

## **Progetto SP1a**

**“Nuove tecnologie per l’analisi non intrusiva dei manufatti”**

### **Programma di ricerca**

**Ingegnerizzazione di prototipi e strumentazione per la diagnostica su manufatti monumentali in materiale lapideo**

## **Progetto di un sistema per misure non invasive a microonde**

*Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti, Enrico Fantini, Guido Gagliardi, Marco Orsolini,  
Alberto Ribolini, Alessandra Zucchelli*

Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione “Alessandro Faedo”.

### **Sommario**

Il lavoro descrive i criteri di progetto di una struttura H/S dedicata all’ispezione di strati superficiali di materiali lapidei mediante tecniche a microonde; il lavoro riporta le specifiche generali dei moduli componenti la struttura ed i componenti da utilizzare per la realizzazione di un prototipo iniziale.

Il lavoro è stato svolto nell’ambito del Progetto SP1a “Nuove tecnologie per l’analisi non intrusiva dei manufatti”.

## Indice

|   |    |
|---|----|
| Introduzione.....                         | 3  |
| Principio di misura.....                  | 3  |
| Metodo di misura .....                    | 4  |
| Circuito di misura .....                  | 4  |
| Strumentazione da laboratorio.....        | 6  |
| Sviluppo di strumentazione dedicata ..... | 8  |
| Modulo a microonde (MM) .....             | 8  |
| Modulo di controllo (MC).....             | 8  |
| Unità di elaborazione (UE) .....          | 8  |
| Impostazione del progetto .....           | 9  |
| MM .....                                  | 9  |
| Sensore .....                             | 9  |
| VCO.....                                  | 12 |
| Circolatore .....                         | 13 |
| Diodo rivelatore.....                     | 13 |
| MC .....                                  | 13 |
| UE .....                                  | 14 |
| Specifiche di progetto .....              | 15 |
| MM .....                                  | 15 |
| MC .....                                  | 15 |
| Risoluzione di misura .....               | 15 |
| Precisione di misura.....                 | 16 |
| Temporizzazione .....                     | 16 |
| Scelta dell'hardware.....                 | 16 |
| Diagramma di flusso.....                  | 16 |
| UE .....                                  | 19 |
| Bibliografia .....                        | 20 |

## Introduzione

L'attività dell'Unità Operativa dell'ISTI nell'ambito del Progetto Strategico PS1 consiste nella realizzazione di vari dispositivi, specializzati per l'esame non distruttivo di materiali lapidei; per questo scopo si useranno differenti tecniche, basate su principi diversi e già impiegate in varie applicazioni [1].

Uno degli obiettivi previsti consiste nella realizzazione di un dispositivo basato sulle tecniche a microonde, che effettui la misura del segnale riflesso da un sensore a contatto con il materiale da esaminare (MUT) e che soddisfi requisiti di:

- possibilità d'impiego in siti esterni
- semplicità
- praticità d'uso
- economicità

In seguito all'attività precedente [2-4], a studi preliminari [5] ed esperienze condotte in laboratorio si sono individuate l'architettura generale e le specifiche principali di progetto di una struttura dedicata.

### *Principio di misura*

Il sistema da realizzare prevede l'impiego di un sensore posto a contatto col materiale da esaminare; il principio di misura che definisce la risposta del sensore si basa sul fatto che la frequenza di risonanza di un dispositivo risonante (in particolare, di un'antenna a patch) varia in funzione della costante dielettrica del mezzo con cui l'antenna è a contatto.

In particolare si ha:

$$f = \frac{A}{\sqrt{\epsilon_{eq}}} \quad (1)$$

dove A è una costante, dipendente dalle caratteristiche fisiche e geometriche dell'antenna e  $\epsilon_{eq}$  è la costante dielettrica equivalente relativa, determinata dalle costanti dielettriche del materiale in esame e del substrato dell'antenna [6]. In particolare, per un'antenna a patch con la struttura mostrata in figura 1, si ha [6-7]:

$$\epsilon_{eq} = \frac{\epsilon_s + \epsilon_m}{2} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (2)$$

dove

$\epsilon_s$   $\equiv$  costante dielettrica del substrato dell'antenna

$\epsilon_m \equiv$  costante dielettrica del materiale in esame

$h \equiv$  spessore del substrato

$w \equiv$  larghezza del patch.

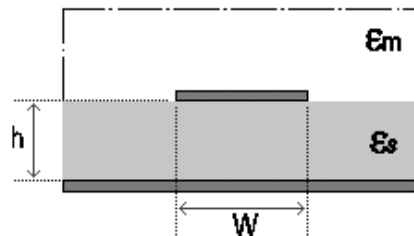


Figura 1. Modello per il calcolo della costante dielettrica equivalente di una linea a microstriscia

### Metodo di misura

Il rilevamento della costante dielettrica del materiale è fatto pilotando l'antenna con un segnale sinusoidale di ampiezza costante e frequenza variabile in modo controllato e rilevando il segnale  $V_A(\omega)$  riflesso dall'antenna: la frequenza di risonanza, da cui si può ricavare il valore della costante dielettrica del materiale, è ottenuta determinando il valore di  $\omega$  per cui si ha il valore minimo di  $V_A(\omega)$ .

### Circuito di misura

La figura 2 mostra lo schema a blocchi del circuito di base impiegabile per il rilevamento della frequenza di risonanza dell'antenna.

