

# ローカル信号源を内蔵した 周波数変換デバイスの 群遅延および位相測定手法 Application Note

## Products:

R&S®ZVA8	R&S®ZVA50
R&S®ZVA24	R&S®ZVT8
R&S®ZVA40	R&S®ZVT20

例えば、衛星の中継局で使用されているような周波数変換デバイスの特性評価では、変換ロスなどの基本パラメータはもとより、特に、デジタル変調信号を扱う場合は、位相や群遅延などの評価が重要になります。こうしたデバイスの場合、内蔵のローカル信号発生器へのアクセスが制限されるケースが多く、デバイスの評価が困難です。

このアプリケーション・ノートでは、R&S®ZVAを使用したローカル信号を内蔵したミキサや周波数変換デバイスの高確度な測定手法について解説しています。この測定手法の要となる技術としては、ネットワーク・アナライザから2トーンの信号を周波数変換デバイスに印加する点にあります。2つの信号の位相差を、入力および出力ポートで測定することで、出力と入力ポート間における群遅延や相対位相の評価が可能になります。

**内 容**

<b>1</b>	<b>はじめに</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>技術的な背景</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>2 トーン信号による測定手法</b> .....	<b>6</b>
3.1	測定のセットアップ .....	7
3.1.1	ハードウェアの設定 .....	8
3.2	測定器の設定 .....	9
3.2.1	低トレース・ノイズを実現するための設定 .....	12
3.3	校 正 .....	15
<b>4</b>	<b>測定結果</b> .....	<b>17</b>
4.1	S パラメータと 2 トーン測定手法の比較 .....	17
4.1.1	フィルタの測定 .....	17
4.1.2	ケーブルの測定 .....	17
4.2	変換デバイスの測定 .....	18
<b>5</b>	<b>Appendix</b> .....	<b>19</b>
5.1	低周波における代替測定手法 .....	19
5.1.1	ZVA24/40/50 の入力周波数が 700 MHz 以下の場合 (アップコンバート) .....	19
5.1.2	ZVA24/40/50 の入力周波数が 700 MHz 以下の場合 (ダウンコンバート) .....	20
5.2	LO 周波数の適切な設定方法 .....	22
<b>6</b>	<b>オーダ情報</b> .....	<b>23</b>

# 1 はじめに

ミキサは、受信機や送信機に使用されている基本的なデバイスの1つであり、特にマイクロ波帯では良く使用されます。ミキサを使用した受信および送信システムで使用されるミキサの条件としては、振幅、位相、そして群遅延などが正しく調整されていることです。特に、位相や群遅延のリニアリティは、データ送信における符号誤り率や、監視システムなどで使用されるフェーズド・アンテナ・アレイ・モジュールのターゲットに対して、高い分解能を実現するための基本的な要素になります。重要な測定は、周波数変換時における群遅延の比測定あるいは絶対値による測定です。

**位相の比測定あるいは群遅延** は、ローカル信号 (LO) にアクセスできる場合は、いわゆるリファレンス、またはゴールデン・ミキサを使用した測定手法により測定が可能です。しかしながら、集積化や小型化の進行により、ローカル信号あるいは基準周波数信号へのアクセスができないケースが多いようです。

このアプリケーション・ノートでは、ローカル信号が内蔵されている場合や、基準周波数信号へのアクセスができないような周波数変換デバイスの測定手法について解説しています。この測定手法の要となる技術としては、ネットワーク・アナライザから2トーンの信号を周波数変換デバイスに印加する点にあります。2つの信号の位相差を入力および出力ポートで測定することで、ネットワーク・アナライザはMUTの入力と出力ポート間における位相の伝達関数や、群遅延を計算で求めることができます。

この測定手法では、内蔵されているローカル信号の周波数偏差がネットワーク・アナライザのレシーバの測定帯域幅 (MBW) に納まっているのであれば、ローカル信号の安定度が測定結果に影響することはありません。

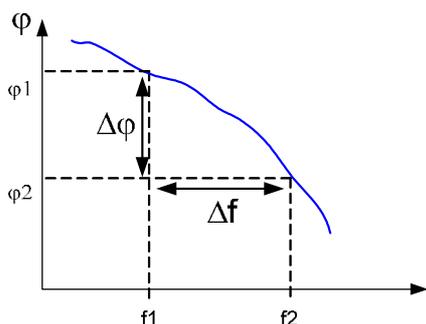
## 2 技術的な背景

群遅延は、位相測定の結果から計算によって求められます。測定手順は、群遅延の定義に対応しており、群遅延  $\tau_{gr}$  は、位相の負の微分係数  $\varphi$  (度) と周波数  $f$  で以下のように表現されます:

$$\tau_{gr} = -\frac{1}{360^\circ} \cdot \frac{d\varphi}{df}$$

測定上の問題により、実際にベクトル・ネットワーク・アナライザは、微分係数を測定しているのではなく、伝送パラメータ  $S_{21}$  の異なる係数を測定しています。この測定では、位相  $\varphi$  の変化がアパーチャと呼ばれる周波数範囲  $\Delta f$  においてリニアリティを保つ場合、測定対象となる群遅延  $\tau_{gr}$  に非常に近い値となります。

$$\tau_{gr} = -\frac{1}{360^\circ} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta f}$$

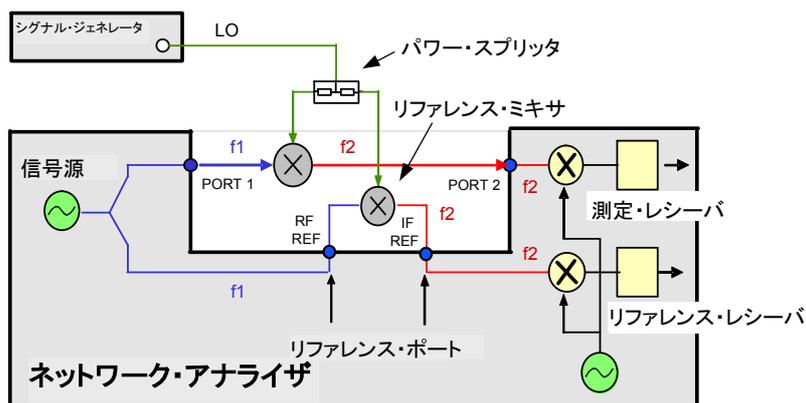


### 位相シフトの定義とアパーチャの関係

上図は、 $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1$  と  $\Delta f = f_2 - f_1$  の項を示しており、位相応答がリニアに減少していることを示しています。つまり、ディレイ・ラインです。

周波数変換デバイス以外の場合、異なる2つの周波数におけるS21測定は連続して行われます。この測定は、フィルタやアンプのような周波数変換をしないデバイスの場合は有効です。

ミキサのような周波数変換デバイスの場合、入力と出力信号の位相差は周波数が異なるため、直接測定することができません。さらに、位相は部品自体の影響だけでなく、ローカル発信器の位相の影響も受けます。そのため、ミキサの位相と群遅延の測定には、いわゆるリファレンス・ミキサ手法が用いられます。リファレンス・ミキサには、MUTと同じローカル発信器を使用してRFまたはIF信号を元の周波数に戻し、ネットワーク・アナライザのリファレンス・レシーバと測定レシーバが測定する周波数を同じにします。さらに、この測定手法は、ローカル発信器の位相の不安定さを打ち消すことができます。



