

# **“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**

#### **SIND**

#### **Sonda per l’acquisizione di segnali a microonde**

*Guido Gagliardi*

Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione “Alessandro Faedo”  
Rapporto tecnico aprile 2009

#### **Sommario**

Il lavoro descrive il prototipo definitivo di un modulo a microonde, componente facente parte del Sistema per Ispezioni Non Distruttive (SIND), sviluppato per ispezioni mediante campo elettromagnetico.

Il modulo è costituito da un’antenna risonante, funzionante nel dominio delle microonde, e da vari circuiti elettronici, usati per pilotare l’antenna e rilevare il segnale prodotto dalla medesima, posta a contatto dell’oggetto in esame; l’analisi di questo segnale fornisce informazioni sulla struttura dello strato proximale dell’oggetto.

La nota descrive, inoltre, il criterio di progetto e la realizzazione del dispositivo, e riporta le specifiche generali dei principali componenti elettronici utilizzati.

#### **Abstract**

The report describes the final prototype of a component of the H/S system SIND (System for Non-destructive Inspections), developed for inspections by means of electromagnetic fields.

The described component is composed of a resonant antenna, working in the microwaves domain, and of several electronic circuits that are used for driving the antenna and for detecting the signal produced by the antenna when it is near to the object under test; information about the proximal layers of the object is obtained by analyzing the acquisition signals.

The report describes the project criteria and the realization of the device; general specifics of the used electronic components are reported.

## Indice

Introduzione.....	3
Criterio di progetto della sonda .....	4
Contenitore del modulo a microonde (MM) .....	5
Contenitore del circuito di conversione.....	7
Alimentazione.....	8
Simulazione del modulo a microonde (MM) .....	9
Risultati.....	11
Risposta sperimentale del VCO.....	15
Taratura della scheda di conversione.....	18
Caratteristica dei componenti.....	19
Riferimenti.....	22

## Introduzione

Il Sistema per Ispezioni Non Distruttive SIND [1], sviluppato nell'ambito del Progetto Strategico Sp1a "Nuove tecnologie per l'analisi non intrusiva dei manufatti", pilota tre periferiche specializzate, mediante le quali si possono eseguire ispezioni basate su differenti tecniche: le ispezioni consistono nella rilevazione dell'interazione tra l'onda ultrasonora, il campo elettromagnetico o il campo elettrico emesso da un apposito trasduttore ed il materiale in esame.

La periferica per l'ispezione con un campo elettromagnetico nel dominio delle microonde ha la struttura mostrata in figura 1.

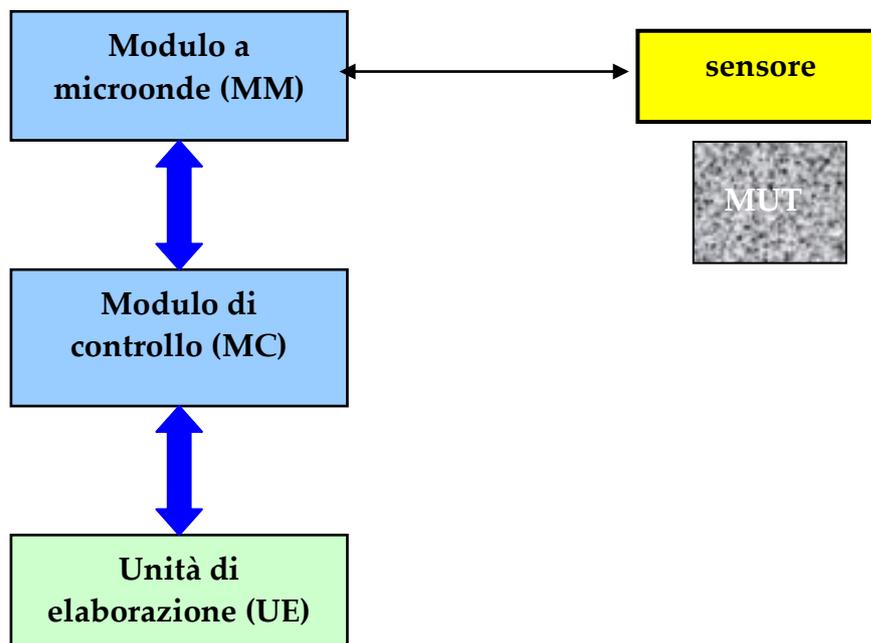


Figura 1. Diagramma a blocchi della periferica per l'ispezione con microonde.

Il sensore impiegato in questo tipo d'ispezione è un'antenna risonante, pilotata con una spazzata in frequenza da un oscillatore a frequenza variabile (VCO). Quando l'antenna è posta a contatto del materiale da esaminare, la sua frequenza di risonanza varia rispetto a quella ottenuta quando l'antenna è in aria e la variazione dipende dalla permittività degli strati di materiale raggiunti dal campo vicino all'antenna: la tecnica d'ispezione consiste quindi nel determinare la frequenza di risonanza dell'antenna nelle differenti posizioni di misura.

Oltre al sensore, la periferica è costituita dai seguenti moduli funzionali.

- Il modulo a microonde (MM), che 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.
- Il modulo di controllo (MC), che 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.
- L'unità di elaborazione (UE), 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 dei dati risultati e informazioni ausiliarie.

Sull'unità di elaborazione è installato il software che consente di ricavare i parametri che caratterizzano il segnale di misura [2].

## Criterio di progetto della sonda

La sonda descritta fa uso dell'esperienza conseguita nello sviluppo di un precedente prototipo [3], in cui si erano individuati i vari componenti e si erano progettati i circuiti elettronici necessari.

Con la nuova versione dovendo soddisfare un requisito di manovrabilità, si è pensato di progettare una sonda che consentisse all'utente un agevole posizionamento del sensore nei punti di misura di un oggetto in esame, sia in ambiente di laboratorio che sul campo.

E' quindi risultato conveniente alloggiare i vari componenti in contenitori compatti e di peso contenuto, distribuendo in essi i vari circuiti. Per questo, si sono così individuati:

- un contenitore con impugnatura, per alloggiare il circuito a radio frequenza collegato all'antenna tramite un connettore posizionato ad un'estremità del medesimo
- un contenitore a scatola, che include i circuiti analogici e digitali del modulo di controllo.

Si è previsto un collegamento via cavo tra i due contenitori ed un collegamento via cavo o via radio tra il Modulo di controllo ed il calcolatore; sempre al fine di ottenere una buona maneggevolezza si è previsto anche l'impiego di un'alimentazione a batteria per i circuiti dei due moduli.

## Contenitore del modulo a microonde (MM)

Il contenitore in oggetto, serve per alloggiare il circuito a radio frequenza (MM) che deve essere situato nell'immediata prossimità dell'antenna. La fig. 2 mostra lo schema logico del circuito.