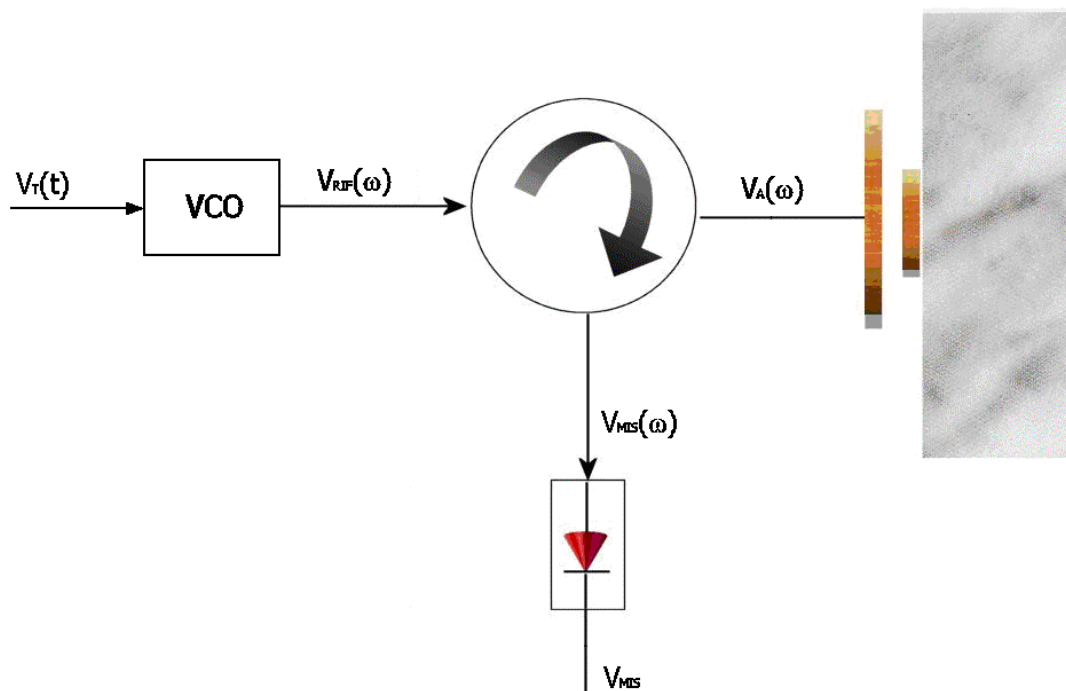


Figura 2. Schema semplificato del circuito usato per la determinazione della frequenza di risonanza del sensore.

Il circuito è sostanzialmente costituito da:

- un oscillatore a frequenza controllata, pilotato dalla tensione  $V_T$ , che fornisce una tensione sinusoidale  $V_{RIF}(\omega)$ , con frequenza data da:

$$\omega = \omega_0 + kV_T$$

dove  $\omega_0$  è la frequenza del segnale d'uscita @  $V_T = 0V$  e  $k \left[ \frac{Hz}{Volt} \right]$  è la sensibilità dell'oscillatore

- un circolatore, che invia all'antenna un segnale proporzionale al segnale  $V_{RIF}(\omega)$  generato dall'oscillatore, e su un'altra porta il segnale  $V_{MIS}(\omega)$ , proporzionale al segnale riflesso dall'antenna (vedi figura 3)
- un diodo rivelatore, che produce un segnale  $V_{MIS}$  con valore medio eguale all'ampiezza di  $V_{MIS}(\omega)$  ed una componente di ripple alla frequenza  $\omega$ .

Per determinare la frequenza di risonanza si varia la tensione di pilotaggio  $V_T$ , in modo continuo o per intervalli discreti, e si determina il minimo di  $V_{MIS}$ .

## Strumentazione da laboratorio

Attualmente l'ispezione dei materiali mediante microonde viene fatta impiegando la strumentazione da laboratorio disponibile presso l'Istituto, costituita da:

- un analizzatore vettoriale di rete (VNA) HP8753B
- un test set HP85044A
- un Personal Computer

L'analizzatore vettoriale [8] provvede ad inviare il segnale di pilotaggio all'antenna e a misurare il segnale riflesso, ricavandone l'ampiezza e la fase all'interno di una gamma di frequenza selezionata dall'utente; lo strumento consente infatti di impostare la banda di scansione  $B(\omega) = \omega_2 - \omega_1$  e il numero di campioni  $N$  che determina la risoluzione in frequenza  $\Delta\omega = \frac{B(\omega)}{N}$ .

L'antenna è collegata all'analizzatore tramite il test set HP85044A [8]. Questo dispositivo comprende un accoppiatore direzionale (power splitter), che separa su due linee di uscita il segnale di ingresso, un circolatore (directional bridge), che trasmette all'antenna il segnale in ingresso e invia all'analizzatore il segnale riflesso dall'antenna, e attenuatori fissi o variabili; l'ingresso del test set è collegato all'uscita dell'analizzatore e le sue uscite, su cui sono presenti rispettivamente al segnale di riferimento (R) ed al segnale di riflessione (A), sono collegate ai due canali di ingresso dell'analizzatore (vedi figura 3).

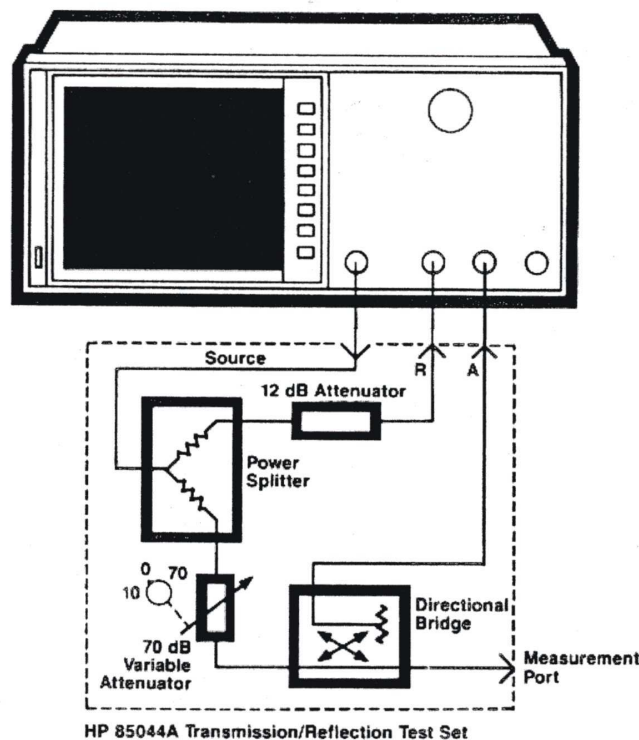


Figura 3. Schema di funzionamento del test set HP85044A.

Eseguendo il rapporto tra A ed R lo strumento determina il coefficiente di riflessione dell'antenna  $\Gamma(\omega)$ ; lo strumento mostra sul display grafico la posizione ed il valore della frequenza in corrispondenza del minimo di  $\Gamma(\omega)$ , l'attenuazione del minimo e la banda a  $-3\text{dB}$ .

