità di trasferire i dati su un altro calcolatore. Oltre ad alcune tecniche classiche di ottimizzazione, come l'utilizzo di aritmetica intera invece che in virgola mobile, sono state proposte due soluzioni che cercano di superare il grosso limite dei personal computer basati sul sistema MS-DOS che riserva solo 640 Kb per il programma eseguibile. Programmi che devono elaborare grosse quantità di dati

caricati in memoria centrale, devono ricorrere a tecniche di overlay che consumano una notevole quantità di tempo di CPU, ed inoltre la CPU lavora con indirizzi estesi a 32 bit, perdendo i vantaggi della segmentazione della memoria in blocchi di 64Kb. Nel nostro caso data la quantità considerevole di dati (circa 1Mbyte), si sono studiate due soluzioni: la prima elabora in linea una traccia alla volta facendo così un numero notevole di accessi a dispositivi esterni ma con un programma eseguibile che non supera i limiti della memoria. Con un clock di 25MHz si possono raggiungere tempi di calcolo inferiori ai 20', per una immagine 64X64 ottenuta dalla elaborazione di 900 tracce. Questi tempi sono paragonabili ai tempi di acquisizione ottenibili con un sistema di movimentazione meccanico, e quindi si può parlare di tempo reale. La seconda soluzione è quella che più si presta alla parallelizzazione del processo di ricostruzione ed è basata su una look-up table di coefficienti precalcolati. E' stata studiata ed implementata una struttura del programma di ricostruzione per applicazioni fuori linea, che fornisce sicuramente le migliori prestazioni raggiungendo tempi di calcolo di soli 46" (vedi Fig.6). Lo svantaggio è la elevata dimensione della look-up table che si può stimare nell'ordine dei 4-64 Mbyte (dipende dalle dimensioni massime dell'immagine che si vuole ricostruire). Data la considerevole dimensione di questa tabella di ritardi, essa deve essere necessariamente memorizzata su disco fisso o virtuale (RAM disk).

7. Studio, simulazione e progetto di trasduttori ultrasonici con caratteristiche tali da ottimizzare le prestazioni del sistema.

Il metodo proposto si basa sull'impiego di trasduttori ultrasonici isotropi. Utilizzando trasduttori con lobo principale esteso ($\text{FWHM} > 50^\circ$) la zona con i difetti viene illuminata dai trasduttori anche dalle posizioni estreme dell'apertura sintetica. Per realizzare trasduttori con tali proprietà sono state

considerate diverse soluzioni come il progetto di lenti acustiche o diaframature di sonde di grandi dimensioni.

La soluzione adottata per le applicazioni ai controlli non distruttivi, è stata quella di diaframmare un trasduttore con diametro di 10mm con un'apertura rettangolare di 3x10 mm. Per l'ottimizzazione delle prestazioni è stato progettato al calcolatore un sistema risonante a specchio, con spessore ad un quarto della lunghezza d'onda realizzato con materiali aventi caratteristiche di elevata impedenza acustica e velocità di propagazione. Questo sistema è un compromesso tra prestazioni e semplicità realizzativa [4].

In figura 7A è riportato l'andamento simulato dell'attenuazione del diaframma realizzato in tantalio con spessore 0.2mm alla distanza di 1.3 mm dal trasduttore immerso in acqua. Nella banda del trasduttore da noi utilizzato 4.6-7 Mhz a -6dB, il diaframma esibisce un'attenuazione del campo trasmesso fuori dell'apertura di almeno 50 dB. I valori nel grafico devono essere divisi per due per ottenere quelli reali, in quanto considerano un doppio percorso dovuto alla riflessione su un oggetto piano posto ad una distanza di 50mm dal trasduttore.

In figura 7B sono riportate le misure sperimentali dell'attenuazione relative ad un diaframma di tungsteno con uno spessore di 0.25 mm posto alla distanza di 4mm dalla superficie della sonda. Le misure forniscono valori reali di attenuazione compresi tra 23 e 30.5 dB che moltiplicati per due corrispondono rispettivamente 46 e 61 dB, quindi inferiori a quelli ottenuti in condizioni ideali con il simulatore. Tali valori sono comunque sufficientemente elevati per poter considerare una funzione direttività dipendente essenzialmente dalle dimensioni dell'apertura, tramite la funzione $\sin X/X$ caratteristica delle aperture rettangolari.

8. Specifiche del sistema progettato per la ricostruzione di immagini ad ultrasuoni.

Campo di frequenze	2 – 20 MHz
Conversione Analogico Digitale	50 o 20 MHz, 8 bit con 16 o 32 medie sul segnale a radiofrequenza
Caratteristiche delle sonde	Diam. efficace 5–10 mm Banda frazionaria >0.5
Elettronica di pilotaggio sonde	impulsatore ad HEXFET con controllo digitale della durata dell'impulso
Stadio di ricezione	Dinamica preamplificatore 50dB
Tipo di fascio	sorgenti isotrope con FWHM >50° ottenute con tecnica di diaframmatrice della sonda
Tecnica di ricostruzione	Apertura sintetica con misure di tempo di volo su segnali diffratti
Numero di scansioni	due perpendicolari o una in riflessione
Immagini	32,64,128,256 pixel
Risoluzione	assiale \cong laterale, nell'ordine della lunghezza d'onda, spazialmente costante su immagini di 10X10 mm
Campo di profondità indagato	20%–80% lunghezza apertura
Tempo di elaborazione (PC 386SX–25MHz, Cache Disk, Linguaggio Microsoft Fortran V5.0)	Fuori linea: 46" immagine 64X64 In linea: nell'ordine del tempo di acquisizione con movimentazione meccanica delle sonde
Sistema di scansione meccanico	Risoluzione motore passo– passo X–Y : 1mm a giro, 600 passi, con precisione del posizionamento migliore di 0.02 mm

