



eXamina spa

**Progetto preliminare di un sistema per la misura in linea della
porosità in piastrelle di ceramica**

*Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti, Guido Gagliardi,
Emanuele Salerno, Ovidio Salvetti, Alessandra Zucchelli*

.....

Contratto di ricerca tra Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione – CNR
e
Examina SpA

Rapporto tecnico marzo 2003

B4-06

Indice

Introduzione.....	3
Modo di scansione.....	4
Array di area con pilotaggio simultaneo	4
Array di riga con pilotaggio simultaneo.....	5
Array di riga con pilotaggio sequenziale.....	6
Scansione di riga con pilotaggio sequenziale.....	8
Banda del segnale a microonde.....	8
Dispositivo di rilevamento.....	9
Artefatti di misura.....	10
Struttura del sistema	12
Tempi di misura.....	15
Flusso di dati.....	17
Costo di sviluppo	19
Hardware.....	19
Software	20
Conclusioni.....	21
Riferimenti.....	22

Introduzione

Nell'ambito del contratto di collaborazione scientifica tra l'ISTI e l'Examina SpA è stata esaminata la possibilità di impiegare un metodo d'ispezione non invasiva, basato sulla rivelazione di segnali a microonde, per determinare la porosità locale di piastrelle di ceramica.

Gli studi condotti su una campionatura fornita dall'Examina SpA hanno dimostrato che il segnale riflesso da una speciale antenna posta in prossimità dell'oggetto da esaminare varia in funzione della porosità della regione sottostante; in particolare si è determinato che variando la frequenza dell'onda applicata all'antenna, il segnale di riflessione presenta il minimo ad una frequenza dipendente dalla porosità della regione in cui si propaga il fronte d'onda [1,2].

Le prove suddette sono state eseguite in condizioni statiche, con la piastrella ferma rispetto all'antenna. Il risultato di ciascuna misura individua la porosità media dell'elemento di volume esaminato; l'intera piastrella viene ispezionata mediante successive traslazioni dell'antenna: al termine della procedura di acquisizione dei dati si ottiene una mappa dei valori di porosità della piastrella.

Questa tecnica di misura può essere impiegata anche per eseguire misure in linea, quando la piastrella, al termine del processo di essiccazione, si muove sul nastro trasportatore verso le fasi di lavorazione successive: per questo scopo, è necessario realizzare un sistema d'ispezione controllato in modo da rispettare i vincoli imposti dal processo di produzione, come il modo di scansione, la risoluzione di misura, la velocità di acquisizione e l'elaborazione dei dati.

Modo di scansione

Se si usa un'antenna quadrata di lato A_0 , la regione esaminata con una misura è anch'essa un quadrato di lato A (a parte gli effetti di bordo); traslando in maniera opportuna l'antenna si possono ottenere le misure relative a regioni d'interesse (ROI) adiacenti e disposte su una griglia con assi perpendicolari ai bordi di essa (vedi figura 1).

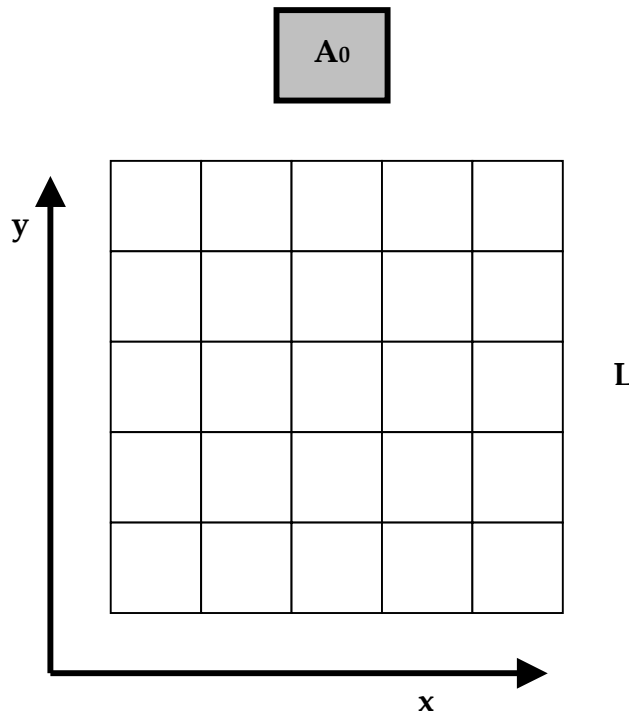


Figura 1. Suddivisione di una piastrina di lato L in ROI di lato A .

Se la piastrina è quadrata con lato L si hanno $N \times N$ misure, con $N = \frac{L}{A}$. Il tempo t_{acq} necessario per l'acquisizione di $N \times N$ dati è dato da:

$$t_{acq} = (N \times N) t_m + (N - 1 \times N - 1) t_t \quad (1)$$

dove t_m è il tempo necessario per l'esecuzione di una misura e t_t è il tempo necessario per la traslazione dell'antenna da una posizione di misura a quella successiva lungo gli assi x e y , mostrati in figura 1.

L'esplorazione della piastrina può essere fatta anche usando più antenne, opportunamente disposte e alimentate. Si possono individuare differenti soluzioni.

Array di area con pilotaggio simultaneo

In questo caso si usa una matrice di $N \times N$ antenne, ciascuna delle quali è pilotata dal proprio generatore; al fine di evitare interazione tra le antenne, è necessario che esse siano separate da un'opportuna distanza.

Mediante l'array di area si ottiene l'esplorazione simultanea dell'intera piastrina. Poiché non sono necessarie traslazioni dell'array il tempo t_{acq} necessario per l'acquisizione di $N \times N$ dati diventa:

$$t_{acq} = t_m$$

Array di riga con pilotaggio simultaneo

In questo caso si usa una schiera di N antenne disposte lungo una riga parallela all'asse x , ciascuna delle quali è pilotata dal proprio generatore. Mediante l'array di riga si ottiene l'esplorazione simultanea di una striscia della piastrina nel tempo t_m . L'intera piastrina viene esaminata per strisce successive, traslando ogni volta l'array lungo l'asse y . Si ha:

$$t_{acq} = N \times t_m + (N - 1) \times t_t$$

dove N è il numero di strisce di misura.