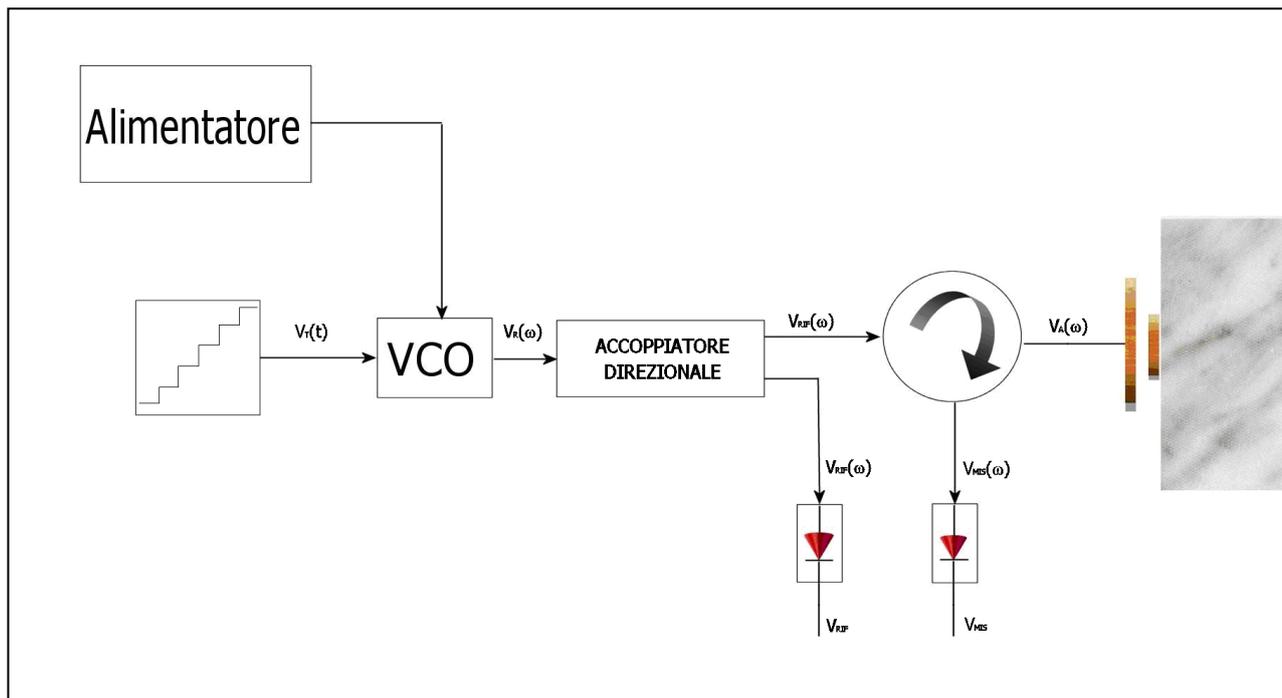


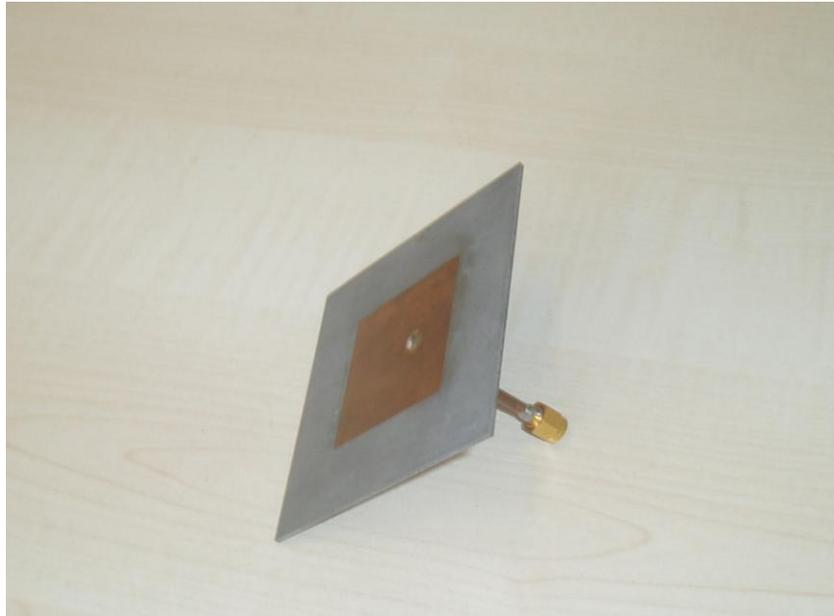
Figura 2. Schema logico del circuito di pilotaggio dell'antenna.

Il circuito è sostanzialmente costituito da:

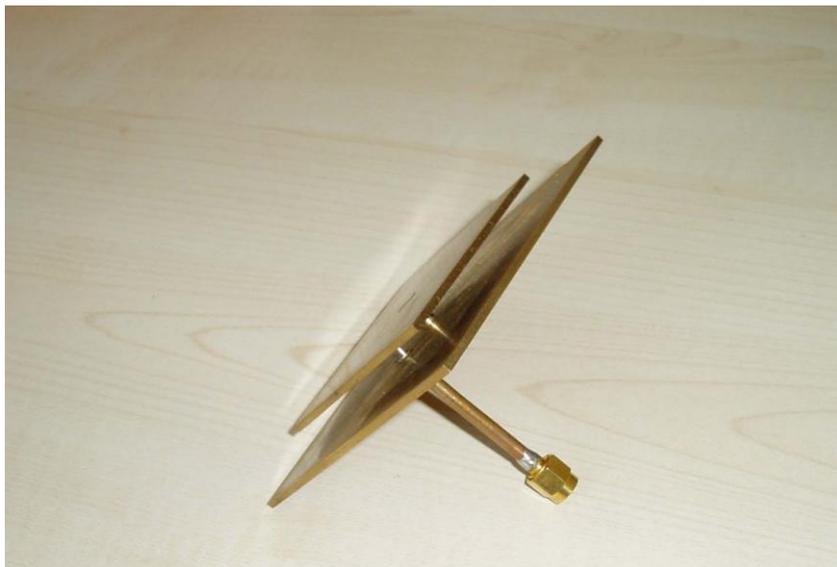
- un oscillatore a frequenza controllata (VCO), pilotato dalla tensione  $V_T$ , fornita dal modulo di controllo, che produce un segnale sinusoidale  $V_R(\omega)$
- un accoppiatore direzionale, che produce due segnali sinusoidali  $V_{RIF}(\omega)$ , proporzionali a  $V_R(\omega)$
- un circolatore, che invia all'antenna un segnale  $V_{RIF}(\omega)$  e fornisce il segnale  $V_{MS}(\omega)$ , proporzionale al segnale riflesso dall'antenna
- due diodi rivelatori, che producono il segnale continuo  $V_{MIS}$  con valore medio eguale all'ampiezza di  $V_{MIS}(\omega)$  e il segnale continuo  $V_{RIF}$  con valore medio eguale all'ampiezza di  $V_{RIF}(\omega)$ .

