

# ANALIZZATORI DI RETI A MICROONDE

L'**analizzatore di reti a microonde** è uno strumento molto complesso, capace di misurare i parametri caratterizzanti una rete, attiva o passiva, in maniera veloce e accurata.

L'analizzatore di reti può essere visto come un insieme di apparecchiature che, attraverso un'opportuna connessione, consentono di realizzare una molteplicità di misure.

La maggior parte degli analizzatori di reti hanno una procedura di calibrazione che consente di effettuare misure, su una banda minore o uguale di quella usata durante la calibrazione stessa, senza che sia necessario ripeterla. Fatto questo che, insieme all'elevata capacità di elaborazione dei dati, rende lo strumento più veloce e più accurato, rispetto all'uso combinato di più strumenti.

Si dividono in due categorie principali: SCALARI e VETTORIALI

L'analizzatore scalare misura e mostra sul suo display solamente l'ampiezza del segnale che si sta analizzando (grandezza mostrata in funzione della frequenza).

Invece l'analizzatore vettoriale misura e mostra sia ampiezza che fase del segnale.

Questa caratteristica consente all'analizzatore vettoriale di visualizzare i parametri, non solo in scala lineare, ma anche in forma complessa, attraverso, per esempio, la carta di Smith.

L'analizzatore vettoriale può anche misurare i parametri S e mostrarli contemporaneamente, in quanto opera una scansione continua delle sue due porte di ingresso.

L'analizzatore da scegliere tra i due tipi dipende dalle caratteristiche richieste dalla particolare applicazione per cui lo si vuole utilizzare.

Per poter apprezzare meglio le capacità dell'analizzatore scalare e vettoriale presentiamo due esempi, uno per ogni tipo, rispettivamente il Wiltron 561 e il Wiltron 360.

## ANALIZZATORE SCALARE

Come già detto sopra, l'analizzatore scalare misura solo l'ampiezza del segnale proveniente dal sistema testato.

Questo non significa che l'analizzatore scalare sia inferiore a quello vettoriale sotto ogni punto di vista; infatti se per un'applicazione è sufficiente la sola conoscenza dell'ampiezza di un parametro caratteristico, l'analizzatore scalare risulta uno strumento più veloce ed efficiente di quello vettoriale.

## ESEMPIO

L'analizzatore scalare di rete Wiltron 561 consente di misurare parametri di trasmissione e di potenza senza l'aiuto di alcun controllo esterno.

Le sue caratteristiche principali sono:

- Copertura continua di banda da 10 MHz a 40 GHz (con un set di componenti in coassiale).
- Una procedura di calibrazione che permette di semplificare e velocizzare le misure (infatti i 2000 punti di calibrazione consentono di stringere il campo senza dover effettuare una procedura di ricalibrazione).
- L'interpolazione tra i punti fa sì che le funzioni di marker e il cursore siano precisi e versatili.
- La regolazione della scala (per aumentare la risoluzione e/o compiere eventuali compensazioni) è automatica.

Gli accessori che accompagnano il Wiltron 561, e in generale gli analizzatori scalari, sono: un autotester SWR (integrato in un dispositivo 3 porte ad alta direttività, la sua uscita è il segnale rivelato e varia a seconda delle riflessioni dovute allo strumento testato), delle terminazioni di riferimento (per test a bassa riflessione) e cavi schermati di connessione.

I connettori a queste frequenze sono molto importanti e sono classificati in base alle frequenze di lavoro:

<b>TYPE</b>	<b>BANDWIDTH</b>
GPC-7 or N	10 MHz – 18 GHz
SMA	10 MHz – 26,5 GHz
K	10 MHz – 40 GHz

Tab.1

Le funzioni del cursore luminoso sono:

- Il Main Cursor che è l'indicatore attivo e varia continuamente la sua posizione a seconda dei dati.
- Il Cursor Delta che è la differenza in ampiezza e frequenza tra il cursore di riferimento e quello principale.
- Il Cursor Min/Max che è il cursore che dà il valore del minimo o del massimo.

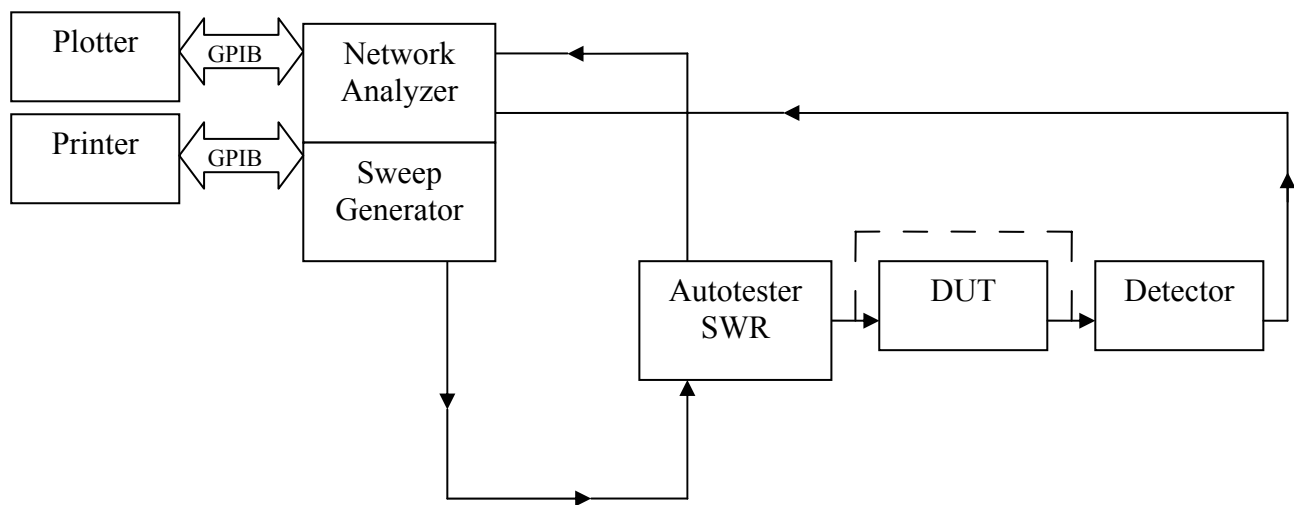
- Il Cursor “X” dB che consente di muovere il cursore attivo sul valore X richiesto.
- Il Cursor “X” Bandwidth che evidenzia la banda individuata dal valore inserito sopra.
- Il Cursor Next Marker che sposta il cursore al successivo valore in frequenza.
- Il Cursor Alive Marker che sposta il cursore sul valore del marker attivo.

L’analizzatore scalare, come quello vettoriale, possiede un generatore di segnale interno, ma solo con l’utilizzo di un generatore esterno appositamente progettato è possibile raggiungere la frequenza di 40 GHz.

Sotto il controllo di un microprocessore interno, il Wiltron 561 normalizza e contemporaneamente mostra i dati misurati sui due canali, il cui range dinamico arriva a 71 dB (da -55 dBm a 16 dBm).

Tipicamente il livello di rumore è minore di -62 dBm, e questo permette di avere un range che arriva fino a 76 dB per quasi tutte le applicazioni.

Un tipico test per l’analizzatore scalare è quello mostrato in figura:



*Fig.1 Typical test setup*

Entrambi i segnali, riflesso e trasmesso, possono essere visualizzati ed elaborati usando questa configurazione.

Il segnale a RF emesso dallo Sweep Generator arriva all’autotester e da questo si ottiene il segnale riflesso, che ritorna direttamente al Network Analyzer, e il segnale trasmesso che ritornerà solo dopo aver attraversato il DUT ( Device Under Test) e il Detector.

I segnali rivelati dall’autotester SWR variano in proporzione alle riflessioni, mentre il rivelatore d’uscita può essere usato per rivelare la potenza trasmessa.

In figura 1 è evidenziato, con una linea tratteggiata, anche il circuito che è utilizzabile in fase di calibrazione.

## **CALIBRAZIONE**

Durante la normalizzazione, una procedura è eseguita automaticamente per la misura di perdite in trasmissione e quelle di ritorno; per queste ultime, si stabilisce un riferimento a 0 dB attraverso la connessione ad un circuito aperto prima, e ad un cortocircuito poi, sulla porta dove si vuole collegare l'autotester SWR.

