

1. はじめに

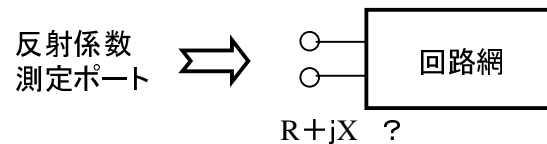
近頃安価なベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)がいくつか販売されています。そのようなVNAの一つを入手しました。回路図もHPで公開されています。安価ゆえの不足の分もありますが、入門用には適当だと思います。ネットアナの基本的動作説明、使用方法などはインターネットで検索すればたくさん出てきます。今回はリターン・ロス・ブリッジを装着している、比較的周波数レンジの低め(<1GHz)のVNAについて動作を調べてみました。私個人の頭の整理のために書いたレポートです。私はVNAについてはシロート同然ですので、勘違いや不正確な点があるかもしれません。その時はご容赦ください。

2. ベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)とは

基本的に回路網に対して、信号の入射、反射、伝送の量を測定する機器です。VNAでは振幅特性とともに位相特性も測定します。

そのような量の測定を行うと、結果として次のような測定結果が得られます。これは一例で、もっと多岐にわたる測定が可能です。周波数を指定、またはスイープして広帯域に測定できます。

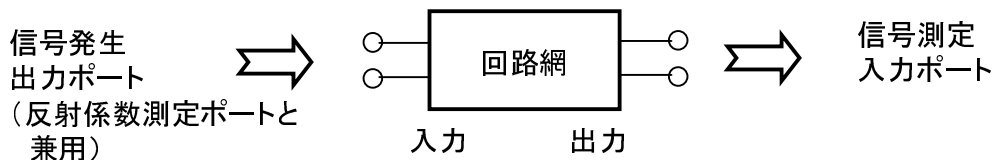
1) 被測定回路のインピーダンスが測定できます。



たとえば、無線のアンテナの給電部分のインピーダンス、アンプの入出力インピーダンスなどです。

2) 回路網のゲインや位相特性が測定できます。

回路網の入出力のゲイン、位相差など。具体的にはアンプのゲイン/位相特性、フィルタの周波数特性 等です。



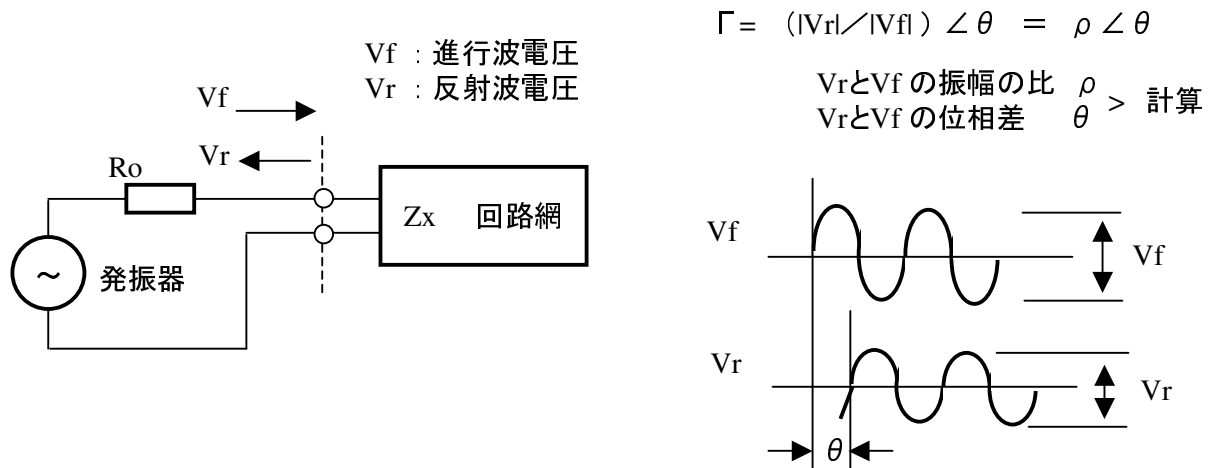
3. 測定のしくみ

3.1 インピーダンス測定

回路網の端子に信号を印可しその進行波と反射波の、振幅と位相を測定することで反射係数 Γ (ガンマ)が得られます。そしてインピーダンスの値 Z_x は Γ から次のように計算されます。インピーダンスは複素数で表されるので、計算結果として抵抗分 R とリアクタンス分 jX となります。

$$\underline{Z_x} = R_o * \left[\frac{(1+\Gamma)}{(1-\Gamma)} \right] = R + jX \quad (\text{付1. 参照})$$

