

VNA basati su linee di trasmissioni non lineari scalabili in frequenza

Karam Noujeim
Jon Martens
Tom Roberts

Microwave Measurements Division
Anritsu

Grazie a campionatori basati su linee di trasmissione non lineari (NLTL – Non Linear Transmission Line) è stato possibile estendere a 110 GHz l'ampiezza di banda degli analizzatori di rete vettoriali della serie VectorStar di Anritsu

I VNA (Vector Network Analyzer – analizzatori di reti vettoriali) operanti ad alta frequenza fanno ricorso a convertitori armonici o a mixer per effettuare la conversione dei segnali di misura alle frequenze IF (intermedie) prima di procedere alla loro digitalizzazione. Questi componenti utilizzati per la conversione verso il basso (down-conversion) sono molto importanti in quanto fissano i limiti di parametri importanti quali efficienza di conversione, compressione del ricevitore, isolamento tra i canali di misura e generazione di spurie alle porte del dispositivo in prova (DUT – Device Under Test). Benché sia i campionatori armonici sia i mixer evidenzino ciascuno pregi e difetti, questi ultimi sono di solito preferiti per la conversione verso il basso alle frequenze RF, a causa soprattutto della maggior semplicità del sistema di pilotaggio dell'oscillatore locale (LO – Local Oscillator) e dei vantaggi che garantiscono in termini di gestione dei fenomeni spuri. Alle frequenze delle microonde e delle onde

millimetriche (dove i problemi principali sono i costi e la compressione del ricevitore) si fa invece ricorso al campionamento armonico. Nei casi in cui la banda di frequenza spazia dallo spettro delta radiofrequenza a quello delle microonde e delle onde millimetriche, campionatori armonici e mixer possono essere usati congiuntamente al fine di ottimizzare le prestazioni sull'intero range di frequenza del VNA.

Campionamento in tempo equivalente

I riflettometri basati su campionatori utilizzano il campionamento in tempo equivalente (ETS – Equivalent Time Sampling) o al miscelamento armonico al fine di espandere temporalmente (time-stretch) le versioni accoppiate delle onde incidenti e riflesse da un DUT prima della digitalizzazione mediante un convertitore A/D.

Questo approccio dà origine a un'architettura semplificata del VNA caratterizzata da un costo inferiore rispetto a quella che prevede il miscelamento della fondamentale (fundamental mixer - in pratica un mixer che usa la frequenza fondamentale dell'oscillatore locale). Questa è una diretta conseguenza della natura del processo di campionamento in tempo equivalente nel quale l'intervallo di frequenza dell'oscillatore locale è confinato in un'ottava, mentre le sue armoniche effettuano la conversione verso il basso dei segnali ad alta frequenza accoppiati. La sorgente dell'oscillatore locale richiesta per l'abilitazione dei campionatori opera in un intervallo di frequenze inferiore rispetto a quello che sarebbe richiesto in un VNA basato su mixer che opera sulla frequenza fondamentale; questo a scapito di un incremento delle perdite di conversione.

La natura periodica delle onde incidenti e riflesse permette di effettuare la loro conversione verso il basso per mezzo del campionamento in tempo equivalente, anche noto come

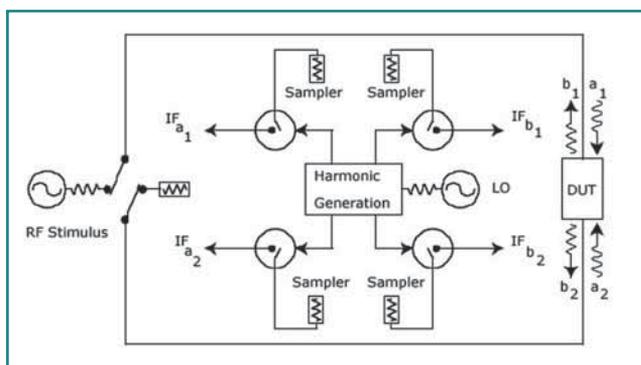


Fig. 1 – Architettura di un riflettometro di un VNA basata sul campionamento in tempo equivalente. Solitamente i campionatori sono abilitati da impulsi generati da diodi SDR (step recovery diode). Le sorgenti RF e dell'oscillatore sono sincronizzate

