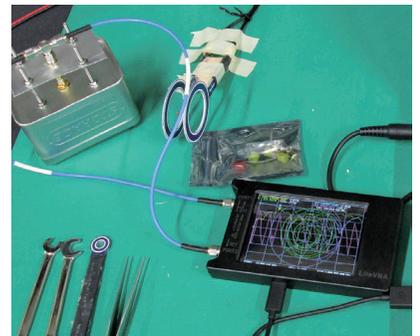
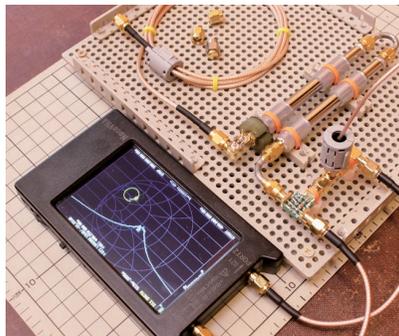
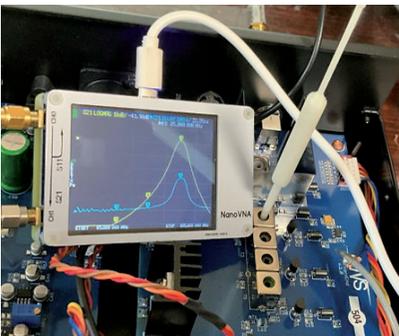
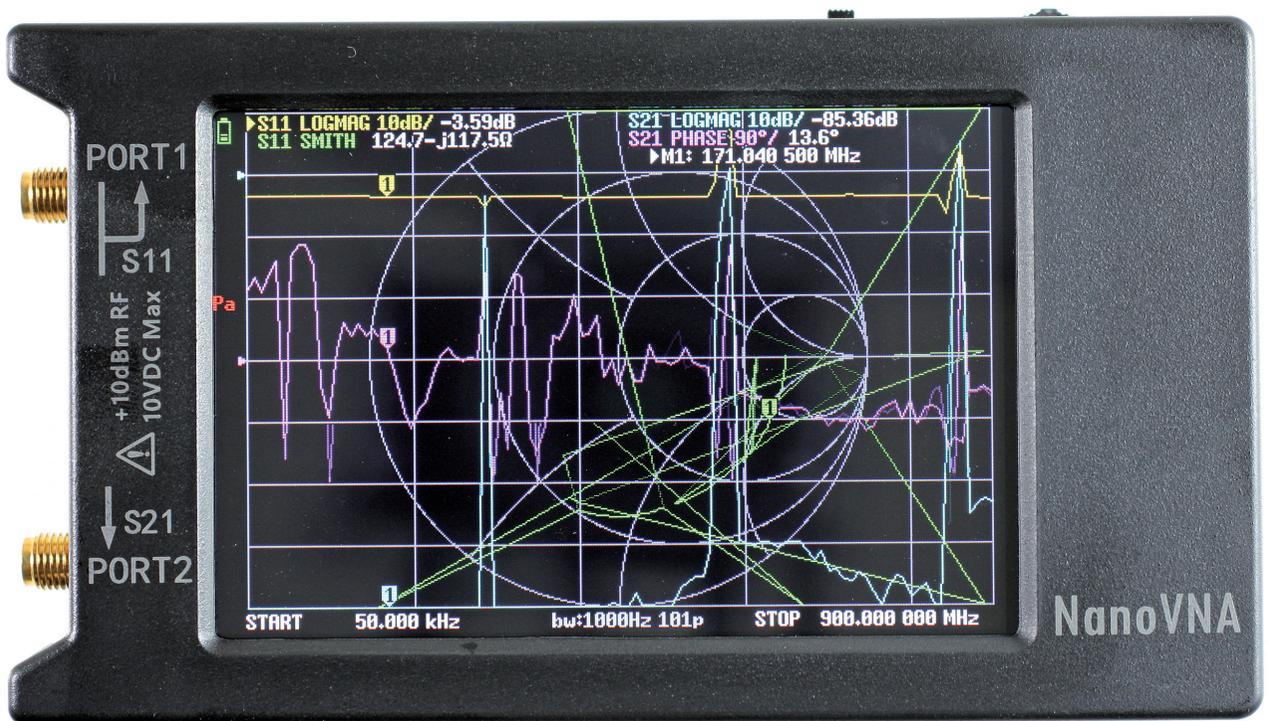


基本的なしくみ&使い方から自動PC計測や6GHz対応LiteVNAまで!

NanoVNA測定で 電子回路マスタ



イントロダクション

1万円 GHz 測定器 「NanoVNA」はなぜ注目か

——まるで測定器界のラズパイ

高橋 知宏 / 川藤 光裕

オリジナル開発者は日本人! NanoVNAとは

● オープンソースの測定器

ナノファイブエー
NanoVNAは、クレジットカード・サイズと小型のVNA(ベクトル・ネットワーク・アナライザ)という種類の測定器です。

パソコンなしにスタンドアロンで使えるハンディなRF測定器を作ろうと、個人的なプロジェクトとして2016年に設計、製作しました(写真1)。少数をキットとして頒布したあと、オープンソース・プロジェクトとして公開して、その後は放置していました。

2019年になって中国で製造販売され、大量に市場に出回った結果、世界的に普及しました。いくつものバリエーションが生まれ、コミュニティによる改善や機能追加が行われ続けています。

NanoVNAの使い方や詳細は他稿⁽¹⁾や本特集の他記事に譲りますが、オリジナルを設計、制作した立場から、NanoVNAを少し紹介します。

● 生まれた経緯

きっかけとなったのは、VNWAという小型VNAを知ったことです。開発者DG8SAQによる解説記事⁽²⁾がARRLのQEX誌に掲載され、その後キットとして頒布されたとのことです。1.3GHzまで測定可能なVNAが自作可能だという事実が、かなりの衝撃でした。

VNWAのRF部分の原理はそのままに、シンセサイザを安価なクロック用PLLに置き換え、A-Dコンバータやマイコン、液晶ディスプレイ、レバー、タッチパネルなどに安価な部品のみを使って、1枚の両面基板にまとめたものがNanoVNAと言っても過言ではありません。