L'impiego di un array di riga è particolarmente conveniente quando la piastrina è in movimento: in questo caso infatti non è necessario un sistema meccanico per la traslazione dell'array ed è sufficiente sincronizzare l'inizio della scansione di riga con lo spostamento della piastrina. In questo caso si ha:

$$t_{acq} = N \times t_m$$

A causa della traslazione della piastrina, la ROI esaminata da ciascun'antenna non è più un quadrato di lato A , bensì un rettangolo di lati A , nella direzione x , e B , nella direzione y (vedi figura 2); si ha:

$$B = A + v \times t_m \tag{2}$$

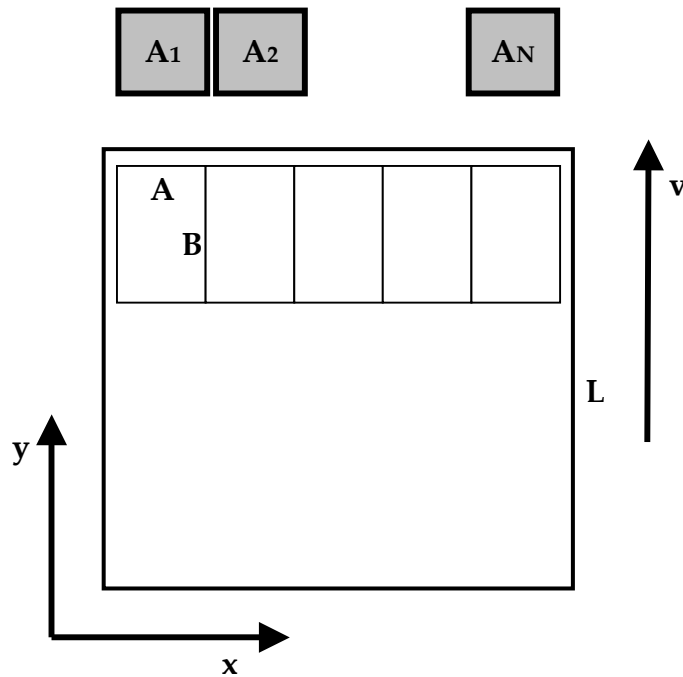


Figura 2. Deformazione delle ROI di scansione quando l'oggetto è in movimento; le antenne dell'array sono pilotate in parallelo.

Array di riga con pilotaggio sequenziale

Il pilotaggio simultaneo di un array comporta un costo elevato, giacché si deve dotare ciascun'antenna dei componenti necessari per la generazione e la rivelazione del segnale; il costo della struttura può essere ridotto se le antenne sono pilotate in sequenza giacché sono necessari un unico dispositivo di pilotaggio e rilevamento ed un apposito dispositivo di commutazione.

In questo caso però, oltre alla distorsione della ROI nella direzione y , si ha anche una disposizione delle ROI di misura lungo rette inclinate rispetto all'asse x (vedi figura 3).

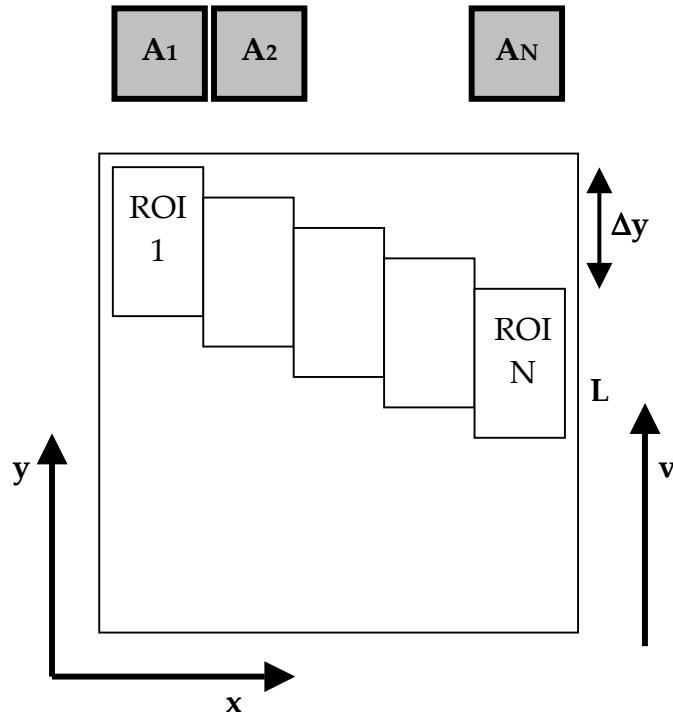


Figura 3. Deformazione e spostamento delle ROI di scansione quando l'oggetto è in movimento; le antenne dell'array sono pilotate in serie.

In prima approssimazione, lo spostamento Δy è dato da:

$$\Delta y \approx v \times (N \times t_m)$$

Se $t_m \ll 1/v$, entrambe le distorsioni elencate possono essere ridotte a valori trascurabili. Poiché il pilotaggio sequenziale di più antenne può essere fatto mediante dispositivi disponibili in commercio, si è eseguita un'analisi più dettagliata di questo modo di scansione per verificare se si può realizzare un sistema d'ispezione che soddisfi i requisiti d'utenza.

Scansione di riga con pilotaggio sequenziale

Nelle prove sperimentali per la determinazione statica della porosità locale di piastrelle di ceramica si è fatto uso di un Network Analyzer HP 8753B: la figura 4 riporta lo schema funzionale dell'apparato.