この測定により、ゴールデン・ミキサに対する位相と群遅延が求められ、被測定ミキサ(以下、MUT)の代わりに校正用に測定されます。通常、ゴールデン・ミキサは理想的なデバイスと見なされるので、MUTの測定結果はゴールデン・ミキサに対する位相と群遅延、それぞれの差分になります。

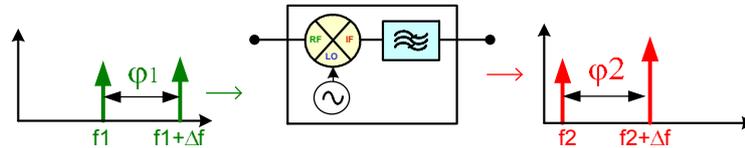
仮にMUTのLO信号にアクセスできない場合、リファレンス・ミキサを使用した群遅延測定は不可能ですが、AMあるいはFM変調信号を使用できます。他の測定方法としては、LO信号の再現を試みることです。この場合、外部シグナル・ジェネレータをリファレンス・ミキサのLO信号として使用し、IF信号の時間に対する位相ドリフトが最小になるようにシグナル・ジェネレータの調整を行います。

これらの測定手法は、ダイナミックレンジ、測定確度、そしてスピードの面で制限があります。さらに、MUTの内部ローカル発信器は非常に不安定な場合が多く、その場合は外部ジェネレータで再現することが困難になります。

R&S ZVA は、こうした測定手法の制限を打ち破る、新しい測定手法を提案します。

### 3 2 トーン信号による測定手法

この新しい測定手法は、オプションZVA-K9として提供され、2トーン信号をMUTに入力して測定します。

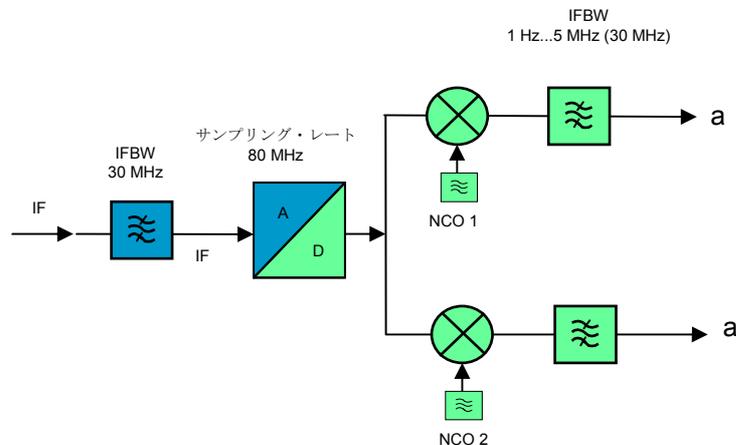


R&S ZVA は、MUTの入力と出力の両キャリア信号の位相差を測定します。これにより、群遅延は以下のように求められます：

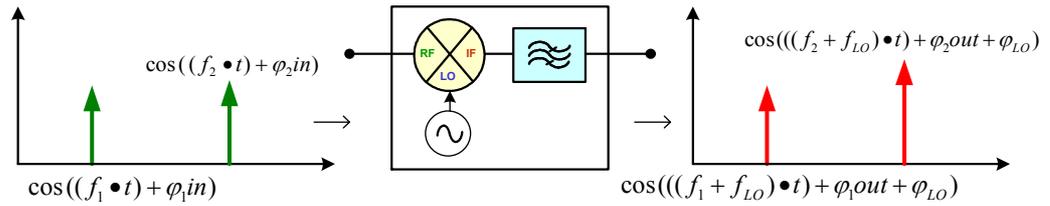
$$\tau = \frac{-1}{360^\circ} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta f} \quad \text{with } \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1;$$

両キャリア信号の周波数の差分  $\Delta f$  をアパーチャと呼びます。

両キャリア信号の位相差を測定するために、R&S ZVAには2つのデジタル・レシーバが、各アナログ・チャンネルに搭載されており、2つの信号を同時に測定することができます。



この測定手法は、MUTの測定にも使用することができます。なぜなら、MUTのローカル信号の周波数と位相が不安定な場合でも  $\Delta\varphi$  を計算することで、その影響を打ち消すことができるからです。



$$\Delta\varphi = (\varphi_{2out} + \varphi_{LO} - \varphi_{1out} - \varphi_{LO}) - (\varphi_{2in} - \varphi_{1in})$$

群遅延以外でも、R&S ZVAはMUTの相対位相を、群遅延の積分や微分の分散により計算でもとめることができます。

### 3.1 測定のセットアップ

以下のアクセサリが必要になります:

ベクトル・ネットワーク・アナライザ

ダイレクト信号源/受信部アクセス  
 周波数変換デバイス測定ソフトウェア  
 ローカル内蔵ミキサの群遅延測定  
 ミキサ群遅延測定用ケーブルセット

ZVA 4ポート あるいは  
 ZVT の 3ポート・モデル  
 ZVA-B16  
 ZVA-K4  
 ZVA-K9  
 ZVA-B9

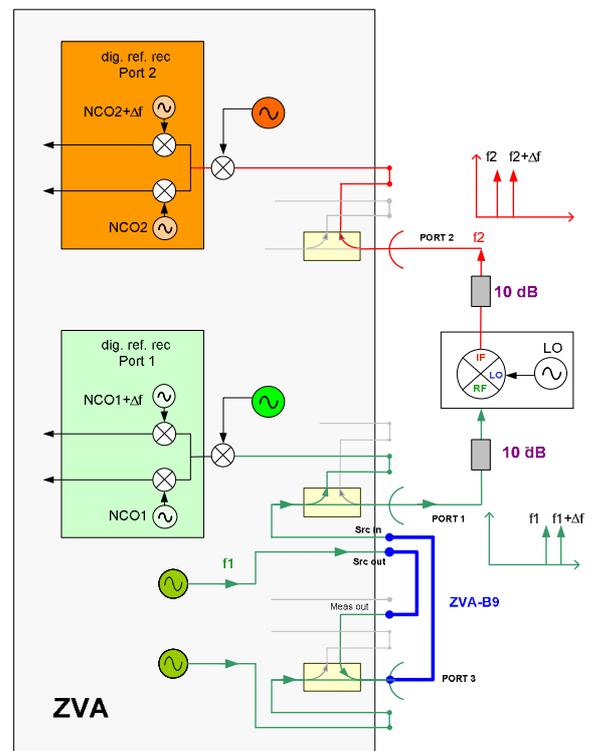
この例では、以下の設定で周波数変換デバイスを測定します:

掃引 RF と IF、固定 LO、 IF=RF-LO

RF 周波数: 5.37 GHz ~ 5.47 GHz

LO 周波数: 4.5 GHz

IF 周波数: 870 MHz ~ 970 MHz



### 3.1.1 ハードウェアの設定

正確な測定を行うために、確度が高く安定した周波数オフセットを持つ2トーン信号を発生させる必要があります。R&S ZVAは、4ポートモデルに内蔵されている2つの信号源を使用することで、こうした信号を発生することができます。2トーンの信号は、外部コンバイナかZVA内部のカプラを使用することで生成することができます。

この場合、以下の接続が必要になります：

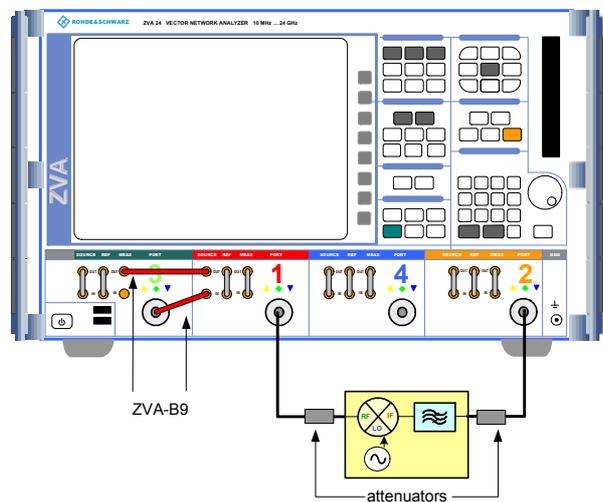
Src out (Port 1) → Meas out (Port 2)

Port 2 → Src in (Port 1)

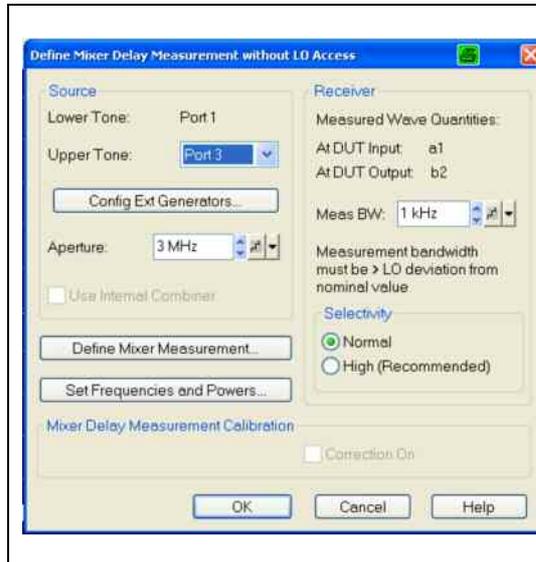
ローデ・シュワルツは、ZVA-B9 ミキサ群遅延測定用ケーブル・セットを各モデルにご用意しております（詳しくはオーダー情報を参照）。

2トーン信号は、ポート1のリファレンス・レシーバを通じてMUTに入力されます。

このセットアップは、IFとRF周波数が700 MHz以上の場合において、全てのZVAモデルに推奨しています。仮に、ZVA24、ZVA40、そしてZVA50のようなマイクロ波のZVAモデルを使用する場合、内部カプラにおける低周波域での減衰がトレース・ノイズの増加を生じさせます。もし、トレース・ノイズが大き過ぎる場合は、Appendixに記載されている設定による測定を推奨します。測定確度を向上させるために、測定面に近い部分にマッチング特性のよい6dB ~ 10dBのアッテネータを、測定ポートの両側に挿入することを推奨します。



### 3.2 測定器の設定

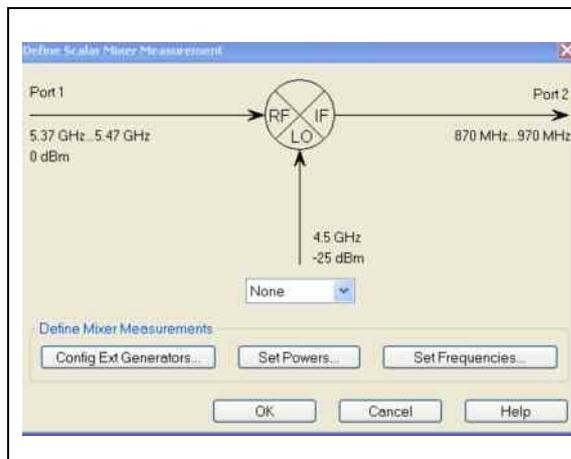


ミキサ測定の構成

以下の手順でメニューを選択してください:

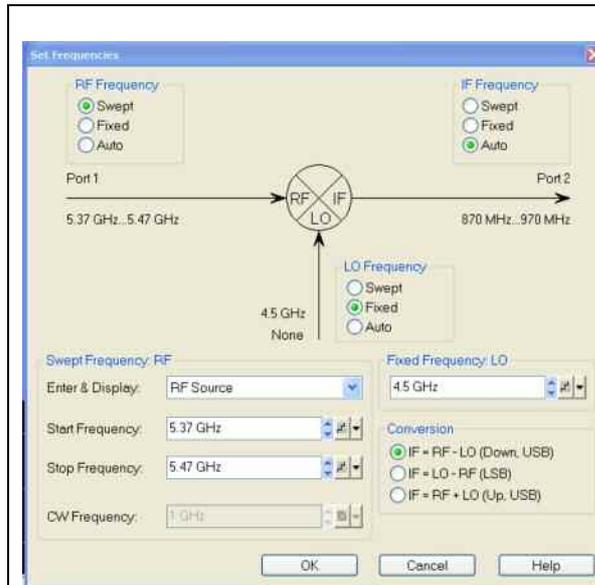
**MODE** - MIXER DELAY MEAS  
- "DEFINE MIXER DELAY MEAS.."

"Define Mixer Measurement"  
を選択



LO source を選択

MUT の LO は内蔵されているので  
"NONE" を選択



周波数と変換タイプを設定

スカラ・ミキサ・ダイアログの “Set Frequencies” を選択

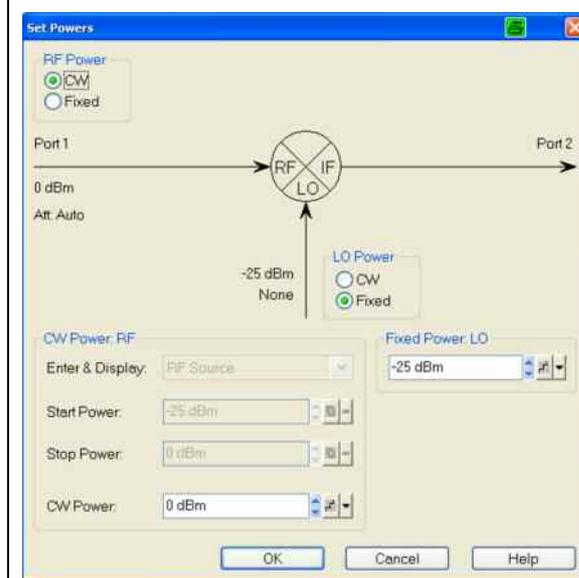
RF frequency: Swept  
LO frequency: Fixed  
IF frequency: Auto