I dati per la normalizzazione sono presi come 2001 punti con una risoluzione di 0,002 dB e memorizzati per la successiva correzione.

Inoltre c'è un algoritmo di interpolazione tra i punti che permette di arrivare ad un'incertezza totale sulla misura di 0,1 dB.

Questa calibrazione consente, come già accennato in precedenza, di effettuare misure su una qualsiasi porzione della banda usata durante questa procedura, senza doverla ripetere.

Le misure possono essere fatte prendendo 101, 201 o 401 punti con 0,005 dB di risoluzione verticale su entrambi i canali e la scansione che si ripete ogni 100 ms permette di fare correzioni in tempo reale sullo strumento testato (caratteristica questa molto utile, per l'utilizzo industriale).

Per mostrare le capacità dell'analizzatore scalare di rete, si riportano due esempi di configurazioni utilizzabili per la misura del *guadagno* di un amplificatore prima (fig. 2) e delle *perdite di conversione* di un mixer poi (fig. 3).

Il guadagno dell'amplificatore può essere ricavato come rapporto dei due ingressi all'analizzatore di rete e la banda a 3dB può essere calcolata spostando il cursore di riferimento sul display. Lo schema di figura 2 è anche sfruttabile per la misura delle potenza d'uscita dell'amplificatore.

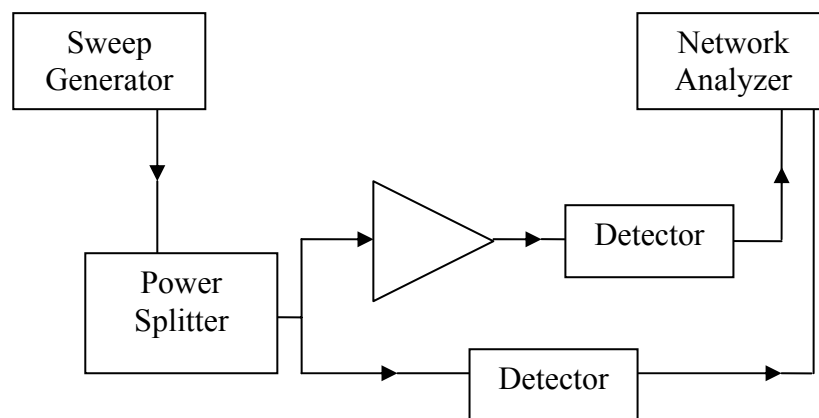


Fig. 2 Amplifier test setup

Per quanto riguarda la misura delle perdite di conversione si ha una configurazione del tutto analoga alla precedente e anche questa volta la misura è data dal rapporto dei due ingressi dell'analizzatore scalare.

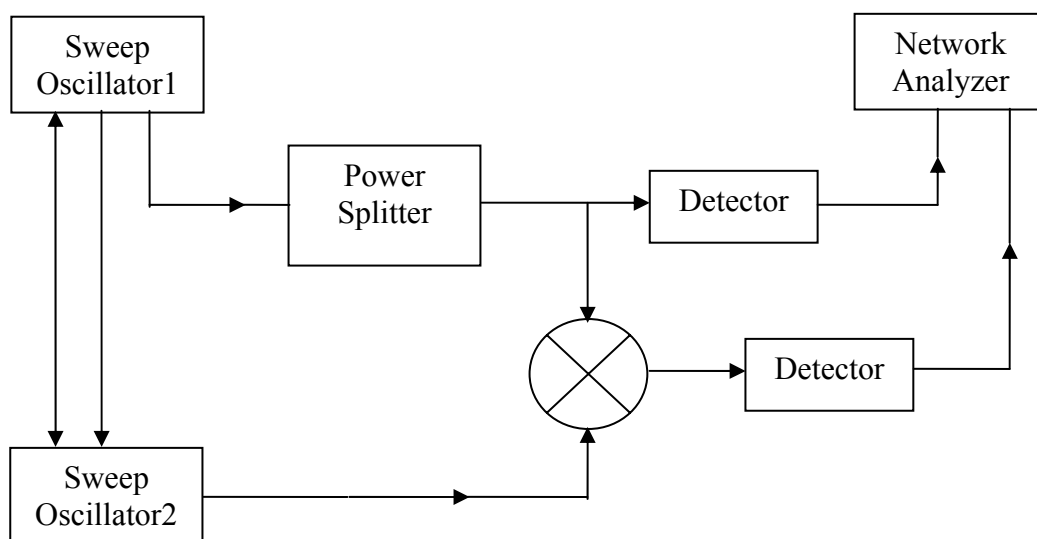


Fig. 3 Mixer test setup

Nello schema sono presenti due generatori di segnale in quanto si devono generare i due segnali, uno a RF e l'altro a bassa frequenza, che arrivano in ingresso al mixer. E' poi evidenziato un collegamento tra i due oscillatori, che serve da controllo per la generazione del segnale LO e di quello modulato.

## **ANALIZZATORE VETTORIALE**

L'analizzatore vettoriale è uno strumento che misura sia la caratteristica di ampiezza del dispositivo da testare ( DUT ), sia quella di fase.

### ESEMPIO

Nel caso particolare del wiltron 360, assume le seguenti caratteristiche:

- Copertura frequenziale da 20 MHz a 40 GHz
- Le frequenze possono essere cambiate senza ricalibrazione.
- Visualizzazione simultanea dei quattro parametri S ( ciascuno in modulo e fase).
- Possibilità di visualizzare ampiezza e fase, parte reale e immaginaria, carta di Smith, ritardo di gruppo e analisi anche nel dominio del tempo.
- Non è necessario invertire fisicamente le porte di collegamento per ottenere i quattro parametri; infatti l'analizzatore effettua le misure alternando il segnale di test sulle due porte; questo fa sì che si risparmi tempo e si evitino perdite di accuratezza sul test stesso.
- Su entrambe le porte è possibile regolare un'attenuazione (a passi discreti) fino a 70 dB, con la quale si riesce ad aggiustare il segnale di test fino a raggiungere il livello adatto alla misura.

In più l'attenuazione sui canali consente di fare misurazioni su strumenti con un livello di potenza in uscita anche superiore ad 1 W.

- Se poi è necessario misurare l'isolamento di componenti all'interno di uno strumento, o la distanza di una discontinuità d'impedenza, l'analizzatore vettoriale usa un software che fornisce la soluzione nel dominio del tempo ( o dello spazio).
- I quattro canali sono completamente indipendenti: infatti mentre su uno si visualizza il dominio del tempo, su un altro è possibile visualizzare quello della frequenza.

- Qualsiasi canale si scelga, si ha sempre una dinamica  $> 100$  dB. Per segnali di livello molto basso, l'accuratezza della misura si mantiene sfruttando due metodi: *averaging* (media) e il *filtraggio* (si riduce la larghezza di banda IF)
- Per ogni livello del segnale e per ogni velocità di misurazione la correzione automatica dell'errore, fatta su un vettore a 12 termini, riesce a rimuovere gli errori residui in modo da mantenere accurate le misure sia di modulo che di fase.

Possono essere eseguite molte *misure* e molti *test* con l'analizzatore vettoriale, e qui di seguito si riportano solo alcuni dei più comuni:

- Impedenza complessa e caratteristiche di trasmissione: grazie alle sue due porte, i parametri S possono essere misurati simultaneamente e aggiornati in tempo reale; così si possono visualizzare le caratteristiche di trasferimento diretta e inversa, come ad esempio le caratteristiche di ingresso ed uscita degli amplificatori a FET (sulla carta di Smith).
- Ritardo di gruppo: con l'aggiornamento continuo dei dati è possibile ottimizzare il ritardo di gruppo, che può essere anche mostrato insieme alla deviazione dalla fase lineare.
- Adattamento di ampiezza e fase: grazie alla capacità di memorizzare dati, è possibile, tramite una funzione di confronto automatico, misurare direttamente le differenze tra la traccia memorizzata e quella corrente.
- Perdite per inserzione/guadagno e fase: il sistema riesce a misurare attenuatori, commutatori ad elevato isolamento e filtri ad alta reiezione. Per questo tipo di misure l'analizzatore vettoriale presenta due notevoli vantaggi rispetto a quello scalare: 1) la correzione automatica degli errori si permette risultati più accurati e 2) ho un aumento della dinamica di 30/40 dB (si arriva a 100 dB fino a 18 GHz ).
- Dominio del tempo: il sistema riesce a mostrare discontinuità come funzioni temporali o spaziali, quindi le riflessioni indesiderate possono essere eliminate agendo sul display.
- Caratteristiche dei semiconduttori: ci sono 3 caratteristiche del Wiltron 360 che aumentano la precisione sui test delle caratteristiche dei semiconduttori: 1) è possibile aggiustare il livello del segnale di ingresso 2) tutti i parametri S possono essere mostrati simultaneamente e 3) il sistema contiene un software che permette l'estrazione e personalizzazione del formato dei dati in uscita.