L'analizzatore può essere controllato a distanza mediante un collegamento GPIB [3]. Nell'ambito degli studi preliminari per il Progetto Strategico è stato sviluppato su PC un software dedicato che consente di controllare in modo remoto l'analizzatore, di leggere i dati grezzi e i risultati delle misure e di memorizzarli su file per successive elaborazioni. Il programma è corredato di un'interfaccia utente che consente la gestione delle operazioni e la rappresentazione dei risultati (vedi figura 4).

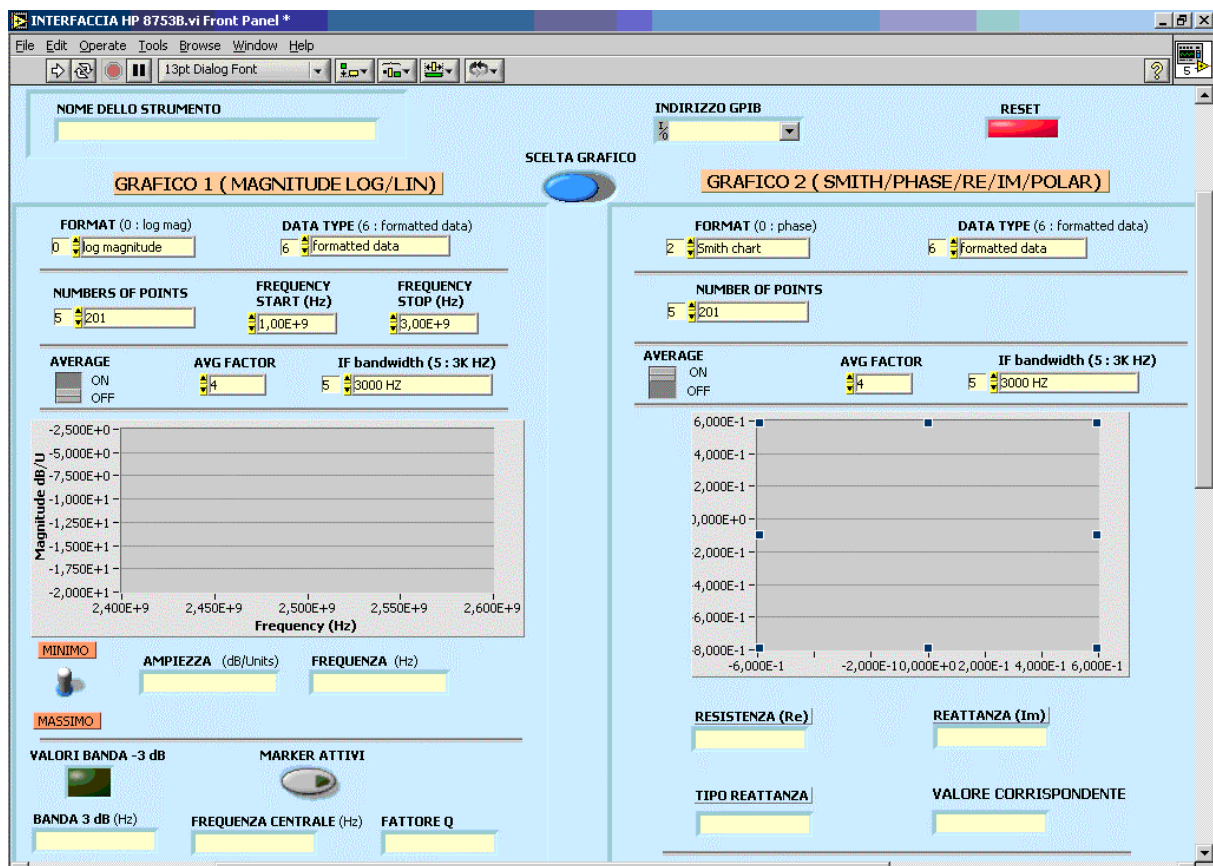


Figura 4. Interfaccia utente del software per il controllo remoto del VNA.

## Sviluppo di strumentazione dedicata

La struttura dedicata da realizzare fornirà solo alcune delle potenzialità offerte dalla strumentazione da laboratorio, in modo comunque da soddisfare i requisiti d'ispezione e di caratterizzazione della classe di materiali da esaminare; la struttura sarà costituita sostanzialmente dai moduli mostrati in figura 5.

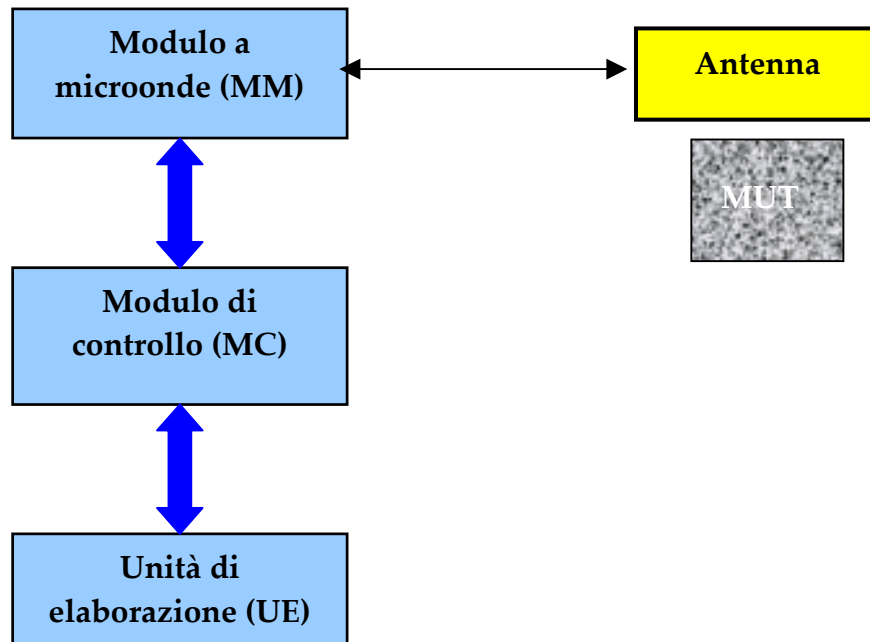


Figura 5. Diagramma a blocchi della struttura per l'ispezione a microonde

### *Modulo a microonde (MM)*

Questo modulo provvede a generare il segnale di pilotaggio dell'antenna in base ai comandi ricevuti dal modulo di controllo (MC) e ad inviare ad esso il corrispondente segnale di misura  $V_{MIS}$ .