Fixed Frequency LO: 4.5 GHz  
Swept frequency:  
Start 5.37 GHz

Stop 5.47 GHz

Conversion:  
IF=RF-LO

最後に “OK” を押します。



パワー・レベルの設定:

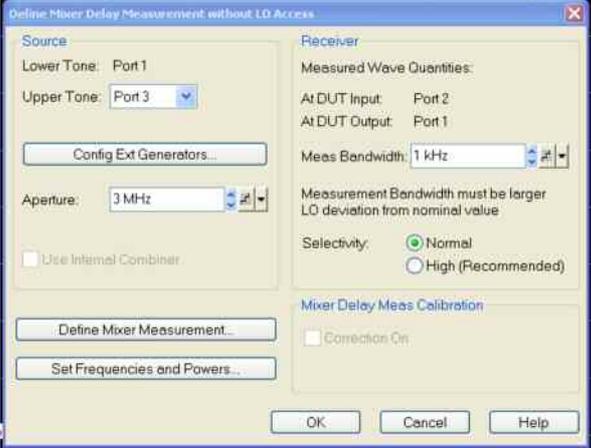
スカラ・ミキサ測定ダイアログの  
“Set Powers” を選択

CW Power: 0 dBm

MUT は、-10 dBm 以下で測定を行う。なぜなら、10 dB アッテネータがポートに接続されているため。

ここでは、0 dBm を選択

“OK” ボタンを 2 回押して設定は終了です。



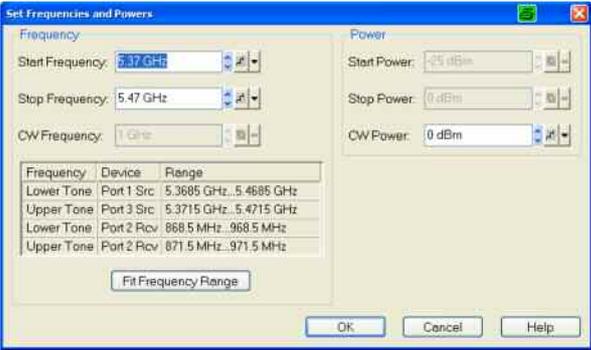
**群遅延の設定:**

Upper Tone: Port 3  
Aperture: 3 MHz  
Meas Bandwidth: 1 kHz  
Selectivity: Normal

外部ジェネレータの使用も可能ですが、あまり推奨しません。なぜなら、周波数と位相の安定度が非常に重要だからです。

アパーチャの設定を3 MHzにします。これは、2つのキャリア信号の周波数オフセット  $\Delta f$  が3 MHzだからです。ミキサの群遅延測定におけるアパーチャは、このダイアログ内のみで変更することができます。

測定帯域幅 (MBW) は、内蔵LO周波数の安定度あるいは偏差よりも広い設定にしてください。測定帯域幅 (MBW) よりも、アパーチャが50倍以上広い場合以外は、SelectivityはNormalで問題ありません。仮にアパーチャが非常に小さい場合は、Selective Filtersを必ず使用してください。



**“Mixer Delay Measurement...”ダイアログで、Set Frequencies と Power を選択**

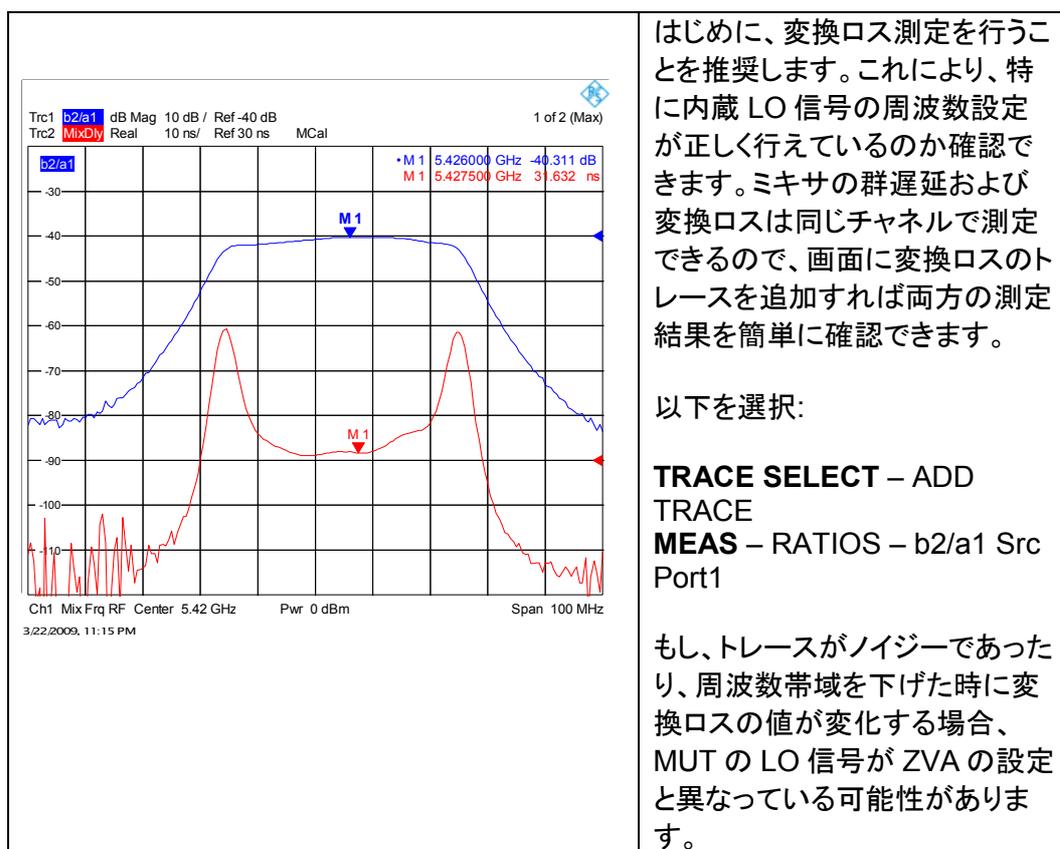
通常、ここでの設定は上記の設定が終了していれば、特に行う必要はありませんが、再度設定に誤りがないか確認します。

設定している周波数が ZVA の周波数範囲を超えている場合、“Fit Frequency Range” を押すことで、自動的に調整してくれます。

最後に “OK” を押します。

再び、“Mixer Delay Measurement”ダイアログに戻ります。

“OK” を押して、mixer group delay をアクティブにします。これにより、アクティブ・トレース の測定パラメータが自動的に群遅延に切り替わります。



