

# Un semplice analizzatore di reti basato sull'involuppo dell'onda stazionaria

R. Olmi, L. Pieri, M. Bini, A. Ignesti  
Istituto di Fisica Applicata N. Carrara - CNR  
Via Panciatichi 64, 50127 Firenze

## Abstract

*Industrial applications requiring a measurement of electrical impedance at radiofrequency or microwaves claim for the availability of robust and low-cost dedicated instrumentation. Several methods have been recently proposed for such a task, including six-port bridges and I-Q detectors, usually bringing to rather complex circuit implementations and, as a consequence, involving delicate setup and calibration procedures. The method proposed in this paper directly descends from the classical slot-line technique, actually constituting a “static” implementation of that method, the slot-line consisting in a section of microstrip line with four capacitive pick-up ports allowing to reconstruct the standing-wave profile. The advantages of the static slot-line technique are discussed and the results of laboratory tests are presented.*

## 1. Introduzione

Nel recente passato sono stati descritti vari approcci alla misura di impedenza a radiofrequenza o microonde, alternativi alle tecniche – complesse e costose – impiegate negli analizzatori di reti da laboratorio. Tra queste, ad esempio, le tecniche del ponte a 6 porte [1] e del rivelatore fase-quadratura [2] sono state impiegate per realizzare sistemi di misura riflettometrici a banda stretta di prestazioni soddisfacenti per applicazioni in ambito industriale, dove la robustezza e il basso costo possono fare da contrappeso all'inevitabile degrado di prestazioni rispetto alla strumentazione per misure di precisione.

I suddetti metodi sono abbastanza complessi in termini di realizzazione circuitale, e portano a sistemi di misura la cui messa a punto è tutt'altro che banale. Il ponte a 6 porte, ad esempio, è una rete complessa nella quale la variazione delle prestazioni di un singolo elemento influenza l'intera rete e la cui calibrazione richiede un elevato numero di impedenze note (almeno quattro). L'interdipendenza tra i parametri del ponte rende la procedura di calibrazione piuttosto lunga e poco adatta ad un “utente finale”.

Il metodo di misura descritto in questo lavoro nasce da una rivisitazione del classico metodo della linea fessurata (LF) che, come è noto, richiede una scansione (meccanica) dei massimi e/o minimi dell'onda stazionaria prodotta dall'impedenza sotto misura in un tratto di linea in aria. Il principale svantaggio della misura mediante linea fessurata, che tutt'ora non teme confronti in termini di precisione, è l'essere fuori linea.

## 2. Riflettometro a linea fessurata statica

L'idea di trasformare il metodo della LF in un metodo “in linea” non è del tutto nuova. Il primo tentativo in tal senso [3] permetteva di misurare con discreta precisione solo coefficienti di riflessione vicini a zero; l'evoluzione di questo metodo ha in effetti portato, attraverso varie trasformazioni atte a ridurre le necessità di calcolo, alla realizzazione del ponte a 6 porte. Mostriamo come, con le attuali capacità di calcolo, sia possibile mettere a punto un sistema di misura in tempo reale, semplice ed affidabile, basato sul

principio della LF. Di tale sistema di misura, che chiameremo linea fessurata statica (LFS), è stato realizzato un prototipo operante a 2.45 GHz. Il sistema di misura fa uso di un tratto di linea a microstriscia, di lunghezza circa uguale a mezza lunghezza d'onda alla frequenza di lavoro, sulla quale vengono effettuati un certo numero di prelievi poco perturbanti (ad esempio, quattro) in posizioni fisse, tali da campionare l'onda stazionaria presente sulla linea stessa. La figura 1 mostra lo schema di principio del riflettometro a LFS.

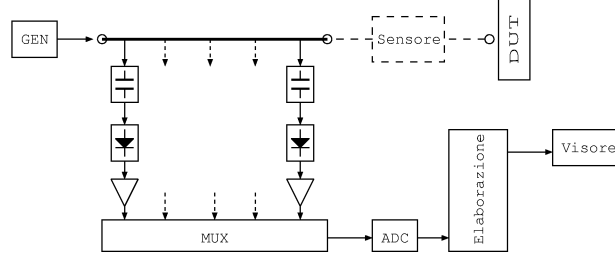


Figura 1: Riflettometro a linea fessurata statica

### 2.1 Principio di funzionamento

Quando la linea è chiusa su una impedenza  $Z_L$  diversa dall'impedenza caratteristica  $Z_0$ , la tensione  $V(x)$  lungo la linea è data da una espressione del tipo:

$$V(x) = A(e^{-j\beta x} + \Gamma e^{j\beta x}) \quad (1)$$

dove  $\Gamma = Me^{j\phi}$  è il coefficiente di riflessione dovuto a  $Z_L$  e  $A$  è un coefficiente di ampiezza. Il modulo della tensione dell'onda stazionaria sulla linea è dunque:

$$|V(x)| = A\sqrt{1 + M^2 + 2M \cos(2\beta x + \phi)} \quad (2)$$

Se le posizioni dei prelievi sono  $x = x_k$ , con  $k = 1 \dots 4$ , le tensioni ai prelievi sono:

$$V_k = A_k\sqrt{1 + M^2 + 2M \cos(B_k + \phi)} \quad (3)$$

in cui  $A_k$  è un fattore di scala che, in generale, dipende dall'ampiezza del segnale generato e dalle caratteristiche del prelievo.  $B_k = 2\beta x_k$  dipende dalla posizione del prelievo e dalla velocità di fase sulla linea.

I parametri della rete ( $A_k, B_k$ ) vengono determinati in fase di calibrazione, misurando le tensioni  $V_k$  nei quattro punti di prelievo quando la LFS è chiusa su impedenze di valore noto (standard di calibrazione). La (3) mostra che in teoria sono sufficienti due soli standard per determinare  $A_k$  e  $B_k$  ( $k = 1 \dots 4$ ). Infatti, sostituendo successivamente  $M_1 e^{j\phi_1}$  e  $M_2 e^{j\phi_2}$ , valori noti di coefficiente di riflessione relativi a due standard, nella (3) si ottengono quattro sistemi di due equazioni in due incognite, da cui nel caso di quattro prelievi si ottengono gli otto parametri incogniti  $A_k, B_k$ .

Il numero di standard necessari è indipendente dal numero di prelievi, che devono comunque essere almeno tre. In fase di misura, poi, il campionamento dell'onda stazionaria trae vantaggio da un pò di ridondanza: la configurazione con quattro prelievi si è dimostrata tale da permettere una precisione di misura confrontabile con quelle ottenibili mediante sistemi a banda stretta basati su altri metodi (ponte a 6 porte, rivelatore

I-Q). I parametri della rete vengono ottenuti invertendo il sistema non lineare (4). Il metodo di soluzione adottato utilizza un algoritmo genetico.

$$\begin{aligned}
V_{11} &= A_1 \sqrt{1 + M_1^2 + 2M_1 \cos(B_1 + \phi_1)} \\
V_{12} &= A_1 \sqrt{1 + M_2^2 + 2M_2 \cos(B_1 + \phi_2)} \\
&\vdots \\
V_{41} &= A_4 \sqrt{1 + M_1^2 + 2M_1 \cos(B_4 + \phi_1)} \\
V_{42} &= A_4 \sqrt{1 + M_2^2 + 2M_2 \cos(B_4 + \phi_2)}
\end{aligned} \tag{4}$$

## 2.2 Prototipo di misuratore a LFS

Le figure 2 e 3 mostrano rispettivamente il prototipo del riflettometro a LFS e il suo schema elettrico.