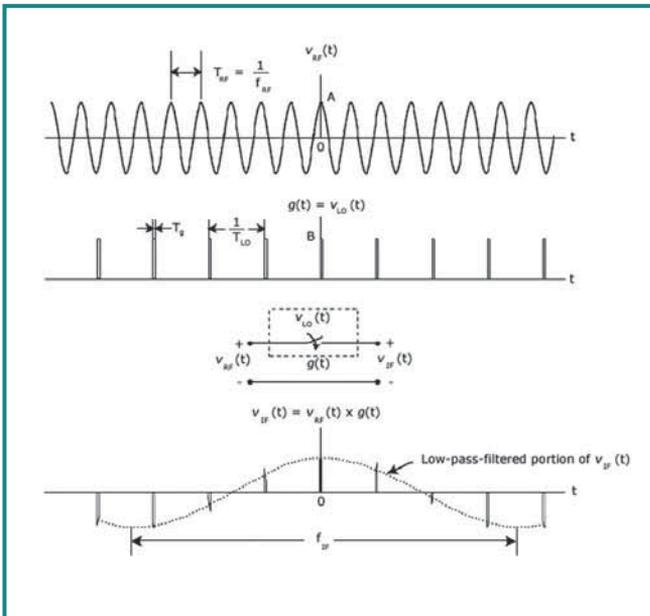


Fig. 2 – Rappresentazione nel dominio del tempo del campionamento in tempo equivalente. (a) Una forma d’onda RF sinusoidale $v_{RF}(t) = A \cos(2\pi f_{RF}(t))$ appare all’ingresso del commutatore in serie ideale. (b) La conduttanza del commutatore, $g(t)$ con l’apertura di abilitazione T_g e una frequenza $f_{LO} = 1/T_{LO}$ (Hz). (c) La forma d’onda IF convertita verso il basso, $v_{IF}(t)$, unitamente a una versione della stessa che ha subito un filtraggio passa basso

d’onda IF campionata, $v_{IF}(t)$, è il prodotto aritmetico della forma d’onda RF sinusoidale, $v_{RF}(t)$ e della conduttanza $g(t)$ del commutatore ideale:

$$v_{IF}(t) = v_{RF}(t) \times g(t)$$

dove $g(t)$ può essere espresso come la seguente serie trigonometrica di Fourier:

$$g(t) = \frac{B - T_g}{T_{LO}} + 2 \cdot \frac{B \cdot T_g}{T_{LO}} \sum_{n=1}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{n \cdot T_g}{T_{LO}}\right) \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot f_{LO} \cdot t)$$

$$\text{e } \text{sinc}(x) = \sin(x)/x$$

Osservando la figura 2 appare evidente che il filtraggio passa-basso della forma d’onda IF dà origine a una riproduzione espansa temporalmente della forma d’onda RF. Si può anche notare che il tempo di abilitazione (gating time), $T(g)$ ha un effetto considerevole sulla risposta in ampiezza del commutatore ideale. Una riduzione del tempo di abilitazione comporta un incremento dell’ampiezza di banda RF a scapito di una riduzione dell’efficienza di conversione.

Limiti dei campionatori basati su diodi SRD

Dal punto di vista pratico, i campionatori per i VNA utilizzano solitamente diodi Schottky come commutatori e diodi SRD (Step-recovery Diode) per la generazione dell’impulso. Un’implementazione di questo tipo, che sfrutta un circuito

sottocampionamento, campionamento armonico o campionamento super Nyquist. I campioni della forma d’onda RF sinusoidale di periodo T_{RF} appaiono all’uscita di un commutatore ideale abilitato a una frequenza di T_{LO} . La forma

di campionamento ideato da Grove, è stata ampiamente utilizzata in una vasta gamma di strumenti, compresi VNA per microonde, oscilloscopi a campionamento e contatori di frequenza. In questo circuito, un impulso di tensione viene utilizzato per abilitare i diodi Schottky per un breve intervallo di tempo (T_g). Durante questo intervallo di tempo, i diodi entrano in conduzione e caricano i condensatori di campionamento (C_s). La carica presente sui condensatori dà origine a una forma d’onda di uscita collegata alla polarità e all’ampiezza dell’ingresso RF.