9. Conclusioni.

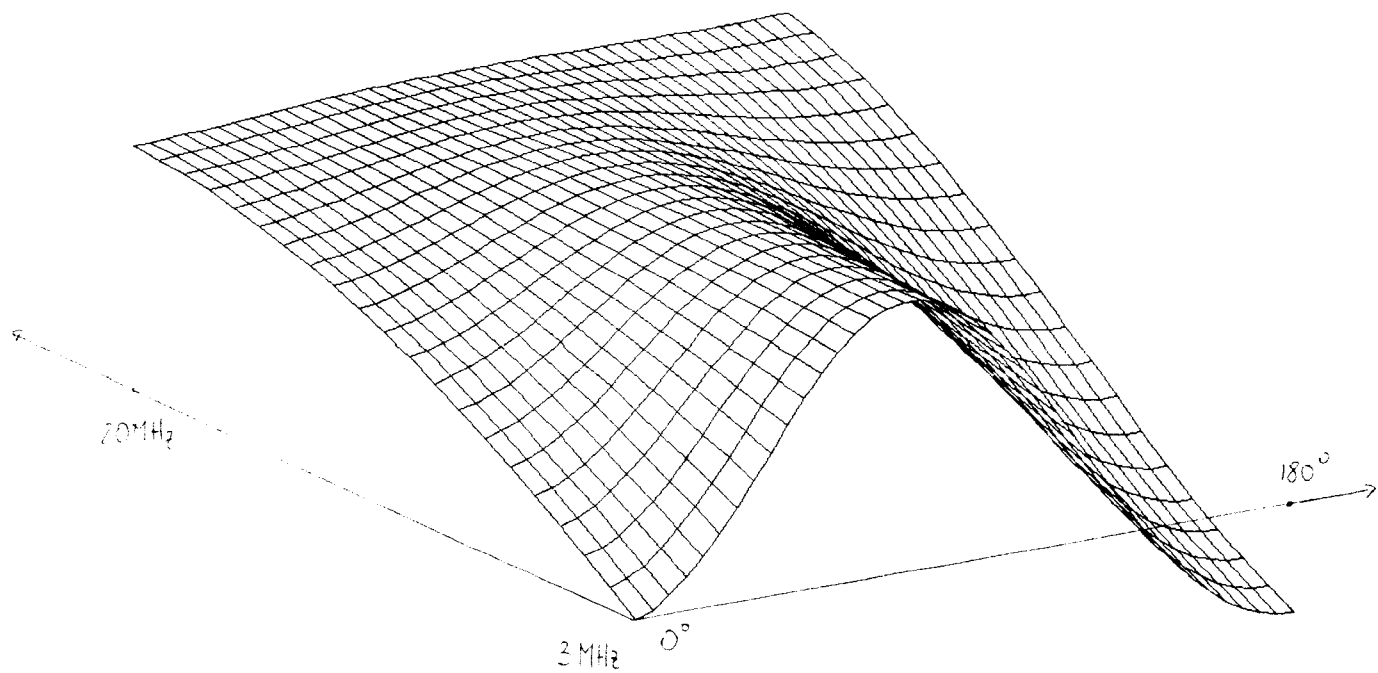
In questo rapporto tecnico sono stati riportati i recenti sviluppi di un lavoro di ricerca che ha portato alla messa a punto di un sistema per fare misure della diffrazione del campo ultrasonico diffratto da difetti di volume in materiali isotropi. Alcuni risultati sperimentali sono stati ottenuti con verifiche sperimentali su difetti artificiali in acciaio, ed hanno fatto intravedere la possibilità di applicare la tecnica ad apertura sintetica anche per l'indagine su altri materiali, come ad esempio i materiali ceramici strutturali. Il lavoro svolto ha cercato di risolvere alcuni problemi di carattere tecnologico-scientifico che limitano l'applicazione di metodi di indagine ad apertura sintetica, come la realizzazione di efficienti sorgenti di piccole dimensioni, la risoluzione laterale ottenibile in presenza di difetti con forma complessa, la struttura di calcolo per ottenere prestazioni in tempo reale con sistemi basati su personal computer. Parte di questo lavoro è stato svolto in collaborazione con il National Non Destructive Centre, Harwell Laboratory, Didcot OX110RA, U.K. nell'ambito di una borsa di studio del British Council.