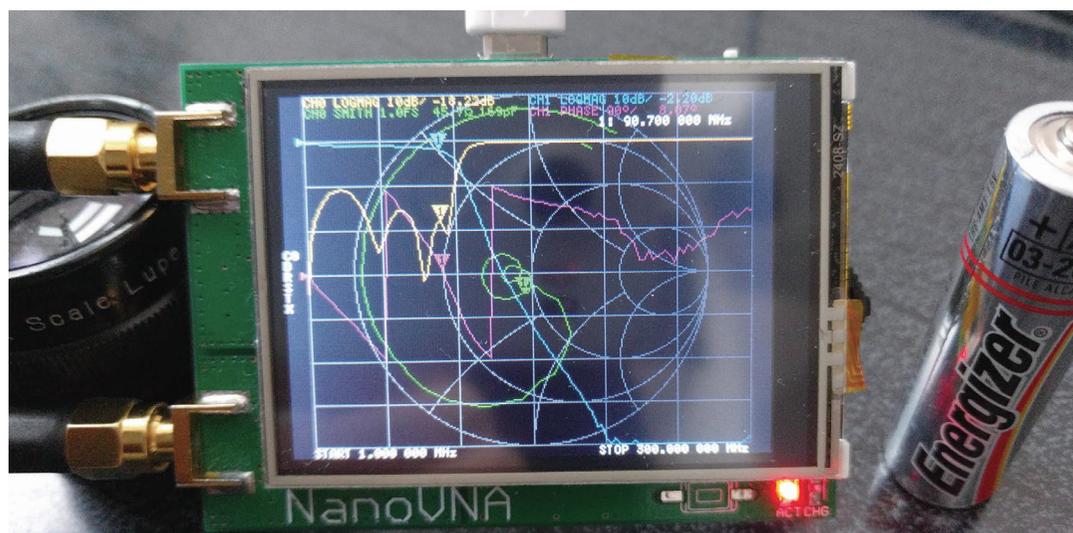


写真1 ここからはじまった…オリジナルNanoVNA
2016年開発当時のもの

価格や供給元やURL等は変更されることがあるので適宜読みかえてください

第1部

第1章

NanoVNAの測定原理と有効に使える範囲

—なぜ安く作れるのか—

技術的な工夫点と市販ネットアナと比べた実力感 エンジャー

本稿では、一般にネットワーク・アナライザを使いこなすために必要な基礎知識を高周波回路初心者の方にもわかりやすいようにかみ砕いて解説したあとに、NanoVNAが従来のネットワーク・アナライザと比較して低コスト化することができた要因を技術的な観点から探ってみます。

そもそもSパラメータって何？

高周波の説明で必ずと言ってよいほど登場するSパラメータ(Scattering parameters)ですが、一般的な電気/電子回路にはほとんど登場しないため、なじみが薄い読者も多いはずです。まずは、Sパラメータがどのようなものなのかを紹介します。

● 回路パラメータの種類

Sパラメータのほかにも、回路の性質を表すパラメータとしてFパラメータ、Hパラメータ、Zパラメータ、Yパラメータなどが存在します。これらのパラメータは、ブラック・ボックス化された2端子対回路(4端子回路)の電圧と電流の関係を図1のように行列式で表します。

これらの回路パラメータはいずれも、ある端子から流入した電流はほかの端子から出力される、という性質をもちます。複数の回路を縦続接続して組み合わせたシステム全体の特性は、回路パラメータ同士の行列計算によって求められます。

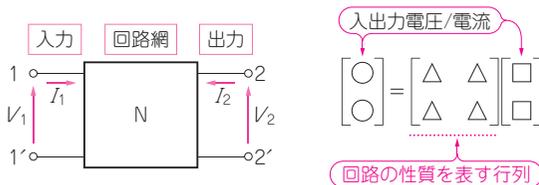


図1⁽⁸⁾ 2端子対の回路パラメータの表し方
ある回路網の入出力の電圧と電流の関係を行列式で表す

● いちばんよく使うSパラメータ

Sパラメータは、高周波回路の特性を表す際に利用されています。ほかの回路パラメータは電圧と電流をもとに回路の特性を表しますが、Sパラメータでは図2のように入射波と反射波をもとにして、回路の性質を表します。

電圧と電流を扱わない理由は、高周波では回路の寄生成分の影響により、電圧や電流を正しく測定することが難しくなるからです。

高周波では、基準インピーダンス(50Ωがよく使われる)を基にした電力で回路の特性を表します。この入射電力と反射電力の関係性を表すのがSパラメータです。

▶ Sパラメータの概念

2端子対のSパラメータでは、一方の端子をポート1、もう一方の端子をポート2と呼び、入射波aと反射波bをもとに2×2の行列式で回路の特性を表します。2×2のSパラメータの各要素の意味は次のとおりです。

- S₁₁: ポート1の反射係数
- S₂₁: ポート1からポート2への伝送係数
- S₂₂: ポート2の反射係数
- S₁₂: ポート2からポート1への伝送係数

注意すべき点は、信号の入出力の向きと添字の関係です(図3)。直感的には入力ポート→出力ポートの順のほうがわかりやすいように思えますが、Sパラメータ

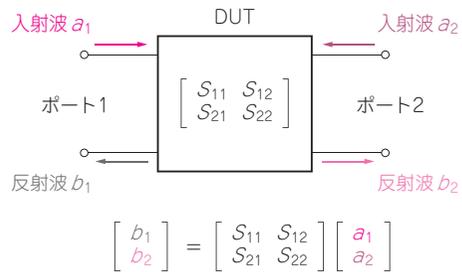


図2⁽¹⁾ Sパラメータは入射波と反射波をもとにして回路の性質を表す

もう一つのおすすめ…

6GHz対応「LiteVNA」

— 入手もしやすくなっている

エンジャー

本章では、NanoVNAの進化版として位置づけられるLiteVNAの機能と実際に使用するにあたっての注意点を紹介しつつ、簡単な実験を通じてLiteVNAの実力を検証していきます。LiteVNAは測定周波数の上限が6.3GHzと、従来の格安ネットワーク・アナライザとは一線を画す性能をもっています。

1万円測定器 NanoVNA

● はじまりの格安 NanoVNA

全世界的に人気を博するNanoVNAですが、その開発の歴史をたどるとそのルーツは実は日本にあります⁽¹⁾。もともとNanoVNAの開発は、日本の高橋知宏氏(edy555)が個人的なプロジェクトとしてスタートしています。個人プロジェクトがここまで世界的に広がることは非常にまれですが、試作機が完成してある程度仕様が固まったところでプロジェクトをオープンソース化したことで、一気に世界中に広がることとなりました。

ちなみにプロジェクト初期段階の様子は、高橋氏が運営するWebサイト“Computer & RF Technology”(https://ttrf.tk/)に掲載されており、開発者として学ぶところも多い記事が多数あるのでオススメです。

▶ 世界中への広がり

NanoVNAが世界中に広がったのは2019年ごろ、中国の通販サイトでの取り扱いが始まったことがきっかけです。オリジナルのプロジェクトで課題として残っていた周波数拡張やLiPoバッテリーの制御についても、オープンソース・プロジェクトならではの有識者達による改良が加えられており、商品としての完成度が高まっていたことも普及を後押しする要因となっていたようです。

この中国を起点としたNanoVNAのムーブメントはもの数カ月で東欧、西欧、北米、日本とまるで世界を左回りに1周するかのようにならび、そこからさらに改良を加えられて、LiteVNAのような進化版も多数登場する状況に至っています。

表1 流通量が多い1万円GHz測定器 NanoVNA

製品	NanoVNA-H	S-A-A-2 V2 Plus4	LiteVNA
開発者	hugen79	HGXQS / OwOComm	hugen79 / DiSlord
正規販売店	スイッチサイエンス(日本)	HGXQS	Zeenko
URL	文献(7)	文献(8)	文献(9)
プロジェクト形態	オープンソース	オープンソース	クローズド・ソース
クローン品	あり	あり	なし
周波数範囲	50k ~ 1.5GHz	50k ~ 4.4GHz	50k ~ 6.3GHz
ダイナミック・レンジ	70dB(50k ~ 300MHz)	90dB(< 1GHz)	70dB(< 3GHz)
	60dB(300M ~ 900MHz)		
	40dB(0.9G ~ 1.5GHz)	80dB(< 3GHz)	
	—		
—	—	> 50dB(> 3GHz)	
ポイント数	101	201	21 ~ 1024
電源	USB 5V	USB 5V	USB 5V
バッテリー	650mAh(2.8インチ)	3200mAh	1300mAh(LiteVNA 62)
	1950mAh(4.2インチ)		2000mAh(LiteVNA 64)
コネクタ	USB-C	USB-B	USB-C
記録メディア	なし	なし	microSDカード
価格	10,800円(2.8インチ)	US\$199	US\$ 99(LiteVNA 62)
	12,800円(4.2インチ)		US\$ 119(LiteVNA 64)