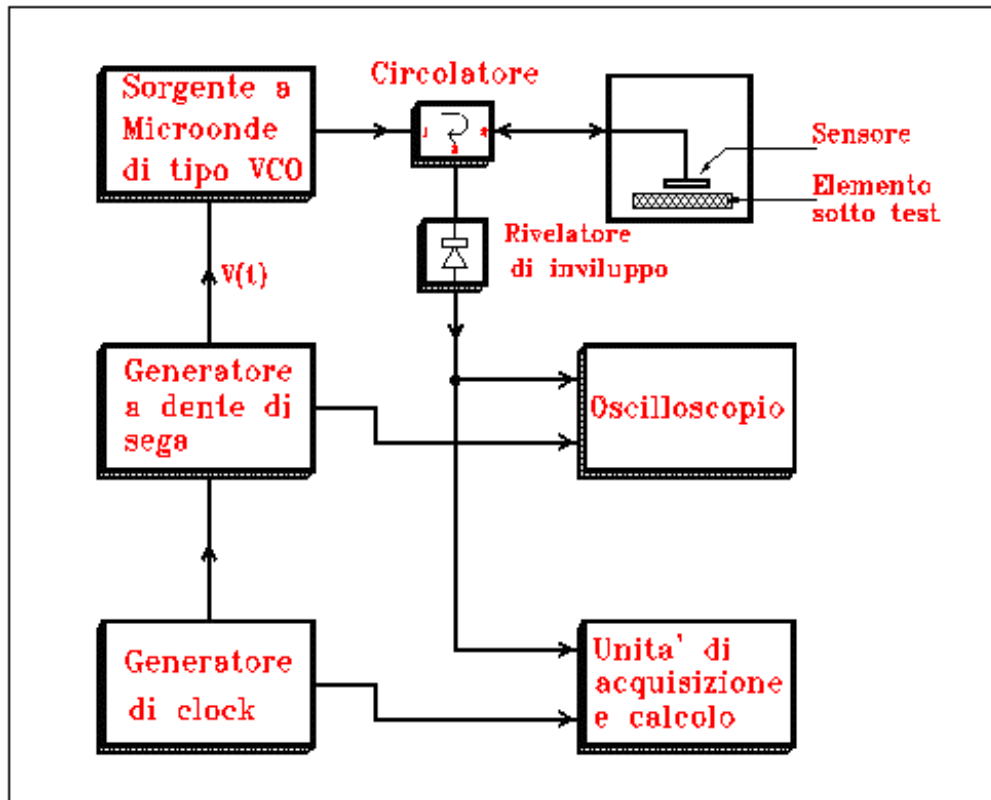


Figura 4. Schema a blocchi del sistema per la misura della densità.

Il sensore posto in prossimità dell'oggetto in esame è una struttura risonante, che presenta un minimo del modulo del coefficiente di riflessione alla frequenza di risonanza f_0 , dipendente dalle proprietà dielettriche del campione.

Per determinare f_0 l'antenna viene pilotata attraverso un circolatore da una sorgente a microonde con frequenza variabile (VCO); il circolatore invia il segnale riflesso dalla cavità ad un rivelatore d'involuppo; l'uscita del rivelatore viene inviata ad un oscilloscopio, sul quale si può osservare l'ampiezza del segnale riflesso alle differenti frequenze generate dal VCO. L'oscilloscopio è sincronizzato dal generatore a dente di sega che pilota il VCO.

Banda del segnale a microonde

L'uscita del rivelatore d'involuppo è inviata anche su un'unità di calcolo, che provvede a determinare automaticamente il valore della frequenza di risonanza e ad archiviare i dati di misura; il calcolatore pilota inoltre il generatore di clock, che avvia il processo di misura.

La frequenza del segnale applicato all'antenna deve variare linearmente nel tempo tra gli estremi f_1 e f_2 necessari per rivelare un prefissato intervallo di valori di porosità delle piastrelle in esame. La banda effettiva B_c del segnale emesso dalla sorgente a microonde dipende dalla banda BW del segnale applicato al VCO e dall'indice di modulazione $\beta = \frac{\Delta f}{BW}$; si ha [3]:

$$B_c = 2 \left(\frac{\Delta f}{BW} + 1 \right) \times BW = 2 (\beta + 1) \times BW \quad (3)$$

dove $\Delta f = \frac{(f_2 - f_1)}{2}$

Affinché sia $B_c \approx 2 \Delta f$, dev'essere:

$$\beta \gg 1 \quad (4)$$

e quindi:

$$\Delta f \gg BW \quad (5)$$

Se il segnale che pilota il VCO è una senoide di periodo t_r , la banda del segnale è $BW = \frac{1}{t_r}$. Se il segnale non è sinusoidale, la banda aumenta a causa della presenza delle armoniche di ordine superiore; poiché l'ampiezza delle armoniche decresce al crescere del loro ordine, si può considerare solo un numero limitato di esse. Se il segnale che pilota il VCO è una rampa di periodo t_r , l'ampiezza della 20^a armonica è circa 1/20 dell'ampiezza della fondamentale; si può quindi assumere:

$$BW = \frac{20}{t_r}$$

La condizione espressa dall'equazione 5 diventa quindi:

$$t_r \gg \frac{20}{\Delta f} \quad (6)$$

Dispositivo di rilevamento

La figura 5 mostra l'architettura semplificata del sistema di rivelazione con un'array lineare di antenne pilotate in sequenza.

L'unità a microonde comprende alcuni dei componenti già mostrati in figura 4: VCO, generatore di rampa, rivelatore d'involuppo e circolatore.

Il segnale a microonde uscente dal circolatore viene inviato sul modulo commutatore; quest'ultimo, in base al comando ricevuto dal sistema di controllo, applica il segnale ad una delle antenne dell'array.

Il sistema di controllo riceve dall'unità a microonde il segnale di riflessione relativo all'antenna eccitata, esegue le misure necessarie alla determinazione del minimo valore del segnale riflesso e controlla la sequenza di eccitazione delle antenne.