## ESEMPIO: TEST DI UN AMPLIFICATORE con VNA WILTRON 373XXA

Introduzione Il VNA è stato progettato per misurare i parametri S a RF e a microonde per strumenti e circuiti.

Quando si misurano i parametri S degli amplificatori è importante conoscere i livelli di potenza di ingresso e di uscita (almeno in modo approssimato) per essere sicuri che l'amplificatore lavori nel suo range e che non si superi la massima capacità di potenza sopportata.

Se poi si vogliono misurare gli effetti delle non linearità come il punto di compressione a 1 dB, o la conversione AM/PM, tali livelli devono essere noti con precisione e diventa consigliabile che la potenza rientri nel range desiderato.

Il 373XXA ha molte peculiarità: la potenza nominale sulle porte è specificata in dBm, la calibrazione della potenza (che può variare in ampio range) e un'interfaccia che semplifica la visualizzazione delle caratteristiche degli amplificatori.

Si noti che i seguenti test sono stati eseguiti sfruttando una calibrazione a 12 termini, fatta su tutta la banda dell'analizzatore vettoriale di reti.

Test lineari Sono costituiti principalmente dalla misura dei *parametri S*:

- **S21** che rappresenta l'ampiezza del guadagno in funzione della frequenza, ma da questo si estraggono anche fase e ritardo di gruppo
- **S11** e **S22** che possono essere utilizzati per vedere l'impedenza d'ingresso e d'uscita, e realizzare il relativo adattamento
- **S12** che rappresenta l'isolamento dell'amplificatore

Per gli amplificatori a microonde la zona di linearità è nota, e valori tipici di questa sono riportati nella tabella 2:

Typical Amplifier Specifications	
Frequency:	8-12 GHz
Minimum Gain:	22 dB
Gain Flatness:	±1 dB
Maximum SWR	
Input:	2:1
Output:	2:1
Output Power @ 1dB Gain Compression:	+8dBm

Tab. 2

Si può controllare di essere in zona di linearità incrementando la potenza d'ingresso di 3 dB e osservare se S21 resta lo stesso.



Spesso è richiesto di lavorare in zona di linearità e il livello di ingresso è molto al di sotto del valore di default del VNA, in particolare per quegli amplificatori che presentano un guadagno elevato.

Il VNA ha su ciascuna delle sue due porte un attenuatore a step (cioè a valori discreti) che permette di aggiustare il livello di ingresso al DUT. Per quanto riguarda l'uscita, l'analizzatore riesce a trattare potenze fino a 1 Watt (30 dBm).

La scansione alternata delle due porte, sulle quali sono posti gli accoppiatori direzionali, permette di estrarre i valori di potenza diretta e riflessa a coppie, e consente ai ricevitori di fare i vari rapporti, quindi di valutare tutti i parametri S.

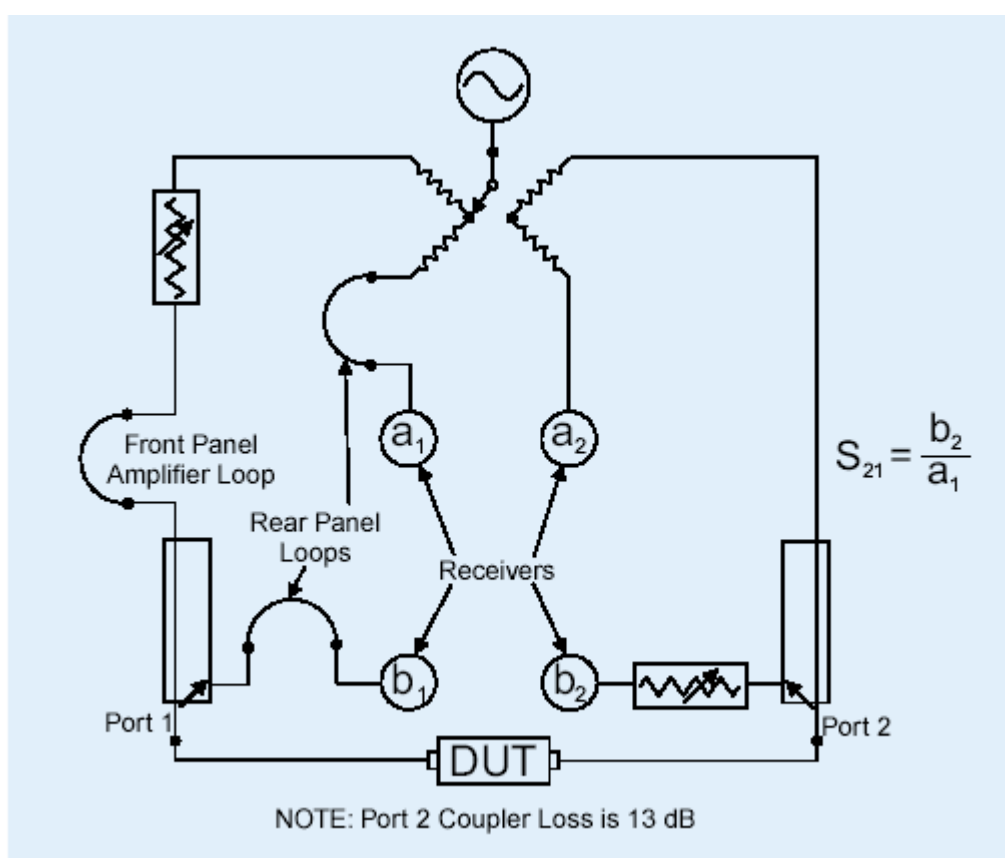


Fig. 4 Schema a blocchi del VNA durante la misura di S<sub>21</sub>

I modelli 373XXA usano un ricevitore la cui struttura, che è mostrata in figura 4, permette di ridurre la potenza in ingresso (durante la misura di S<sub>21</sub>) a meno di -10 dBm, fatto questo che consente al VNA di lavorare in condizioni di linearità.

La figura 5 mostra infine i parametri S dell'amplificatore, misurati col VNA:

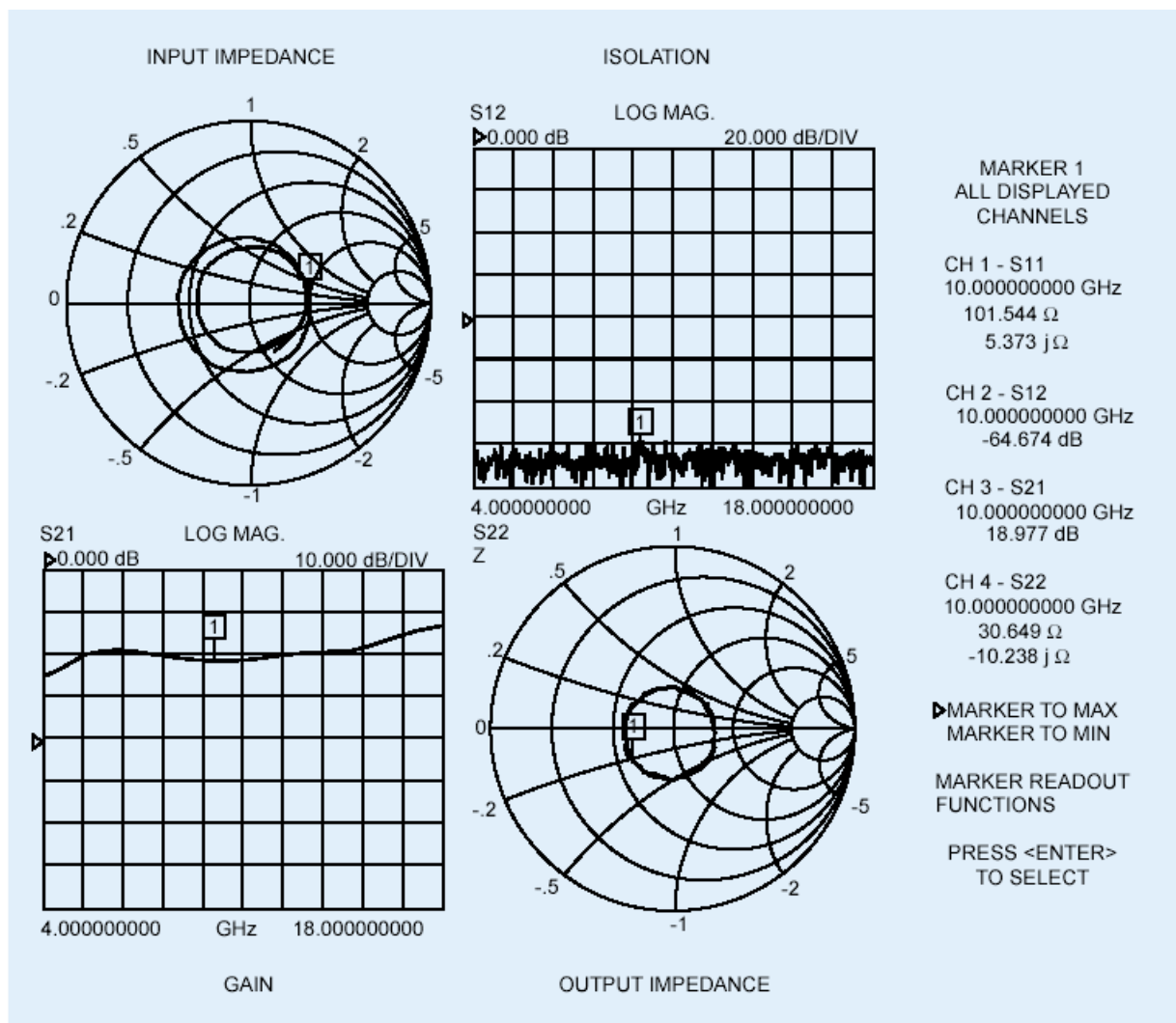


Fig 5 Parametri S

### Ritardo di gruppo

Se tutte le componenti frequenziali desiderate, non hanno lo stesso ritardo, si ha una distorsione del segnale in uscita.

Il ritardo di gruppo è definito come:

$$\text{Delay} = -\frac{\Delta \phi}{\Delta \omega}$$

E, come si nota dalla formula, è controllato dall'apertura  $\Delta \omega$ , che può essere regolata dall'utente.

E' importante che l'impostazione di questo parametro sia fissata in modo identico se si vuole fare il confronto tra due o più misure.

In figura 6 è mostrato il ritardo di gruppo per un amplificatore in cui si è impostata un'apertura del 3% sui 14 GHz della banda (quindi pari a 420 MHz).

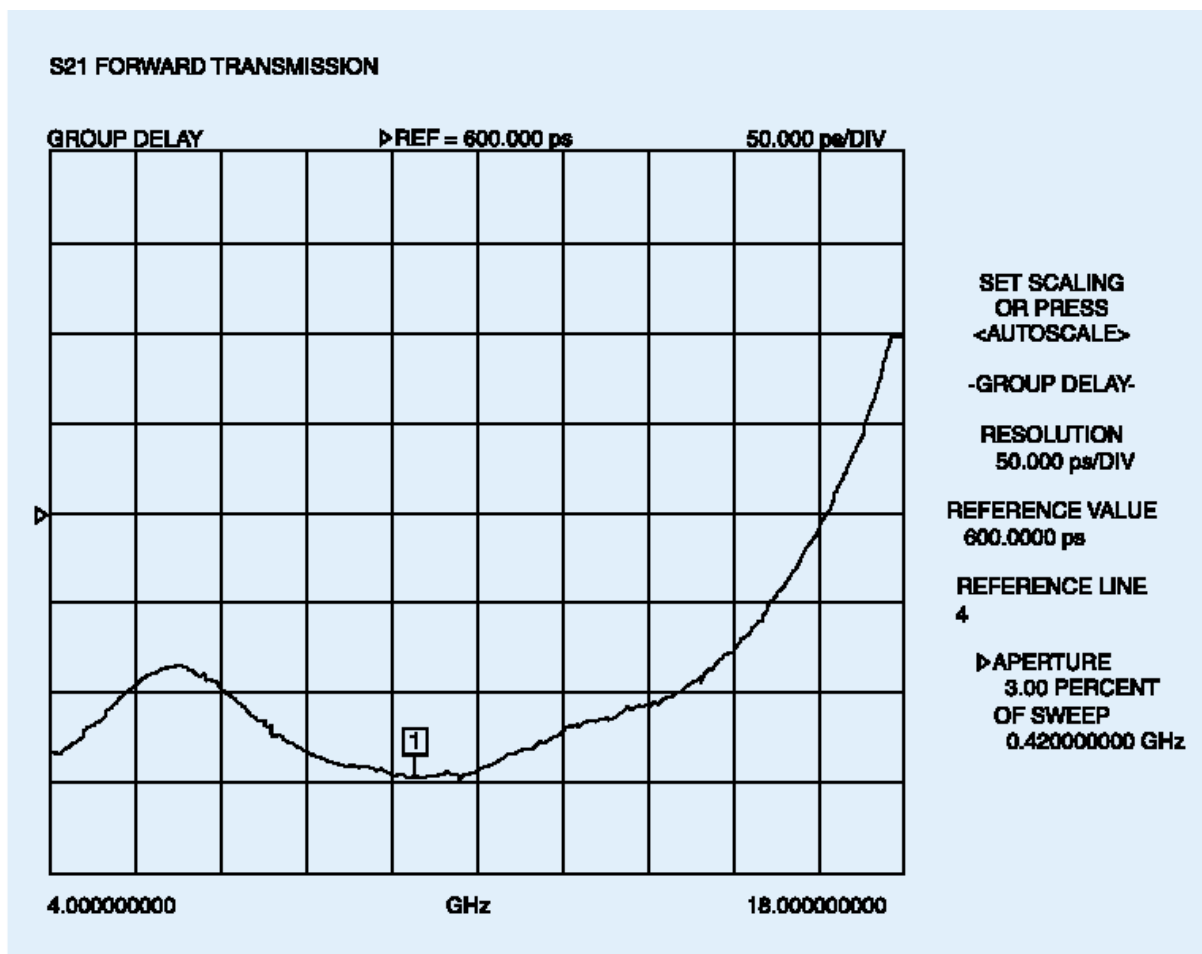


Fig. 6 Ritardo di Gruppo

### Test non lineari

Se si incrementa il livello dell'ingresso, troveremo un punto oltre il quale l'amplificatore non risponde più in modo lineare, e l'uscita risulta compressa.

Un parametro noto, è il *punto di compressione a 1 dB* (che indica proprio quando il livello del guadagno scende di 1 dB dal suo valore massimo).

Se si vuole osservare la risposta del DUT oltre questo punto, è necessario aumentare la potenza d'ingresso e conseguentemente la risposta scenderà finché non si arriverà al punto di saturazione; punto questo dopo il quale non sarà più possibile ottenere una potenza d'uscita maggiore.

I parametri importanti per questa misura sono: la potenza d'ingresso del DUT, il range di potenza utilizzabile e la potenza d'uscita dell'amplificatore.

La configurazione del test è mostrata in figura 7. Per questo tipo di test si fissano i parametri di potenza e la frequenza di lavoro, poi si procede alla misura dei parametri S incrementando gradualmente la potenza in ingresso all'amplificatore.