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  $V_{MIS}$ .

Dal frontale del contenitore per mezzo di un connettore SMA è consentito il collegamento al MM, dei sensori P1 e P2 (vedi foto 1 e 2) scelti in base alle caratteristiche del materiale in esame



**Foto 1. Sensore P1. Antenna a patch con substrato in duroid;  $\varepsilon_s = 2.35$   $f_0 = 2.5GHz$ .**



**Foto 2. Sensore P2. Antenna a patch in aria:  $\varepsilon_s = 1$ ,  $f_0 \cong 2.4GHz$**

## Contenitore del circuito di conversione

Questo contenitore alloggia al suo interno tre schede che trattano i segnali a bassa frequenza: la scheda a microprocessore GPC 554, la scheda EZL-90-E e la scheda di conversione, precedentemente realizzata presso l'Istituto. La Figura 3 riporta lo schema del circuito di conversione.

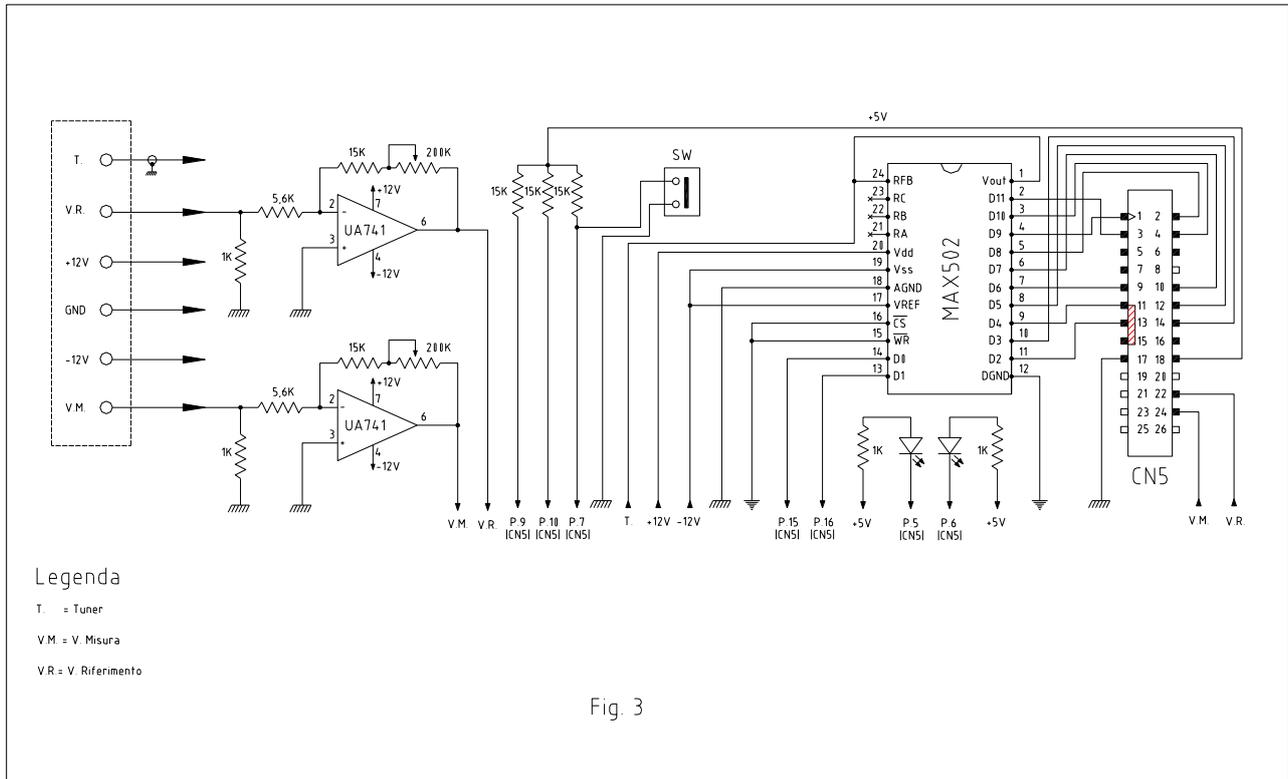


Figura 3. Schema elettrico del circuito di conversione.

Il circuito comprende due operazionali, che amplificano i segnali  $V_{MIS}$  e  $V_{RIF}$  provenienti dal MM ed un convertitore D/A che produce il segnale  $V_T$  da inviare al modulo a microonde.

Il collegamento tra la scheda di conversione e la scheda GPC 554 è garantito mediante un connettore plug-in, mentre il collegamento al modulo (MM) è fatto tramite un connettore circolare da pannello a 7 poli.

## Alimentazione

Per l'alimentazione da rete è stato utilizzato un alimentatore stabilizzato (foto 3), anch'esso realizzato nel nostro laboratorio, che fornisce a tutto l'apparato la tensione necessaria per il funzionamento. L'alimentatore è costituito da due moduli incapsulati, uno della ditta CALEX 2.15.240, dual power supply e l'altro della ditta POWER-TECHNICS, model PTL5 5S1000 power supply.

Il primo modulo fornisce una tensione di uscita continua di  $\pm 15\text{ V} - 240\text{ mA}$ , che serve ad alimentare sia il VCO del dispositivo a microonde che il circuito di conversione.

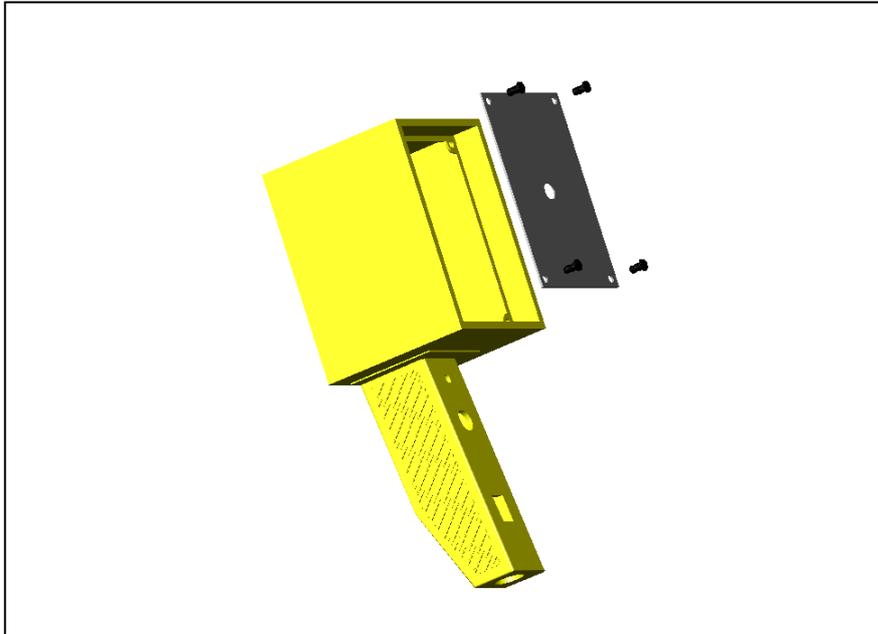
Il secondo modulo fornisce una tensione di uscita continua di  $+5\text{ V} - 1\text{ A}$ , che serve ad alimentare le schede GPC 554 e EZL-90-E .