10. Bibliografia.

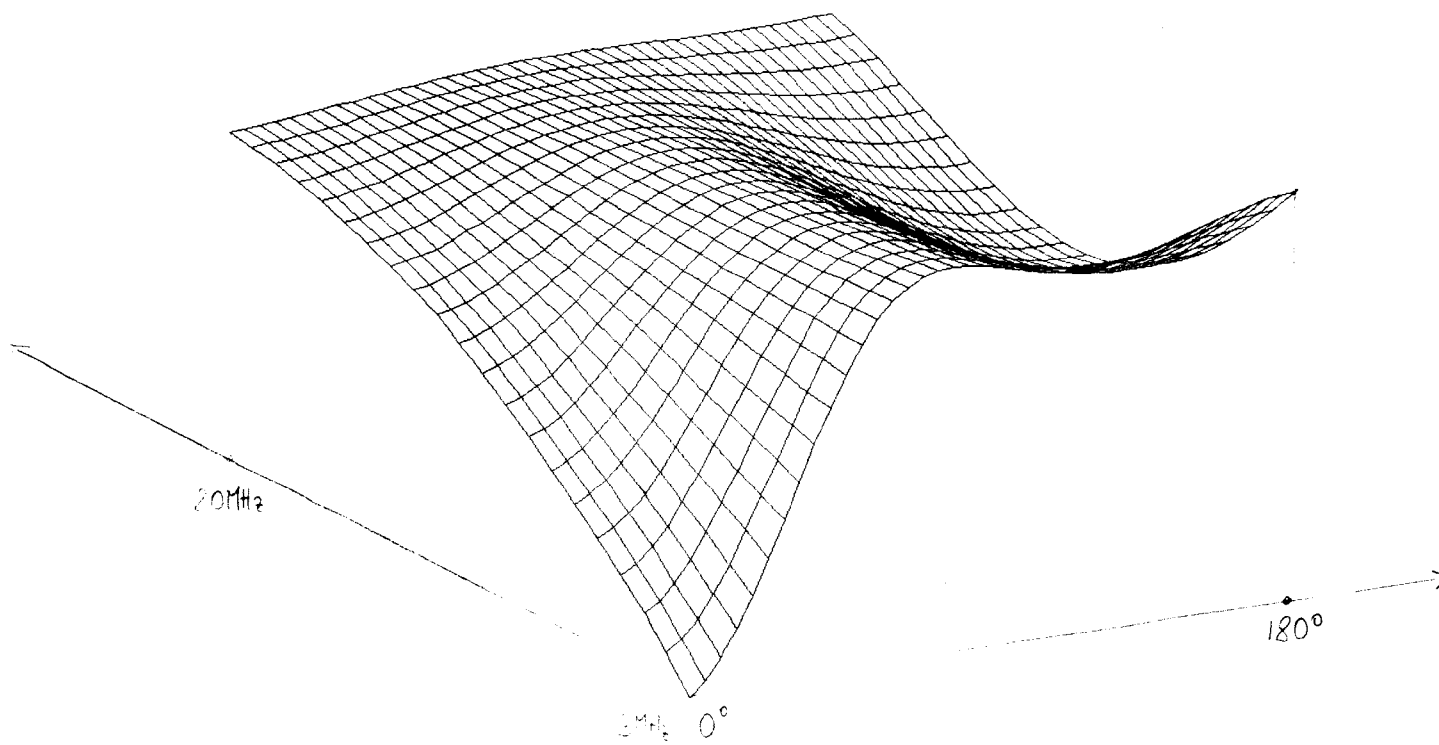
- [1] I ceramici ingegneristici, C. Majani, C.A. Nannetti, P.C. Martinengo, pubblicato dall'ENEA
- [2] Considerazioni di carattere economico sul settore delle piastrelle di ceramica. G. Nava, Franco Angeli Editore
- [3] L'Italia scommette sui ceramici avanzati, A. Bellosi, C. Galassi, Rivista Nuovi Materiali
- [4] Reconstruction system based on ultrasonic time of flight diffraction for NDT applications. L. Capineri, Rapporto tecnico n.901209, Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Dicembre 1990
- [5] Three dimensional lesion reconstruction by ultrasound, L.Capineri, G. Castellini, L. Masotti, S. Rocchi, Edward Arnold Ltd., from Diagnostic Vascular Ultrasound, Working Group Vascular Ultrasound, Bad Schauenburg, Switzerland May 7th-9th 1991. (In stampa).
- [6] Investigation of ultrasound limits for the carotid analysis based on diffraction tomography, E.Biagi, L.Capineri, G.Castellini, L.Masotti, S.Rocchi, Cardiovascular Imaging - Publisher CEPI, Vol. 2, N. 1, January/February 1990, pp. 31-35
- [7] Formal aspects of theory of the scattering of ultrasound by flaws in elastic materials, Gubernatis J.E., Domany E., Krumhansl J.A., Jour. of Appl. Phys., Vol.48 n.7, (1977), pp 2804-2811
- [8] The Born approximation in the theory of scattering of elastic waves by flaws, Gubernatis J.E., Domany E., Krumhansl J.A., Huberman M, Journ. of Appl. Phys., Vol.48 n.7, 1977, pp 2812-2819
- [9] The eikonal approximation in elastic wave scattering theory, Rose J.H., DeFacio B., Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation, D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, Vol. 1, (1982), pp. 119-129
- [10] Transducer considerations for point-source/point-receiver materials measurements, Sachse W., Ultrasonics International 87 Conf. Proc., pp.419-425
- [11] Synthetic aperture in acoustic microscopy, U. Stelwagen, J.A.

Vogel, W. van Hoorn, A.J. Berkhout, Nondestructive Testing of high-performance ceramics, Ed.s A.Vary and J. Snyder, Conference proceedings, August 25-27, 1987, Boston(MA), pp. 348- 370

Coefficiente di diffrazione onda long.->long.