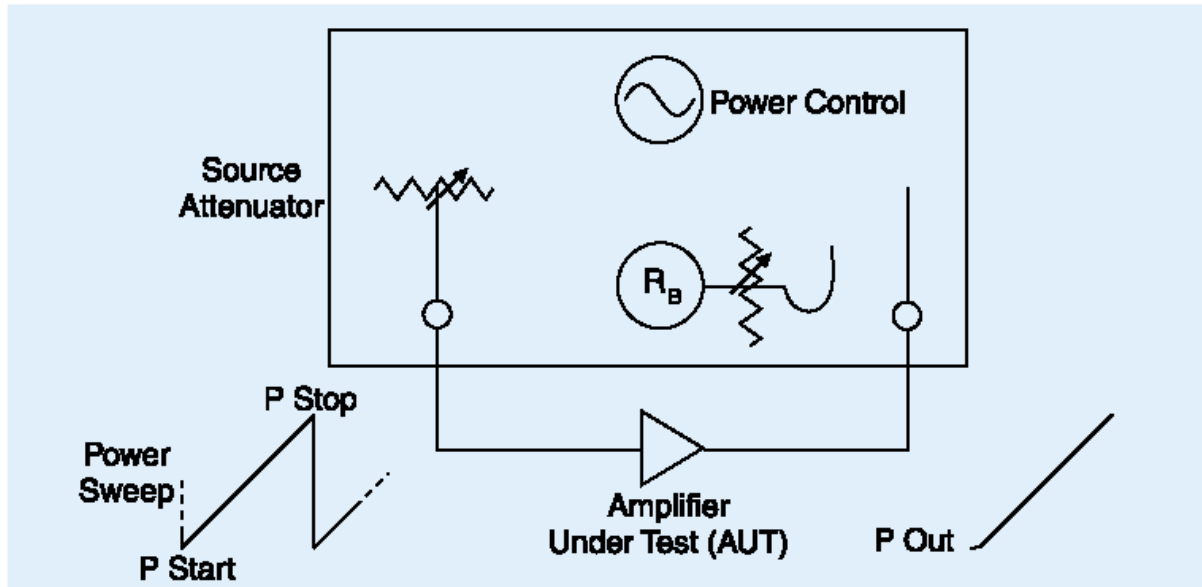


Fig. 7 Configurazione per test non lineare

La compressione del guadagno può essere misurata dal VNA attraverso due metodi:

- Swept Frequency Gain Compression (SFGC)
- Swept Power Gain Compression (SPGC)

Tipicamente si effettuano le misure dei parametri S nella zona lineare e dopo si osserva la compressione della caratteristica AM/PM incrementando la potenza d'ingresso.

Per operare nella zona di linearità, la potenza d'ingresso è regolata dalla formula:

$$P = PGC - G - 15\text{dB}$$

Dove PGC è la potenza nominale dell'amplificatore da testare per cui la caratteristica si discosta di 1 dB dalla linearità e G è il guadagno dell'amplificatore

Il livello di tale potenza è limitato dalle caratteristiche del VNA e in particolare dall'attenuatore a step sulla porta d'ingresso.

La porta di uscita dell'amplificatore da testare (AUT) deve essere considerata come se lavorasse in zona di linearità: per il VNA si ha 0,1 dB di compressione per un livello d'ingresso di -10 dBm. L'attenuatore a step da 10 dB sull'uscita fa sì che VNA lavori in linearità, per segnali d'ingresso fino a 30 dB (1 Watt).

## SFGC

Permette di visualizzare la risposta dell'amplificatore in funzione della frequenza, per una potenza iniziale fissata e conseguente incremento manuale dello stessa.

Questa procedura è implementata nelle applicazioni del 373XXA (figura 8a); l'utente può seguire le istruzioni direttamente sullo schermo, e comprendono anche la calibrazione (figura 8b).

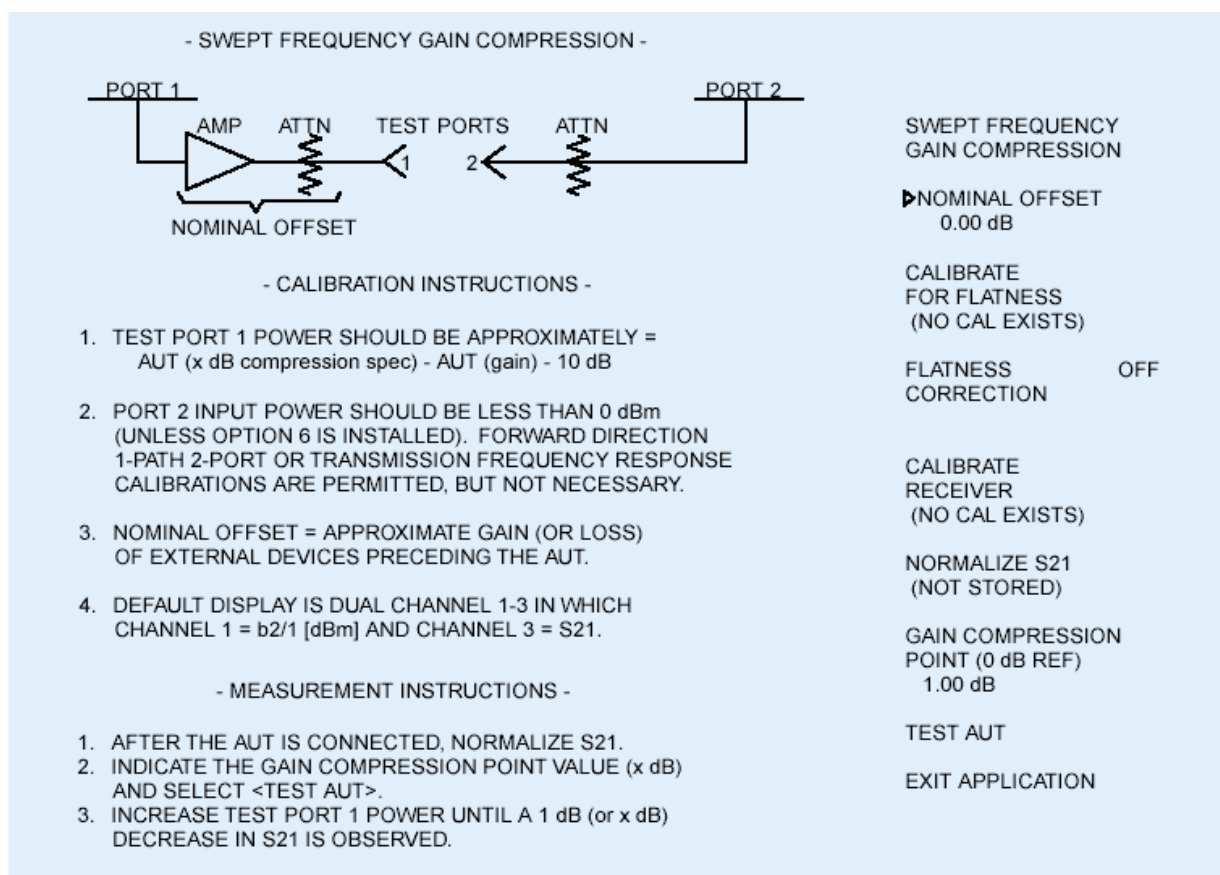


Fig. 8a Istruzioni

Il risultato del test è invece mostrato in figura 9, dove per lo specifico amplificatore (le cui caratteristiche sono riportate in fondo al capitolo), il punto di compressione a 1 dB è visualizzato là dove il guadagno è massimo.

# - FLAT POWER CALIBRATION -

FLAT POWER CALIBRATION ADJUSTS THE SOURCE OUTPUT POWER AT EACH MEASUREMENT POINT ACROSS A FREQUENCY SPAN TO PROVIDE A CONSTANT POWER LEVEL AT THE TEST PORT (FORWARD DIRECTION ONLY)

## - INSTRUCTIONS -

1. PRESET, ZERO, AND CALIBRATE THE POWER METER.
2. SET POWER METER OFFSET IF REQUIRED
3. CONNECT THE POWER METER TO THE DEDICATED GPIB INTERFACE AND THE POWER SENSOR TO THE TEST PORT.
4. SELECT <START FLAT POWER CALIBRATION>.

000.0 %

## - FOR BEST RESULTS -

1. SET THE POWER CONTROL, PORT 1 ATTENUATOR, AND POWER TARGET SO THAT THE TEST PORT LEVEL IS APPROXIMATELY CORRECT AT THE DESIRED PORT.
2. MEASURE 1 POWER POINT FOR EVERY DATA POINT. OTHERWISE, SKIPPED POINTS WILL BE INTERPOLATED.