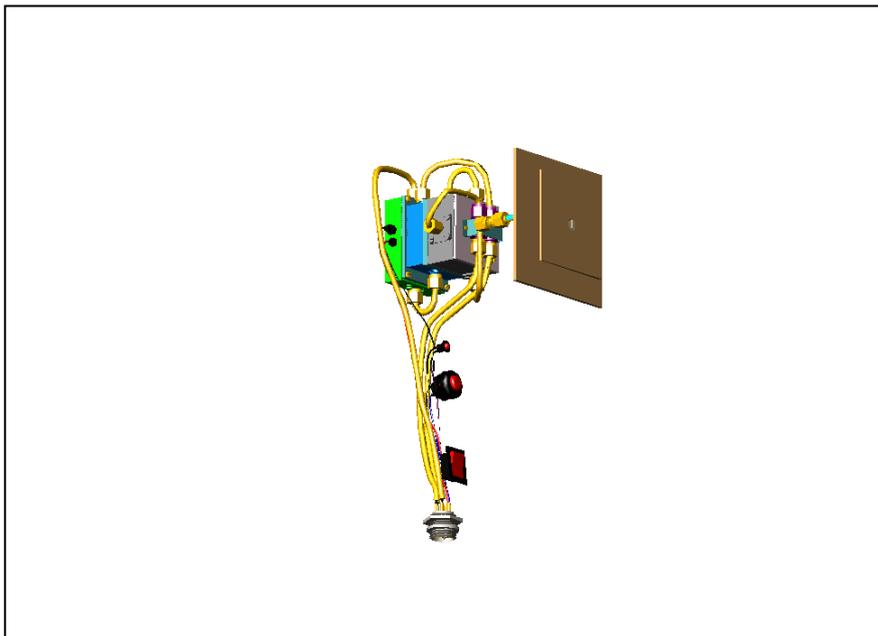
Foto 3. Alimentatore stabilizzato

## Simulazione del modulo a microonde (MM)

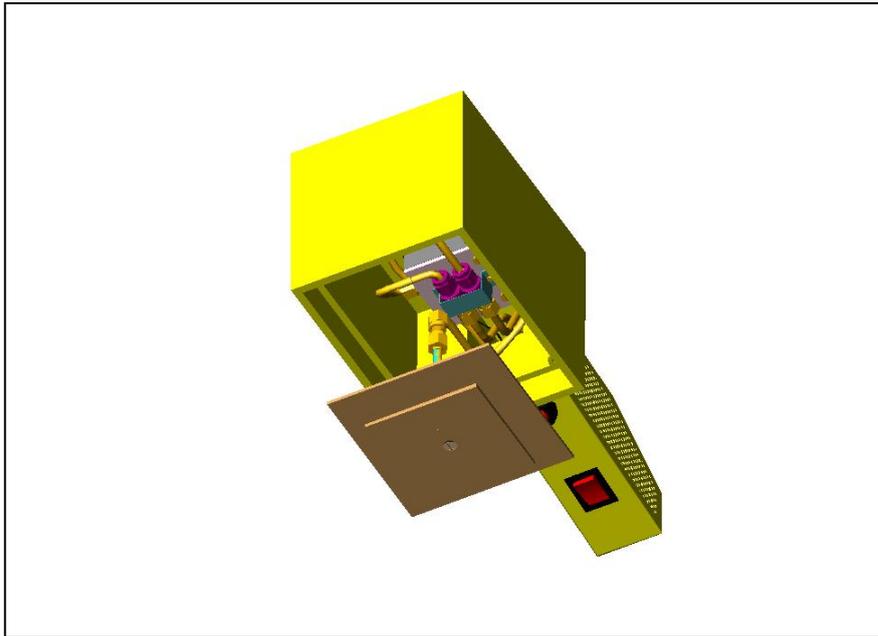
Il software Autocad Mechanical Desktop 2004 DX, prodotto da Autodesk Inventor Professional, è stato impiegato per determinare la struttura e le dimensioni del contenitore per il modulo a microonde, utilizzando le dimensioni reali dei componenti da inserire al suo interno. Le figure 4 ÷ 7 mostrano alcune rappresentazioni 3D ottenute con questo software.



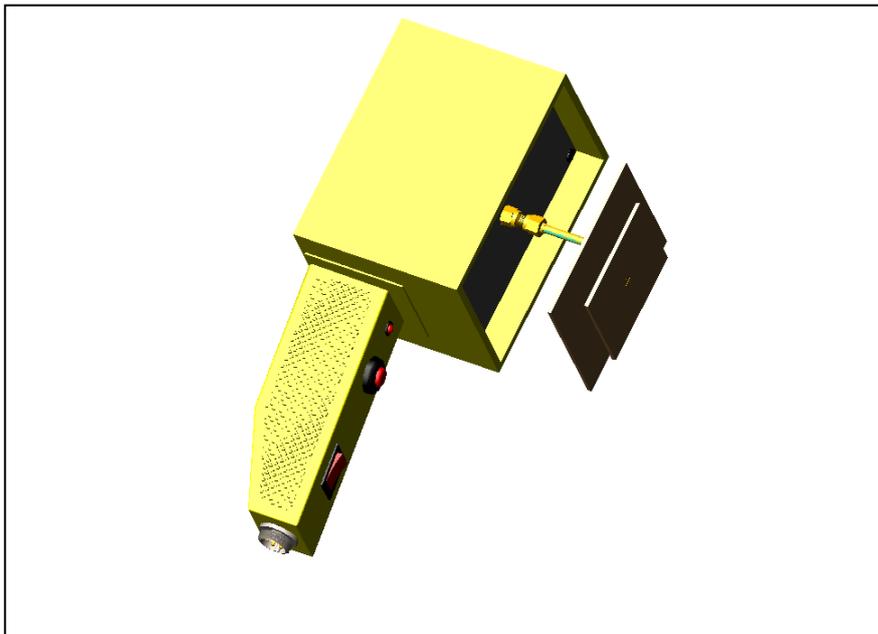
**Figura 4. Contenitore vuoto.**



**Figura 5. Circuiteria interna.**



**Figura 6. Dispositivo completo aperto.**



**Figura 7. Dispositivo completo chiuso.**

## Risultati

La fig. 8 mostra lo schema a blocchi del circuito a radiofrequenza per il pilotaggio dell'antenna