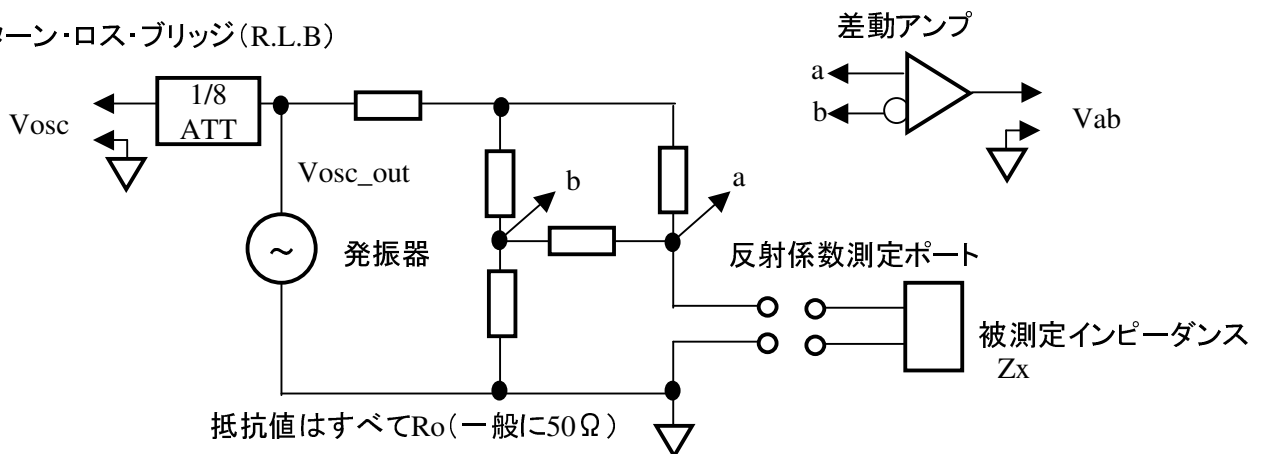
ただし、回路網の端子にオシロスコープなどを接続しても、反射波と進行波の合成された一つの波形しか観測できません。それではどうやって反射波と進行波の振幅比と位相差を測定するのでしょうか。



3.1.1 反射係数の測定方法

反射係数の測定は一般に数kHz～数GHz(max3GHz位)の周波数範囲では、リターン・ロス・ブリッジ (R.L.B) が、また、もっと高い周波数では方向性結合器(Directional Coupler)が使用されることが多いようです。いずれにしても結果的に進行波と反射波を分離した形で測定します。ここではR.L.Bを使用した場合を考えます。

リターン・ロス・ブリッジ(R.L.B)



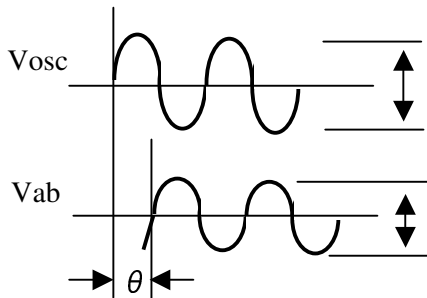
$$V_{ab} = V_{osc} * \left[\frac{(Z_x - R_o)}{(Z_x + R_o)} \right] = V_{osc} * \Gamma \quad (V_{osc} = V_{osc_out} / 8 \text{ とする})$$

$$\Gamma = (V_{ab} / V_{osc})$$

V_{osc} の振幅値は一定なので、 V_{ab} を測定すると Γ を測定したことになります。

ここで Z_x がリアクタンスを含む場合、 V_{osc} と V_{ab} は図のように振幅も位相も違ってきます。

$$\Gamma = \rho \angle \theta \quad \rho = (|V_{ab}| / |V_{osc}|) \quad \theta = \text{測定値}$$



3. 1. 1 項の進行波と反射波をブリッジで分離して、測定できるようにしたものです。

3. 1. 2 実際の測定方法

R.L.Bを使用して、 $|V_{osc}|$ 、 $|V_{ab}|$ 、 θ の3つの値を測定できれば反射係数 Γ が解り、その Γ からインピーダンスが算出できることがわかりました。

$|V_{osc}|$ や $|V_{ab}|$ はRF電圧計を使用すれば測定できます。問題は θ です。2つの高周波の位相差を必要な精度で測定しなければなりません。周波数は1GHzに及ぼうという2つの高周波の位相差です。多く使用されている方法に次のようなものがあります。

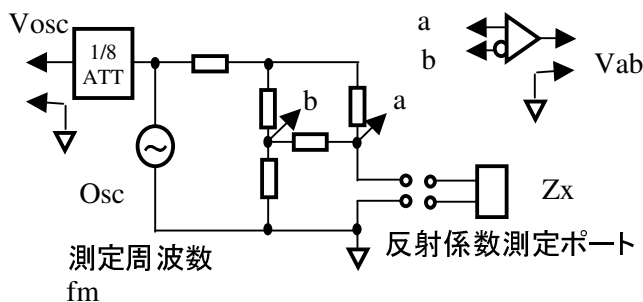
1、周波数変換用発振器を用い、ミキサを使用して測定周波数を低い周波数に変換しその位相差を測定します。