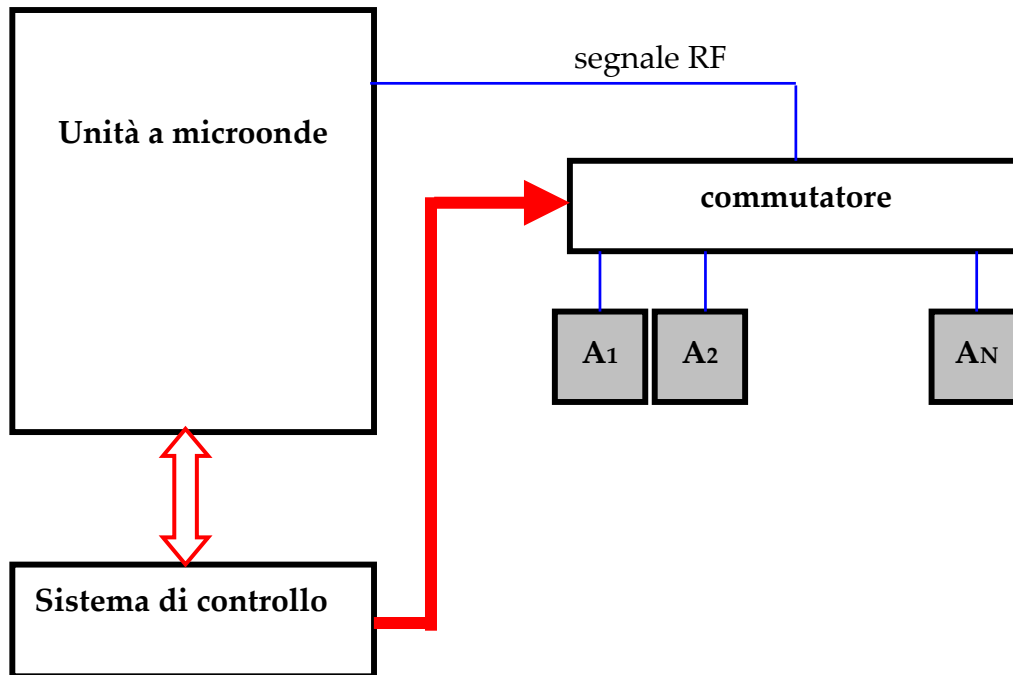


Figura 5. Sistema di misura con array lineare di antenne.

Il tempo t_{rig} necessario per l'acquisizione dei dati prodotti da una riga di scansione è dato da:

$$t_{\text{rig}} = N \times (t_m + t_c) \quad (7)$$

dove t_m è il tempo di misura, determinato dall'equazione 6, e t_c è il tempo richiesto dal modulo commutatore per passare dal collegamento di un'antenna a quello della successiva.

Artefatti di misura

Se la piastrina esaminata è in movimento, ciascuna ROI di misura è traslata rispetto alla precedente (vedi figura 3). Lo spostamento Δy tra il bordo superiore della ROI₁ e quello della ROI_N è dato da

$$\Delta y = v \times (N - 1) \times (t_m + t_c) \quad (8)$$

Durante la scansione della prima striscia non viene dunque esplorata una zona della piastrina con forma approssimativamente triangolare e area $\frac{1}{2}(L \times \Delta y)$; durante le successive scansioni non vengono esplorate zone a forma di parallelogramma con area $(L \times \Delta y)$.

Questa situazione può essere migliorata se l'array lineare di antenne è inclinato rispetto all'asse x dell'angolo:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta y}{L}\right) \quad (9)$$

In questo modo, le strisce di scansione sulla piastrina risultano parallele e separate dell'intervallo:

$$\Delta y' = v \times t_c \quad (10)$$

Riassumendo, la velocità di scorrimento delle piastrine e i tempi necessari per l'esecuzione di una singola misura e per la commutazione delle antenne determinano due artefatti, consistenti nella deformazione della ROI rispetto alla forma quadrata ideale e nella copertura della piastrina con strisce di ROI non adiacenti.

Si possono definire un indice di distorsione geometrica D, dato da:

$$D = \frac{B - A}{A} = \frac{v \times t_m}{A}$$

e un indice di perdita R, dato dal rapporto tra l'area non esplorata e l'area di una striscia:

$$R = \frac{\Delta y' \times L}{B \times L} = \frac{v \times t_c}{B}$$

Fissato v, i valori di D e R possono essere ridotti riducendo i tempi di misura e di commutazione: ciò comporta l'impiego di dispositivi con prestazioni più elevate e conseguentemente costi maggiori.

Per soddisfare le richieste in termini di D e R, supposto $B \approx A$, deve essere:

$$t_m \leq \frac{A}{v} D$$

$$t_c \leq \frac{A}{v} R \quad (11)$$

Struttura del sistema

La figura 6 mostra la possibile struttura del sistema per l'ispezione delle piastrelle mediante strutture risonanti a microonde.

Le piastrelle da esaminare sono spostate dal nastro trasportatore alla velocità costante v . Quando una piastrella arriva in prossimità del rivelatore di posizione S , quest'ultimo invia all'unità di controllo un segnale che viene usato come inizio per la sequenza programmata di operazioni, costituita sostanzialmente dai seguenti passi.

1. L'unità di controllo seleziona la prima antenna del rilevatore e attiva un generatore di rampa lineare; l'uscita del generatore pilota il VCO, in modo che la frequenza di pilotaggio dell'antenna varia in modo lineare nell'intervallo prefissato. Il segnale di riflessione dell'antenna viene inviato mediante il circolatore al diodo rivelatore, ricavando così il segnale a bassa frequenza $s(t)$, che rappresenta la risposta del sistema sensore-piastrella alle varie frequenze di eccitazione.
2. L'unità di controllo provvede a campionare $s(t)$ e a ricavarne il valore di minimo, determinando così la frequenza di risonanza della struttura.
3. L'unità di controllo trasferisce questo valore al sistema di calcolo, quindi seleziona la successiva antenna e fa ripartire il ciclo di misura: viene cioè esaminata la successiva ROI della stessa striscia della piastrella.

Al termine della scansione delle N antenne dell'array, si hanno gli N valori di misura relativi alla prima striscia di piastrella; ha quindi inizio l'esplorazione della successiva striscia, che è giunta sotto il rivelatore a causa del movimento del nastro.

L'intera piastrella viene suddivisa in M strisce di esame, con:

$$M = \frac{L}{B + \Delta y}$$

Al termine dell'ispezione dell'intera piastrella il sistema di calcolo elabora la matrice degli $M \times N$ valori di misura e determina quindi la mappa di porosità della piastrella. Il programma residente sul calcolatore può fare rappresentazioni delle mappe, provvedere all'eventuale marcatura o eliminazione delle piastrelle che non soddisfano i requisiti di qualità, aggiornare un archivio dei dati, costruire carte di qualità, ecc.

La figura 7 mostra un diagramma di flusso semplificato della procedura di acquisizione.

In questo caso, rispetto alla descrizione fatta in precedenza, si è introdotto un ciclo di misure ripetute sulla stessa ROI: in questo modo si migliora il rapporto segnale/rumore e si può quindi individuare la posizione del minimo della curva di risposta in modo migliore rispetto alla misura singola. Si ottiene così una migliore

determinazione della frequenza di risonanza della cavità e quindi della porosità relativa alla ROI in esame.