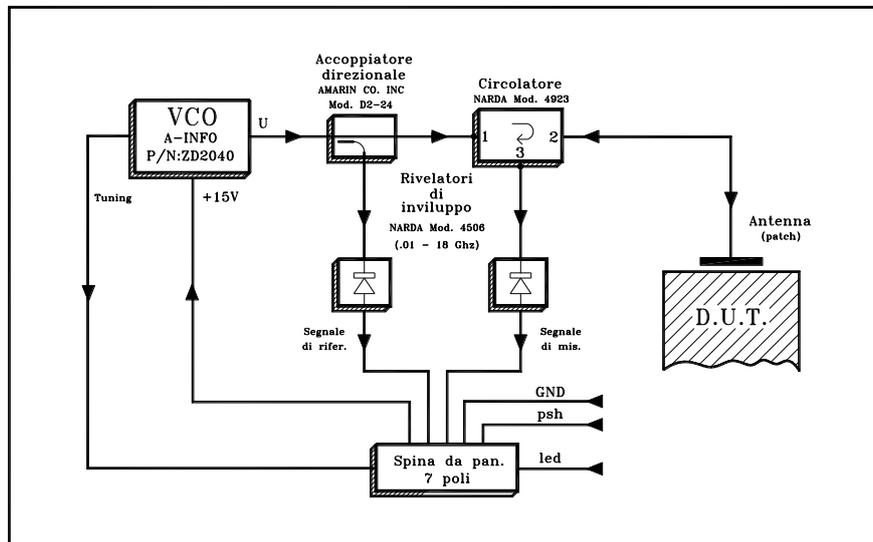


Figura 8. Schema a blocchi del circuito a radiofrequenza

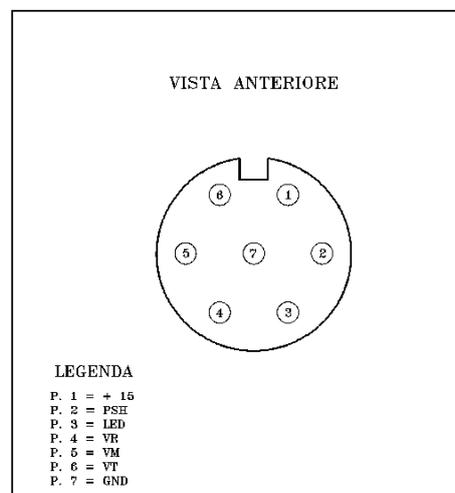
Le foto 4 ÷ 8 mostrano i componenti del modulo a microonde, realizzati in seguito alla simulazione.



Foto 4. Contenitore con impugnatura e antenna a patch.

La foto 3 mostra il contenitore, all'interno del quale è visibile la circuiteria a radio frequenza, sulla cui impugnatura sono posizionati l'interruttore della tensione di alimentazione il pulsante di RESET (della scheda di conversione dati ) e il led (rosso) che indica l'acquisizione dei dati.

All'estremità dell'impugnatura si nota il connettore per il cavo di collegamento alla circuiteria contenuta nella scatola, i cui collegamenti sono riportati nel disegno di (Fig. 9).



**Figura 9. Collegamenti al connettore del MM**

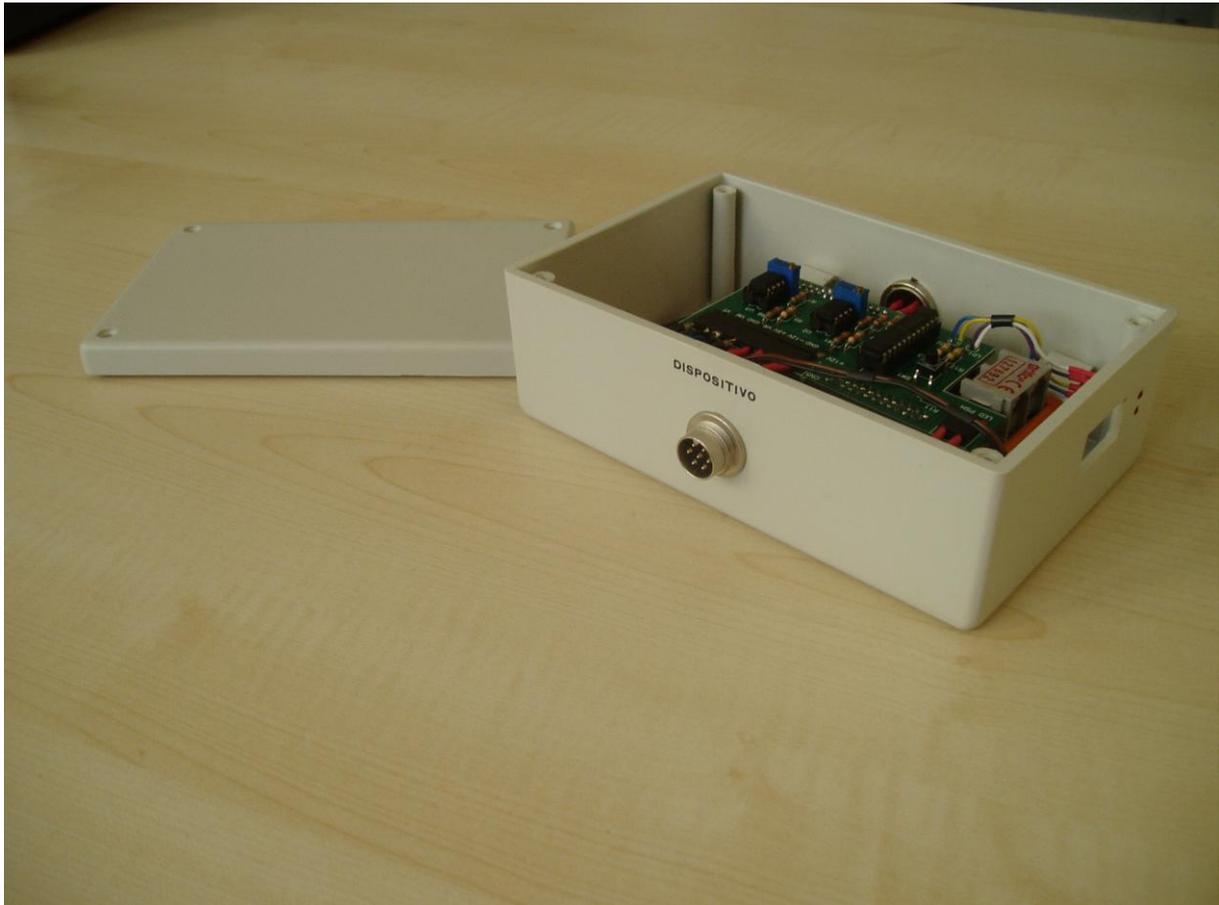
L'interno del contenitore che alloggia la scheda di conversione e il sottostante controllore GPC 554 è mostrato dalla foto 5. Sulle pareti della scatola sono visibili il connettore di collegamento al modulo a microonde (spina a 7 poli) e il connettore per il collegamento all'alimentatore (spina a 5 poli).