2) サンプラを使用して、測定周波数を低い周波数に変換しその位相差を測定します

2)はサンプリングオシロスコープとして高い周波数(>GHz)の波形を観測するのに応用されています。

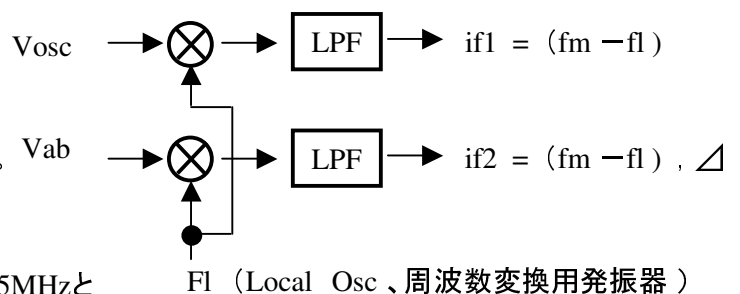
ここでは1)の方法を見てゆきましょう。

知りたいのは $|V_{osc}|$ と $|V_{ab}|$ の振幅比 ρ 、 V_{osc} と V_{ab} の位相差 θ です。

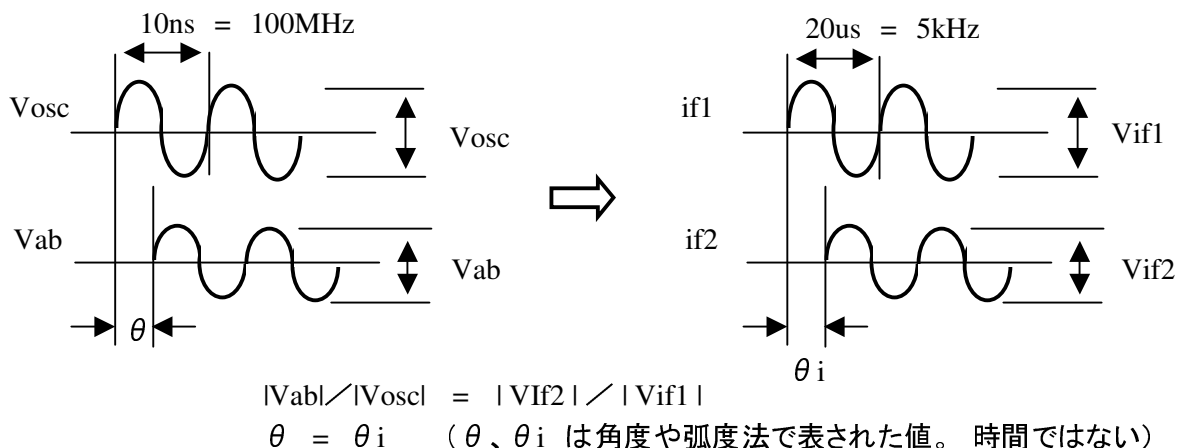


- Oscは測定周波数です (f_m)。
- 従って V_{osc} 、 V_{ab} の周波数もOscと同じ周波数です。
- Z_x にリアクタンス分があると、 V_{osc} と V_{ab} の間には位相差が発生します。

- V_{osc} 、 V_{ab} を右のように周波数変換します。
 - 変換後の信号をif とすると、if は図の様な周波数になります。(次ページ)
- 仮にOscを100MHzとした場合、 f_l を99.995MHzとすると、ifは5kHzとなります。



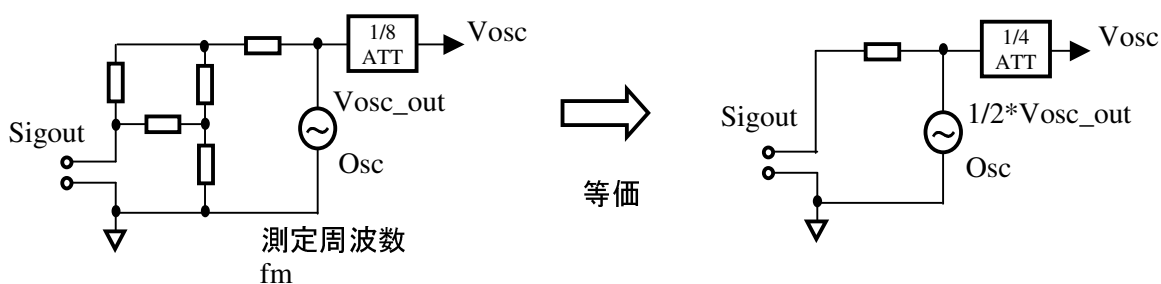
V_{osc} , V_{ab} , V_{if1} , V_{if2} の関係は図のようになります。
 (V_{osc} を100MHz、 f_1 を99.995MHzとした場合、 f_i は5kHzとなります)。