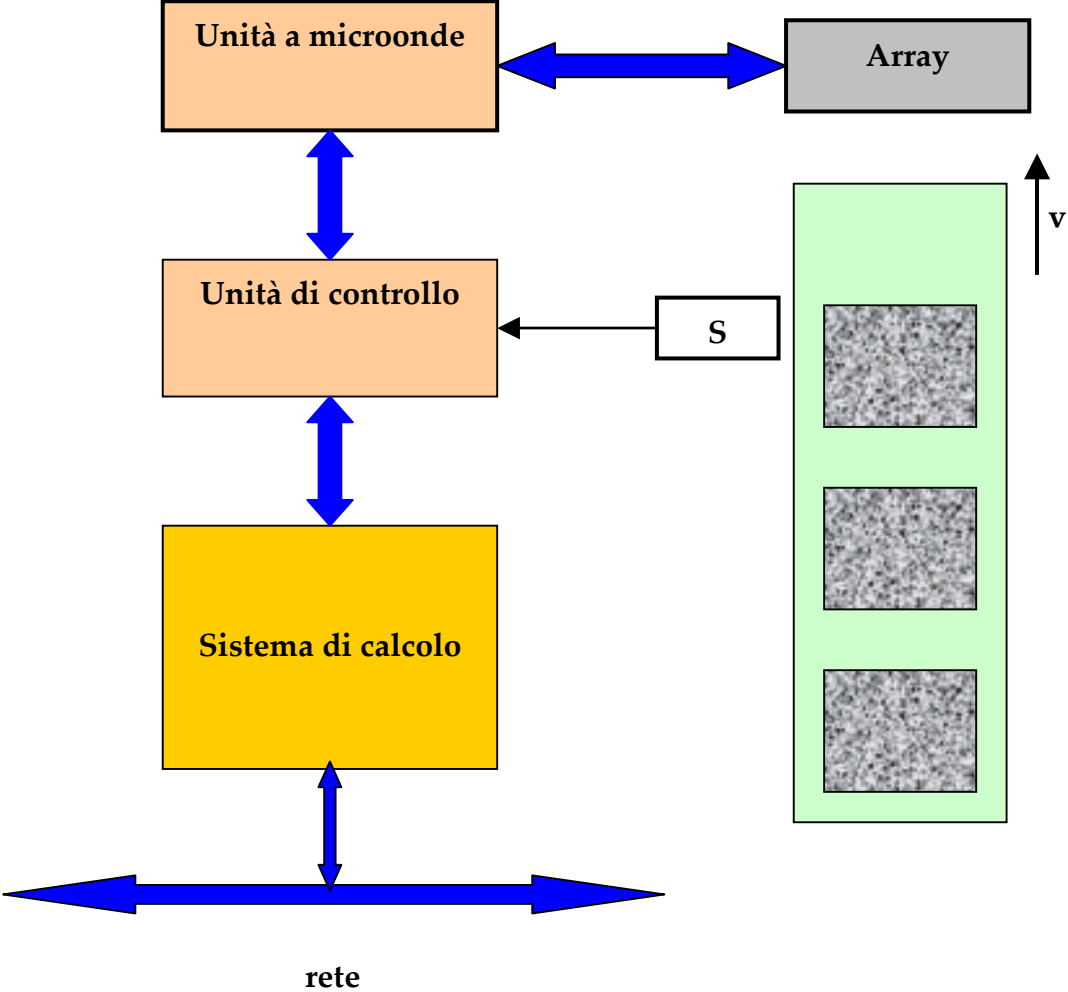


Figura 6. Struttura semplificata del sistema per l'ispezione di piastrelle.