価格や供給、URL、ソフトウェア等に変更されることがあるので、適宜読みかえてください。

第1章

NanoVNAの 基本的な使い方

——重要なキャリブレーション&表示機能を覚える

川藤 光裕

「NanoVNAとは何か?」、「どんなことができるのか?」といった基礎的な話はさておき、まずは実際にNanoVNAを使ってさまざまなものを測定してみます。NanoVNAの操作方法や測定方法の参考にできれば幸いです。

NanoVNAには多くのバリエーションやクローンが出回っています。ファームウェアによって多少の

違いはあるものの、基本的な操作方法は同じです。

本記事ではNanoVNA-H4を使用します(写真1)。特に区別する必要がある場合を除き、記事内では総称として「NanoVNA」と表記します。

基本の操作

● 感圧式タッチパネルで操作

NanoVNAの電源スイッチは上側面のスライド・スイッチです。電源を入れるとすぐに動作が始まります。

NanoVNAの操作は、上側面にあるレバー・スイッチか、タッチパネルで行います(写真2)。レバー・スイッチだけでも操作できるように作られていますが、タッチパネルのほうが操作性が良いと思います。

画面上的の任意の場所をタッチすると、写真3のようにメニューが表示されるので、このメニューをたどって目的の操作を行います。メニュー以外の場所をタッチするとメニューは閉じます。最初はトップ・メニューが表示されますが、それ以降は、前回表示したメニューが表示(再現)されます。

NanoVNAの画面は小さいので、指ではタッチパネ

SMAコネクタには最初キャップがついている

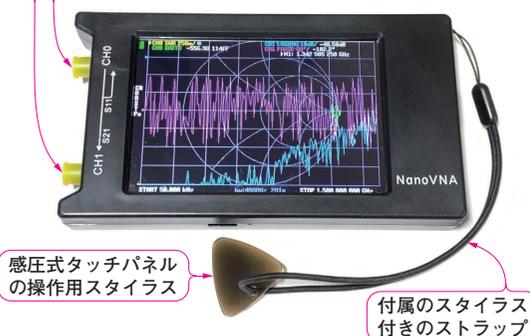


写真1 画面が大きく操作しやすい NanoVNA-H4
NanoVNA-Hとは画面が違うだけでなく、搭載マイコンも異なっている。バージョン・アップ時にはNanoVNA-H4用のファームウェアでないと適用できない



写真2 NanoVNAの上側面には電源スイッチとレバー・スイッチがある
タッチ操作も可能なので、本稿ではレバー・スイッチによる操作は解説しない



写真3 画面上的の任意の場所をタッチするとメニューが表示される
トップ・メニュー以外では最下段に [←BACK] ボタンがあり、上位メニューに戻る

第2章

NanoVNA 実測①… アンテナ等価回路

— まずはLCR直列共振回路を調べる

川藤 光裕

NanoVNAを使ってさまざまなものを実際に測定してみます。まずはアンテナです。項目の設定方法やマーカの使い方についても併せて説明します。

高周波といえばアンテナの測定から

最初の測定対象はアンテナです。アマチュア無線家には、アンテナの自作や市販品の調整などで「アンテナがどのくらい50Ωにマッチングできているのかを測りたい」、「同調周波数を知りたい」といったことがあります。専用の測定器アンテナ・アナライザがあればそうした測定ができますが、高価なので、なかなか手が出ませんでした。しかし、NanoVNAの登場によって、手軽に詳しい測定ができるようになりました。

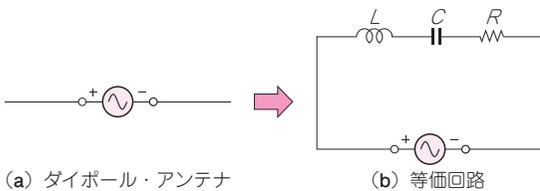


図1 基本的なアンテナは無線機からはLCR直列回路と等価に見える

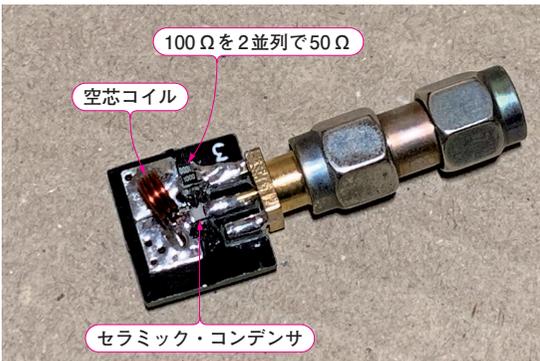


写真1 アンテナの測定を模擬するための自作LCR直列共振回路
共振周波数は170 MHz付近

● 今回はアンテナと同等のLCR直列共振回路を測定
実際にアンテナを測定してみます、と行きたいところですが、実際のアンテナでは、周囲の影響を受けるため、測定結果が安定しません。ここではNanoVNAの使い方を知ることが目的なので、分かりやすさのために、アンテナと等価な回路を測定します。

シンプルなアンテナを等価回路で表すと、図1のようなLCR直列共振回路になります。そこで、写真1のように実際にLCR直列共振回路を作り、これをアンテナの代わりとします。

今回は写真2に示すように、このアンテナ等価回路をNanoVNAのコネクタに直接、接続して測定しました。が、キャリブレーションもNanoVNAのコネクタで再度行います(同軸ケーブルは使用しない)。

アンテナ測定用のグラフ表示設定

● 測定周波数範囲を設定

まず、スイープ範囲(測定周波数範囲)を設定します。トップ・メニューにある [STIMULUS] を選んで設定します。ここでは測定対象に合わせて100 M ~ 200 MHzとします。



写真2 小さいので直接NanoVNAのコネクタに付けて測定してみる

簡単アンテナ・アナライザ 入門実験

——無線のおともに! 設定ファイルを読み込んで試せる!

川藤 光裕

無線家が欲しいアンテナ・アナライザを NanoVNAで

アマチュア無線を趣味とする人が欲しい測定器の一つがアンテナ・アナライザです。アンテナの共振周波数を測定したり、グラフ機能があれば周波数とSWRの様子を視覚的に表示したりできて、アンテナの調整にとっても役立ちます。そのようなアンテナ・アナライザは大変高価で簡単に手が出るものではありませんでしたが、NanoVNAの登場によって状況は一変しました。

第2部第2章で解説しているアンテナ等価回路の測定方法のように設定すればNanoVNAをアンテナ・アナライザとして使用することができます。

しかし設定手順が少々複雑なので、NanoVNAに慣れていないと大変かもしれません。そこで、あらかじめ必要な設定を行ったデータ・ファイルを用意しました。対象機種はNanoVNA-H4で、microSDカードのスロットが付いたものです。

簡単アンテナ・アナライザ用 設定ファイルの入手

● 入手方法

CQ出版社の本書のページから、アンテナ・アナライ

ザ用の設定ファイルをダウンロードできます。

<https://www.cqpub.co.jp/hanbai/series/trial.htm>

ダウンロードしたzipファイルを展開して、その中のcalファイル(SWR_HF_1_2_40.cal)をmicroSDカードに書き込みこみます(ファームウェアが1.240よりも前のバージョンならSWR_HF.calを書き込む)。それを、NanoVNA-H4のスロットに差し込みます。