### *Modulo di controllo (MC)*

Questo modulo provvede all'interpretazione dei comandi ricevuti dall'unità di elaborazione (UE), all'esecuzione delle operazioni del ciclo di misura definite dal programma residente ed alla trasmissione dei dati ad UE.

### *Unità di elaborazione (UE)*

Questa unità provvede alla gestione di MC, allo scaricamento dei dati di misura provenienti da MC, alla loro elaborazione, alla presentazione dei risultati in forma grafica e all'archiviazione di dati, risultati e informazioni ausiliarie.

La struttura sopra descritta sarà sviluppata in differenti fasi, passando da un prototipo da laboratorio ad una versione portatile ingegnerizzata.



## Impostazione del progetto

Nella fase preliminare teorico-sperimentale dello studio sono stati individuati i requisiti relativi alla generazione del segnale a microonde, alla rivelazione di involuppo del segnale riflesso dall'antenna, alla sua conversione in forma digitale ed alla elaborazione dei dati di misura; si sono individuati anche i componenti necessari per la realizzazione dei singoli moduli e le interconnessioni tra i moduli stessi.

## MM

I componenti principali di questo modulo sono: un oscillatore controllato in tensione (VCO), un accoppiatore direzionale, un circolatore e una coppia di diodi rivelatori; il modulo pilota un sensore.

## Sensore

Saranno utilizzate come sensore due antenne a patch, P1 con substrato avente  $\epsilon_s = 2.35$  e frequenza di risonanza a vuoto  $f_0 = 2.5GHz$  e P2 con substrato avente  $\epsilon_s = 1$  e  $f_0 \cong 2.4GHz$  (vedi figure 6 e 7).

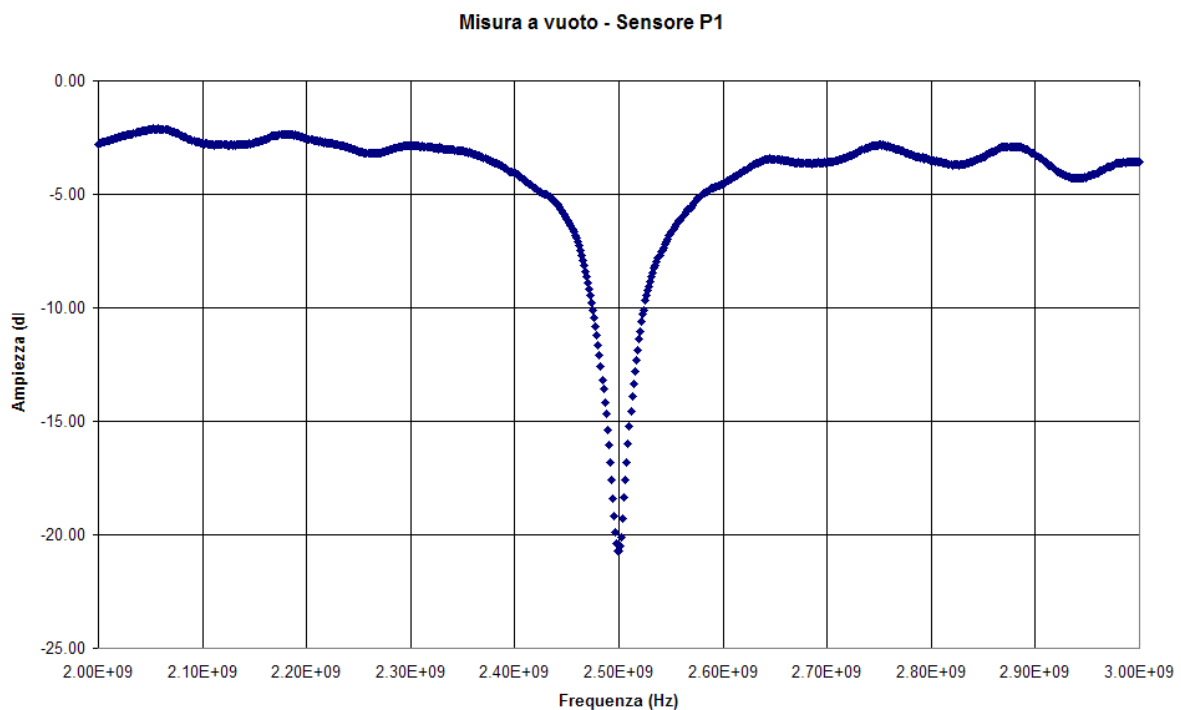
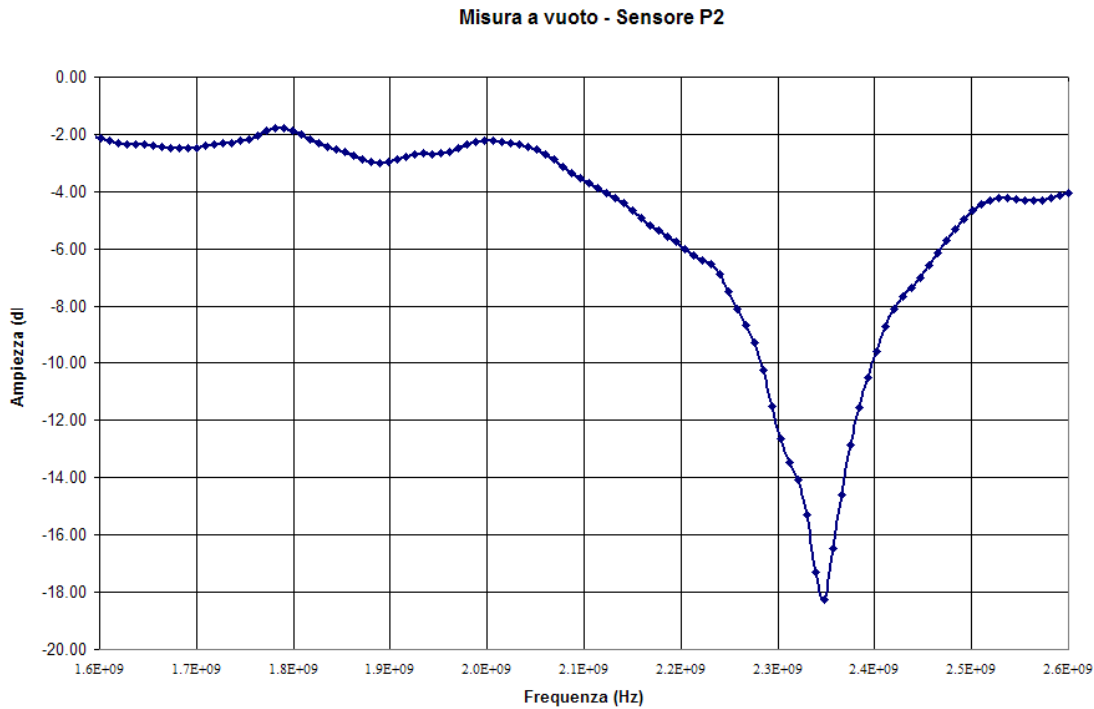