CALIBRATE FOR  
FLAT PORT POWER

FORWARD  
DIRECTION ONLY

80 POINTS  
MEASURE 1 PWR  
POINT EVERY  
4 POINT(S)

POWER TARGET  
-23.00 dBm

>START FLAT  
POWER CALIBRATION

PREVIOUS MENU

PRESS <ENTER>  
TO SELECT

TURN KNOB TO  
CHANGE NUMBER  
OF POINTS

Fig. 8b Calibrazione

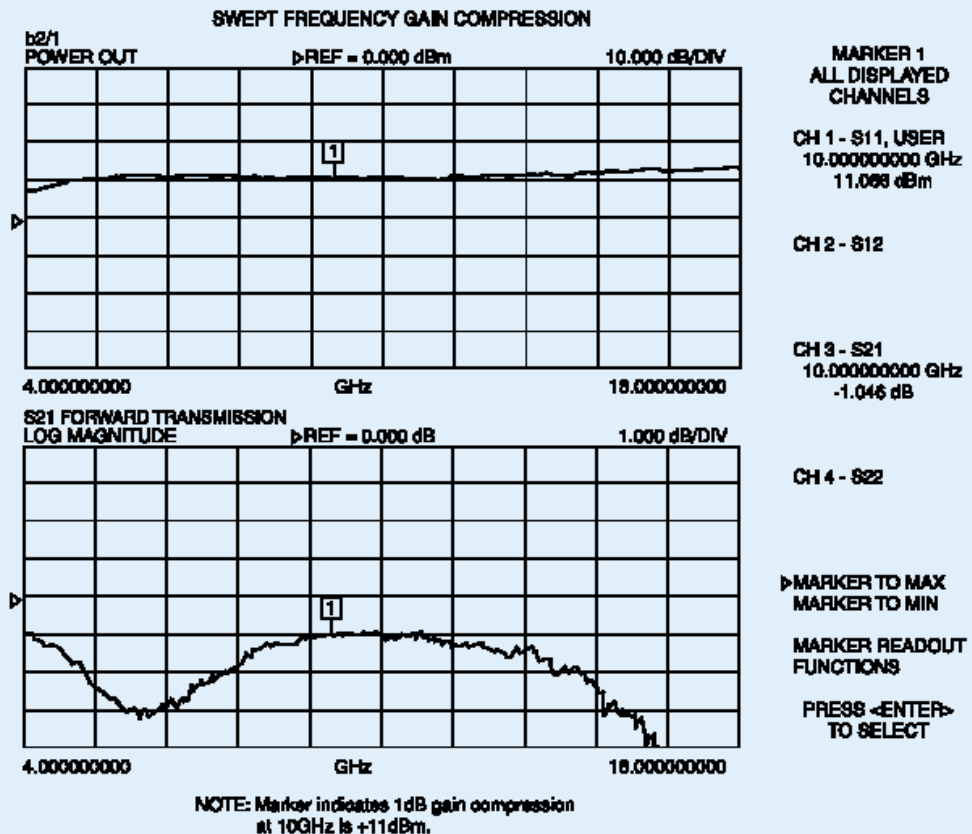


Fig. 9 Risultati della misura

## SPGC

E' un test svolto per 10 frequenze fissate dall'utente e il risultato è mostrato in funzione della potenza d'ingresso, i cui passi sono regolabili durante la procedura evidenziata nelle figure 10a e 10b.

Questo test permette anche di visualizzare la fase della risposta sempre in funzione della potenza di ingresso.

I risultati sono mostrati in figura 11a e 11b come si nota possono essere visualizzati grafici per una o più frequenze.