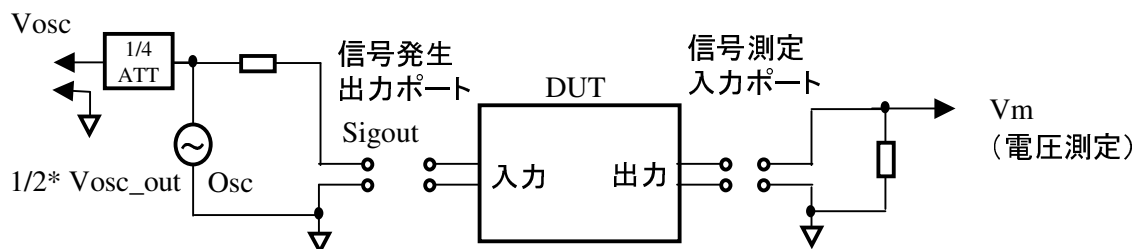
このように周波数変換しても元の信号間の振幅比、位相差は保存されるので、測定周波数でそれらの項目を直接測定するより、 f_i の周波数に変換した信号を測定した方が精度はずっと高くなります。
 f_i 周波数を数kHz～数10kHzにすれば、 f_1, f_2 をA/Dコンバータに入力してデジタル化し、マイコンなどで計算できるようになります。波形をデジタル化してしまうと、振幅の比較や位相差などはプログラムで求めることができます。測定値からインピーダンスに変換したりすることは容易です。
 また、 V_{osc} , f_1 に1chipのシンセサイザやPLLを使用すれば、クロックの水晶発振器と同等の精度で、且つ高分解能の信号が得られます。ハードウェアの極端な減少が可能です。

3.2 通過特性

入力と出力を有した回路の通過特性を測定する場合は、R.L.Bの測定端子を信号の出力端子として信号発生出力ポートとし、別に測定端子を設けて信号測定入力ポートとして入出力の関係を測定します。信号測定入力ポートは V_{osc} との振幅/位相関係を測定するので、 f_1 と混合して f_i 周波数に変換されます。 f_i 信号をA/Dし、CPUで V_{osc} の f_i 信号と比較されます。