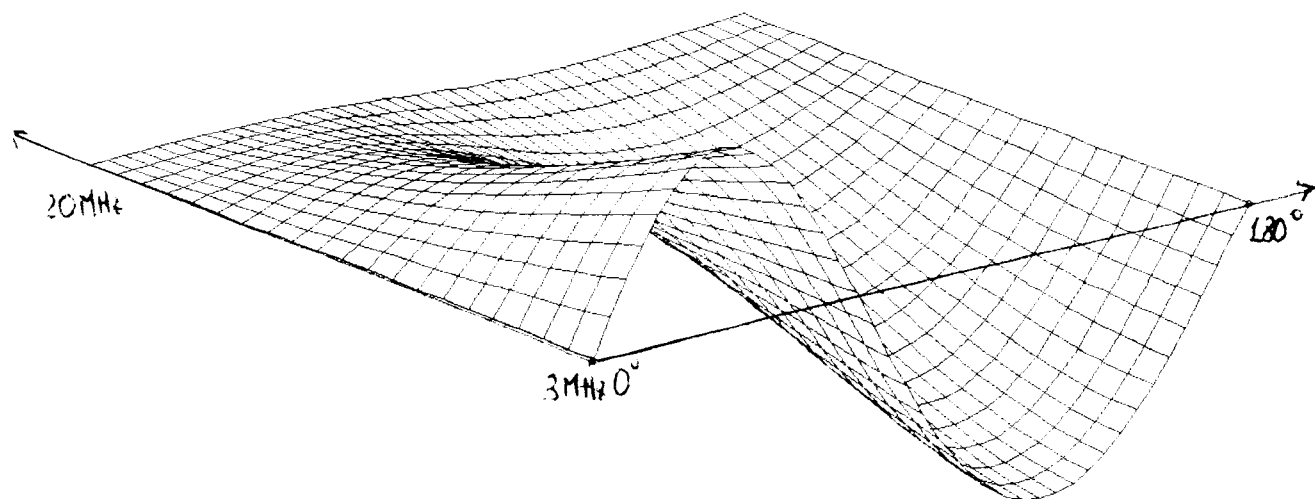


Inclusione sferica di Si in SiC : diametro 0.2mm

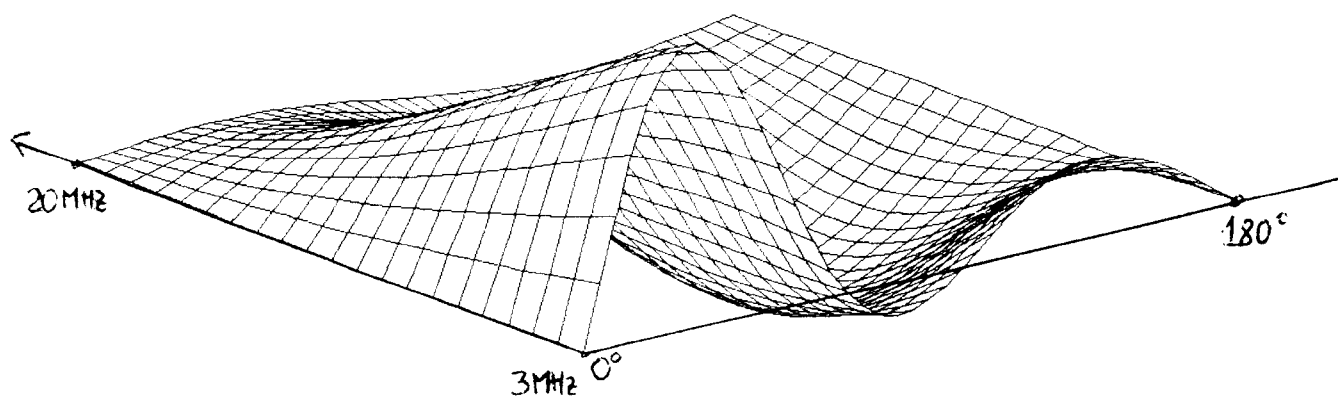


Inclusione sferica di Si in SiC : diametro 0.4mm