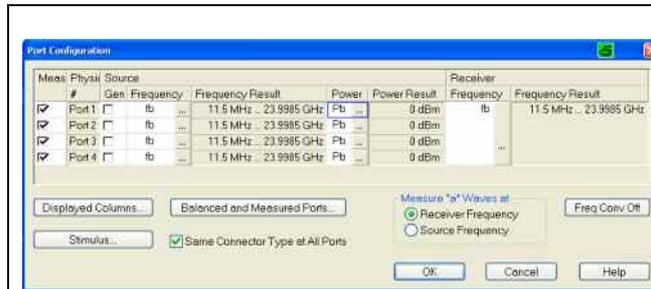
### 3.2.1 低トレース・ノイズを実現するための設定

上記の設定では、MUT の 6dB ロスによる影響として、群遅延のばらつきが 100 ps pK-pk のトレース・ノイズとして現れます。

仮に、MUT がさらに大きなロスを持っているとすれば、トレース・ノイズが増加します。以下のステップは、トレース・ノイズを減少させるのに役立ちます。

#### 3.2.1.1 Source 1 のパワー・レベルを増やす

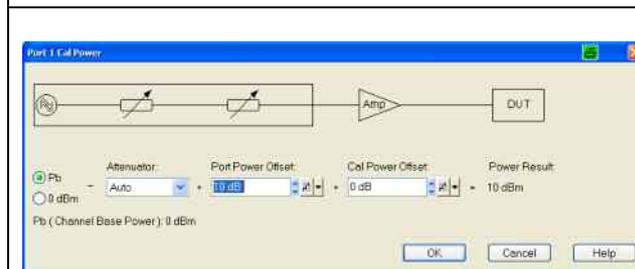
ZVA-B9 ケーブル・セットを使用して、ポート 1 の信号源をカプラ、あるいはポート 2 のブリッジに Meas Out を経由して入力します。カプラあるいはブリッジのロスにより、信号は約 10dB 減衰します。マイクロ波帯 ZVA の場合、700 MHz 以上の周波数では約 10dB 減衰し、低周波ではさらに減衰します。つまり、信号源 1 からのキャリア信号のパワーは、信号源 2 からのキャリア信号よりも 10dB 低くなります。信号源 1 のパワーを増加することで、トレース・ノイズを改善することができます。この設定は、“Port Configuration”で行えます



以下を選択します:

**MODE – Port Config...  
Pb... (from Port 1)**

ポート 1 の設定ダイアログがポップアップします。



“Port Power Offset” として ZVA8 に 20dB、そして、他の ZVA モデルには 10 dB を設定します。

これにより、信号源 1 のパワーは、信号源 2 のパワーよりも常に 10dB 高くなります。

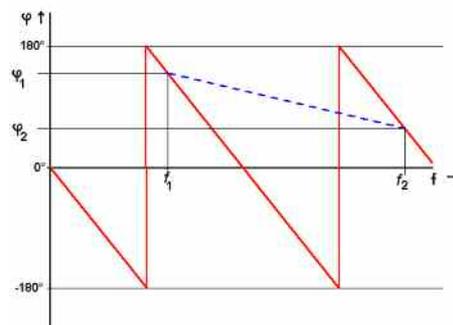
“OK” を押して終了です。

### 3.2.1.2 アベレージングの追加

IF 帯域幅を小さくすることで、トレース・ノイズは減少しますが、内蔵 LO 信号が不安定な場合、測定結果は悪くなります。アベレージングを増やすことで、帯域幅を減らすことなく、トレース・ノイズを改善することができます。

### 3.2.1.3 アパーチャの増加

アパーチャを増やすことで、トレース・ノイズを改善することができます。しかしながら、制限もあります。アパーチャを増やすということは、2 トーン信号間の位相差も増加することになります。この位相差は、 $180^\circ$  を超えてはいけません。それを超えると、測定結果が誤ったものになります。



$$\Delta\varphi(f) = -360 \cdot \Delta f \cdot \tau$$

$$\Delta\varphi_{\max} = 180^\circ \quad \Rightarrow \Delta f_{\max} = \frac{0.5}{\tau}$$

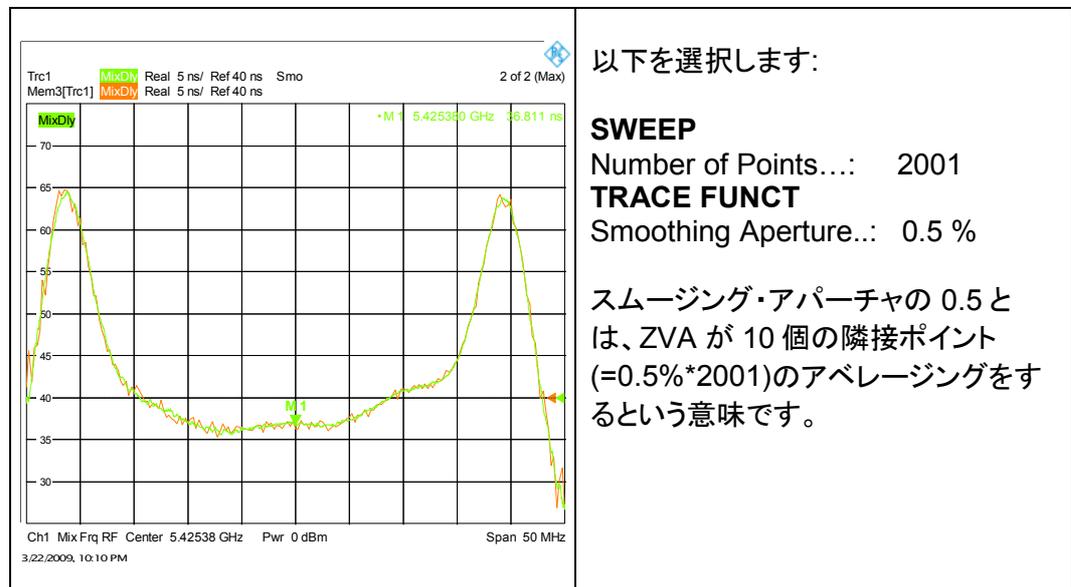
群遅延が大きくなるにつれ、最大アパーチャは小さくなります。MUTが100nsの場合、アパーチャの最大値は5 MHzに制限されます。最適なアパーチャの設定については、

アプリケーション・ノート1EZ 35 “Group and Phase Delay Measurements with Vector Network Analyzer ZVR” を参照してください。

### 3.2.1.4 測定ポイントの増加とスムージングの適用

アパーチャの増加は、MUT の群遅延を制限するだけでなく、特に MUT の群遅延が周波数によって変化するような場合、こうした重要な情報が観測できなくなります。スムージングと合わせて、測定ポイントを増加することは、トレース・ノイズが改善されるだけでなく、こうした情報の欠落をも防ぐことができます。スムージングは、アベレージよりもトレース・ノイズを改善する場合があります。

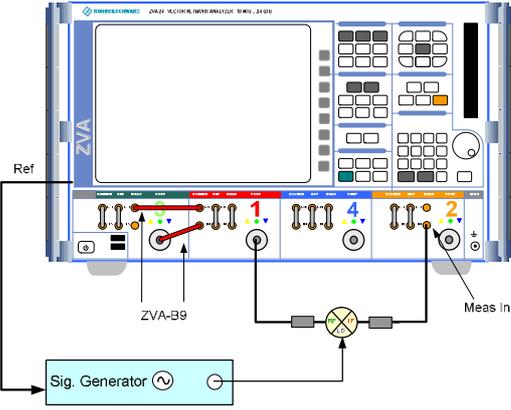
測定例:



### 3.3 校正

校正を理想的、あるいは既知の校正ミキサを使用して行います。既知の校正ミキサを入手するためには、ZVA-K5を使用して事前に特性付けを行います。ZVA-K5は、ミキサの絶対位相や群遅延測定を、ベクトル誤差補正によって行うことができるオプションです。

絶対値の群遅延は不要なケースがありますが、相対群遅延や群遅延のリプル値は必要です。これらについては、リニアな位相と、フラットな群遅延特性を持つゴールデン・ミキサを使用した校正で十分です。

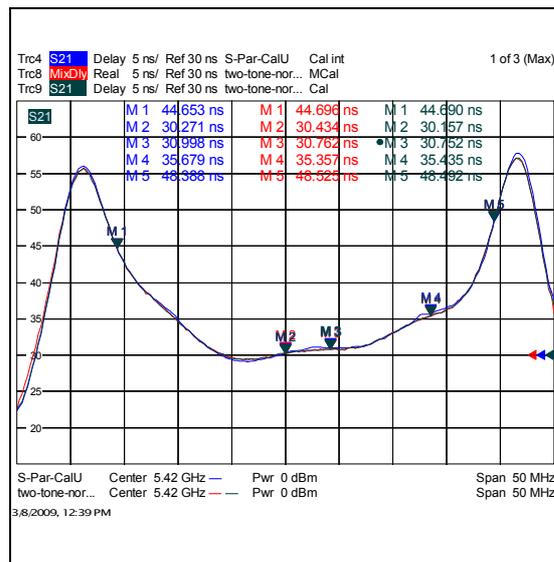
	<p>校正を開始する前に、適切なアパーチャを設定します。校正の途中でアパーチャを変更すると、測定確度が悪くなります。</p> <p>ゴールデン・ミキサを MUT の代わりに接続します。</p> <p>LO 信号として外部信号源を使用します。周波数を設定し、ZVA の LO 周波数をロックすることで、狭帯域の使用が可能になります。</p> <p>ZVA を外部信号源にロックするために、ケーブルでリファレンス入力を接続し、以下の設定を行います：</p> <p><b>System Config - External Reference</b>  <b>PWR BW AVG</b>      Meas Bandwidth: -100 Hz</p> <p>AVERAGE FACTOR: 10      AVERAGE ON</p>
	<p>以下の設定を行います：  <b>MODE - MIXER DELAY MEAS - CAL MIXER DELAY MEAS...</b></p> <p>校正ダイアログがポップアップします。</p>

	<p>群遅延の絶対値測定では、校正ミキサの情報を、“Load” ボタンを使用して読み込む必要があります。</p> <p>相対群遅延では、0 s のディレイ値を持つデータ・セットを“Zero Delay” ボタンを使用して読み込みます。</p> <p>以下の設定を行います： Take Cal Sweep</p> <p>“finished” のメッセージが表示されるまで待ち、ダイアログを閉じます。必要であれば、校正データを“Save” や“Load” ボタンを使用して保存あるいは呼び出します。</p>										
<p>Trc1 <b>MixDly</b> Real 100 ps/ Ref 0 s <b>MCal</b></p> <table border="1" data-bbox="405 1115 922 1263"> <tr> <td><b>MixDly</b></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>400</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	<b>MixDly</b>					400					<p>MCAL がトレース・ラインに表示されているのは、そのトレースに対して校正が行われていることを示しています。</p>
<b>MixDly</b>											
400											

## 4 測定結果

### 4.1 Sパラメータと2トーン測定手法の比較

#### 4.1.1 フィルタの測定



青:

フル 2 ポート校正実施後の S パラメータ測定手法での結果

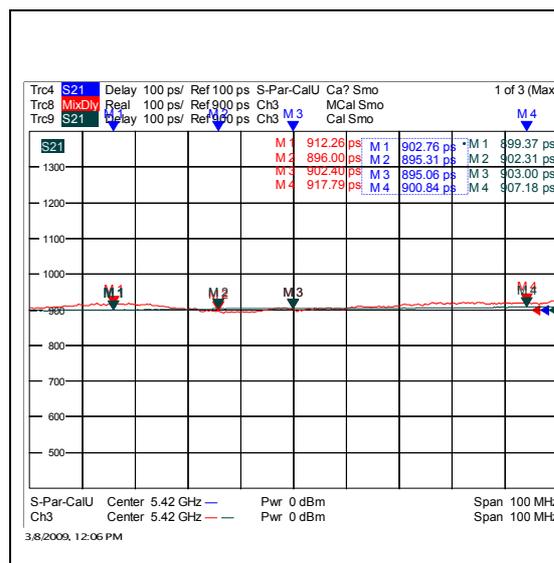
赤:

2 トーン測定手法でノーマライズ実施後の結果

緑:

S パラメータ測定手法でノーマライズ実施後の結果

#### 4.1.2 ケーブルの測定



青:

フル 2 ポート校正実施後の S パラメータ測定手法での結果

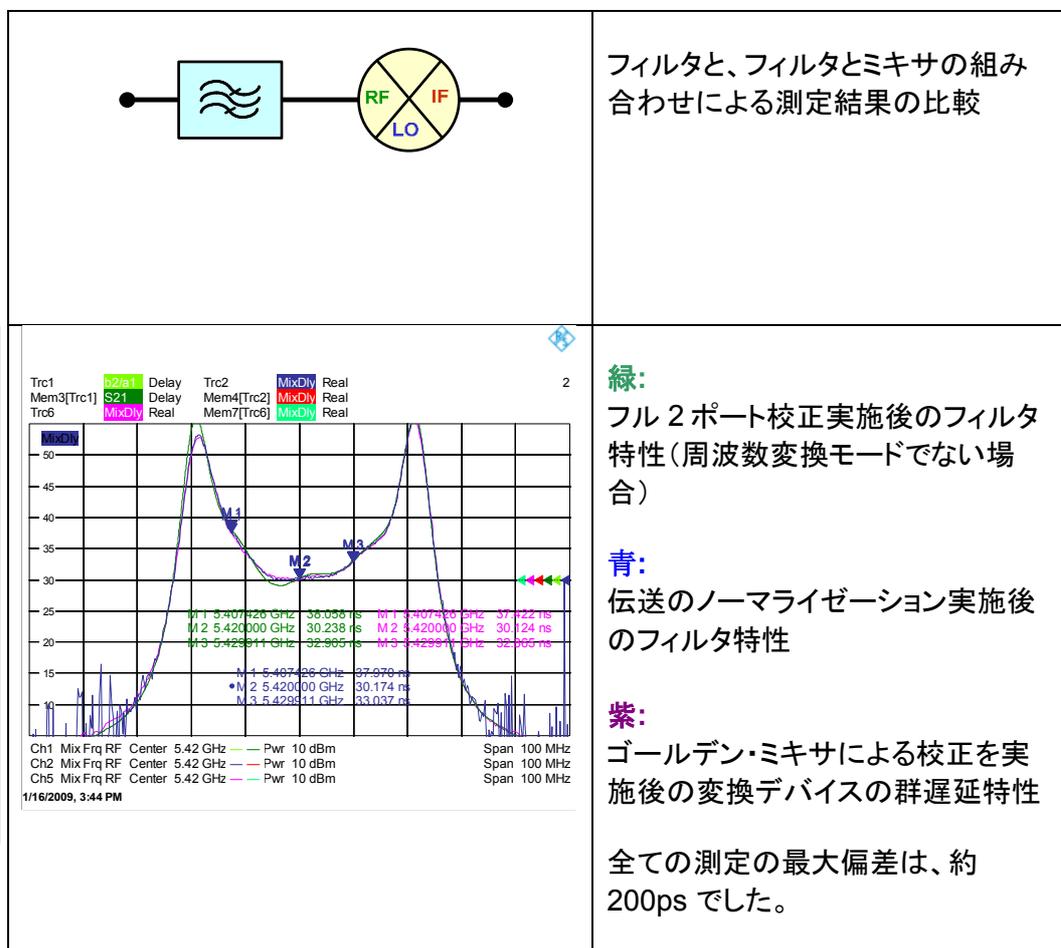
赤:

2 トーン測定手法でノーマライズ実施後の結果

緑:

S パラメータ測定手法でノーマライズ実施後の結果

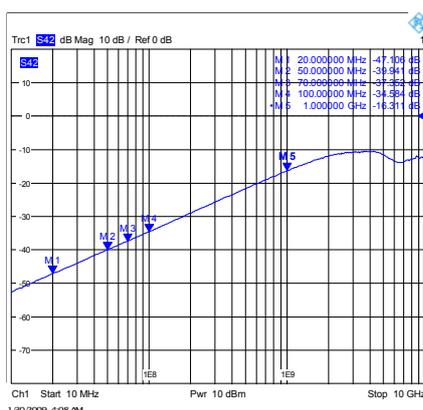
## 4.2 変換デバイスの測定



## 5 Appendix

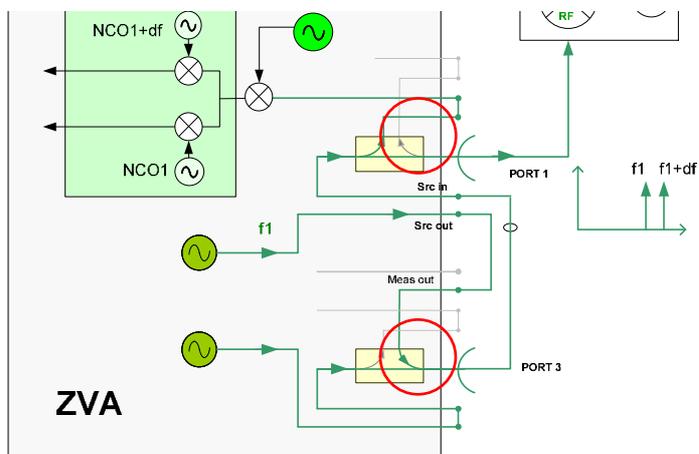
### 5.1 低周波における代替測定手法

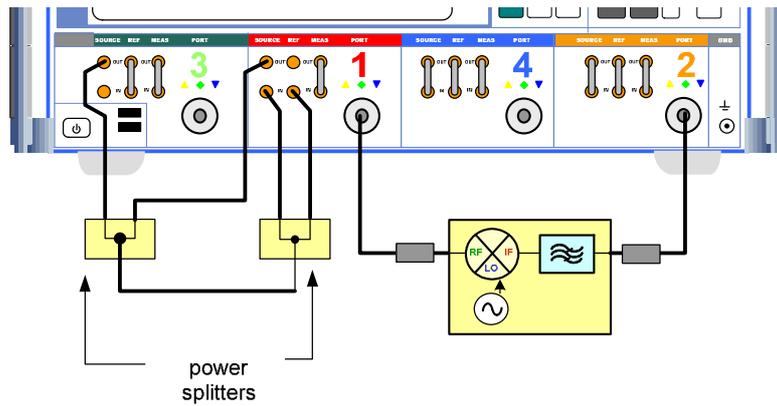
マイクロ波帯モデル、ZVA24、ZVA40 そして ZVA50 のカプラのロスを示します。



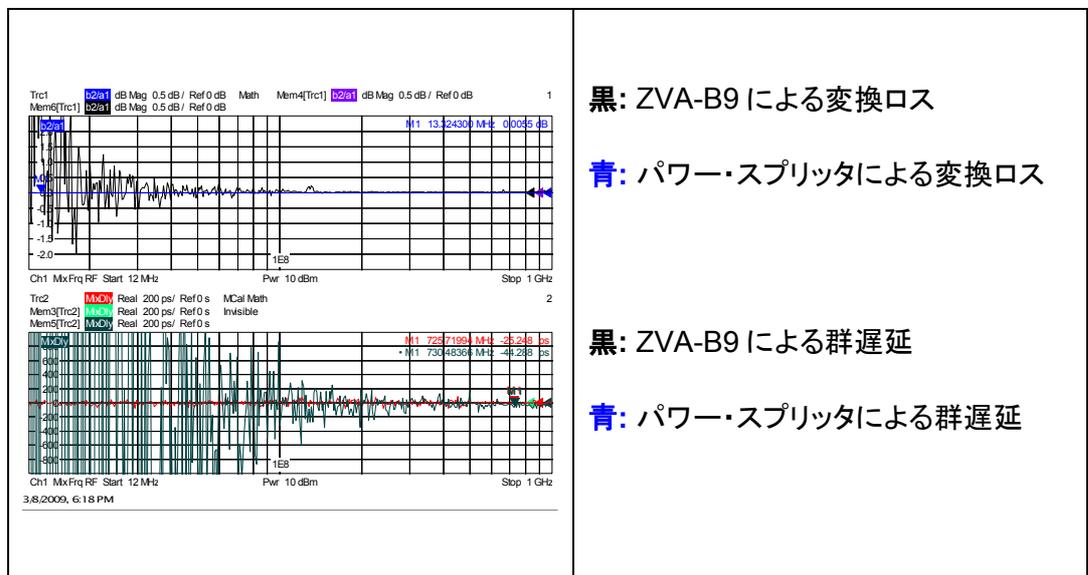
#### 5.1.1 ZVA24/40/50 の入力周波数が 700 MHz 以下の場合 (アップコンバート)

この場合、トレース・ノイズが極端に悪くなります。理由としては、ポート 1 からの信号がコンバイナとして使用しているポート 3 のカプラにより減衰するためです。例えば、100 MHz においては、約 35 dB にもなります。さらに、2 トーン信号も、ポート 1 の a1 レシーバで測定される前に、再び減衰 (e.g. 35 dB@100 MHz) されてしまうからです。