通過特性の測定



通過特性では

1)ゲインは $|V_m|$ と $|V_{osc}|$ の比を計算。

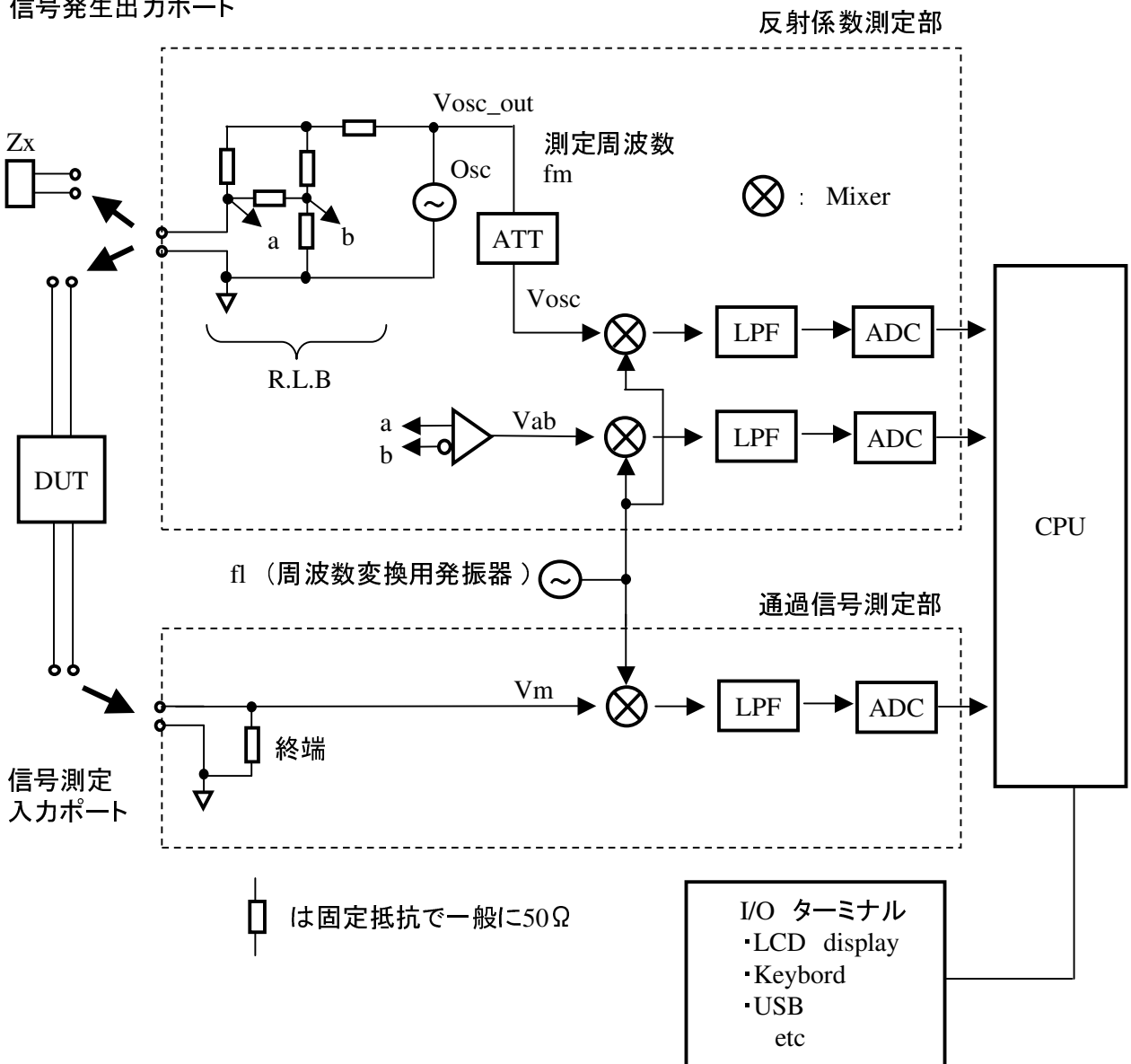
2)位相特性は V_m と V_{osc} の位相差を算出。

これらをプログラムで計算すれば測定結果が得られます。振幅比や位相差を求めるのは、反射係数の測定の時と同様に行えば良いでしょう。

4. VNAの全体ブロック図

まとめると次のようなブロック図となります。

反射係数測定ポート／
信号発生出力ポート



5. キャリブレーション

多くの場合測定を行うためにはポートとDUTの間をケーブルで接続する必要があります。ケーブルにはロスもあるし、長さによって位相も変化します。その分を補正しないと正確な測定ができません。したがって使用するケーブルを接続した状態でキャリブレーションを行います。ケーブルは特性インピーダンス 50Ω でロスの少ないものを使用します。

キャリブレーションの内容としては次のようです。

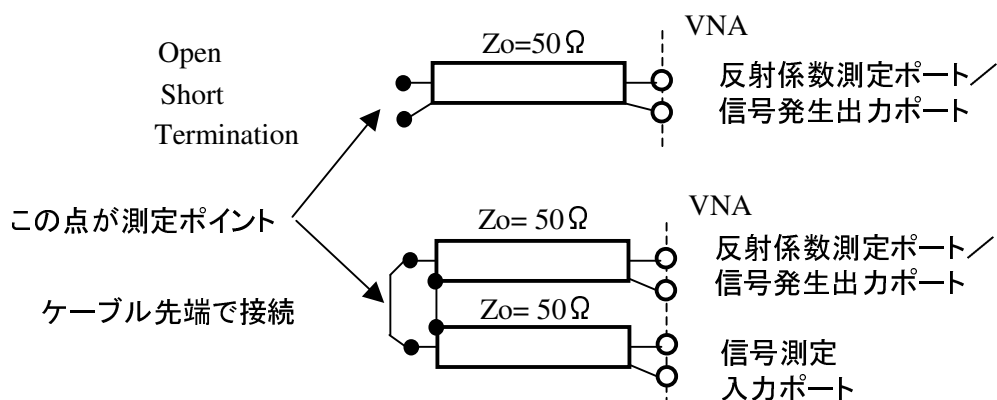
- ・ケーブル先端open
- ・ケーブル先端short
- ・先端ターミネーション(一般に 50Ω 接続)
- ・入出力ポートの接続

キャリブレーションを行うことによってケーブル先端においての測定が正しく行えます。

ケーブルを交換した場合は、再度キャリブレーションが必要です。

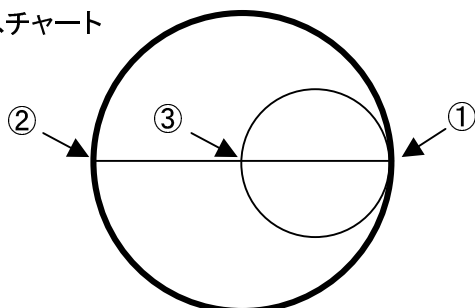
測定周波数範囲を広がる方向に変更した場合も、再度キャリブレーションが必要です。

VNA内部ではキャリブレーションの項目ごとに、内部の計算に必要な補正係数などを最適化しています。



正しくキャリブレーションができれば、インピーダンス測定を行った時にスミスチャートで表示では測定周波数範囲内で図の位置に測定値が集中します。正しくキャリブレーションできたかどうかのチェックになります。コネクタの接触不良によるキャリブレーション不良に注意のこと。

スミスチャート



Open	①	∞
Short	②	$0 \pm j0$
Termination	③	$50 \pm j0$

キャリブレーションしたケーブルの先端が測定ポイントなので、DUTにケーブルがついている場合はDUTケーブルを含めた測定値となってDUT本体の値ではありません。DUT本体のみの測定値が必要な時は、スミスチャートなどを使用してDUTのケーブルをキャンセルするような補正が必要です。