Due led (rossi) che indicano rispettivamente:

Led-1 con accensione intermittente che indica, dispositivo pronto per l'acquisizione dati.

Led-2 con accensione continua che indica, il tempo di trasferimento acquisizione dati.

Il collegamento al calcolatore è fatto mediante un cavo che passa attraverso l'apertura sulla parete della scatola a destra del connettore (Grifo C 127692 ) e si attesta al connettore sulla scheda GPC 554, come mostrato dalla foto 5 .



**Foto 5. Contenitore di alloggiamento della scheda a microprocessore GPC 554 e scheda di conversione**

L'interno del contenitore comprensivo della scheda EZL-90-E, che permette il collegamento al calcolatore tramite connessione wireless è mostrato dalla foto 7. Mentre il particolare della scheda (EZL-90-E) è mostrato dalla foto 6.

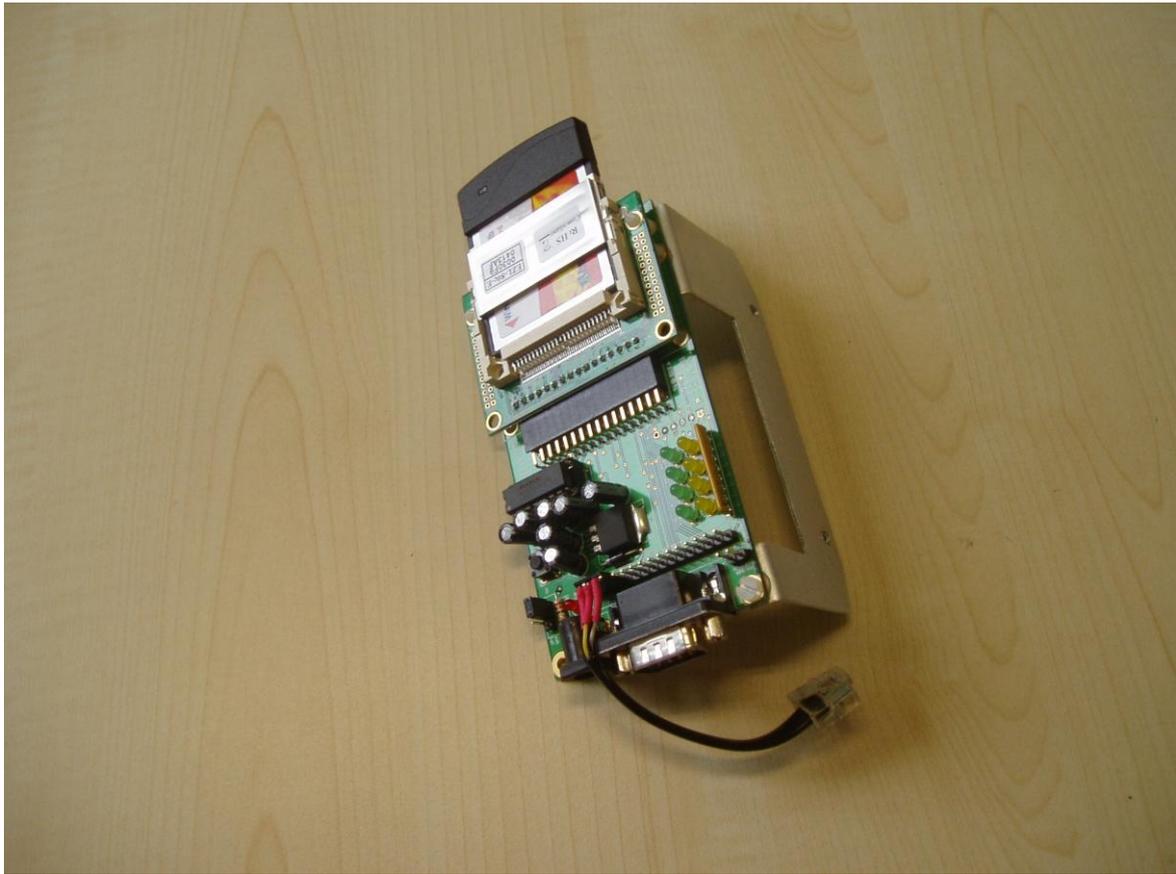


Foto 6. Particolare della scheda EZL-90-E

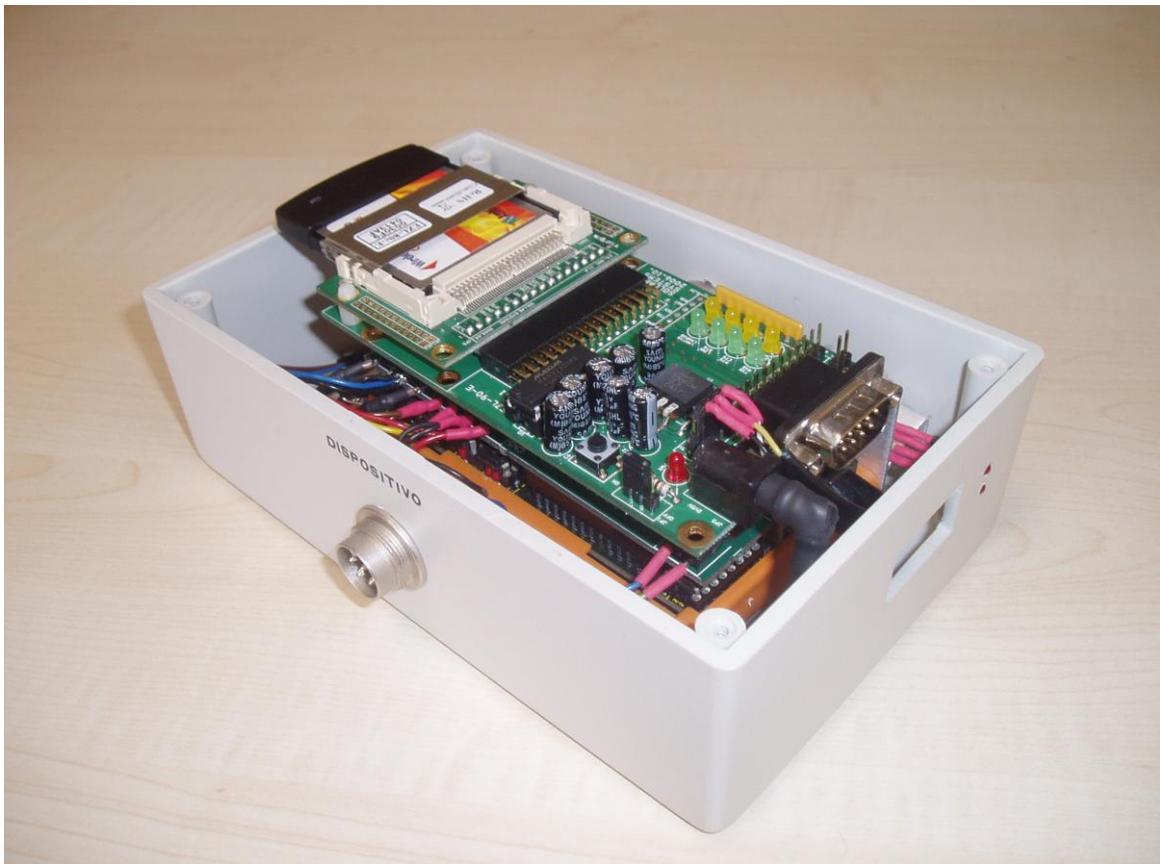


Foto 7. Contenitore completo

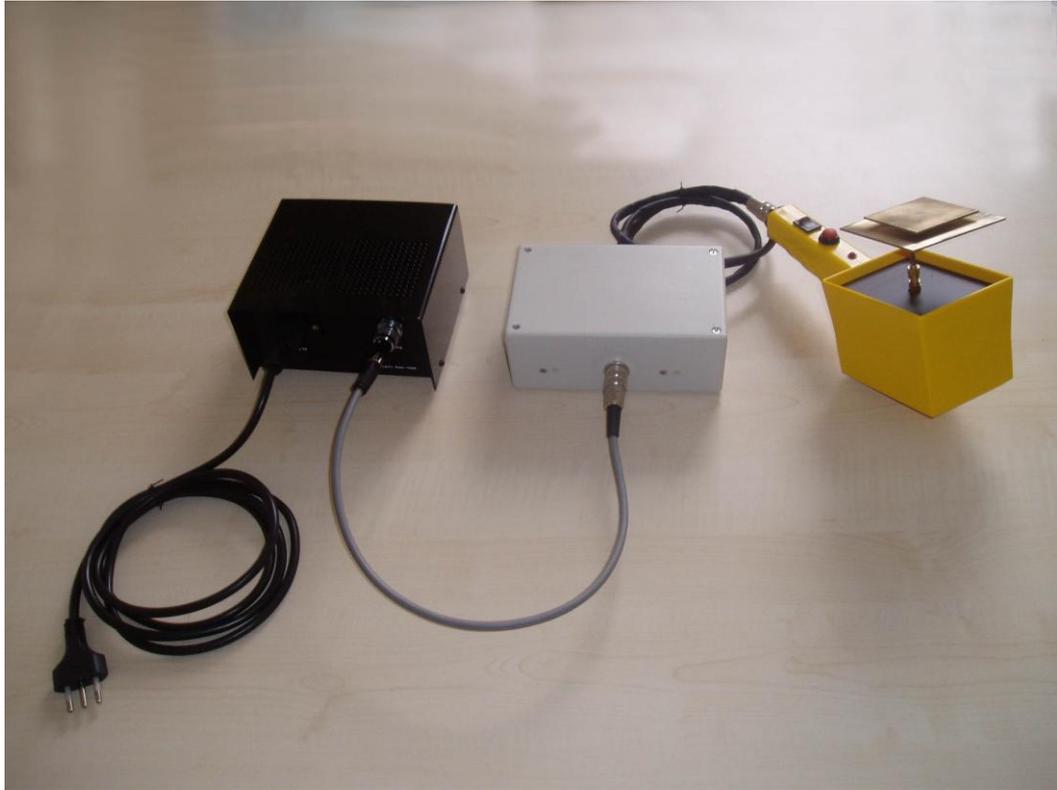


Foto 8. Vista d'insieme della sonda a microonde con alimentazione da rete.

La connessione del SIND è stata effettuata mediante l'impiego di connettori circolari ( a 5 e 7 poli) BINDER-Serie 680 Din, volanti per la cavetteria e da pannello per la circuiteria nei contenitori.

## Risposta sperimentale del VCO

Per determinare la risposta del VCO (A-INFO P/N: ZD2040) è impiegato il programma di test per il controllo del modulo MF, inviando un codice che determina la tensione  $V_t$  applicata all'oscillatore e conseguentemente la frequenza di oscillazione.