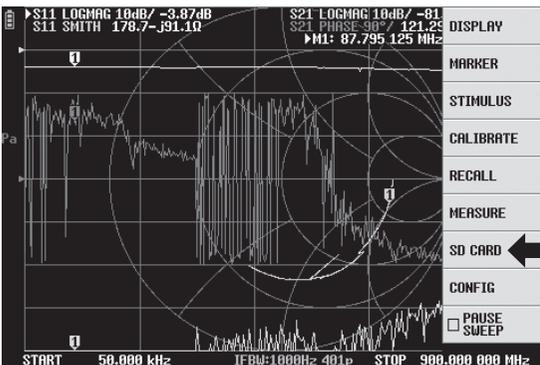
● 設定されている内容

このファイルはキャリブレーション・データを保存したもので、各グラフの設定情報なども一緒に保存されています。設定されている情報は次のとおりです。

- 周波数範囲：50kHz～30MHz
- グラフ：
 - + 黄：SWR(縦軸 0.2/div)
 - + 青：R(縦軸 25 Ω/div, 一番下が0 Ω)
 - + 赤：X(縦軸 25 Ω/div, 中央が0 Ω)
 - + 緑：スミスチャート

SWRのグラフでは、インピーダンスは、レジスタンス分をRで、リアクタンス分をXのグラフで表示します。リアクタンスが0 Ωの周波数がアンテナの共振周波数です。

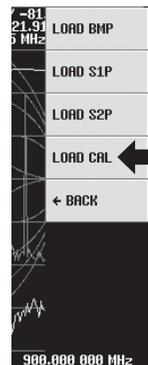
SWRはインピーダンスの絶対値で計算されますの



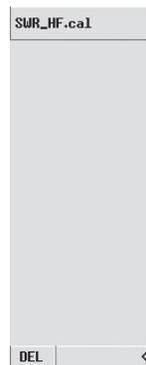
(a) SD CARDを選ぶ



(b) LOADを選ぶ



(c) LOAD CALを選ぶ



(d) 使用する簡単アンテナ・アナライザ用設定ファイルを選ぶ

図1 入手した簡単アンテナ・アナライザ用設定ファイルを NanoVNAに読み込む

NanoVNA 実測③… 電子部品の周波数特性

— コンデンサ/抵抗/コイル/水晶振動子…*f* 特いろいろ!

川藤 光裕

NanoVNAを使って、抵抗、コンデンサ、コイルなど基本的な電子部品の周波数特性を測ってみます。CH0に部品を接続してCH0のインピーダンス(レジスタンスとリアクタンス)を見ます。

測定に際しては、コラムで紹介する自作の治具を使っています。治具を含めてキャリブレーションを行ってから測定していますが、この治具の上限周波数は100 MHz程度だろうと思います。そのため、100 MHz以上の特性は参考程度に捉えてください。

電子部品と周波数の関連については文献(5)(6)などが参考になります。

抵抗のインピーダンス周波数特性

● 測定対象の抵抗

抵抗にはカーボン抵抗や金属皮膜抵抗など、多くの種類があります。表1に示す抵抗のインピーダンス特性を測ってみました。

● カーボン抵抗(写真1)

100 Ω 1/4 Wのカーボン抵抗(炭素皮膜抵抗)の測定の様子を写真1に、測定結果を図1に示します。

図1ではレジスタンスとリアクタンスを表示しています。スケールはどちらも20 Ω /DIVです。測定周波数の範囲は50 kHz~900 MHzですが、自作治具の特性を考えると信頼できそうなのは100 MHz程度(マーカ1付近)までで、それより上は参考程度に考えてください。

画面上部の値は、各マーカの周波数におけるレジスタンスで、周波数によらずほぼ一定です。

リアクタンスは周波数の上昇につれて大きくなっていきます。抵抗のリード線の影響が気になったので、同じ抵抗(同一個体)のリード線を写真2のように切り詰めて測定した結果が図2です。リアクタンスの上昇が

表1 インピーダンスを測定した抵抗

抵抗の種類	値, 定格
カーボン抵抗	100 Ω 1/4 W
金属皮膜抵抗	100 Ω 1/4 W
チップ抵抗	100 Ω 1/8 W
セメント抵抗	50 Ω 5 W
メタル・クラッド抵抗	50 Ω 10 W

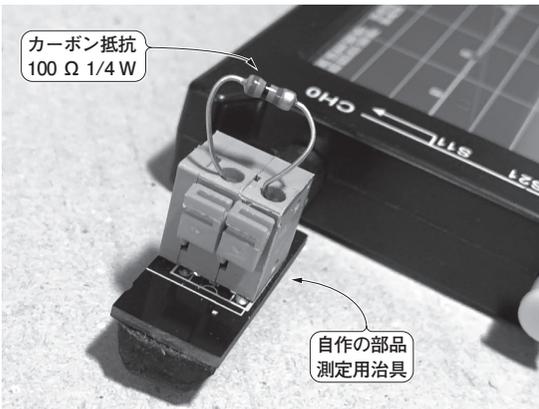


写真1 リードに余裕を持った状態でのカーボン抵抗100 Ω 1/4 Wのインピーダンスを測定

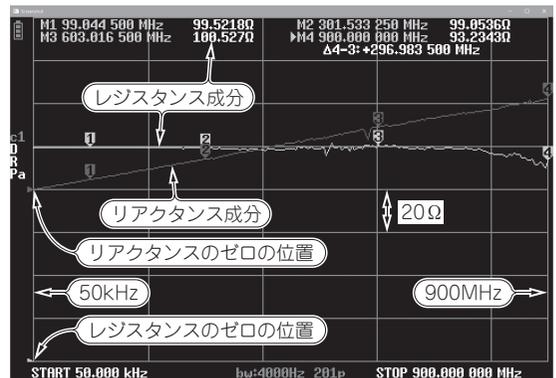


図1 リードが長い状態で測ったカーボン抵抗100 Ω 1/4 Wのインピーダンス周波数特性

第1章

無電源FMラジオの製作

— NanoVNA で定数のアタリをつける

早川 槇一

ゲルマニウム・ラジオは、電源を必要とせず、簡単な回路から出る音には不思議な魅力があります。検波デバイスは必ずしもゲルマニウム・ダイオードである必要はないので、本稿では電源を必要とせず動作するラジオを無電源ラジオと呼ぶことにします。

今回は、アンテナの調整や外部アンテナ接続端子の調整、検波回路の調整にNanoVNAを使った例を紹介します。小型&安価なVNAを使用することで、追加するべき部品の定数にアタリを付けて、効率よく性能を求めることができます。

製作した無電源ラジオ

製作した無電源ラジオの外形を写真1に、使用した部品を表1に、回路を図1に示します。古くから知られる無電源ラジオ(図2)同様に、コイルとコンデンサで並列共振回路を構成したものです。

今回製作した無電源ラジオは、アンテナとしてロッド・アンテナを組み合わせて作ったループ・アンテナを用います。外部アンテナを接続することも可能で、

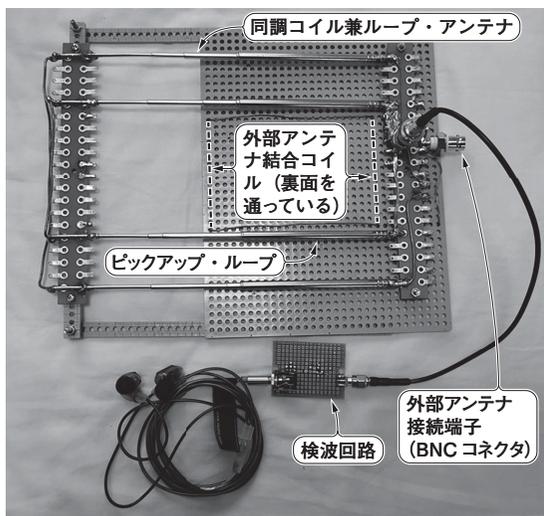


写真1 製作した無電源ラジオ

例えば室内では受信電力が弱い場合などに室外に置いたアンテナを接続すると、補助的に使用できます。

同調コイルはループ・アンテナと兼ねています。同調コイルと、ループ・アンテナのインピーダンス・マッチングをするためのピックアップ・ループおよび外部アンテナと疎結合させるためのコイルの3つを磁気結合しています。