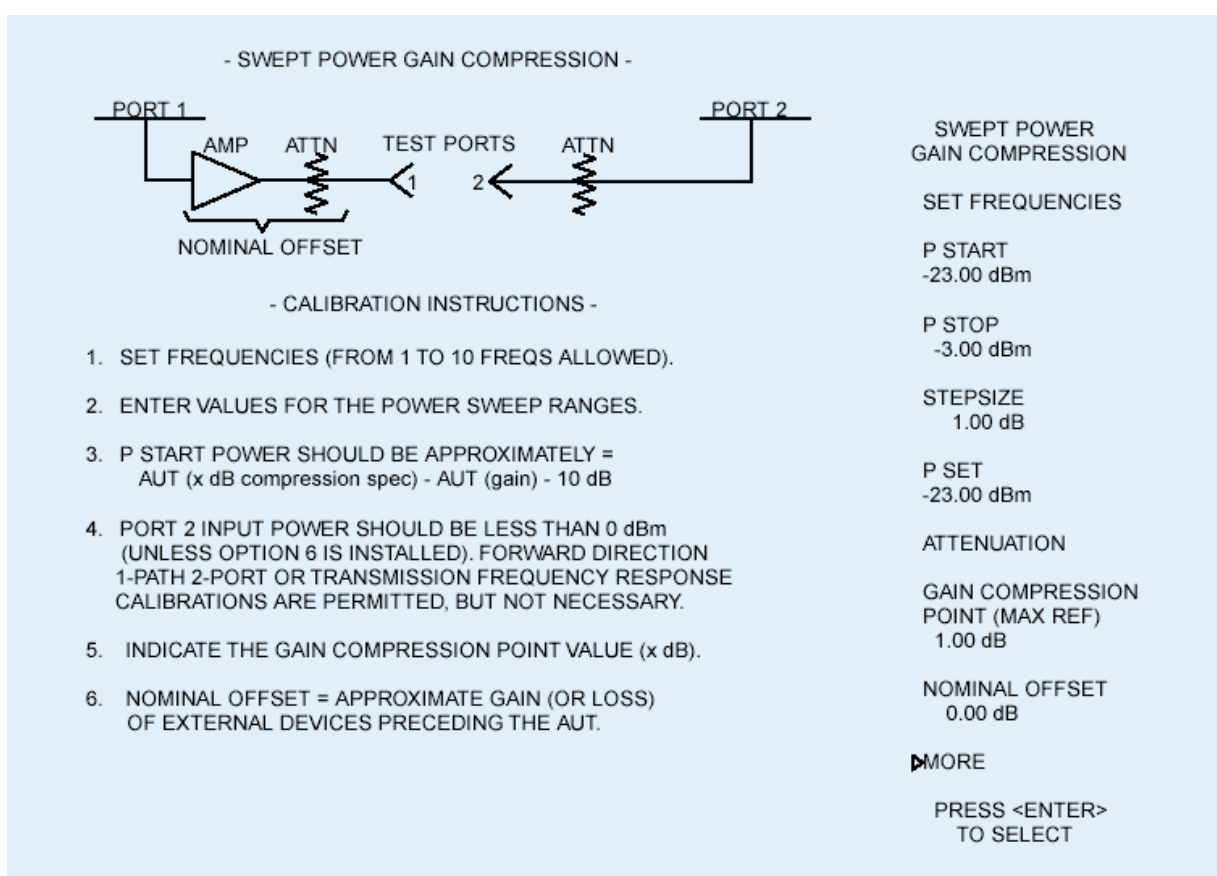


Fig. 10a Istruzioni

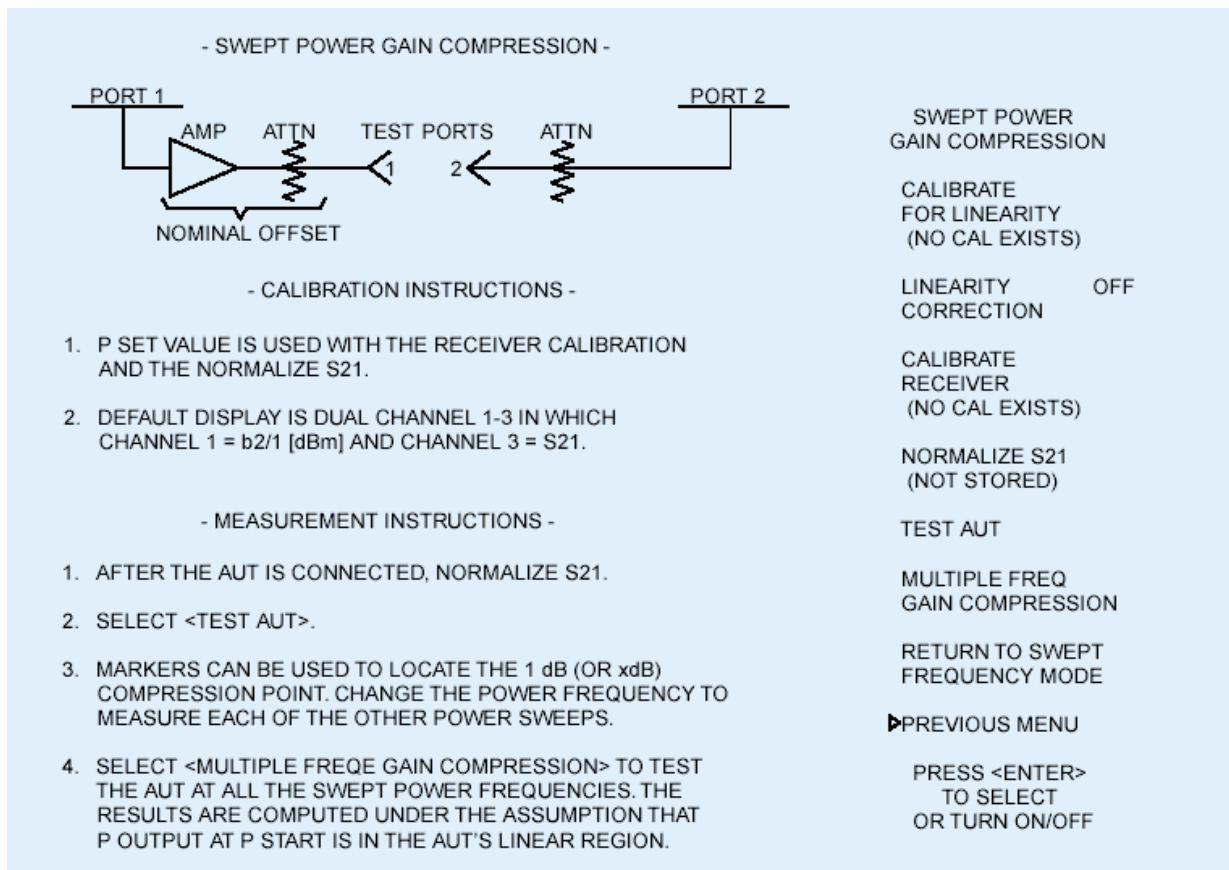


Fig. 10b *Calibrazione*

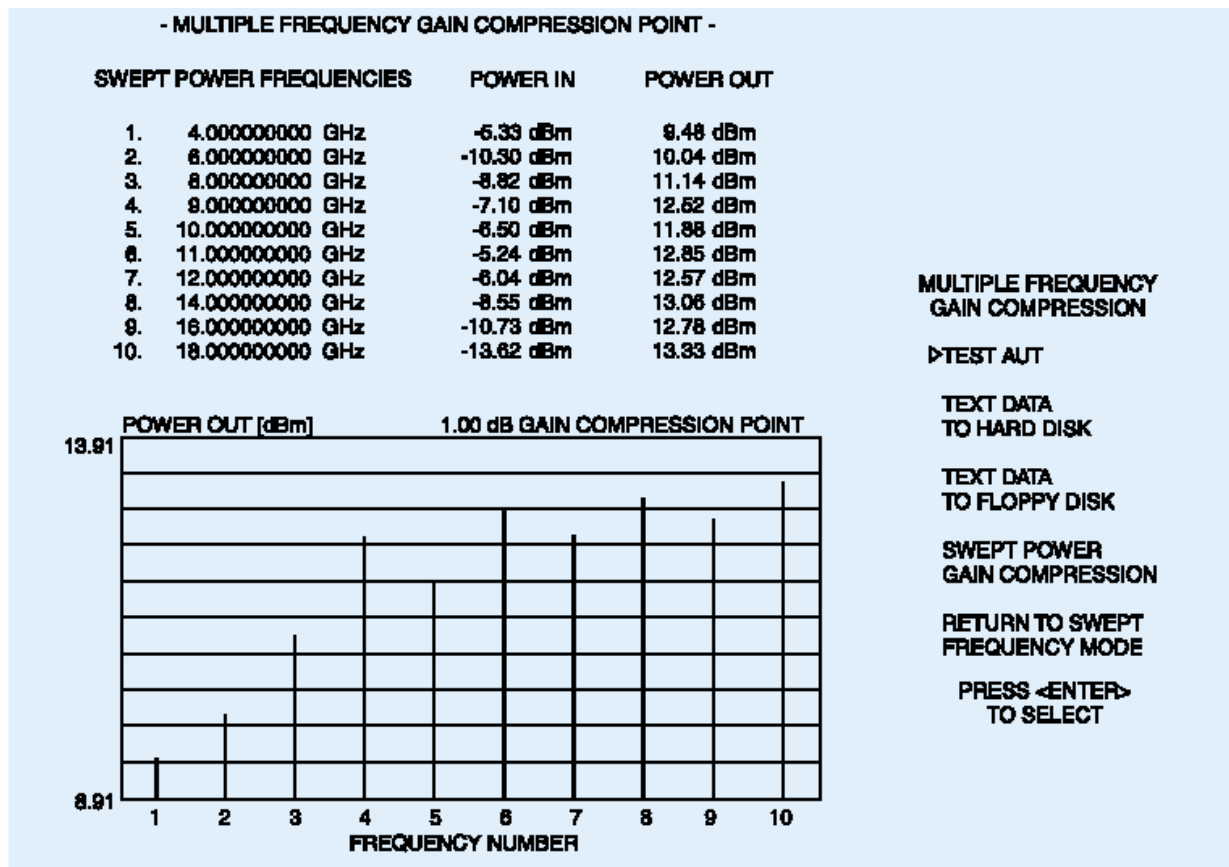


Fig. 11a *Potenza d'uscita per le varie frequenze*



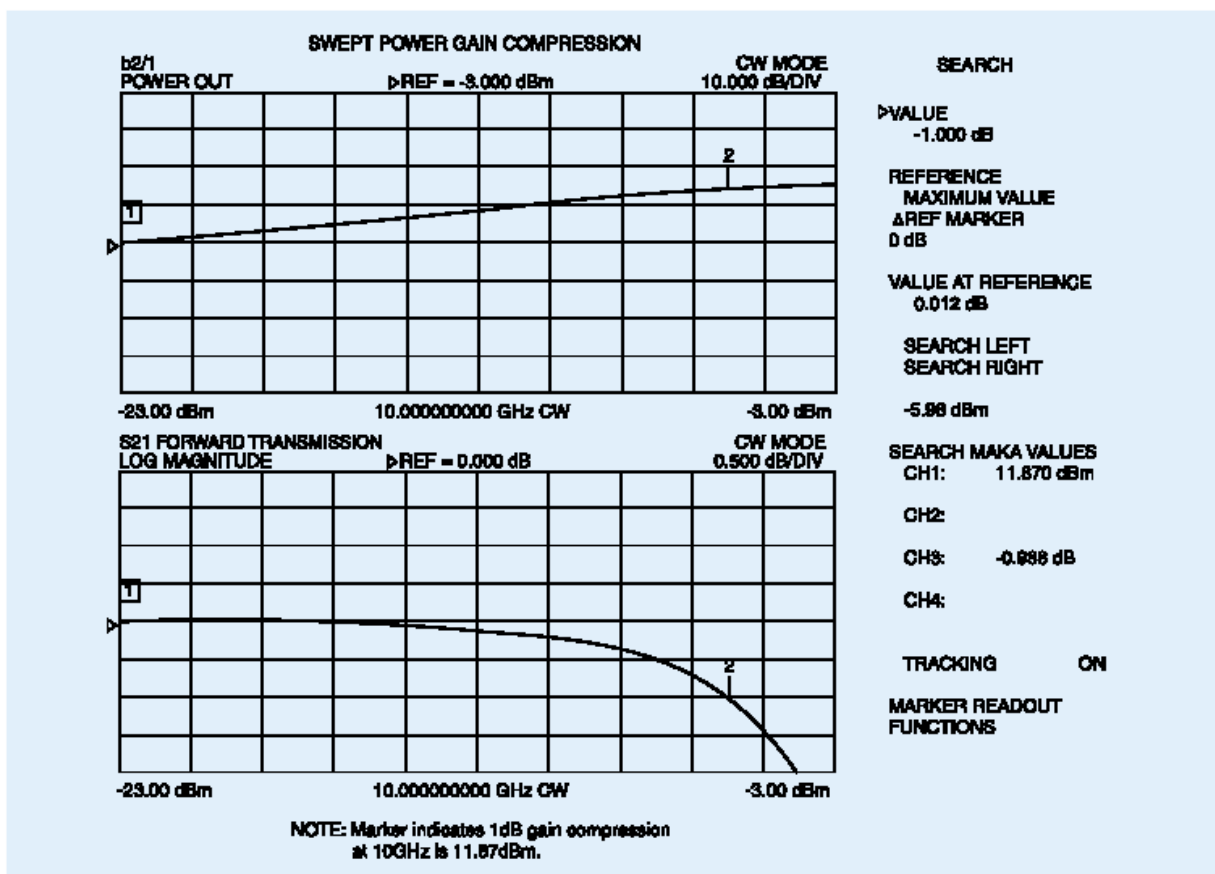


Fig. 11b Potenza d'uscita in funzione della potenza d'ingresso per 10GHz

### Conversion AM/PM

Quando si varia la potenza d'ingresso, come per le procedure precedenti, la risposta in fase dell'amplificatore può cambiare introducendo così una certa distorsione.

Conversion AM/PM serve per misurare l'entità di questa distorsione; l'analizzatore vettoriale permette di sovrapporre i grafici relativi alla potenza d'uscita e della fase (entrambi in funzione della potenza d'ingresso) come si vede nella figura 12.

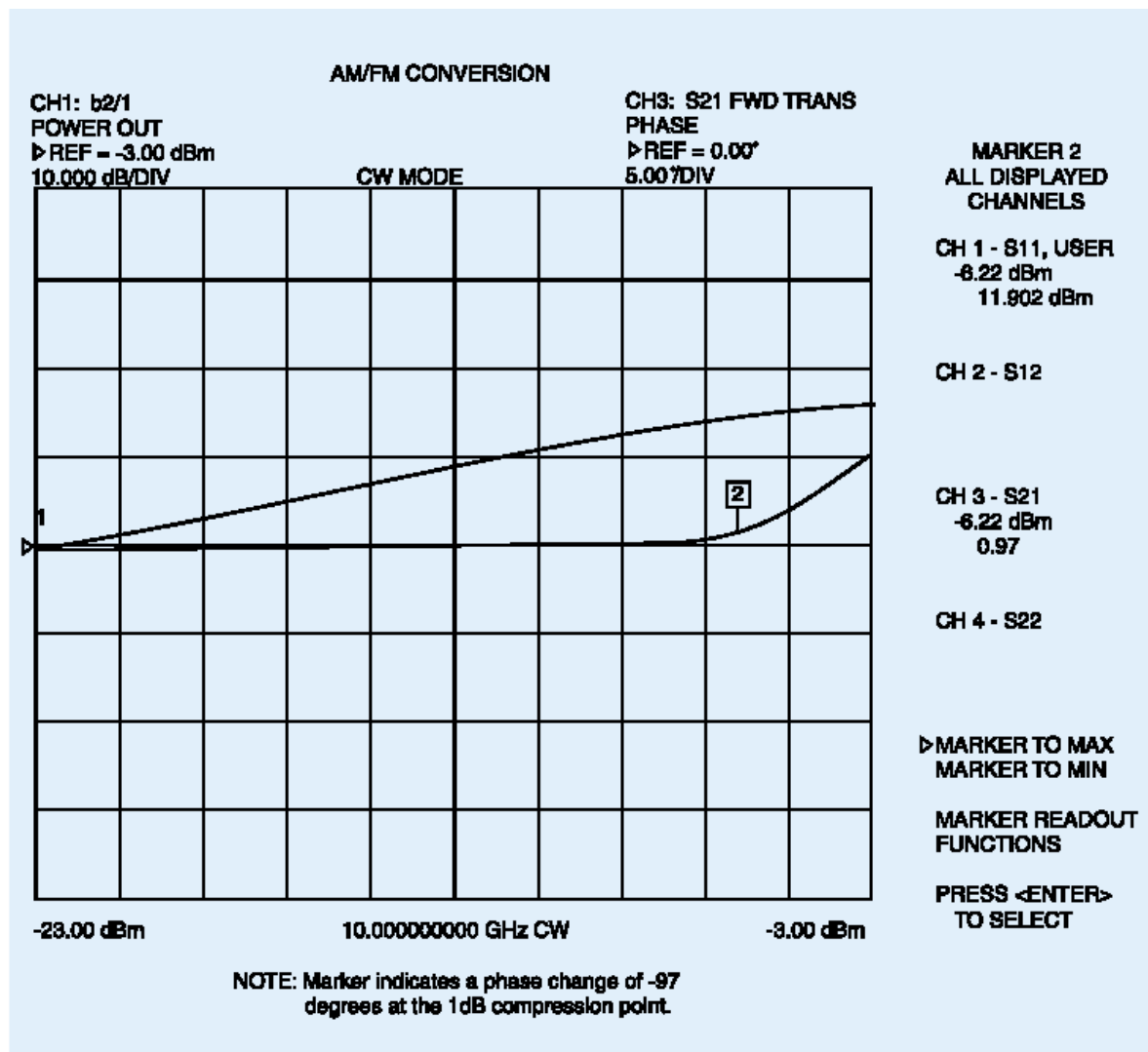


Fig. 12 *Conversione AM/PM*

Considerazioni sull'accuratezza della misura Ci sono pochi fattori che incidono sull'accuratezza della misura del punto di compressione a 1 dB:

- Accuratezza del misuratore di potenza usato nel processo di calibrazione
- Il trasferimento di tale accuratezza al ricevitore che effettua la lettura della potenza assoluta (dBm)
- Metodo usato SFGC o SPGC

Il tempo che richiede un misuratore di potenza a buon mercato per arrivare a regime può essere determinante, in quanto questo può allungare la procedura di calibrazione.

Il VNA si aspetta di ricevere dati corretti dal misuratore di potenza, e generalmente l'accuratezza è dell'ordine del decimo di dB, ma quando si usa un misuratore a buon mercato questa può variare anche del 10% sul range operativo dello strumento.