La risposta è stata determinata usando 17 codici, dal valore minimo 0 al valore massimo 4096, con incrementi di 256 livelli; per ciascun codice si è misurata la tensione  $V_T$  e la frequenza di oscillazione  $f$ , quest'ultima è stata misurata mediante un frequenzimetro Frequency Counter 3120, della Electronic Instruments srl.

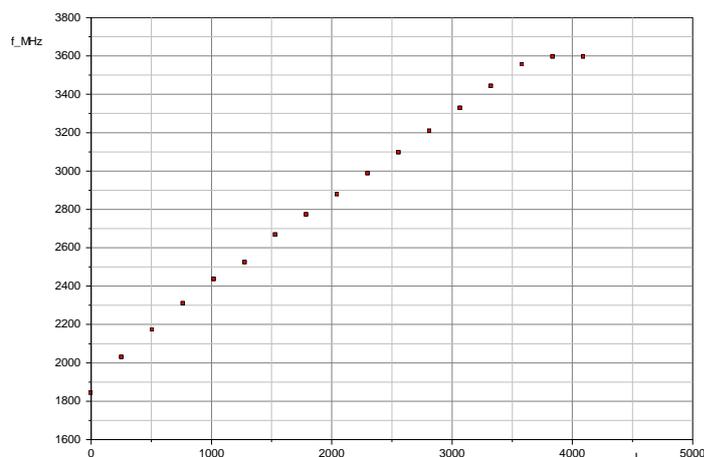
La Tabella 1 riporta le misure ottenute.

<b>L</b>	<b>V<sub>T</sub></b>	<b>f</b>
0	0	1841
256	0.94	2028
512	1.89	2171
768	2.84	2307
1024	3.79	2434
1280	4.74	2522
1536	5.69	2665
1792	6.64	2771
2048	7.58	2876
2304	8.53	2985
2560	9.48	3094
2816	10.43	3206
3072	11.37	3326
3328	12.30	3440
3584	13.27	3552
3840	13.65	3593
4096	13.64	3593

**Tabella 1. Valori di misura. L = livello di controllo; V<sub>T</sub> = tensione applicata al VCO (in Volt); f = frequenza di oscillazione ( in MHz).**

La fig. 10 mostra il grafico dei valori di frequenza in funzione del livello di controllo.

La frequenza di oscillazione cresce all'aumentare del livello per  $L \leq 3300$ ; raggiunto questo valore, il convertitore A/D è in saturazione e la tensione d'uscita non è più proporzionale al codice d'ingresso: il VCO non è quindi più pilotato correttamente.



**Figura 10. Frequenza di oscillazione del VCO in funzione del codice di controllo.**

Si riduce quindi la dinamica dei livelli all'intervallo 0 ÷ 3300. Eseguendo la regressione lineare sui primi tredici valori si ottengono le seguenti relazioni:

$$L = -4102,3323 + 2,1416 \times f \quad (1)$$

$$f = 1918,7363 + 0,4649 \times L \quad (2)$$

La Tabella 2 riporta le statistiche comuni alle due analisi di regressione.