Figura 6. Grafico del coefficiente di riflessione  $\Gamma(\omega)$  dell'antenna P1, ricavato mediante VNA.



**Figura 7. Grafico del coefficiente di riflessione  $\Gamma(\omega)$  dell'antenna P2, ricavato mediante VNA.**

In entrambi i casi la frequenza di risonanza dell'antenna diminuisce al crescere della costante dielettrica del materiale a contatto.

Usando l'equazione 1, si hanno le frequenze di risonanza a vuoto  $f_0$  e in presenza di materiale  $f_M$ , date rispettivamente da:

$$f_0 = \frac{A}{\sqrt{\epsilon_{eq}(0)}}$$

$$f_M = \frac{A}{\sqrt{\epsilon_{eq}(M)}}$$

eseguendo il rapporto si ottiene:

$$f_M = \left( f_0 \sqrt{\epsilon_{eq}(0)} \right) \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eq}(M)}} = C \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{eq}(M)}} \quad (3)$$

Usando il modello definito in 2, l'equazione 3 diventa

$$f_M = C \frac{1}{\sqrt{E + \epsilon_m F}} \quad (4)$$

dove:

$$C = (f_0 \sqrt{\epsilon_{eq}(0)})$$

$$E = \epsilon_s \frac{1+D}{2}$$

$$F = \frac{1-D}{2}$$

$$D = \frac{1}{\sqrt{1+12\frac{h}{W}}}$$

Considerando i parametri relativi alle due antenne si hanno i seguenti coefficienti:

| Antenna | C       | D     | E      | F      |
|---------|---------|-------|--------|--------|
| P1      | 4.06GHz | 0.815 | 2.1326 | 0.0925 |
| P2      | 2.4GHz  | 0.691 | 0.8455 | 0.1545 |

Tabella 1. Coefficienti nell'equazione 4 per i due tipi di antenne.

Si hanno così le seguenti espressioni:

Antenna P1

$$f_M = \frac{4.06}{\sqrt{2.1326 + 0.0925\epsilon_m}} \text{GHz} \quad (5)$$

Antenna P2

$$f_M = \frac{2.4}{\sqrt{0.8455 + 0.1545\epsilon_m}} \text{GHz} \quad (6)$$

La figura 8 mostra i grafici delle relazioni definite dalle equazioni 5 e 6 per le due antenne considerate; la figura 9 mostra i risultati ottenuti simulando il comportamento delle antenne mediante software Ensemble [4]. In entrambi i grafici le frequenze sono state normalizzate, dividendo  $f_M$  per la frequenza di risonanza a vuoto,  $f_0$  di ciascuna antenna.

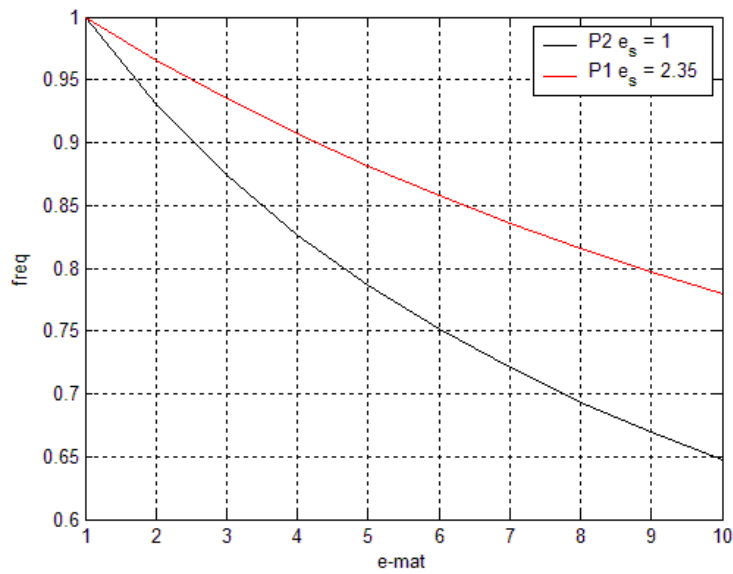


Figura 8. Grafico della frequenza di risonanza di un'antenna a patch in funzione della costante dielettrica del materiale in esame, secondo le equazioni 5 e 6. Curva rossa: grafico relativo all'antenna P1; curva nera grafico relativo all'antenna P2.

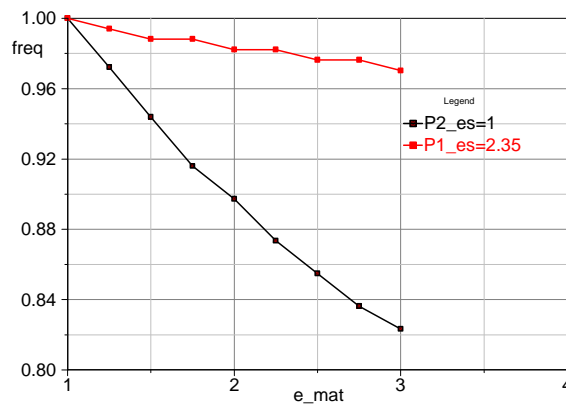


Figura 9. Risultato della simulazione mediante Ensemble del comportamento delle antenne P1 e P2 al variare della costante dielettrica del materiale a contatto.