● コイルのインダクタンスを変化させて目的の局の周波数に同調させる

コイルのインダクタンス、あるいはコンデンサの静電容量を変化させ、目的の局に同調することを考えます。一般的には、静電容量を変化させるバリコンが使われますが、今後の入手性を考えて使用しませんでした。

今回は、コイルのインダクタンスを変化させる方法を取りました。図1に示したようにロッド・アンテナの組み合わせでループ・アンテナを構成し、ロッドを伸び縮みさせることでインダクタンスを変化させる方法です。

静電容量は固定です。その方が可変容量素子によるQの低下を低く押さえられるからです。もし、ロッド・アンテナの伸縮範囲を調整したい場合、10 pF程度のトリマ・コンデンサを使用するとよいでしょう。

● 検波回路の部品と工夫

検波デバイスとして、小信号ショットキー・バリ

表1 無電源ラジオに使用した部品

部品名	型番・定数	参考価格	入手先
ロッド・アンテナ	ANT-5BNC	350円	千石電商
ダイオード	1SS106	120円	秋月電子通商
コンデンサ	5 pF, 10 pF	10~50円	一般的なもの
インダクタ	270 nH	10~50円	一般的なもの
BNCコネクタ	B-014IF	120円	秋月電子通商
ラグ板	L-3522-20P	880円	千石電商
SMAコネクタ	S-063-49-TGG	150円	秋月電子通商
イヤホン	VSD3S	1,920円	一般的なもの
イヤホン・ジャック	MJ-352W-O	80円	秋月電子通商

価格や供給、URL等は変更されることがあるので適宜読み替えてください。

FPGA電源ラインの 解析&改善

——高速デジタル回路のコンデンサ&インピーダンスをマスタ!

川口 正

FPGA(Field Programmable Gate Array)のように電源電圧が低く、電源ピンに流れ込む電流が大きくなるデバイスを使用する場合、電源側を見たインピーダンスが特定の値より大きいと回路動作が不安定になる場合があります。電源回路のインピーダンスが大きくなるのは電源回路の部品の共振による場合が多く、主にコンデンサの入れ方によってその状態が決まります。

本稿では、簡単なロジック回路の場合ですが、NanoVNAで回路のインピーダンスの周波数特性を測定し、対策を施した例を紹介します。NanoVNAを使えば数十k~数百MHzの周波数範囲で電源インピーダンスを簡単に測定できます。

低電圧・大電流化により 電源回路のインピーダンスがより重要に

- FPGA回路の電源ラインはどんどん低インピーダンスに
少し複雑なデジタル回路はFPGAを使って実現することが多くなっています。図1はFPGAを使う回路を概念的に示したものです。FPGAの電源は、規模が大きく高速化対応のデバイスほど多種類使用され、また、1V以下へと低電圧化が進んでいます。

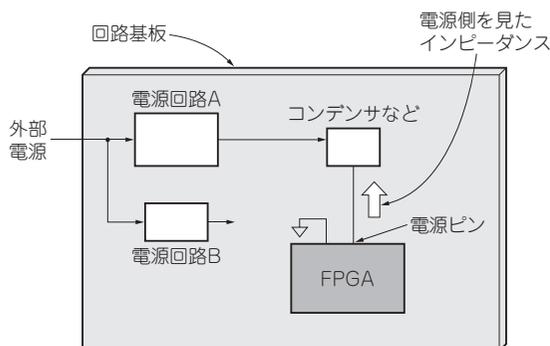


図1 FPGA回路は低電圧・大電流な低インピーダンス!
FPGAは大規模化に伴って電源電圧が低くかつ電源ピンに流れ込む電流が多くなりインピーダンスが低下する。これにつながる電源側はそれ以下のインピーダンスが求められる

- 電源回路はもっと低インピーダンスに設計する必要がある

仮に、1.2Vで3A供給される電源ピンでは、電源ピンでのFPGA側のインピーダンスは0.4Ωとなります。このとき、その電源ピンから電源回路側を見たインピーダンス(電源側インピーダンス)が0.4Ωより大きい場合、FPGA回路動作が不安定になる場合があります。

このインピーダンスをターゲット・インピーダンスと呼びます。ターゲット・インピーダンスは、FPGAを外して電源ピンでインピーダンスを測定することで得られます。

どこかの周波数でターゲット・インピーダンスを超えることがあるため、周波数ごとにインピーダンスを測る必要があります(図2)。そのため、実測にはネットワーク・アナライザが有効です。

通常の基板回路の電源系に入れる1μF程度のコンデンサは、数k~数十MHzの電源インピーダンスを低下させています。NanoVNAは数十k~GHzの帯域を測定できるので、電源インピーダンスで重要になる周波数範囲を測定できるといえます。

コンデンサが特に要注意

- どんどん増えるセラコンは電源ONで測りたい
デジタル回路の電源に入れるコンデンサは1μF

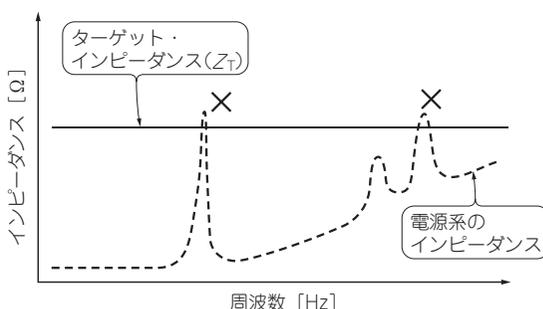


図2 電源回路はもっと低インピーダンスじゃないといけない
電源ピンでの電源側のインピーダンスは、デバイスで決まるターゲット・インピーダンスより低いようにする

NanoVNAで 10 MHz 増幅回路の製作

—— マッチングが重要! 便利なスミス・チャートの使い方を知る

脇澤 和夫

高周波回路の肌感覚

一般にいわれる高周波回路は、デジタル回路や低周波アナログ回路と、何が違うのでしょうか。

「難しい!」それはそうなのですが、もう少し具体的にしてみましょう。筆者の感覚では、以下の点が特徴的です。

- 回路インピーダンスが低い
- 電圧や電流ではなく電力を扱うことが多い
- 周波数以外のところは意外とおおざっぱでいい順番に説明していきましょう。

● 高周波回路で使う素子のインピーダンスは低い

高周波の伝送に使う同軸ケーブルやコネクタが50Ωや75Ωなのはもちろんで、たいていの高周波回路は数百Ω以下のインピーダンスで動作しています。

高周波を扱う場合、高圧小電流で動作するといわれる真空管回路ですら、せいぜい数kΩ程度の回路インピーダンスしかありません。

アマチュア無線の430 MHz帯では、回路中に出てくるコンデンサは数pFが多く、インピーダンスが高そうに思えます。しかし430 MHzでは5 pFのコンデンサがもつリアクタンスが約75Ωなので、やはり低インピーダンスです。