- Fig. 1A -



Inclusione sferica di Si in SiC: diametro 0.2mm



Inclusione sferica di Si in SiC: diametro 0.4mm

Contorni a livelli: 0,-3dB,-6dB,-10dB

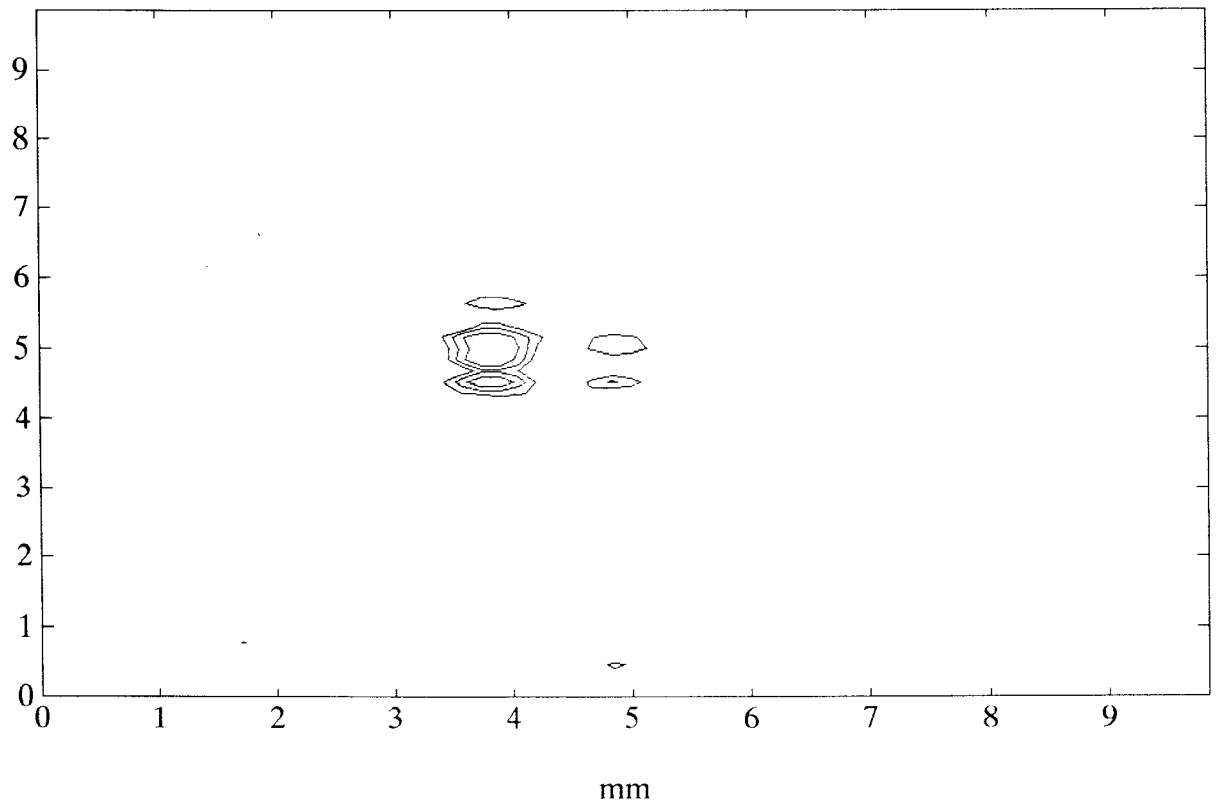