6. その他

- 1) 昔は何百万もしたVNAが数千円で入手できるようになりました。高価なVNAはむしろ高い周波数に於いて(～数十GHz)有用な測定器で、専用のコネクタが必要だったり使用のノウハウなどが必要で且つ高価なのでアマチュアには縁遠いものでした。
安価なVNAはもちろん簡易型で、specや機能において高価な機械に遠く及びませんが、我々アマチュアにとってVNAを使用できることは、ずいぶん勉強になりますしメリットがあります。
- 2) 以前はインピーダンスブリッジなどを使って、リアクタンスも周波数で補正しながら使っていました。知恵が付くとSGとR.L.B、ATT、受信機を使ってアンプの入出力インピーダンスを測定しました。
- 3) そもそもアンプの入出力インピーダンスを測るなどという事自体を考えませんでした、(今までは出来高払いでした)VNAがあるといとも簡単に測定できます。
- 4) HF用の長いエレメントのアンテナのインピーダンス測定に挑戦しましたが、近くに放送局の送信所があるためか(5km～8km) 測定値が安定せず、VNAに手を近づけただけで値がバラつくような状態でうまく測定ができませんでした。
- 5) 高性能のVNAでは、測定周波数が数10GHzに及びますが、そういう周波数ではキャリブレーションのポイントがmmレベルで決められるようで、取り扱いにノウハウが必要です。10GHzともなると、1波長が約30mmなので、3mmもずれると $1/10$ 波長=36° も位相の変化が生じます。そうしますと測定値も変わります。今回のVNAでは測定周波数が低いので少々ラフな扱いも許されそうです。メーカーのアプリケーションノートでも、コネクタの知識についてちゃんと説明しています。
- 6) 測定誤差についてはメーカーのアプリケーションノートには書いてありますし必要なことですが、難しくて良くわかりません。今回のVNAにどうやって対応して良いのかもわかりません。
- 7) CPU、広帯域PLL発振器、A/D変換器などのコンポーネントがほとんど1chipの部品で、アナログ部は必要最小限で、ほとんどプログラムの処理で行っているの、小さくできるのだと思います。
- 8) 私はネットアナを作ったことはありませんが、製品にするのは大変だったのではないかと思います。机上で実験しているレベルではうまく行っても、実際広帯域でテストするとある周波数だけ値が違うとか、プリント板のパターンが思わぬところで結合しているとか、いろいろとトラブルが発生したのではないかと想像します。
- 9) プログラムで振幅比と位相差などを求めるわけですが、実際はノイズの低減など信号処理も一緒に行っていると思います。
- 10) F特などが数値やグラフで表示されると、例えばフラットネスが0.5dB不足などと言い出します。通常は問題ないと考えますが、どうしても気になってしまいます。
- 11) 本原稿内で下の参考の内容の一部を少し変更して引用している部分があります。