オーディオ回路では10 kΩ以上が当たり前、真空管回路なら数百kΩの負荷抵抗も使われるのと比べ、高周波回路で使われる素子のインピーダンス(抵抗やリアクタンス)はかなり低いことがわかります。

● 高周波回路で計算に使うのは基本的に電力

高周波回路では電力を扱います。つまりエネルギーを扱う回路がほとんどだ、ということです。そのため単位としても、VやAだけでなく、何種類かのdBの単位が出てきます(そのほうが計算しやすいから)。

高周波では、増幅回路のゲインも「電圧で何倍」ではなく「電力ゲインが何dBか」で考えます。

● 意外とおおざっぱでよい

高周波では、回路素子の計算のとき、精密な計算が必要ない場合がけっこうあります。送受信周波数は厳密に何桁もの精度が要求されますが、LCフィルタや増幅回路の定数は、それほど厳しくありません。むしろ精密にすることが困難といったほうがよいかもしれません。

まずは扱いやすい 10 MHz 付近で回路設計に挑戦

一般のご家庭で…という、ちょっと語弊がありますが、今回は入門編として、NanoVNAをたよりに周波数の低い高周波回路を作る実験をしていきます。

いきなりGHzを扱えといわれても、うまくできるわけはありません。そこで10 MHzぐらいの高周波回路を作り実験してみよう、というわけです。

10 MHzは、高性能なマイコンのクロックより遅い周波数で、空間波長は30 mもあります。多少雑な配線でも動作しますし、スペクトラム・アナライザをはじめとするややこしい機器がなくても大丈夫です。いざとなれば、ブレッドボードやユニバーサル基板、リード付き部品でも実験可能な周波数です。

高周波回路の考え方

● 基本はLとCの回路、そして伝送線路も回路素子

高周波回路で主力となる受動部品はインダクタとコンデンサです。抵抗も使いますが、低周波回路より少なくなります。というのも扱うのが電力なので、電力を消費し熱に変える抵抗は、なるべく使いたくないのです。リアクタンス素子(コンデンサやインダクタ)であれば理想的にはエネルギー・ロスはありません。

インダクタとコンデンサは、交流回路では相補的な関係にあります。リアクタンスという形で考えればプラスとマイナスの関係であり、単位はΩ(オーム)に統一されます。そして抵抗が(正の)実数の値をもつのに対し、リアクタンスは虚数の値をもちます。

増幅回路のトランジスタが JFET/高周波用の場合

— NanoVNAを使った10 MHz アンプ回路チューニング

脇澤 和夫

前章では、汎用トランジスタ2SC2712(かつての定番2SC1815のパッケージ違い)で10MHzのアンプを作ってみました。当初電力ゲインが-8dB(0.15倍)と増幅できていませんでしたが、NanoVNAで実測しながら入出力にマッチング回路を追加することで、10MHzでの電力ゲインを23dB(200倍)にできました(図1)。

接合型FET(ジャンクションFET, 以下JFET)や高周波用トランジスタで10MHzアンプを作るとどうでしょうか。

①低周波用JFETで作る10MHzアンプ回路

● FETは品種によらず高周波まで使えることが多い

FETは、低周波においては入力インピーダンスがとても高い素子です。pA級のソース・メジャ・ユニット(ソースメータ)ですら、JFETの定番だった2SK30ATM(東芝、現在は廃品種)のゲート漏れ電流を測定できなかったことがあるぐらいです。

FETのデータシートには、バイポーラ・トランジスタのトランジション周波数などのような「増幅可能な最大周波数」の表記はありません。ゲート側を低インピーダンスでドライブできて帰還容量による増幅率低下が起きなければ、かなり高い周波数まで使えるのがFETの特長でもあります。

今回の実験には2SK208のYランクを使います。これは2SK30ATM, 2SK118のパッケージ違いで、低周波のインピーダンス変換や増幅などに用いられる汎用JFETです。その実力を見ていきましょう。

● 2SK208Yの1石アンプを設計・製作

2SK208の1石アンプを図2のように作ってみました。2SK208はゲート-ソース間電圧が0Vでも電流が流れるデプレッション型です。ソースとグラウンドの間にバイアス用の抵抗やバイパス用コンデンサを入れることになります。バイポーラ・トランジスタの自己バイアス回路より部品点数が多くなります。

もちろん、このままで高周波増幅は無理です。10MHzでの実測ゲインは-6dB程度、バイポーラ・トランジスタのときと同様に、減衰器になってしまいました。

図2の回路で増幅できるように、入出力にマッチング回路を加えます。

● 入出力インピーダンスを測定してチューニング

NanoVNAで実測した入出力インピーダンスが図3です。入力側はほぼ完全な容量性(10.5pF程度)でした。バイアス電流が流れないので当然なのですが、高抵抗です。スミス・チャートの右端です。

出力側も容量性ですが、こちらは負荷抵抗があるた

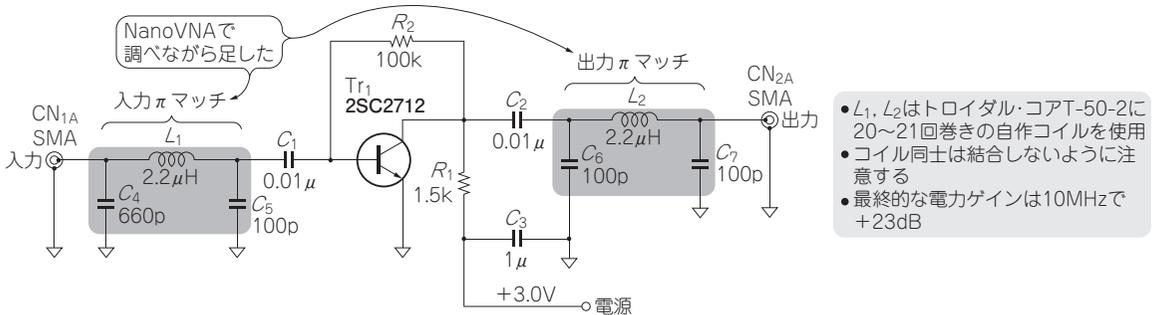


図1 汎用トランジスタ2SC2712を使った10 MHzアンプの入出力マッチング回路追加チューニングをJFET/高周波用トランジスタ・アンプの製作でも行ってみる

基本アッテネータ/ 信号分岐器の設計&製作

—— 実験に便利な 50 Ω 高周波コンポーネントを作る

じがへるつ

● 高周波回路は 50 Ω 整合が基本

信号周波数が高くなると、インピーダンスの不整合による反射や減衰が測定結果に大きく影響します。そのため高周波回路や高周波測定器は、50 Ω に整合した入出力端子同士を 50 Ω に整合した同軸ケーブルを使って接続するのが一般的です。

● よく使いそうな補助パーツを作ってみた

本格的な測定には、入出力が 50 Ω に整合されていて、性能が保証された専門メーカー製の高周波コンポーネントを使うべきですが、NanoVNA よりも高

価なものばかりです (NanoVNA が安価すぎる)。

そこで、実験に役立つような高周波コンポーネントをいくつか試作してみました。NanoVNA で測定して特性を確認しておけば、実用できるかどうかかわかります。

わりとカンタン! 製作した高周波コンポーネント

● 本章と次章の製作物まとめ

写真1, 表1に、製作した高周波コンポーネントを示します。

写真2, 図1に、これらの使用例を示します。例えば、アンプの評価をする際は、アンプ出力をそのまま測定器に入力すると過大入力となり、測定器を壊す可能性があるため、アッテネータを挿入します。また、高調波をカットしたい時は、ローパス・フィルタを挿入します。その他、信号を分岐させたい場合は、パワー・スプリッタやパワー・ディバイダを使います。