### VCO

Come già accennato, la frequenza del segnale d'uscita del VCO è data da:

$$f = kV_T$$

con  $f_{\min} = kV_{T\min} \leq f \leq f_{\max} = kV_{T\max}$

La frequenza di risonanza  $f_M$  del sensore a contatto con il materiale in esame è misurabile all'interno dell'intervallo suddetto:

$$f_{\min} \leq f_M \leq f_{\max}$$

Se  $f_0 = f_{\max}$ , il massimo valore della costante dielettrica ricavabile dalla misura della frequenza di risonanza del sensore è dato da:

$$\epsilon_{\max} = \frac{1}{F} \left[ \left( \frac{C}{f_{\min}} \right)^2 - E \right] \quad (7)$$

L'intervallo di permittività misurabile dipende quindi dalla gamma di frequenze prodotte del VCO e dalle caratteristiche dell'antenna. Se  $f_0 < f_{\max}$ , l'intervallo di permittività misurabile è minore di quello indicato dall'equazione 7.

### *Circolatore*

Questo dispositivo dev'essere in grado di trasmettere la gamma di frequenze dei segnali generati dal VCO.

### *Diode rivelatore*

Anche questo componente deve funzionare correttamente nella banda di frequenze utilizzate.

### **MC**

Il Modulo di Controllo deve svolgere le seguenti funzioni:

- determinare la tensione di pilotaggio  $V_T(i)$  da inviare al VCO del modulo MM per l'esecuzione dell' $i$ -esima acquisizione;
- acquisire dopo un opportuno ritardo  $t_d$  il segnale analogico all'uscita del diodo rivelatore contenuto in MM;
- memorizzare il dato relativo alla  $i$ -esima acquisizione nella  $i$ -esima posizione di un vettore con lunghezza  $N$  prefissata;
- ripetere l'operazione di acquisizione fino al riempimento del vettore;
- inviare all'Unità di Elaborazione (UE) il vettore dei dati di misura.

MC avvia il ciclo di acquisizione in seguito ad un comando esterno, prodotto da un apposito trigger o inviato da UE.

Il Modulo di Controllo può essere dotato di una limitata capacità elaborativa e deve essere collegato all'unità di elaborazione principale mediante una porta per il controllo di operazioni e il trasferimento dei dati.

## UE

L'Unità di Elaborazione deve provvedere al trattamento dei dati forniti dal modulo MC, alla rappresentazione alfanumerica e grafica dei risultati ed alla archiviazione di dati grezzi, risultati e informazioni ausiliarie.

Per quanto riguarda il prototipo iniziale da laboratorio, si prevede di utilizzare come Unità di Elaborazione un PC, collegato ad MC tramite una porta seriale; per il prototipo da campo è previsto, invece, l'impiego di un portatile, collegato ad MC tramite un palmare.

## Specifiche di progetto

### MM

In questa fase saranno utilizzati inizialmente i seguenti componenti:

- ❑ VCO EMF Systems – mod. 194013
- ❑ Accoppiatore Direzionale AMARIN Co. Inc – mod. D2-24
- ❑ Circolatore PAMTECH – mod. STH 205
- ❑ Diodi Rivelatori KRYTAR – mod. D101

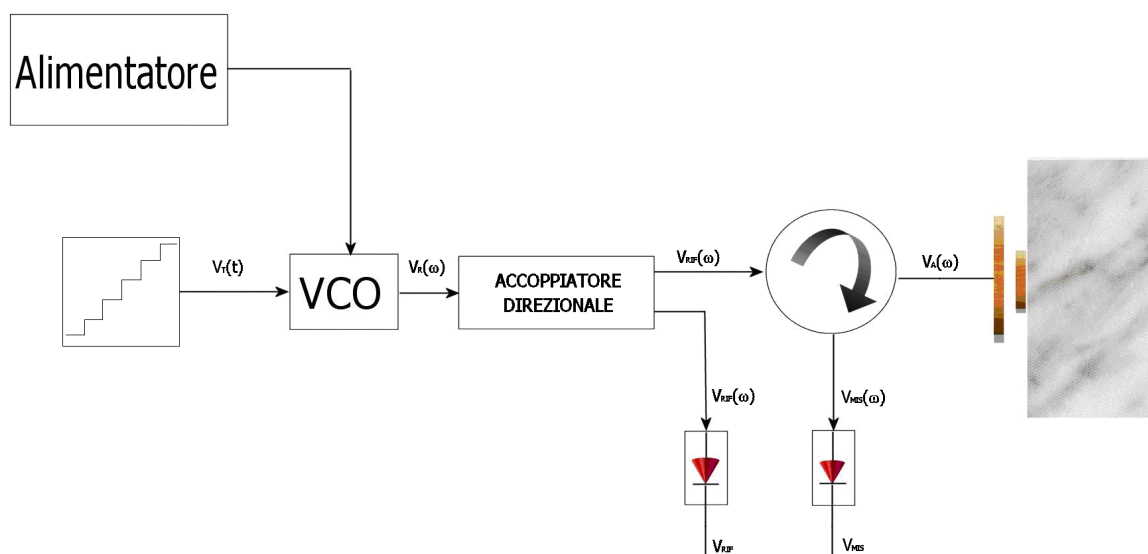


Figura 10. Schema elettrico semplificato del modulo a microonde.

La figura 10 riporta lo schema semplificato del circuito da realizzare.

### MC

Per questo modulo si sono individuate le specifiche relative alla risoluzione di misura, alla precisione di misura ed alla temporizzazione delle operazioni di acquisizione.

#### *Risoluzione di misura*

Si prevede di suddividere la gamma di frequenze emesse dal VCO in  $N$  intervalli di ampiezza costante, con  $N \leq 1024$ ; il VCO può essere quindi pilotato mediante un convertitore D/A a 10 bit.