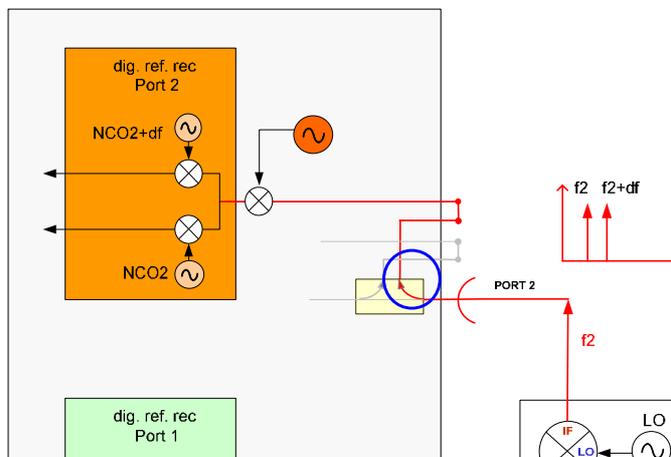




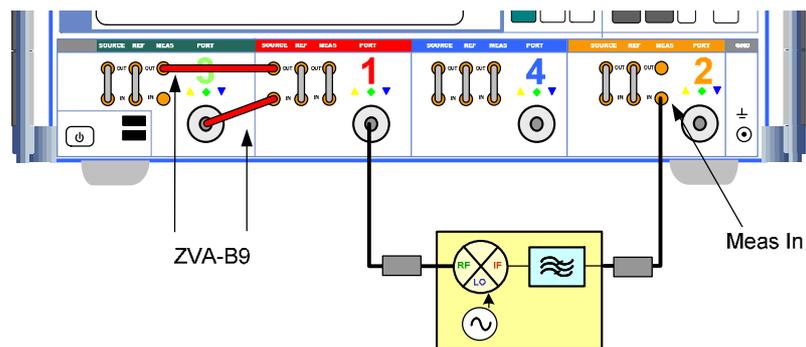
ZVA-B9 の代わりにパワー・スプリッタを使用



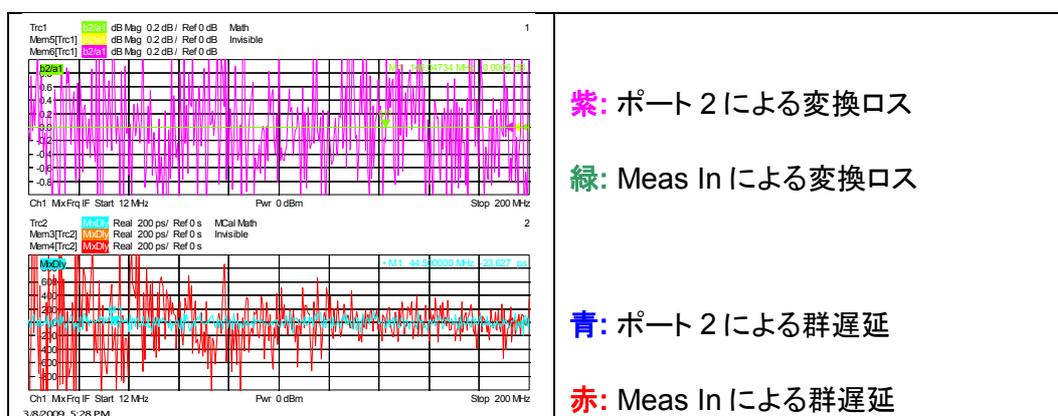
### 5.1.2 ZVA24/40/50 の入力周波数が 700 MHz 以下の場合 (ダウンコンバート)



ポート 2 におけるカプラのロスを防ぐために、ダイレクト・レシーバ・アクセスを使用します。MUT からの出力を、ポート 2 の Meas In に接続することでカプラのロスを防ぎます。



## ポート 2 の代わりに Meas In を使用することでトレース・ノイズを改善



## 5.2 LO 周波数の適切な設定方法

新しいチャンネルを使用します

以下の設定を行います:  
**CHAN SELECT – ADD CHANNEL+TRACE+ DIAG AERA**  
**MEAS - WAVE QUANTITIES - b2 Src Port 1**  
**MODE – PORT CONFIG**

ポート 1 の fb...(Frequency) を押します

MUT の通過帯域内で、RF 周波数を一定値に設定します。

この例では 5.42 GHz です。

“OK” を押して終了します。

	<p>IF 周波数に対して、ステイミュラスの中心値を設定します。</p> <p>“Stimulus” を押します。</p> <p>“All Receivers” を選択します。</p> <p>“OK” を 2 回押します。</p>
	<p>スパンと測定帯域を狭くします。</p> <p><b>SWEEP - SPAN 100 kHz</b></p> <p><b>Pwr BW AVG -</b> MEAS BANDWIDTH: 1 kHz</p> <p><b>SEARCH - MARKER</b> TRACKING - SEARCH MAX</p> <p>マーカは自動的に、最大値を検索します。マーカの値は、ダウン・コンバートされた IF 周波数を示します。</p> <p>LO は RF-IF LO = 5.42 GHz-920.008 GHz <b>LO = 4.499992 GHz</b></p>

## 6 オーダ情報

製品名	型番	オーダ番号
ミキサのベクトル測定 <sup>1)</sup>	ZVA-K5	1311.3134.02
ローカル内蔵ミキサの群遅延測定 <sup>1)</sup>	ZVA-K9	1311.3128.02
周波数変換デバイス測定ソフトウェア	ZVA-K4	1164.1863.02
ZVA-K9 用セミリジットケーブル	ZVA-B9/02	1305.6541.02
ZVA-K9 用セミリジットケーブル 2.92mm	ZVA-B9/03	1305.6541.03
ミキサ群遅延測定用ケーブルセット	ZVA-B9	1305.6541.04

<sup>1)</sup> ZVA-K4 が

## ローデ・シュワルツについて

Rohde & Schwarz グループ(本社:ドイツ・ミュンヘン)は、エレクトロニクス分野に特化し、電子計測、放送、無線通信の監視・探知および高品質な通信システムなどで世界をリードしています。創業 75 年、世界 70 カ国以上で販売と保守・修理を展開している会社です。

### 本社/東京オフィス

〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1  
住友不動産西新宿ビル 27 階  
TEL : 03-5925-1288/1287 FAX : 03-5925-1290/1285

### 神奈川オフィス

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区  
新横浜 2-13-13 KM 第一ビルディング 8 階  
TEL : 045-477-3570 (代) FAX : 045-471-7678

### 大阪オフィス

〒564-0063 大阪府吹田市  
江坂町 1-23-20 TEK 第 2ビル 8 階  
TEL : 06-6310-9651 (代) FAX : 06-6330-9651

### サービスセンター

〒330-0075 埼玉県さいたま市浦和区  
針ヶ谷 4-2-20 浦和テクノシティビル 3 階  
TEL : 048-829-8061 (代) FAX : 048-822-3156

E-mail : [info.rsjp@rohde-schwarz.com](mailto:info.rsjp@rohde-schwarz.com)

URL : <http://www.rohde-schwarz.co.jp>

Certified Quality System  
**ISO 9001**  
DQS REG. NO 1954 QM

Certified Environmental System  
**ISO 14001**  
DQS REG. NO 1954 UM

おことわりなしに記載内容の一部を変更させていただくことがありますので、あらかじめご了承ください。