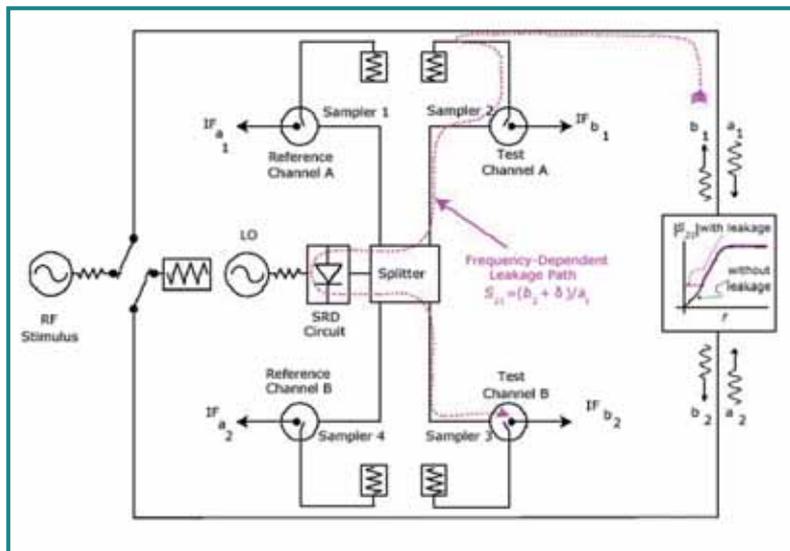


Fig. 3 – Schema di un VNA a campionamento basato su diodi SRD. Le perdite tra i canali di test limitano il range dinamico dello strumento, impedendo la completa caratterizzazione di dispositivi caratterizzati da elevata riflettività come filtri in guida d’onda. In questo caso, la coerenza tra i canali di campionamento viene mantenuta facendo ricorso a un solo diodo SRD

Sebbene i diodi SRD abbiano consentito di espandere l’ampiezza di banda RF dei VNA fino a 65 GHz, fattori quali tempo di discesa (fall time) limitato e mancanza di scalabilità della frequenza dell’oscillatore locale ne impediscono l’uso in VNA che operano a frequenze più elevate. Oltre a ciò, il range dinamico delle misure di trasmissione di un VNA a campionamento basato su diodi SRD risulta limitato a causa

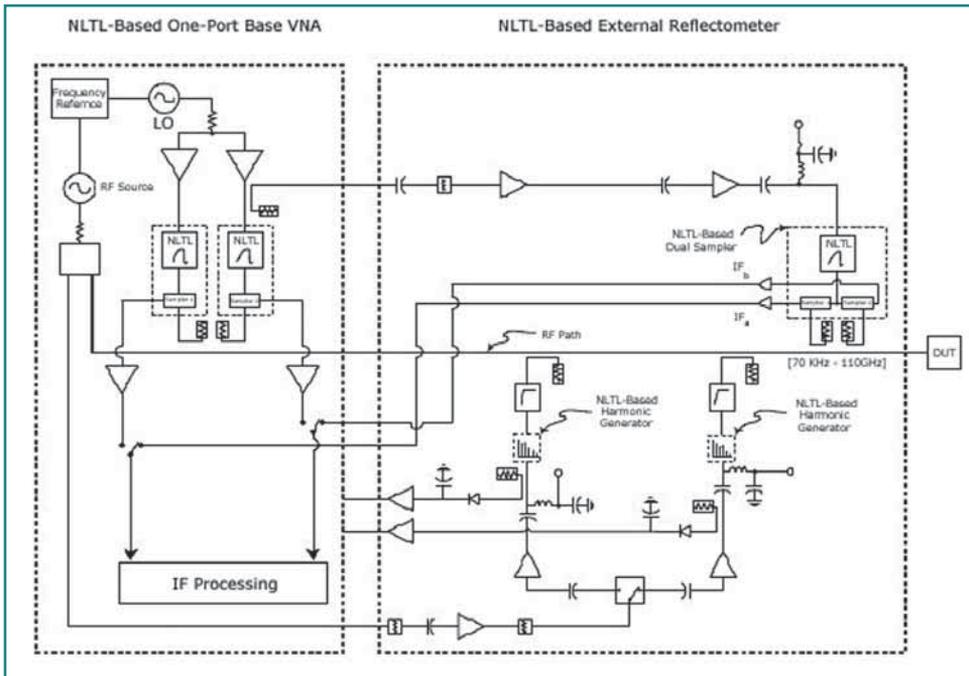


Fig. 4 – Riflettometro basato su linee NLTL integrato con un VNA a una porta (lo schema ha scopo illustrativo)