Si hanno  $N \leq 1024$  campioni per misura, a frequenze equidistanti.

### Precisione di misura

Si prevede di quantizzare il segnale analogico prodotto dal diodo rivelatore su circa 1000 livelli; questa operazione deve essere eseguita sul segnale di riferimento e sul segnale riflesso dall'antenna.

Si devono quindi usare due convertitori A/D a 10 bit, oppure un singolo convertitore a ingressi multipli.

Le tensioni analogiche alle uscite dei diodi sono  $\leq 0.8$  Volt: è necessario quindi regolare opportunamente l'offset e il guadagno del convertitore, eventualmente impiegando un operazionale.

### Temporizzazione

Non esistono vincoli esterni riguardo alla velocità di esecuzione delle misure e non ci sono di conseguenza specifiche dettagliate rispetto al tempo di conversione dei dati; è comunque opportuno che il tempo necessario per l'esecuzione di ogni misura sia minore di un secondo anche alla massima risoluzione.

### Scelta dell'hardware

Per la realizzazione del modulo di controllo sono state prese in esame le schede a microprocessore per impiego generale prodotte dalla GRIFO<sup>®</sup>, basate su microprocessore 80C. La tabella 2 riporta le caratteristiche principali delle schede; si è scelto di utilizzare, per il primo prototipo, la scheda modello 554.

| scheda | processore | Clock MHz | I/O | timer | RS232 | Real time | A/D | bit | Tc $\mu$ s | Dim. cm | Conn. |
|--------|------------|-----------|-----|-------|-------|-----------|-----|-----|------------|---------|-------|
| 552    | 80C552     | 22/29     | 44  | 3     | 1+1   | Sì        | 8   | 10  | 27/20      | 10 x 20 | 8     |
| 553    | 80C552     | 22/29     | 16  | 3     | 1+1   | sì        | 8   | 10  | 27/20      | 10 x 15 | 7     |
| 554    | 80C552     | 22        | 16  | 3     | 1+1   | No        | 6-8 | 10  | 27         | 10 x 5  | 6     |
| 323    | 80C532     | 22        | 24  | 3     | 1+1   | No        | 6-8 | 12  | 10         | 10 x 15 | 8     |

| scheda | EPROM KB | RAM/EEPROM KB | RAM KB | RAM/EEPROM/EPROM KB | EEPROM Seriale byte | RAM+RTC Seriale byte |
|--------|----------|---------------|--------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 552    | 32       | 8-32          |        | 8-32                | 512-2048            | 256                  |
| 553    | 32       | 8-32          |        | 8-32                | 512-1024            | 256                  |
| 554    | 32       |               | 32     | 8-32                | 256-8K              |                      |
| 323    | 32       |               | 32     | 32                  | 256-2048            | 256                  |

Tabella 2. Caratteristiche e prestazioni delle schede general purpose GRIFO<sup>®</sup>

### Diagramma di flusso

La figura 11 mostra la sequenza delle operazioni eseguite dal modulo di controllo.

Per ogni campione, la scheda fornisce mediante le linee I/O di una porta utente un codice ad un convertitore D/A esterno, collegato a sua volta al VCO alloggiato in MM; mediante il multiplexer sull'ingresso delle linee analogiche, la scheda acquisisce in sequenza la tensione all'uscita del diodo di riferimento e quella all'uscita del diodo



di misura. Successivamente, la scheda aggiorna il codice di uscita sulla porta ed attende il tempo  $t_a$ , in modo che al successivo ciclo di acquisizioni il segnale prodotto dal VCO si sia stabilizzato sulla frequenza definita dal codice corrente. Il tempo complessivo per una misura costituita da 1024 campioni è di circa 200msec.

Al termine di ogni misura il programma residente sulla scheda provvede a inviare ad UE una coppia di vettori, contenenti rispettivamente i dati di riferimento e quelli di misura.

Durante il ciclo di misura un LED giallo pilotato da una linea di I/O della scheda indica "operazioni in corso", mentre un LED verde indica "sistema pronto".

La scheda impiegata è collegata ad un PC tramite due porte seriali, una usata per la scrittura e il caricamento dei programmi, l'altra per il trasferimento dei dati