参考

浦和アマチュア無線クラブ ホームページ内

1)リターンロス・ブリッジの動作 <http://www.yacc.co.jp/~uarc/RLBridge.pdf>

2)伝送系のふるまい <http://www.yacc.co.jp/~uarc/trans.pdf>

インターネットで検索すると多くの資料があります。キーサイト・テクノロジー、ローデ・シュワルツ等のメーカーのアプリケーションノートがわかりやすく有効です。

7. 写真

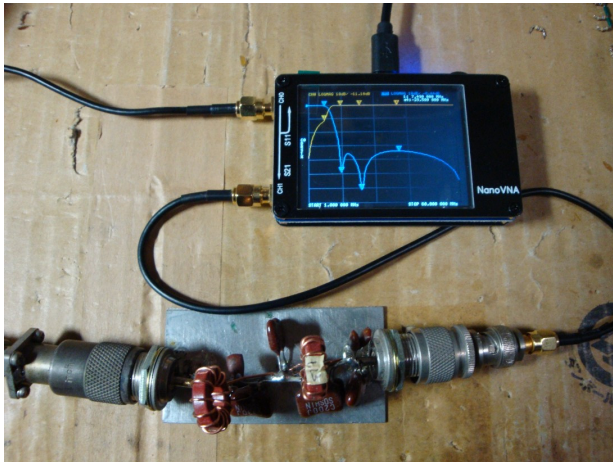
nanoVNAを入手したので、いくつかの測定をしました。

測定内容については今回省略します。

このVNAは外形がほぼ名刺サイズです。あまりに小さい文字なので老眼の私には天眼鏡が必要です。

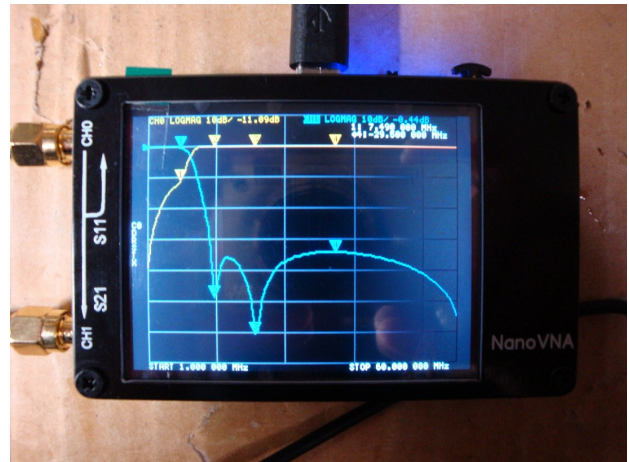
写真の撮り方が未熟で細かい所は見えませんが、イメージということでお願いします。

7MHz LPFを測定



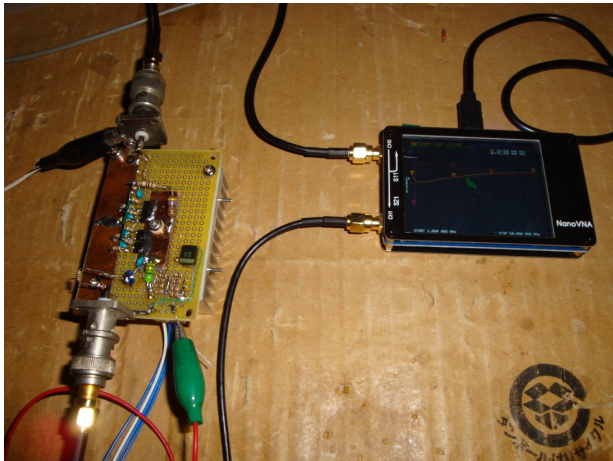
青: 周波数特性

キヨロ:リターンロス



2次、3次高調波の周波数で減衰が多くなるように設計されています。

高周波アンプを測定



スミスチャートも出ます



ゲイン: 約15dB の広帯域アンプ

この写真ではよく見えませんが

- ・アンプの入力インピーダンス
 - ・入出力間位相差
 - ・アンプのゲイン
- 等の測定中

付1. 反射係数からインピーダンスを求めるための実際の計算

実際の値を入れて計算してみます。

少し長いですが計算を省力しないで記します。また計算精度は電卓まかせなので、端数が違う事があります。計算の紛らわしさを避けるために、通常では不必要な*や()が記入してあります。

$$Z_x = R_o * [(1+\Gamma) / (1-\Gamma)] = R + jX$$

これを計算してみます。Γは絶対値と偏角で表されています(極形式)。測定自体が振幅比と位相差を測定しているので、測定結果そのものです。

$$\Gamma = (|V_r| / |V_i|) \angle \theta = \rho \angle \theta \quad \text{また } R_o = 50 \Omega$$

ここで $\Gamma = 0.62 \angle 29.7^\circ$ と測定されたとします。偏角は $^\circ$ で測定していますので $^\circ$ を使用します。

先ず極形式から複素数の形に変換します。

$$\Gamma = 0.62 \angle 29.7^\circ = 0.62 [\cos(29.7^\circ) + j \sin(29.7^\circ)] = 0.62(0.8686 + j 0.49546) = 0.53853 + j 0.30719$$

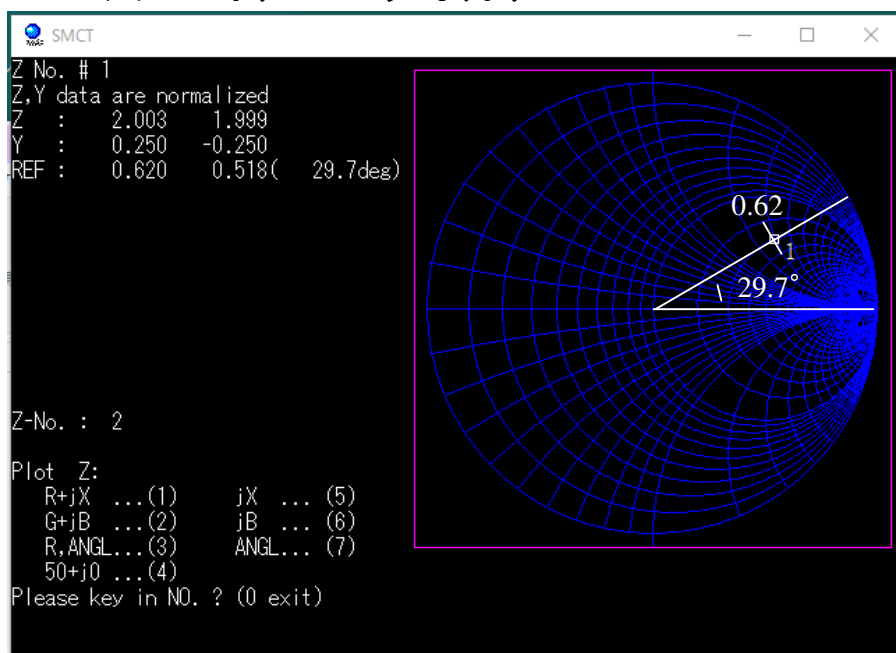
Z_xの式に代入します。

$$\begin{aligned} Z_x &= R_o * [(1+\Gamma) / (1-\Gamma)] = R_o * \left[\frac{1 + \frac{0.53853 + j 0.30719}{\Gamma}}{1 - \frac{0.53853 + j 0.30719}{\Gamma}} \right] \\ &= R_o * [(1.53853 + j 0.30719) / (0.46147 - j 0.30719)] \end{aligned}$$