R-Squared	0,995554
Adjusted R-Squared	0,995150
Coefficient of Determination	0,995554238
Correlation Coefficient	0,997774643
Model Selection Criterion	5,108111626

**Tabella 2. Statistiche delle regressioni lineari.**

Nell'intervallo di livelli considerato il sistema è lineare con buona approssimazione; i punti d'interesse della curva di risposta dell'antenna determinati sulla scala dei livelli di controllo possono essere convertiti in valori di frequenza impiegando l'equazione 2.

## Taratura della scheda di conversione

E' necessario regolare il guadagno degli amplificatori posti sulla scheda di conversione, in modo che il massimo segnale d'ingresso al convertitore A/D della scheda GPC raggiunga il fondo scala.

Per eseguire la regolazione si utilizza il programma di controllo della sonda e s'invia un codice costante (1000) alla periferica, in modo che al VCO sia applicata una tensione fissa; si aggiustano quindi i guadagni degli amplificatori dei segnali di riferimento e di misura.

### *Riferimento (VR)*

Si regola il trimmer R4 da 200 K $\Omega$  per ottenere 3,5 V all'uscita dell'amplificatore U2 (piedino 6).

### *Misura (VM)*

Si regola il trimmer R8 da 200 K $\Omega$  per ottenere 3,5 V all'uscita dell'amplificatore U3 (piedino 6).

## Caratteristiche dei componenti

Di seguito sono riportate le caratteristiche dei più significativi componenti, impiegati per la realizzazione del circuito ad alta frequenza.



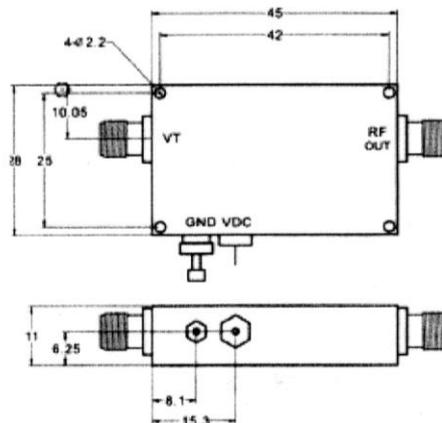
**ChengDu Ainfo Inc.**  
Suite# 10-2-301, #1 TongZiLin East Road  
Chengdu, China

Broadband VCO

P/N: ZD2040

Frequency Range(GHz)	2 ~ 4
Tuning Voltage(V)	0 ~ +20
Power Supply(V / mA)	+15/100
Phase Noise @ 100KHz(dBc / Hz)	-95
Harmonics(dBc)	<-12
Spurious(dBc)	-60
Operating Temperature(°C)	-55 ~ +85
Storage Temperature (°C)	-60 ~ +90
Power Output(dBm)	10
Power Output Flatness(dBm)	±2
Setting Time(μs)	1
Net Weight(kg)	0.04 Around

Outline Drawing (Size: mm)



Tel: +86-28-8816-3497 or +86-28-8519-2786  
Fax: +86-28-8519-3068  
Website: www.ainfoinc.com Email: Sales@ainfoinc.com

0.01-18.0 GHz

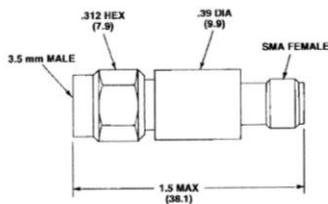
**Ultra Broadband  
Schottky Detectors**

- Zero Biased Detectors
- Excellent Sensitivity, Rugged
- Matched Detector; Good VSWR Characteristics

**Specifications**

FREQUENCY RANGE GHz	MODEL	FLATNESS dB 0.01-18.0	VSWR 0.01-18.0	SENSITIVITY* mV/mW	CAPACITANCE	POLARITY	CONNECTORS INPUT MALE OUTPUT FEMALE
0.01-18	4506	±0.5	1.5	500	30pf	Neg.	SMA M SMA F

\*Referenced to -20 dBm maximum

**Outline Drawings**

All dimensions are max. unless otherwise specified.  
Dimensions in parentheses are in millimeters and for reference only.

435 MORELAND ROAD • HAUPPAUGE, NY 11788  
USA TEL: (1) 631 231-1700 • INT'L TEL: (1) 631 231-1390 • FAX (1) 631 231-1711  
E-MAIL: nardaeast@L-3COM.com • www.nardamicrowave.com

**narda**  
an |  communications company



25,4

**Isolators and Circulators**

50 Years of  
Excellence

2000-26500 MHz

**Ferrite Isolators  
and Circulators**



**Specifications**

**ISOLATORS**

FREQUENCY (MHz)	MODEL NO.	ISOLATION (dB Min)	LOSS (db Max)	VSWR (Max)	PEAK POWER Fwd & Rev (Watts)	AVERAGE POWER Forward Reverse (Watts)		TEMP. RANGE (°C)
<b>NARROWBAND</b>								
7000-10000	4915	20	0.4	1.25:1	10	5	1*	-20 to +65
<b>BROADBAND, OCTAVE AND GREATER</b>								
2000-4000	4913	18	0.5	1.30:1	50	25	1*	0 to +55
4000-8000	4914	18	0.5	1.30:1	50	15	1*	-20 to +65
8000-18000	4946	16	0.6	1.45:1	15	5	1*	-20 to +65
11000-18000	4916	20	0.5	1.25:1	20	5	1*	-20 to +65
18000-26500	4917	17	0.6	1.40:1	10	3	1*	-20 to +65

**CIRCULATORS — 3 PORT**

FREQUENCY (MHz)	MODEL NO.	ISOLATION (dB Min)	LOSS (db Max)	VSWR (Max)	PEAK Fwd & Rev (Watts)	AVERAGE POWER Forward Reverse (Watts)		TEMP. RANGE (°C)
2000-4000	4923	18	0.5	1.30:1	50	25	25	0 to +55
4000-8000	4924	20	0.4	1.25:1	50	15	15	-20 to +65
7000-12400	4925	20	0.4	1.25:1	25	10	10	-20 to +65

\*Limited by termination power handling capacity



**narda**

an | B | communications company

435 MORELAND ROAD • HAUPPAUGE, NY 11788  
USA TEL: (1) 631 231-1700 • INT'L TEL: (1) 631 231-1390 • FAX (1) 631 231-1711  
E-MAIL: nardaeast@L-3COM.com • www.nardamicrowave.com

## Riferimenti

- 1) M. Chimenti, E. Fantini: "SIND – Descrizione del sistema", ISTI-CNR, Nota Interna, aprile 2009.
- 2) R. Bozzi, M. Chimenti, E. Fantini: "SIND - Procedura per l'analisi di segnali a microonde", ISTI-CNR, Nota Interna marzo 2009.
- 3) G. Gagliardi: "Realizzazione del prototipo di un modulo a microonde per misure non invasive", ISTI-CNR, Nota Interna marzo 2007.