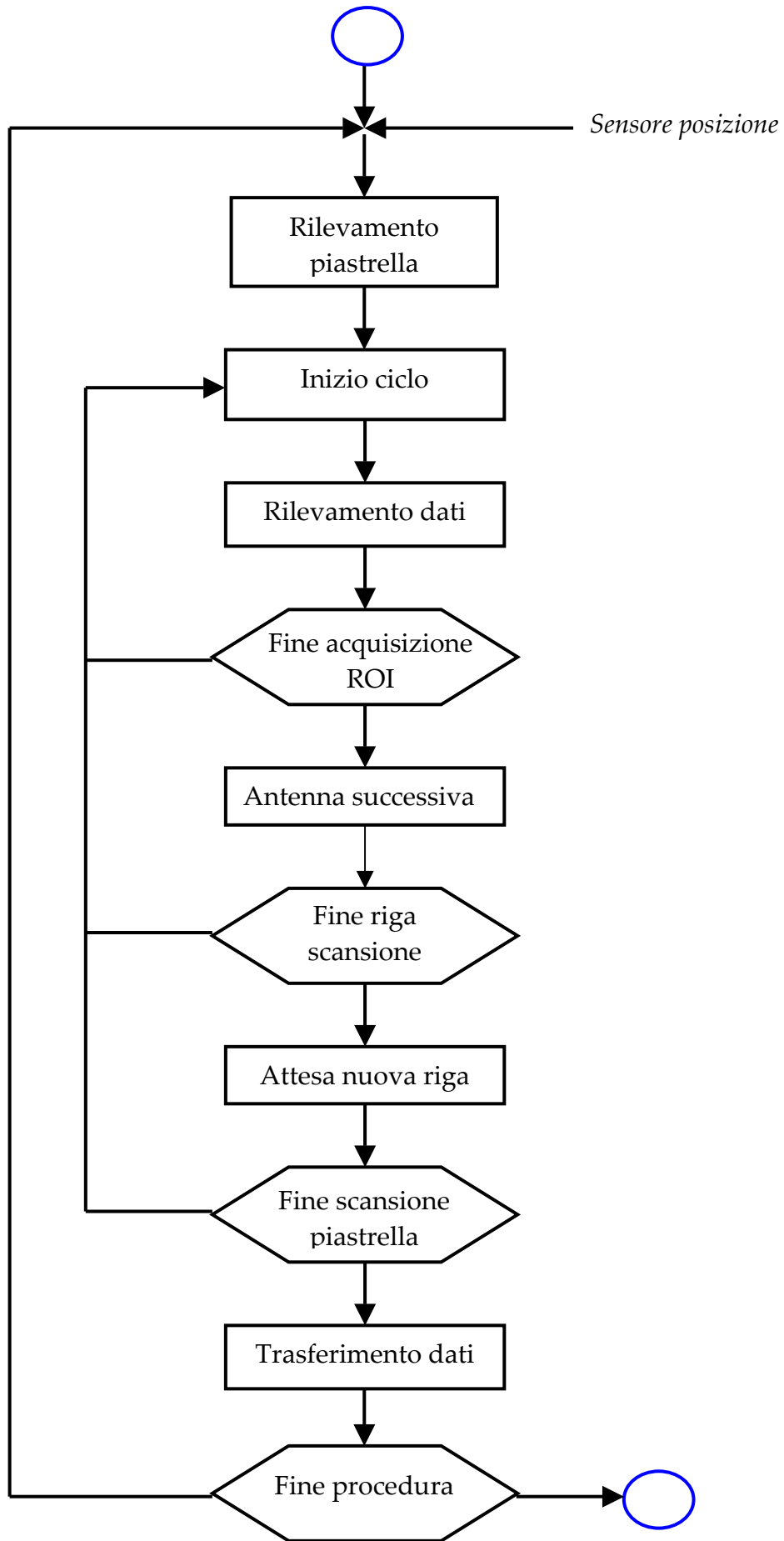


Figura 7. Schema a blocchi di una possibile procedura di ispezione delle piastrelle.

Tempi di misura

In questo paragrafo si fa una stima dei tempi necessari all'esplorazione delle piastrelle; alcune delle considerazioni fatte in seguito hanno validità generale, altre sono invece valide per l'esempio preso in considerazione.

Si assume che le piastrelle da esaminare abbiano formato quadrato, con lato $L = 32$ cm, e si spostino con la velocità $v = 0.5$ m/s; si assume inoltre che lo spessore della piastrella sia dell'ordine di 1 cm, in modo che il sistema di ispezione sia in grado di eseguire misure corrette.

Il formato delle piastrelle, la velocità di scorrimento, i requisiti utente e la disponibilità dei componenti consentono di determinare i valori dei parametri di tempo e frequenza necessari per il corretto pilotaggio dei componenti del sistema di acquisizione.

L'antenna di esplorazione impiegata nella sperimentazione è un quadrato con lato $A_0 = 8$ cm e la ROI esaminata quando l'antenna è posta a ≈ 2 mm dalla piastrella è un quadrato di lato $A \approx 4$ cm, col centro coincidente con quello dell'antenna: di conseguenza, se si costruisce un array lineare affiancando $N = 4$ antenne, ogni striscia della piastrella viene esaminata in N ROI distanziate di ≈ 4 cm.

La piastrella può essere esplorata quasi integralmente usando due array di antenne opportunamente sfalsati e ricavando un numero di strisce $M \neq N$. In quest'esempio si assume invece che la piastrella sia esaminata in 4 strisce con 16 ROI equidistanti (vedi figura 8): l'area complessiva esplorata è di 256 cm^2 .

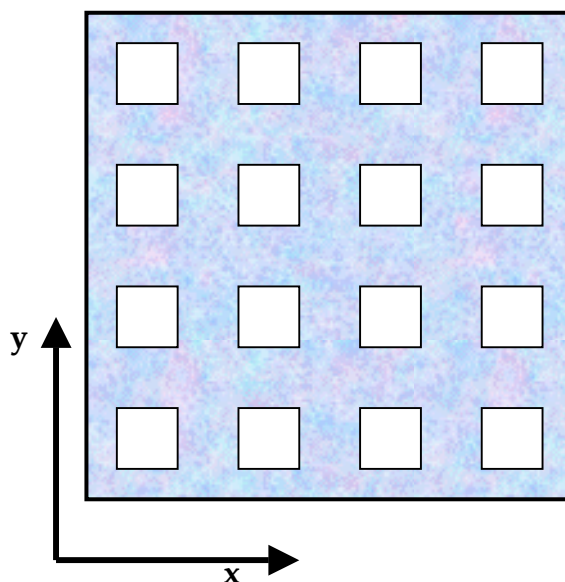


Figura 8. Esempio di esplorazione di piastrelle mediante ROI quadrate di 4 cm disposte su una griglia quadrata con passo 8 cm.

L'intervallo utile di frequenze di pilotaggio dell'antenna, determinato esaminando il campione di piastrelle disponibile nella fase di sperimentazione iniziale, è compreso tra $f_1 \approx 2.35$ GHz e $f_2 \approx 2.45$ GHz; si ha quindi:

$$\Delta f \approx 0.05 \text{ GHz} \quad (12)$$

Posto $\frac{1}{\Delta f} = t_{\min} = 0.02 \mu\text{s}$ la condizione di corretto pilotaggio del VCO espressa dall'equazione 6 diventa quindi:

$$t_r \gg 20 t_{\min} = 0.4 \mu\text{s} \quad (13)$$

Supponendo che la distorsione geometrica D causata dal moto di trascinamento della piastrina debba essere dell'ordine dell'1%, usando l'equazione 12 si ottiene:

$$t_r \equiv t_m \leq 0.8 \text{ ms} \quad (14)$$

Si pone $t_r = 0.8 \text{ ms}$, in modo che la condizione espressa nell'equazione 13 è ampiamente soddisfatta.

Poiché il tempo minimo di misura espresso nell'equazione 13 è inferiore di circa tre ordini di grandezza rispetto al tempo massimo indicato dall'equazione 14, è possibile eseguire sulla stessa ROI un numero di misure $C > 1$.

Nelle prove sperimentali si è verificato che con 10 misure si ottiene un notevole miglioramento del rapporto segnale rumore. Supponendo di ripetere 8 volte la misura della stessa ROI, il tempo necessario per la singola misura diventa:

$$t_1 = \frac{t_m}{8} = 0.1 \text{ ms} \quad (15)$$

Anche in questo caso, l'equazione 13 è verificata.

Per determinare in maniera corretta il valore di minimo della curva di risposta $s(t)$ sono necessari ≈ 800 campioni; la frequenza di campionamento del convertitore A/D dev'essere quindi:

$$f_s \approx 8 \text{ MHz} \quad (16)$$

La risoluzione di quantizzazione può essere di 8 bit.