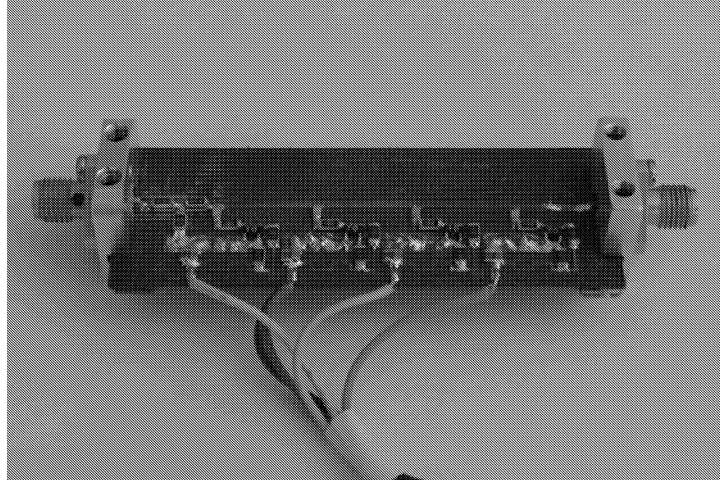


Figura 2: Prototipo di riflettometro a LFS

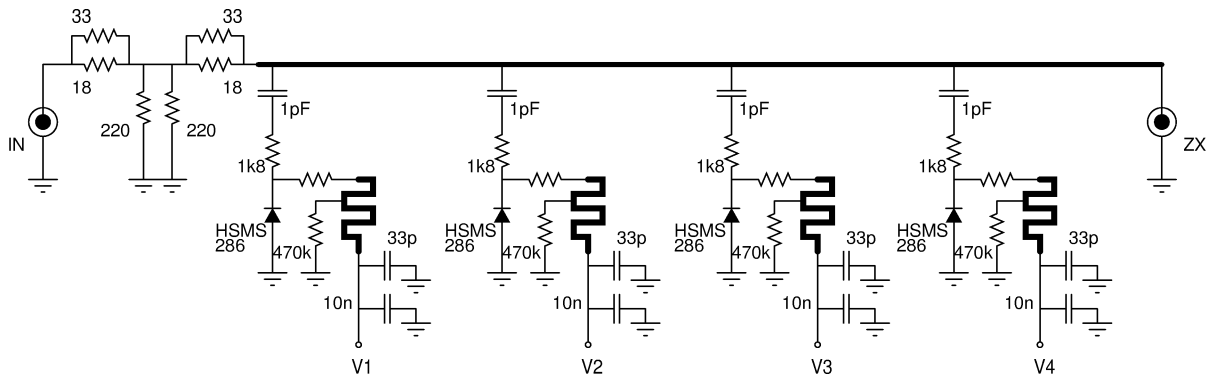


Figura 3: Schema elettrico del riflettometro a LFS

La linea a microstriscia è stata realizzata su dielettrico Taconic TLC 30, di spessore 0.05 mm e costante dielettrica  $\epsilon_r = 3$ . Il piano di massa è stato saldato su lamierino di ottone per ragioni di stabilità meccanica. Le connessioni al generatore e al carico incognito consistono in due connettori SMA provvisti di apposito lanciatore.

I quattro prelievi sono equidistanti tra loro (circa 13 mm, cioè 61° elettrici a 2.45 GHz) e realizzati su linea a 50  $\Omega$ . Il prelievo viene effettuato tramite condensatori da 1 pF. L'accoppiamento alla linea viene ridotto ponendo in serie agli stessi una resistenza da 1800  $\Omega$  (con riferimento alla figura 3).

### 2.3 Risultati

La tabella 1 riporta i parametri della LFS ottenuti dalla procedura di calibrazione.

	1	2	3	4
$A_i$	2.204	2.138	2.058	2.089
$B_i$	+104.08	-126.88	+9.19	+143.82

Tabella 1: Parametri di calibrazione per il prototipo di misuratore a LFS

Sono state eseguite misure su terminazioni caratterizzate mediante analizzatore di reti di precisione. Per carichi tali da dare un coefficiente di riflessione di modulo maggiore di 0.8 (e fase qualsiasi tra 0 e 180°), l'errore sul modulo è risultato inferiore al 3% e quello sulla fase minore di  $\pm 5^\circ$ .

### 3. Conclusioni

Il metodo a LFS presenta diversi vantaggi rispetto ad altri approcci di misura a banda stretta. In particolare:

1. Disaccoppiamento dei parametri della rete: le costanti che caratterizzano un prelievo non dipendono da quelle relative agli altri prelievi.
2. Semplicità costruttiva: la rete di misura non necessita di alimentazione (i soli componenti attivi sono i rivelatori a diodo) e non presenta particolari criticità. L'impedenza incognita viene ottenuta da misure di tensione continua, eseguibili quindi con precisione mediante strumentazione standard.
3. Calibrazione: in linea di principio sono sufficienti due soli standard di calibrazione, anche se l'aggiunta di un terzo standard migliora la precisione della misura.
4. Estendibilità: il metodo si presta ad essere realizzato su una larga banda di frequenze, dalle HF fino alle onde millimetriche.

Le suddette caratteristiche rendono il riflettometro a LFS uno strumento adatto ad un impiego in ambiti in cui un pò di precisione può essere sacrificata a vantaggio di una elevata robustezza ed affidabilità. La semplicità concettuale e costruttiva del misuratore a LFS permette di realizzare un riflettometro a banda stretta compatto, che può ad esempio essere accoppiato ad una sonda *open-coaxial* per realizzare un misuratore di contenuto di umidità a microonde.

### Bibliografia

- [1] G.F. Engen *The Six-Port Reflectometer: An Alternative Network Analyzer* IEEE Trans. on Microwave Theory Tech. Dec. (1977) pp 1075-1080
- [2] Ik-soo Chang, Chango-bok Lee, In-ho Kang *S-Parameter Measurement Using an I/Q Demodulator* Microwave Journal Nov. (1998) pp 80-84
- [3] A.L. Samuel *An oscilloscope method of presenting impedance on the reflection coefficient plane* IRE Proc. November (1947) pp 1279-1283