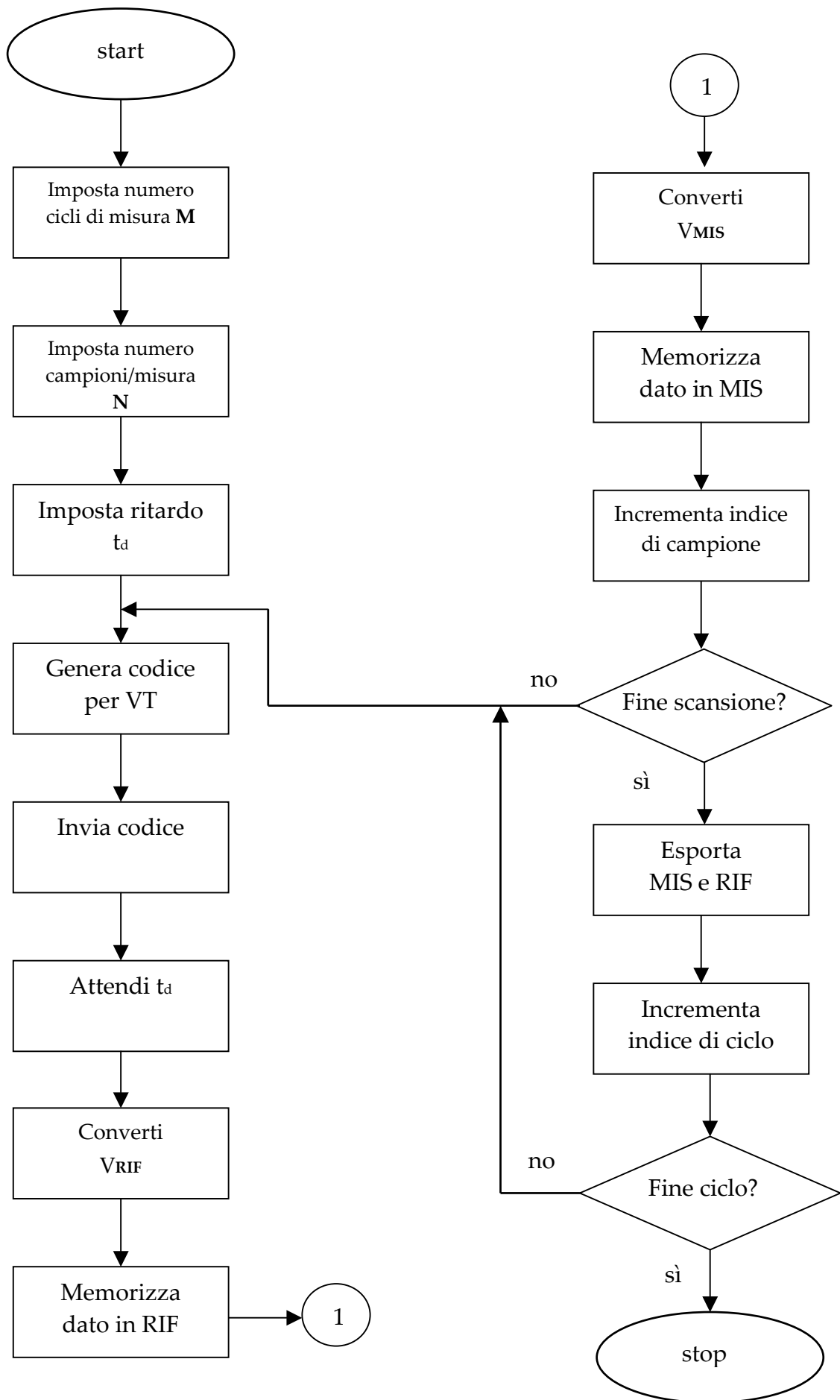


Figura 11. Schema a blocchi delle operazioni eseguite dal modulo di controllo.

## UE

L'Unità di Elaborazione deve svolgere le seguenti funzioni:

- ❑ Memorizzazione dei vettori, RIF e MIS, contenenti i dati di acquisizione per ciascuna misura;
- ❑ Calcolo del coefficiente di riflessione,  $\Gamma(\omega)$ , mediante il rapporto  $GAM = \frac{MIS}{RIF}$
- ❑ Elaborazione dei dati del vettore GAM e utilizzo delle caratteristiche del VCO per:
  - ricerca del minimo (frequenza di risonanza);
  - trasformazione in dB in corrispondenza del minimo (attenuazione);
  - determinazione dei valori a 3dB dal minimo (banda a 3dB);
  - calcolo del fattore di merito e successivo calcolo della tangente di perdita;
  - calcolo della costante dielettrica relativa;
  - stima della porosità (in termini di volume di aria interna al campione);
- ❑ Rappresentazione:
  - display grafico di GAM in funzione della frequenza;
  - display numerico dei risultati delle elaborazioni
- ❑ Archiviazione di dati, risultati e informazioni ausiliarie;
- ❑ Lettura dell'archivio.

All'inizio delle operazioni l'unità di elaborazione invia al modulo di controllo i seguenti parametri:

- numero N di campioni da ricavare per ciascuna misura (definizione della risoluzione di misura);
- numero M di cicli di misura (miglioramento del rapporto segnale/rumore);
- ritardo  $t_a$  tra l'impostazione del codice da inviare al VCO e l'abilitazione della conversione A/D

Al termine di ogni ciclo di misura UE riceve da MC una coppia di vettori RIF e MIS con dimensione N; ogni elemento di ciascun vettore è definito da 2 byte: per ogni ciclo si ha quindi un trasferimento di 4N byte.

L'unità di elaborazione calcola il coefficiente di riflessione dell'antenna eseguendo il rapporto tra il vettore MIS (contenente i dati ricavati dal segnale prodotto dal diodo rivelatore collegato all'uscita del circolatore) e il vettore RIF (contenente i dati ricavati dal segnale di riferimento prodotto dal diodo collegato ad una porta dell'accoppiatore direzionale). Il risultato di questa operazione è costituito da un vettore GAM di N elementi, espressi in reale.

Se  $M > 1$ , l'unità di elaborazione calcola la media dei vettori GAM ottenuti ad ogni passo del ciclo di misura; UE usa questo vettore per la successiva elaborazione.

## Bibliografia

- [1] E. Bozzi, M. Chimenti, O. Salvetti, A. Zucchelli, *“Rassegna sulle tecniche non distruttive per la caratterizzazione dei difetti all’interno di materiali lapidei”*, Rapporto Tecnico B4-24 ISTI-CNR, Aprile 2003.
- [2] A. Zucchelli, *“Studio e sperimentazione di tecniche a microonde per la misura di porosità in materiali dielettrici”*, Elaborato finale del Corso di Laurea Triennale di Ingegneria delle Telecomunicazioni, Università degli Studi di Pisa, a.a. 2000-2001.
- [3] F. Boccacci, *“Progetto e sviluppo di un’interfaccia utente per il controllo remoto di un analizzatore vettoriale a microonde”*, Elaborato finale del Corso di Laurea Triennale di Ingegneria delle Telecomunicazioni, Università degli Studi di Pisa, a.a. 2002-2003.
- [4] M. Filippini, *“Impiego di sensori a microonde costituiti da antenne a patch per ispezione di materiali”*, Elaborato finale del Corso di Laurea Triennale di Ingegneria delle Telecomunicazioni, Università degli Studi di Pisa, a.a. 2003-2004.
- [5] G. Gagliardi, A. Zucchelli, *“Analisi mediante simulazione e sperimentazione di sensori a risonanza realizzati con antenne a patch per l’indagine non distruttiva a microonde su materiali dielettrici”*, Nota Interna B4-12 I.S.T.I. – CNR Pisa, Novembre 2002.
- [6] A. Constantine Balanis, *“Antenna Theory: Analysis and Design”*, Wiley, 1997.
- [7] K.C. Gupta, R. Garg, I.J. Bahl, *“Microstrip lines and slotlines”*, Artech House Ed., 1979.
- [8] Vectorial Network Analyzer HP8753B *“System Operating and Programming Manual”* and *“Network Analyzer’s – RF Network Analyzer, 300KHz to 6GHz – Model 8753B”*, Hewlett Packard Company.