Nell'ipotesi fatta in precedenza (vedi figura 8), l'intervallo tra la fine di una riga di scansione e l'inizio della successiva è:

$$\Delta y'' = 8 \text{ cm}$$

Per compiere questo spostamento alla velocità $v = 0.5 \text{ m/s}$ è necessario il tempo:

$$\Delta t = \frac{\Delta y''}{v} = 160 \text{ ms} \quad (17)$$

Nell'equazione 6 si è mostrato che l'intervallo minimo tra la fine di una riga di scansione e l'inizio della successiva è dato dal tempo di risposta dei dispositivi impiegabili per la selezione delle antenne dell'array; poiché t_c è normalmente inferiore al valore indicato nell'equazione 17 si deve aggiungere un opportuno ritardo nel ciclo di acquisizione in modo da ottenere la voluta disposizione delle ROI sulla piastrina.

Se $t_c = 1 \mu\text{s}$, il tempo t_{trig} necessario per l'acquisizione dei dati prodotti da una riga di scansione diventa (vedi equazione 7):

$$t_{\text{trig}} = 4 \times (0.8 + 0.001) \text{ ms} \approx 3.2 \text{ ms} \quad (18)$$

Il tempo t_{acq} necessario per l'acquisizione dell'intera piastrina è:

$$t_{\text{acq}} = (4 \times t_{\text{trig}}) + (3 \times \Delta t) = 492.8 \text{ ms}$$

In base all'equazione 8, durante la scansione di ogni riga lo spostamento Δy tra il bordo superiore della ROI₁ e quello della ROI₄ è dato da:

$$\Delta y = 0.5 \text{ m/s} \times (3 \times 3.2) \text{ ms} = 4.8 \text{ mm} \quad (19)$$

Per compensare questa deriva, l'inclinazione della retta passante tra i centri delle antenne dell'array dev'essere (vedi equazione 9):

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{4.8}{240}\right) \approx 1.1^\circ \quad (20)$$

Flusso di dati

Nell'esempio descritto, il flusso dei dati ottenuti campionando il segnale $s(t)$ di riflessione dell'antenna è organizzato nel tempo secondo il diagramma mostrato in figura 9.

Per ogni singola misura si hanno ≈ 800 byte alla cadenza di $\approx 8 \text{ MB/s}$ per una durata $t_1 \approx 0.1 \text{ ms}$; il pacchetto di dati della misura successiva è distanziato del tempo necessario per il reset della rampa che pilota il VCO.

L'intervallo di tempo tra la fine delle misure in una ROI e l'inizio delle misure relative alla ROI successiva è $t_c \approx 1 \mu\text{s}$.

L'intervallo di tempo tra la fine delle misure di una riga e l'inizio delle misure nella riga successiva è $\Delta t \approx 160 \text{ ms}$.

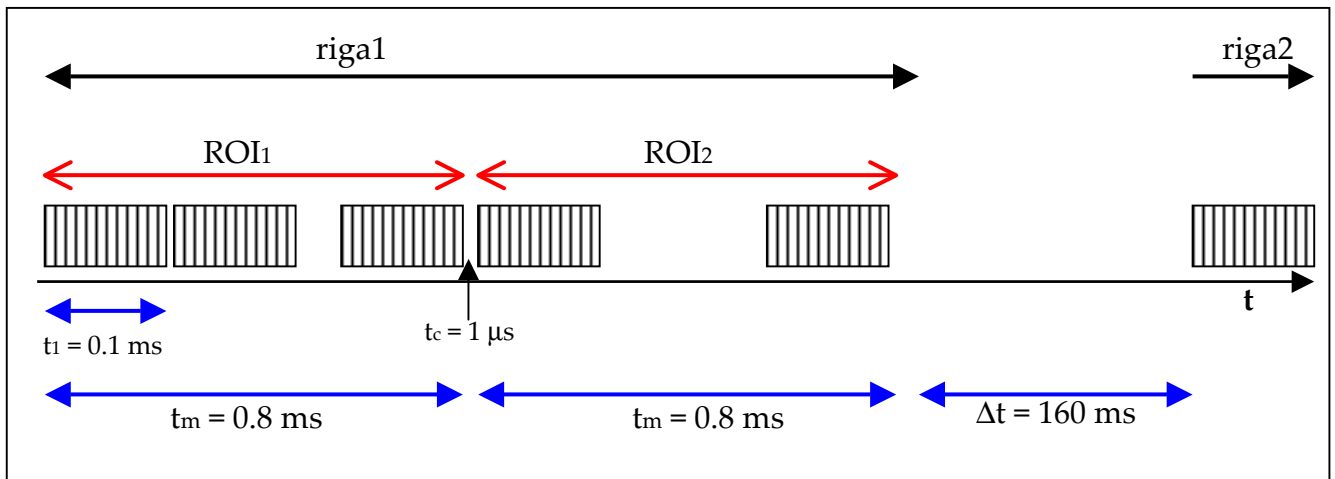


Figura 9. Flusso dei dati ottenuti durante l'ispezione di una piastrella.

Con 8 misure ripetute, per ogni ROI si hanno complessivamente:

$$N_1 \approx 8 \times 800 = 6400 \text{ byte}$$

Per ogni riga di scansione si hanno:

$$N_2 \approx 4 \times 6400 = 25600 \text{ byte}$$

Per ogni piastrella si hanno:

$$N_3 \approx 4 \times 25600 = 102400 \text{ byte}$$

La velocità media del flusso dei dati è:

$$v_d \approx 207800 \text{ byte/s}$$

Poiché il flusso dei dati è intermittente, risulta conveniente immagazzinare i dati prodotti in una riga di scansione ed eseguire le operazioni di media e determinazione dei minimi delle curve di risposta nell'intervallo di tempo tra una riga di scansione e la successiva. In base a questa considerazione, si può demandare la capacità elaborativa al calcolatore del sistema. Si può quindi impiegare un convertitore A/D con le prestazioni richieste, inserito nell'unità di controllo e collegato ad una porta parallela sul calcolatore, oppure si può fare uso di una scheda per l'acquisizione di segnali, inserita sul bus del calcolatore.

Costo di sviluppo

Per realizzare il sistema descritto in precedenza sono necessari: componenti hardware dedicati per segnali a microonde e componenti elettronici standard di tipo analogico e digitale; componenti software per il controllo dell'acquisizione e l'elaborazione dei dati.