Immagine ricostruita a radiofrequenza: lato 10mm, 64X64 pixel

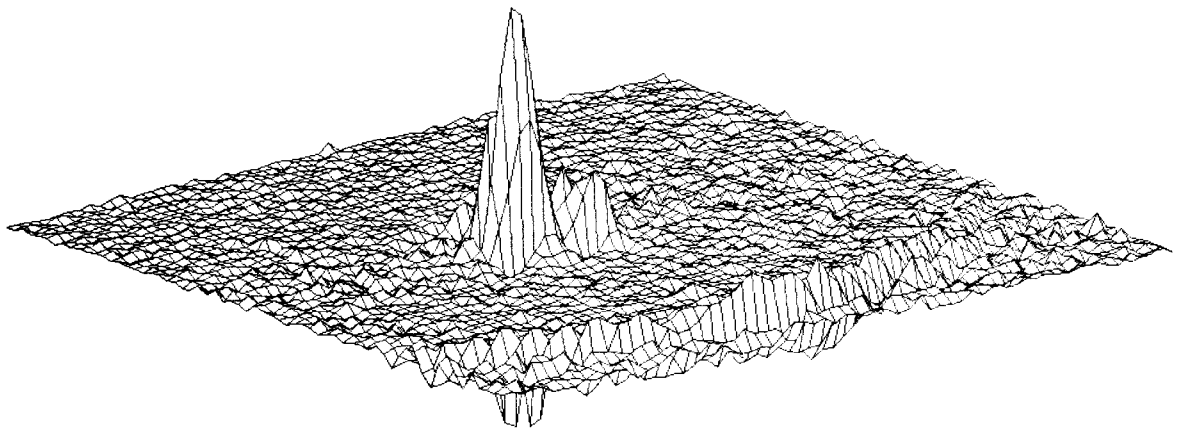
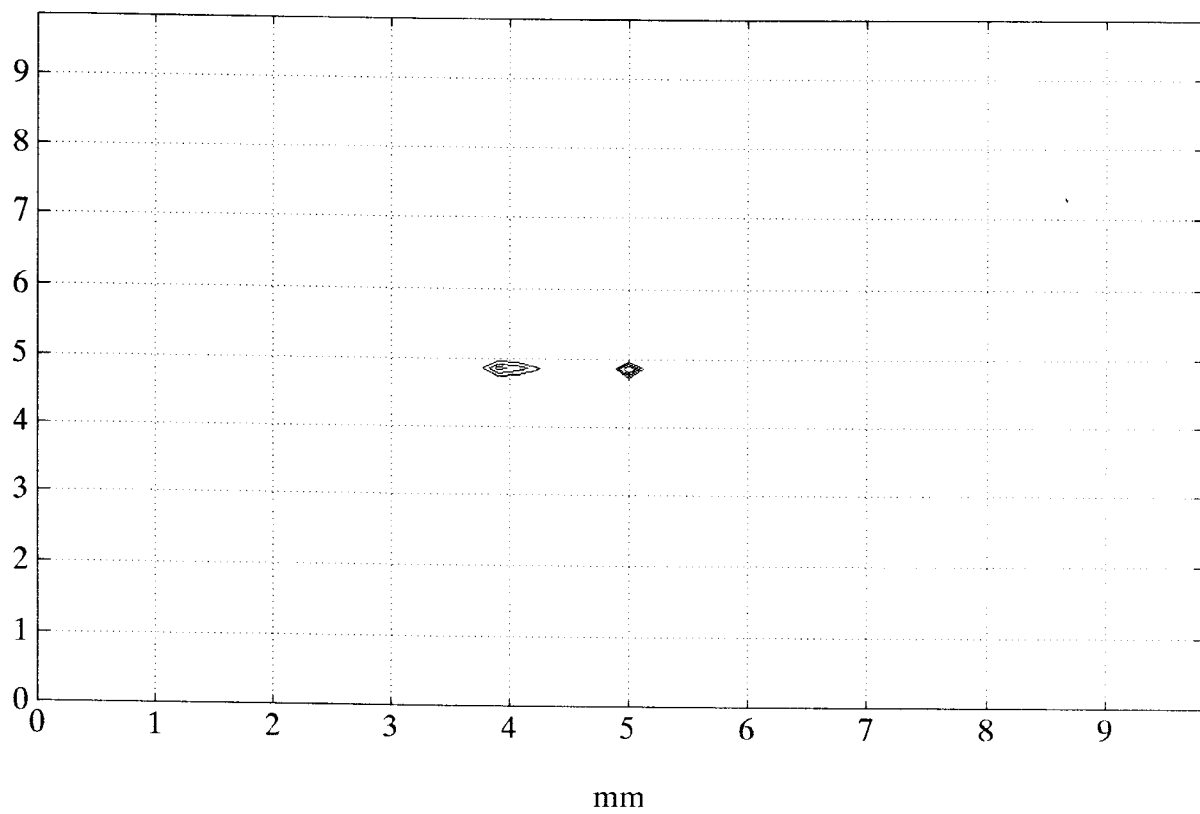
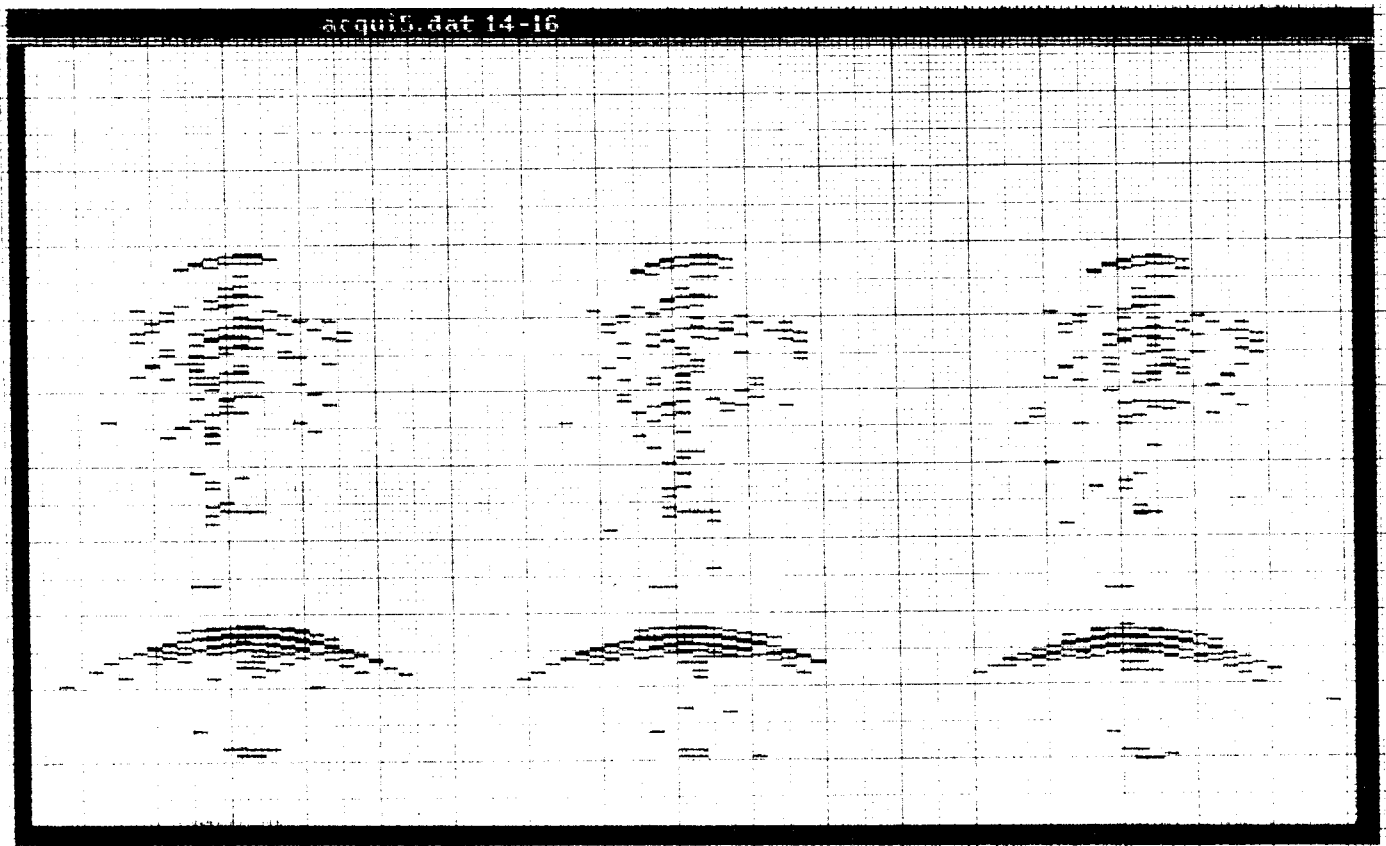