有理化して、計算します。

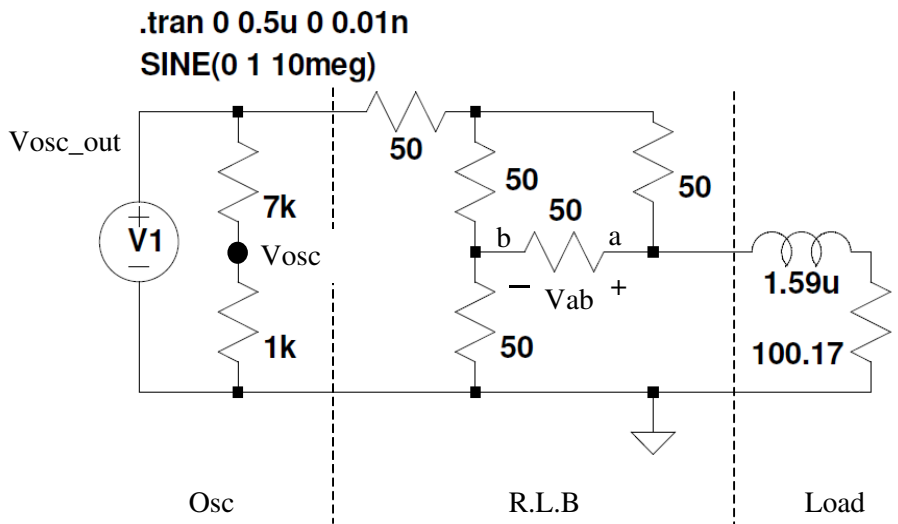
$$\begin{aligned} &= R_o * [(1.53853 + j 0.30719) * (0.46147 + j 0.30719)] / [(0.46147 - j 0.30719) * (0.46147 + j 0.30719)] \\ &= R_o * [(1.53853 + j 0.30715) * (0.46147 + j 0.30715)] / 0.30732 \\ &= R_o * [(0.70999 + j 0.47256 + j 0.14174 - 0.09434)] / 0.30732 \\ &= R_o * (0.61565 + j 0.61403) / 0.30730 = R_o * (2.00342 + j 1.9985) \\ &= 100.171 + j 99.9 \end{aligned}$$

スミスチャートで示すとこのようになります

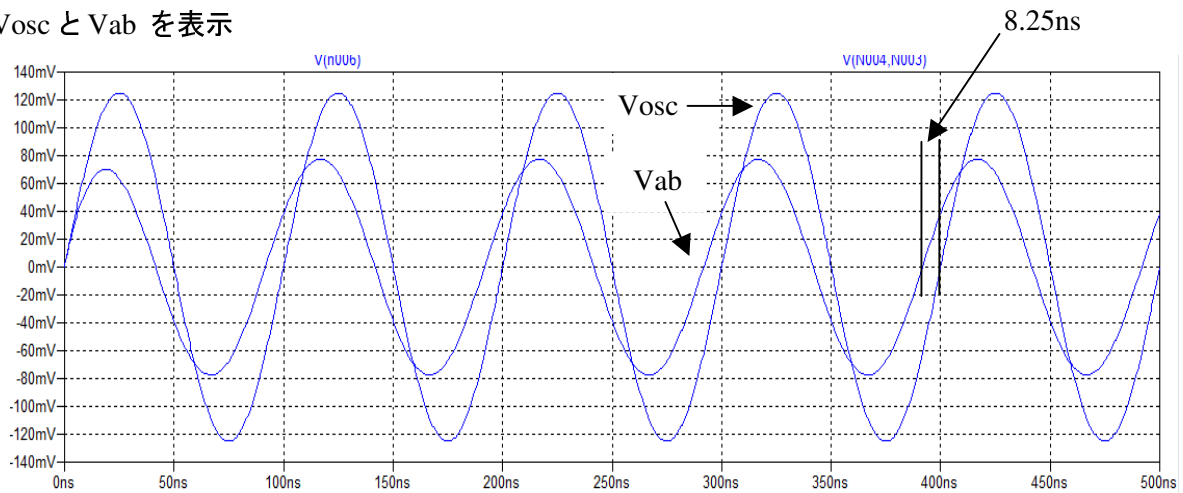


Spice を使って、シミュレーションしてみましょう。
 回路図は下記のようになります。 $V_{osc} = k * V_{osc_out}$ で k は $1/8$ なので V_{osc_out} を $1/8$ になるように抵抗で分割しておきます。 周波数は10MHzとしました。
 グラフとカーソルで値を読んでいるので、数値の精度が若干落ちていることがあります。

シミュレーション回路図



Vosc と Vab を表示



$$V_{osc} = 249.96 \text{ mVpp}$$

$$V_{ab} = 154.4 \text{ mVpp}$$

$$\Delta = 8.25 \text{ ns}$$

$$|V_{ab}| / |V_{osc}| = 0.62$$

$$8.25 \text{ ns} : 100 \text{ ns} = x : 360^\circ \rightarrow x = 27.9^\circ$$

というわけで インピーダンスで $100.17 + j99.9 (\Omega)$ ($1.59\mu\text{H} = 99.9\Omega @10\text{MHz}$) は $0.62 \angle 27.9^\circ$ と測定されました。

以上