Hardware

La tabella 1 riporta un elenco dei componenti per microonde impiegabili, coi relativi prezzi. Il costo totale, IVA esclusa, previsto è di € 7435.

Dispositivo	Quantità	Prezzo unitario	Costruttore
attenuatori A-8-6-R	3	226.00	RLC Electronics
terminazioni T-13-R-M	1	197.00	"
accoppiatore direzionale C1530-6-T	1	497.00	"
diodo rivelatore CR-133-R	1	413.00	"
circolatore 2.382÷2.420GHz, Mod. 3A4NAD coassiale	1	200.00	Renaissance Co
cavetti semirigidi da 30-50cm con connettori SMA-M	10	50.00	JYBAO
VCO mod190, 2÷3 GHz	1	300.00	EMF Systems
commutatore GG-75425_05	1	3450.00	NARDA
Array di antenne	1	1200.00	MicroComm

Tabella 1. Componenti a microonde necessari per la realizzazione del sistema di ispezione.

I componenti elencati devono essere inseriti in un apposito rack opportunamente schermato, del costo presumibile di \approx € 100.

I componenti analogici e digitali necessari per il condizionamento dei segnali a bassa frequenza sono:

- Generatore di rampa con durata 0.1 ms
- Operazionali con banda 1 MHz
- Componenti passivi vari

Il costo dei suddetti componenti, compresa la scheda di supporto, è stimabile in \approx € 1500. Il costo presumibile degli alimentatori necessari per i componenti a microonde e quelli a bassa frequenza è \approx € 600.

E' inoltre necessaria una scheda PC che comprenda:

- temporizzatori programmabili $1\mu\text{s} \div 250\text{ms}$
- porte I/O programmabili a 8 bit

- convertitore A/D 8 bit 10 MHz
- accesso DMA
- RAM 1MB

Il costo presumibile della scheda è \approx € 1500

Sono infine necessari:

- supporto meccanico per l'array di antenne
- sensori di prossimità per l'individuazione delle piastrelle e per il rilevamento di condizioni di pericolo
- cavi di collegamento vari

Il costo presumibile è \approx € 50 per sensore e \approx € 100 per i cavi; il costo del supporto meccanico dev'essere valutato in base alla sua sistemazione sulla catena di trasporto. Riassumendo, per quanto riguarda la componente hardware, il costo complessivo presumibile, a parte il calcolatore e il supporto meccanico, è dato da:

componenti per microonde	\approx € 7500
rack	\approx € 100
componenti a bassa frequenza	\approx € 1500
alimentatori	\approx € 600
scheda	\approx € 1500
accessori	\approx € 300
 totale	 \approx € 11500

Software

Con la soluzione prospettata non sono necessari dispositivi programmabili ad alta velocità per il trattamento dei dati: è necessario quindi uno sviluppo software sul calcolatore del sistema.

In prima istanza si possono individuare i seguenti moduli, specializzati per:

- gestione della scheda I/O per la temporizzazione, la sincronizzazione e la raccolta dei dati
- elaborazione dei dati grezzi per la determinazione dei valori di misura
- controllo della qualità delle piastrelle, basati sull'interpretazione dei dati raccolti
- determinazione di parametri statistici per il controllo del processo.

L'impegno prevedibile, da ottimizzare anche in base alle richieste d'utenza, e dipendente dall'esperienza nel settore, è quantificabile grossolanamente in circa 2 ÷ 3 mesi-uomo.

Conclusioni

La tecnica di ispezione a microonde descritta nel rapporto si è dimostrata in grado di determinare la porosità di campioni di marmo o di polvere pressata, con caratteristiche note mediante altri metodi d'indagine, e di apprezzare variazioni di porosità dell'ordine dell'1%.

Questa tecnica è stata applicata successivamente a piastrelle di ceramica prima della fase di cottura, e anche in questo caso si è dimostrata efficiente. Allo stato attuale, a causa della limitata quantità di campioni esaminati, questo tipo d'ispezione può fornire solo misure indicative di porosità e può essere impiegato per operazioni di confronto: è comunque ipotizzabile che la tecnica possa fornire misure accurate, precise e ripetibili se si dispone di un'adeguata campionatura di piastrelle per determinare con esattezza la risposta. Prima della realizzazione di un sistema basato su questa tecnica d'ispezione è comunque opportuno verificare che le condizioni ambientali di lavoro non degradino le prestazioni ottenute in laboratorio.

La realizzazione del sistema d'ispezione descritto nel rapporto presenta anch'essa un rischio tecnologico molto contenuto, in quanto si fa uso di componenti hardware reperibili sul mercato e si richiede lo sviluppo di un software basato su tecniche di programmazione standard.

Il progetto dettagliato del sistema richiede un previo accordo con l'utenza al fine di stabilire con precisione le caratteristiche di risoluzione e di precisione di misura. La soluzione presentata nel rapporto con un certo grado di approfondimento consente di misurare la porosità di una frazione (1/4) della piastrella: questa frazione può essere notevolmente aumentata se si fa uso di un array più complesso di quello descritto e si ricorre, eventualmente, all'impiego di processori dedicati per l'elaborazione dei dati. La risoluzione di misura può essere aumentata progettando nuove antenne che consentano l'esame di una ROI con dimensioni inferiori a quelle attuali: l'efficacia della nuova antenna dev'essere verificata sperimentalmente.

La stima del costo di realizzazione dipende anch'essa dalle soluzioni adottate (numero di array, numero di antenne, numero di sensori, sistemi di posizionamento, ecc.). I costi indicati nel rapporto possono essere ridotti se si possono reperire a migliori condizioni alcuni dei componenti necessari (soprattutto quelli per il trattamento di segnali a bassa frequenza) e se si dispone del personale per lo sviluppo del software.

Riferimenti

- [1] A. Zucchelli, G. Gagliardi, *“Analisi mediante simulazione e sperimentazione di sensori a risonanza realizzati con antenne a patch per l’indagine non distruttiva a microonde su materiali dielettrici”*, I.S.T.I. – CNR Pisa (2002).
- [2] G. Gagliardi, A. Zucchelli, *“Un metodo per la misura on-line delle variazioni di porosità all’interno di piastrelle di ceramica”*, I.S.T.I. – CNR Pisa (2002).
- [3] A. N. D’Andrea, *“Comunicazioni Elettriche”*, ed. ETS (2002).