Immagine filtrata con Wiener. Contorni a livelli: 0,-3dB,-6dB,-10dB

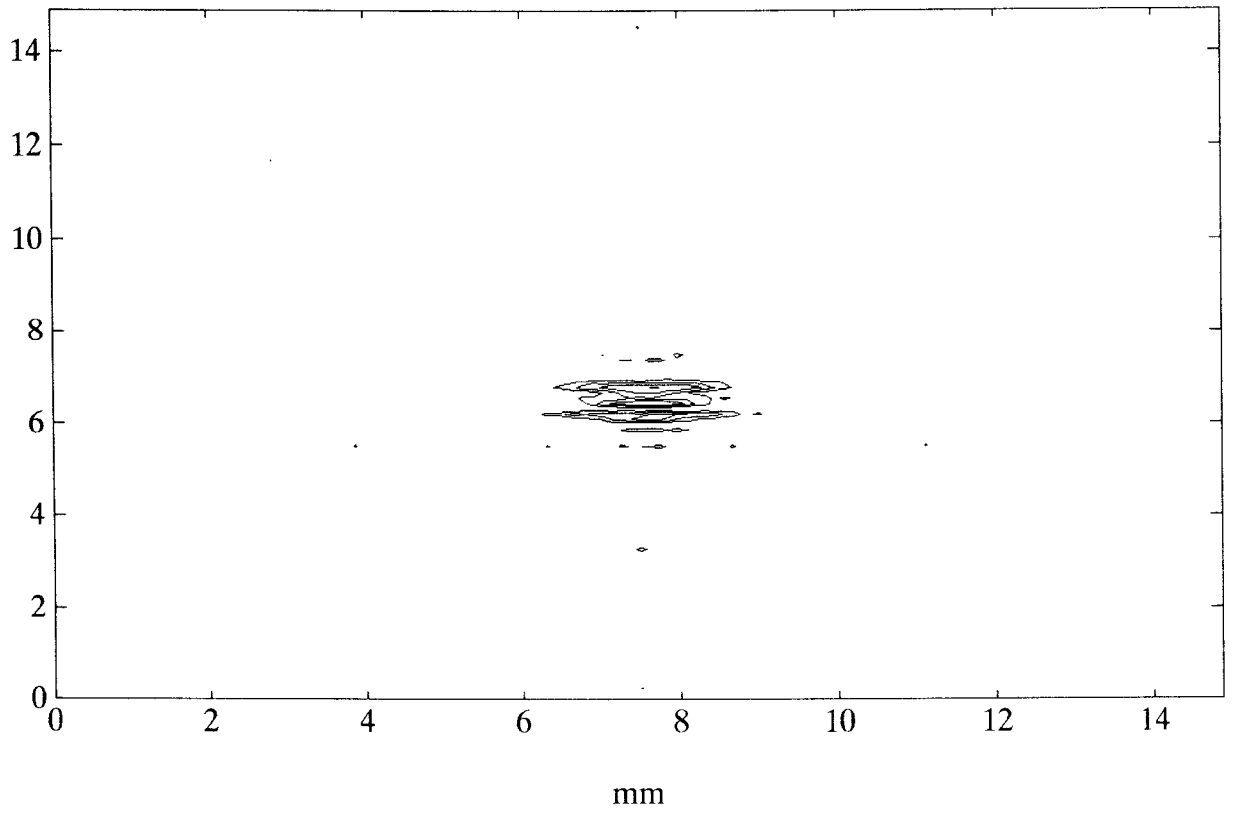


- Fig. 3 -

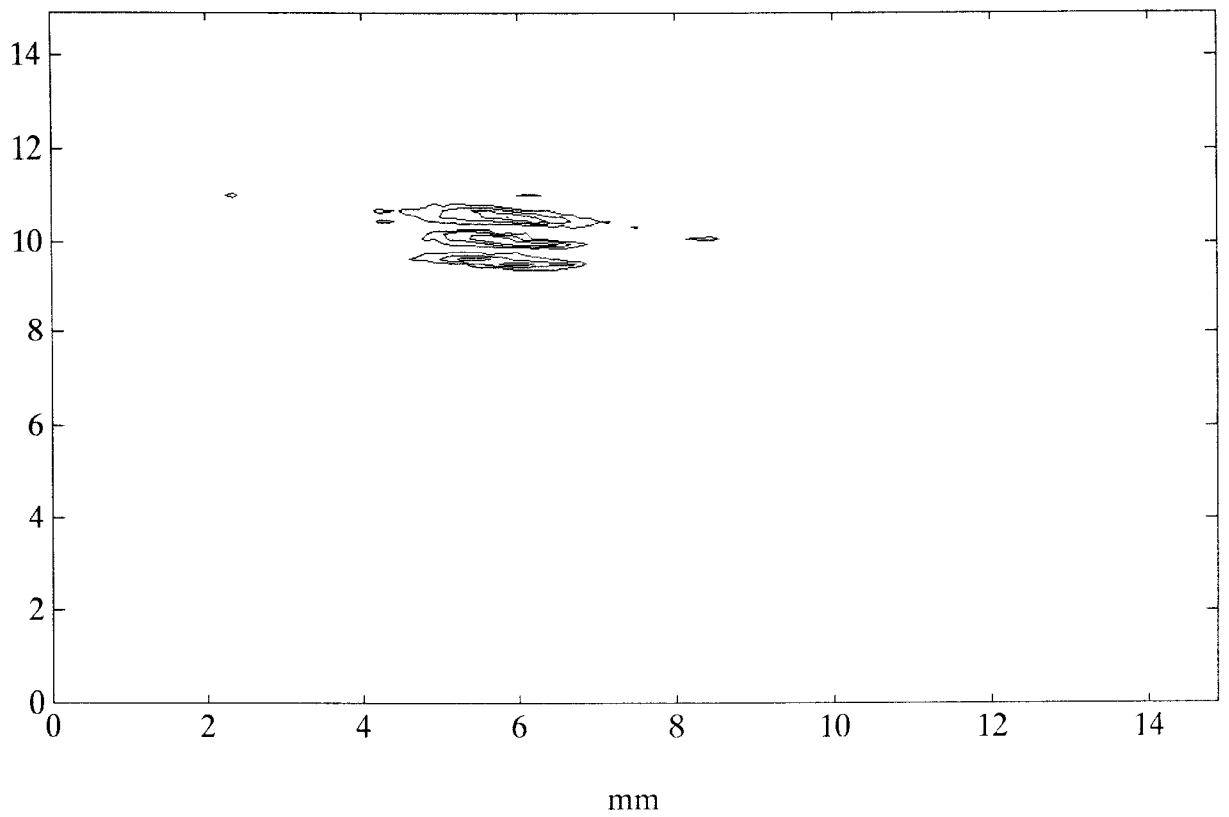


- Fig. 4 -

Simulated image:128X128 pixel, material stainless steel, $V_I=5900\text{m/s}$

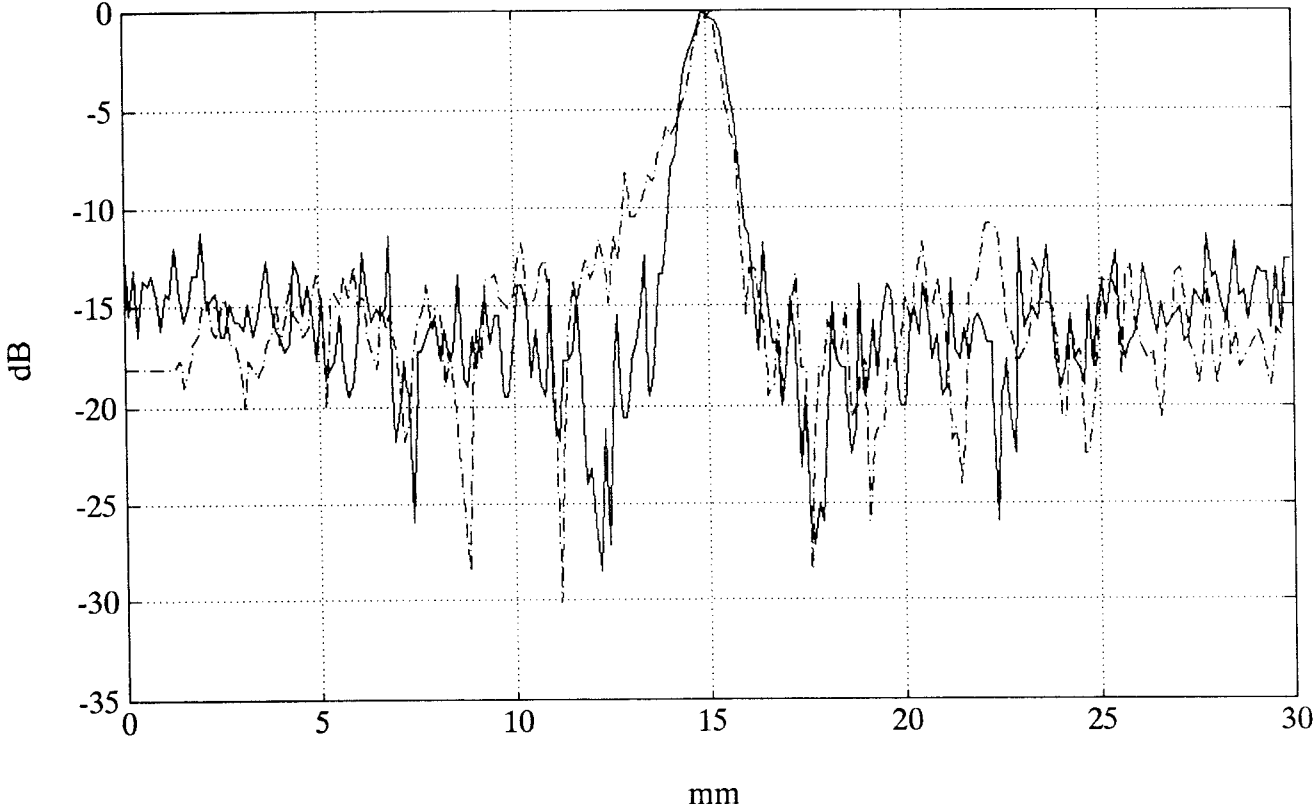


Experimental image:128X128 pixel, material stainless steel, $V_I=5900\text{m/s}$



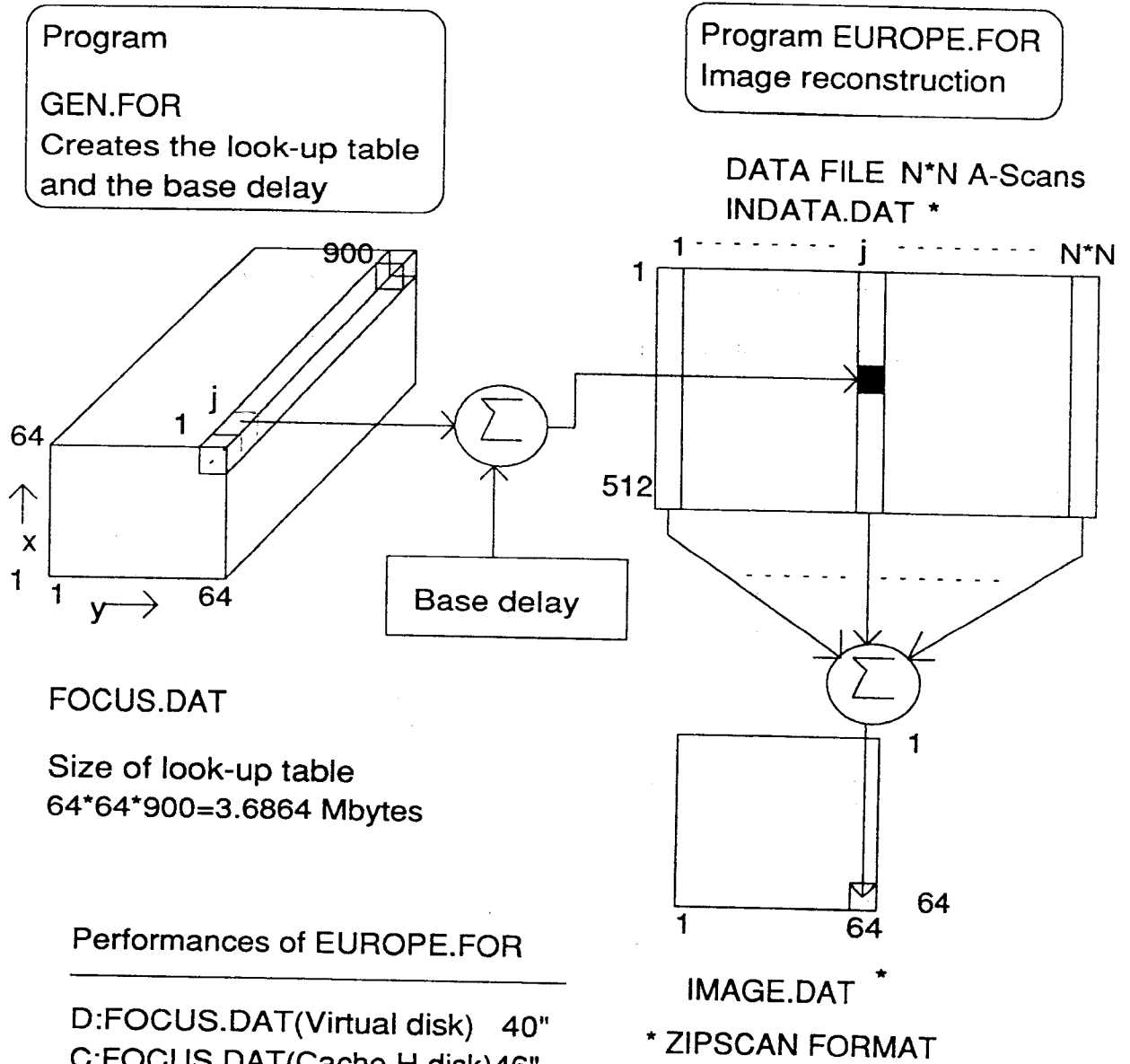
– Fig. 5A (alto), Fig.5B (basso) –

Lateral resolution: lambda 1.18mm,30 TX-RX,depth 35 mm,Sim.-,Exp.-.