これらの高周波コンポーネントは、もちろん市販品もありますが、入手性が悪かったり、高価だったり、趣味での使用にはあまり向きません。しかし、高周波コンポーネントの中身は単純であり、個人で作ることも可能です。

自作したコンポーネントが、正しくできているのか、本当に使えるものなのかは、NanoVNA を用いて測定します。また、設計値からどれくらいずれているかを確認できます。周波数範囲を限定すれば使える、といったこともわかるでしょう。

アッテネータ回路の設計&製作

● 設計

アッテネータは、信号を減衰させるコンポーネントです。

アッテネータは抵抗だけで作れます。そして抵抗そのものは周波数特性をもたないため、アッテネータも周波数特性をもちません。理想的には全周波数で一定

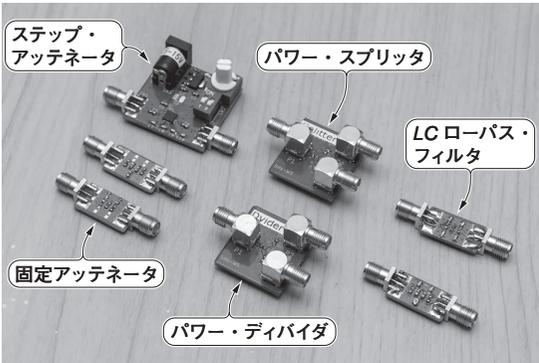


写真1 製作した各種の高周波コンポーネント
高周波コンポーネントは作りが簡単なので作るだけなら難しくくない!

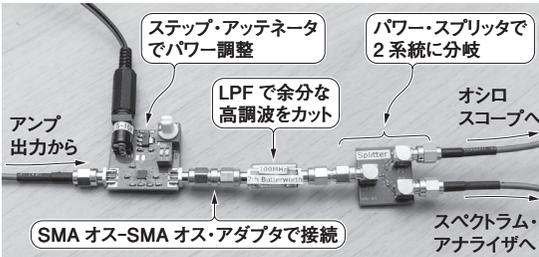


写真2 高周波コンポーネントの使用例
自作コンポーネントを用いてアンプ出力のレベルを調整し、LPFを通して、オシロスコープとスペクトラム・アナライザで測定するようす。50 Ω 整合したコンポーネント同士なら、信号の反射などを気にせず接続できる

CやLやICを使ったちょっと本格的な高周波回路

——0.5 dB ステップ・アッテネータ/信号切り替え器/LPFの製作

じがへるつ

本章ではLやCやICを使って、高周波の測定であると便利、かつ簡単に作れるコンポーネントを作って、NanoVNAで特性を確認してみます。

ステップ・アッテネータの製作

● アッテネータを複数組み合わせれば欲しい減衰量を得られるが変更が面倒

前章で、入出力インピーダンスが50Ω、減衰量が10dBのアッテネータを作りました。では、減衰量を変化させたい場合は、どうすればよいでしょうか。

任意の減衰量のアッテネータを複数作っておき、直列につなぐことで、欲しい減衰量を得られます(図1)。しかし、減衰量を変化させるたびにアッテネータを付けたり外したりするのは、非常に面倒です。

そこで、複数のアッテネータをスイッチで切り替えて、任意の減衰量を得られるようにしたコンポーネントがあり、ステップ・アッテネータと呼ばれます。

● 減衰量を簡単に変えられるステップ・アッテネータ

ステップ・アッテネータの回路を図2に示します。構造は単純で、任意の減衰量をもったアッテネータをスイッチで接続します。スイッチをON/OFFし、信号をアッテネータに通して減衰させるか、アッテネータに通さずにそのまま通過させるかで、減衰量を制御します。例えば1dB、2dB、4dB、8dB、…といっ

た倍刻みでアッテネータを用意しておけば、1dB刻みで減衰量を設定できます。

● ステップ・アッテネータ専用IC HMC472A

複数のアッテネータをスイッチで接続する構成は、わかりやすいのですが、作るのは面倒です。減衰量ごとに定数の異なるアッテネータを作ることになりますし、後述するように、理想的なOFF状態を実現するスイッチを作るのは難しいのです。そこで、ステップ・アッテネータ用のICを使って作ります。

HMC472A(アナログ・デバイセズ)は、DC~3.8GHzの信号に対応しており、少ない外付け部品でステップ・アッテネータを作れるICです。減衰量はデジタル・ピンを用いてパラレル信号で設定するため、制御も簡単です。

● HMC472Aを使ってステップ・アッテネータを製作

HMC472Aを用いたステップ・アッテネータの回路を図3に、製作した基板を写真1に示します。データシートに記載された参考回路をそのまま用いています。

電源はDCジャックから供給します。LDOレギュレータTLV1117(テキサス・インスツルメンツ)を用いて5Vを生成し、HMC472Aへ供給します。

減衰量の設定はロータリDIPスイッチを用いました。スイッチを1クリック回転するごとに2dB刻みで減衰量を設定できます。より細かい0.5dBと1dBは、

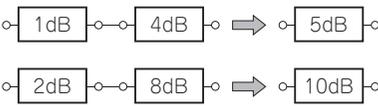


図1 任意の減衰量を得る方法
さまざまな値のアッテネータを用意しておき、つぎはぎすれば任意の減衰量を得られる。しかしつなぎ替えは面倒

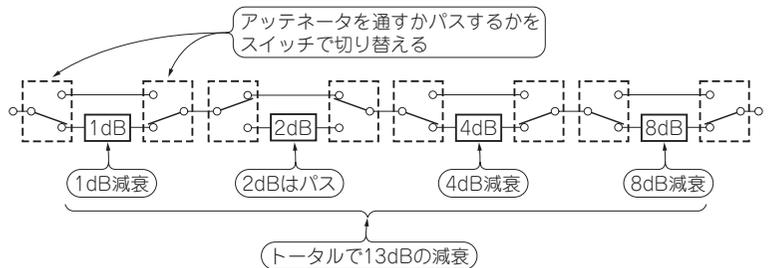


図2 ステップ・アッテネータの回路
スイッチを切り替えて任意の減衰量を得られる

第1章

NanoVNAの自動PC計測システム

—— ターミナルやExcelから操作&データ取り込みできれば便利!