Il trasferimento dell'accuratezza è collegato al rapporto segnale rumore in ingresso al ricevitore. Un livello di -20 dBm è ideale ma se si testa un amplificatore ad alto guadagno, può diminuire e quindi deve essere misurato.

A questo punto per ridurre il livello di rumore si usa o un filtro a banda stretta in ingresso (VIDEO IF BW) o una media su più misure (AVERAGING).

Ogni volta che si fanno misurazioni di potenza l'incertezza dovuta al disadattamento tra sorgente e sensore porta ad una diminuzione dell'accuratezza.

L'ampiezza dell'incertezza può essere espresso dalla formula:

$$\text{unc}(\text{maximum dB}) = 20 \cdot \log(1 + \rho_1^2 + \rho_2^2)$$

dove  $\rho_1$  e  $\rho_2$  sono i coefficienti di riflessione sulle due porte.

Si possono avere due situazioni di disadattamento:

- Tra la sorgente del VNA e l'ingresso dell'AUT
- Tra l'uscita del AUT e l'ingresso del VNA

Per i VNA a banda larga, che hanno sulle porte accoppiatori direzionali, l'adattamento tra sorgente e carico varia tra 10 e 15 dB (  $\rho = 0,2 \div 0,3$  ). Gli amplificatori a microonde presentano SWR d'ingresso e uscita da 1,5 a 2 (  $\rho = 0,2 \div 0,3$  ), quindi dalla formula sopra si ricava che ogni disadattamento (in ingresso e/o in uscita) porta un contributo pari a  $\pm 0,8$  dB. Questo comporta un errore notevole, che può essere ridotto attraverso l'uso di un buon attenuatore (su ciascuna porta).

Questo aumenta l'adattamento fino a 25 dB, e l'incertezza si riduce a  $\pm 0,2$  dB, che rappresenta un valore accettabile.

Alternativamente può essere usato un isolatore sulle porte, e questo diminuisce oltre che l'incertezza anche le perdite, ma purtroppo limita la banda della misura.