Linee di trasmissione non lineari

Le limitazioni cui si è accennato sopra possono essere superate ricorrendo a campionatori basati su linee di trasmissione non lineari (NLTL – Non Linear Transmission Line). Queste linee sono dispositivi di tipo distribuito che supportano la propagazione di onde elettriche non lineari come ad esempio onde d’urto (shock wave) o solitoni (onde solitarie autorinforzanti). Essi sono formati da linee di trasmissione ad alta impedenza caricate con diodi varactor in modo da costituire un mezzo di propagazione in cui fase, velocità – e quindi ritardo temporale – risultino funzione della tensione istantanea. Per una forma d’onda

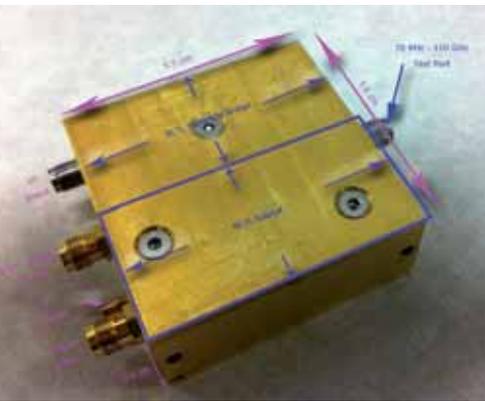


Fig. 5 – Un riflettometro esterno basato su NLTL viene utilizzato per ampliare da 54 a 100 GHz l’intervallo di frequenza dei VNA della serie VectorStar

della mancanza di dispositivi a larga banda per l’isolamento dei canali di collaudo. Per meglio comprendere il problema dell’isolamento dei canali si può far riferimento al riflettometro a campionamento abilitato mediante diodi SRD (Fig. 3), dove si può notare che la soppressione dei segnali privi di isolamento (leaky signal) richiede l’uso di dispositivi d’isolamento a larga banda nei rami di uscita dello splitter.

Queste osservazioni, abbinata al fatto che questi fenomeni di perdita che dipendono dalla frequenza non possono essere calibrati, impongono limitazioni sul range dinamico di un VNA a campionamento basato su SRD. Ciò a sua volta impedisce la completa caratterizzazione di dispositivi contraddistinti da elevata riflettività quali filtri passa alto, così come di dispositivi dove l’accoppiamento debole tra i vari componenti deve essere misurato completamente in funzione della frequenza (per esempio diafonia debole).

del tipo a gradino che si propaga su una linea NLTL, il ventre dell’onda viaggia a una velocità di fase superiore rispetto al picco. Ciò dà origine a una compressione dei tempi di discesa e, di conseguenza, alla formazione di un fronte d’onda più ripido che si approssima a quello di un’onda d’urto. Al fine di ampliare l’ampiezza di banda dei VNA della serie VectorStar di Anritsu a 110 GHz, è stato progettato un riflettometro esterno basato su campionatori NLTL e generatori armonici (Figg. 4 e 5). Il riflettometro è stato integrato con il VNA.

La direttività originale (raw) misurata del VNA e del riflettometro esterno risulta migliore di 6 dB sull’intero intervallo

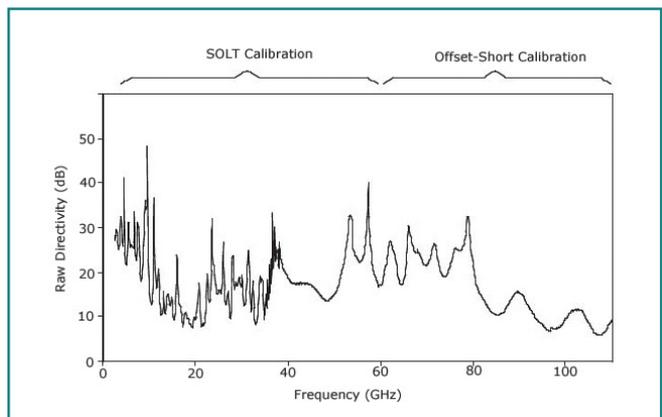


Fig. 6 – La direttività originale misurata di un VNA basato su NLTL e del riflettometro esterno