- Fig.5C -

**Structure of the reconstruction algorithm
based on the look-up table of delay terms**



Notes:

Fortran code with full optimization

Huge address for INDATA.dat (32 bit)

Rows in FOCUS.DAT are loaded one by one: 64*64=4096 disk access

Fig.7B -

Misure sperimentali di attenuazione [dB] in trasmissione, per confrontare con i valori di Fig.7A si deve moltiplicare per un fattore 2.

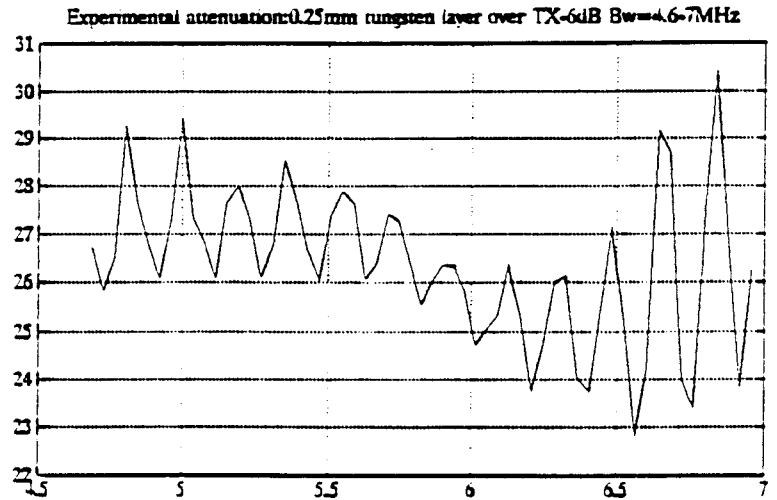


Fig.7A -

Attenuazione in [dB], ottenuta con il simulatore nella banda di frequenze da 4.5 a 7 MHz