di frequenza (Fig. 6). La direttività originale, unitamente all'annullamento del gradiente termico ai capi del riflettometro esterno e al controllo del livello dell'oscillatore locale contribuiscono alla stabilità della misura sul lungo termine. D'altro canto, il range dinamico misurato supera i 100 dB nell'intervallo compreso tra 70 kHz e 110 GHz (Fig. 6), rendendo possibile la caratterizzazione di dispositivi ad alta riflettività e con diafonia debole. Le perdite di potenza misurate dell'oscillatore locale misurate all'esterno della porta di test del riflettometro sono inferiori a -40 dBm nell'intero range di frequenza del dispositivo, da 5 a 10 GHz. Ciò è stato possibile grazie a un'accurata progettazione dei circuiti di pilotaggio dell'oscillatore che sono caratterizzati da un isolamento pari ad almeno 65 dB nell'intervallo compreso tra 5 e 10 GHz. Queste perdite potrebbero essere ulteriormente filtrate dal momento in cui esso si trova fuori dalla banda. I riflettometri basati su NLTL potrebbero essere usati per ampliare il range di frequenza di un VNA nel campo delle onde millimetriche. Le dimensioni contenute e il peso ridotto ne fanno i candidati ideali per misure per componenti multi porta direttamente sul wafer e scansioni in campo vicino. La possibilità di posizionare il riflettometro nelle immediate vicinanze del DUT permette di aumentare la potenza della porta di test e migliorare la direttività originale del VNA, a garanzia della stabilità delle misure sul lungo termine. Un vantaggio chiave dei riflettometri compatti è la loro natura non intrusiva: in questo modo il percorso RF che parte dal VNA e arriva alla porta di test resta integro. Il risultato finale è una copertura continua di frequenza, che in questo

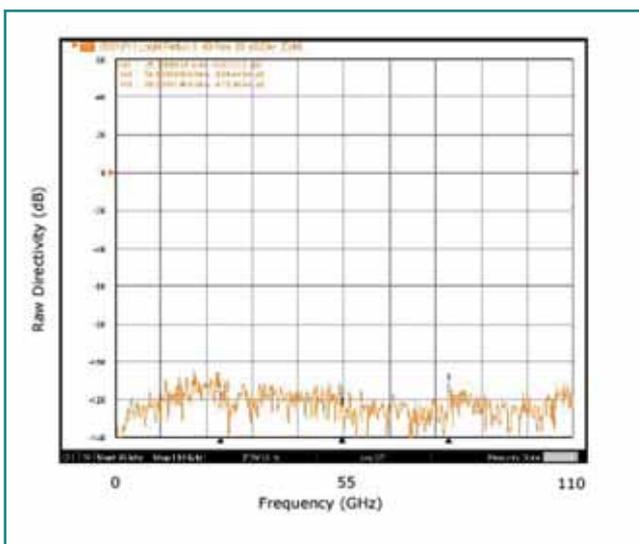


Fig. 7 - Il range dinamico misurato del VNA basato su NLTL e dei riflettometri esterni nella banda di frequenza compresa tra 70 kHz e 110 GHz con un'ampiezza di banda IF di 10 Hz. Nell'intera banda il range dinamico supera i 100 dB

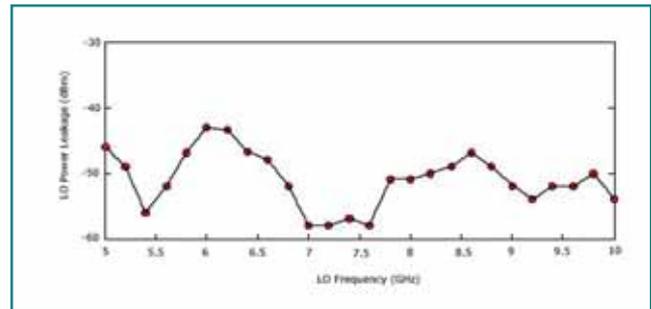


Fig. 8 - La perdita dell'oscillatore locale misurata all'esterno della porta di collaudo del riflettometro esterno nell'intervallo di frequenza dell'oscillatore

caso si estende da 70 kHz a 110 GHz: questo intervallo è limitato solamente dall'ampiezza di banda del connettore coassiale e dal numero di catene di moltiplicatori NLTL. Tutto ciò, abbinato a un ponte di campionamento basato su NLTL, consente di ampliare l'intervallo di frequenza di un VNA senza ricorrere a combinatori, a fronte di un miglioramento della direttività dell'analizzatore. Questo in netto contrasto con le metodologie attualmente adottate per le estensioni di frequenza di un VNA, che prevedono l'uso di un combinatorio esterno di grandi dimensioni per concatenare due bande di frequenza, tecnica questa che comporta un peggioramento della direttività originale e un aumento delle perdite di inserzione. ■