林 輝彦

NanoVNAでPCデータ取り込み&自動測定したい

NanoVNAで測定する伝送特性や反射特性といった周波数特性は、数字のデータとしてではなくグラフで見ることができ、その特徴や傾向を瞬時に把握することができます。超小型でありながら、スタンドアロンでの完全動作を目指し「芸術品」の域に達した優れたユーザ・インターフェースを備えたNanoVNAですが、実務でバリバリ使うには、やはり画面が小さすぎ、操作性も決して良いものではありません。操作をパソコンからリモートで行い、プログラム化することで、測定データをパソコンに取り込んで詳細な検討/比較を可能にし、将来のためのデータベース化をしたい、というのが筆者のかねてからの望みでした。

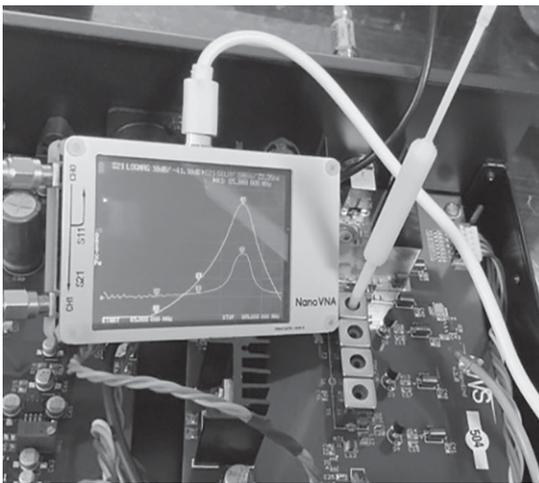
ここでは、パソコン上で広く利用されている表計算ソフトウェアであるMicrosoft Excel(以降Excel)に

NanoVNAで取得した測定データを取り込む方法と、NanoVNAをExcelのマクロ記述であるVBA(Visual Basic for Applications)のプログラムでコントロールして、自動測定する方法について説明します(図1)。

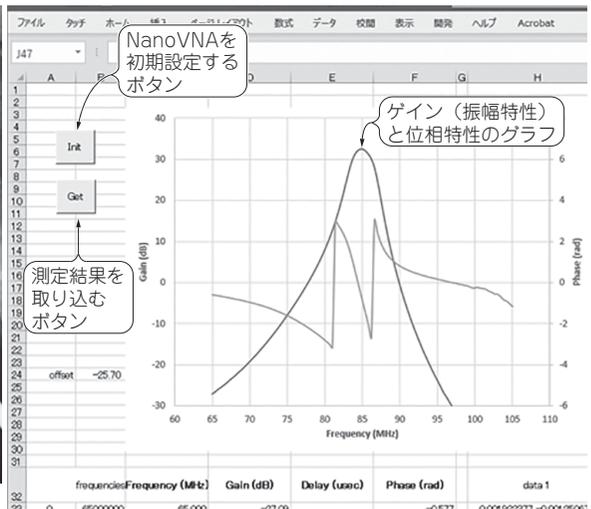
● みんなが使えるExcelが便利

Excelにデータが取り込めると、それだけでも豊富なグラフ化の機能、データ解析機能を使うことができ、十分に便利ですが、さらに測定条件や測定手順をVBAで記述したマクロとして記録できることとなります。同様な測定をする際は、過去に行ったシートを読み出し、必要に応じて修正し「測定の再利用」をすることで作業効率の飛躍的向上を図ることができます。

図2は、Excelのマクロに測定条件を記述し、測定結果を記録し、それをシート上のボタンで呼び出しながら効率良くRFフロントエンドの周波数特性(ゲイン、遅延時間)をグラフ化したものです。



(a) NanoVNAでデジタルFMチューナのフロントエンド部を調整しているようす



(b) 測定データはPCに取り込んでExcelで処理できる

図1 NanoVNAの制御と結果の表示をパソコンで自動化! 本格的なVNAにも負けない便利ツール!
動作周波数レンジの最も低い端/高い端において振幅特性、遅延特性を確認しながら調整を進める

ソフトウェアのバージョンやURL等は変更されることがあるので、適宜読み替えてください

ピッ! いろいろなフィルタ特性の 測り方&自動化テクニック

—— 同じ実験条件の測定データがExcelに集まっていく便利さ!

林 輝彦

NanoVNAの適用例として、入出力インピーダンスが50Ωまたは75Ωで、入出力に同軸コネクタを備えたフィルタやモジュールを測定してみます。同軸コネクタを入出力に備えたフィルタであれば、その特性を測るのには、なるべく短めの同軸ケーブル(パッチケーブル)を用いてNanoVNAに接続するだけです。

正しい測定を行うためには、若干の注意も必要です。以下に、測定を行う際の要点を挙げました。この章で説明したExcelのシートはCQ出版社の本書ページ*からダウンロード可能にしておきますので、必要な変更を加えて、NanoVNAと接続してご利用ください。

● VNAの測定ポートの基準インピーダンスは50Ω

通信システムの設計方法として、個々の機能モジュールの入出力インピーダンスを50Ωとし、それらを伝送線路、すなわち同軸ケーブルを使って接続して組み上げていくモジュール・ベースの設計法があります。扱う周波数が高い(10MHz以上)場合は、この設計スタイルが絶対的な主流といえます。増幅器やフィルタ、ミキサなどの主要な機能モジュール、デバイスは、入出力のインピーダンスが50Ωに設定され提供されるのが普通です。

今日広く使われるインピーダンス50Ωという値がどのようにして決められたかは、筆者は詳しくありませんが、50Ω以外の基準インピーダンスとしては

75Ωという値も広く使われます。家庭のテレビ・アンテナ接続用のケーブルの特性インピーダンスは75Ωです。こちらは、半波長ダイポール・アンテナの給電点インピーダンスが約73Ωということと関係がありそうです。基準インピーダンス50ΩのNanoVNAを使い、75Ωの回路の伝送特性を測定したいこともあります。

実測①…カットオフ周波数19.2MHzと1.2MHzのローパス・フィルタ

高周波回路の実験や測定を行う際に、不要な信号が測定に影響を与えないように、フィルタを挿入する必要に迫られることがあります。そうしたときのため、手元に素性のわかっているフィルタをいくつか用意しておくとう便利です。

写真1に示すのは、そのような筆者の常用フィルタの1つです。ローパス・フィルタとしての仕様は、カットオフ周波数11.3MHz、遮断周波数19.2MHz、保証減衰量40.8dB、帯域内リプル0.011dBといったものです。5次のLC型の楕円関数フィルタ(減衰極は2個)として、かなり以前に設計/製作したものです。10MHzの信号の高調波を取り除き、きれいな単一の正弦波信号に近づける目的で使用します。回路を図1に示します。

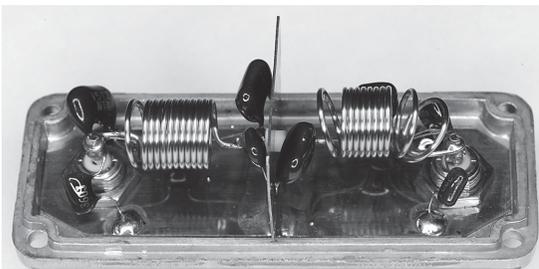


写真1 自作フィルタの特性をいろいろ測定してみる①…
カットオフ周波数11.3MHzのローパス・フィルタ
測定補助用。5次のLC型楕円関数フィルタで、手巻きの空芯ソレノイド・コイルとマイカ・コンデンサで製作

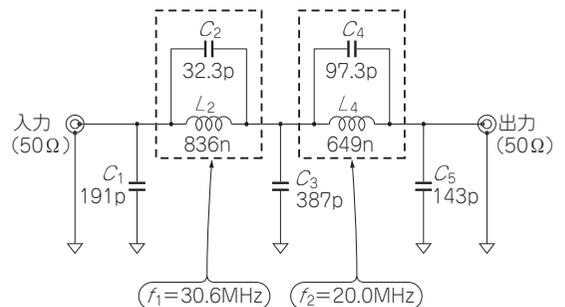


図1 カットオフ周波数11.3MHzの測定補助用ローパス・フィルタの回路
コイルのインダクタンスの調整は、2つの減衰極の周波数(f_1 、 f_2)の調整で行うことができ、製作はしやすい

第1章

リンゴやバナナも等価回路… 品種/品質のインピーダンス解析

— 1 M ~ 100 MHz 測定! 果物に求められる非破壊品質チェックの研究

知念 幸勇

果物や野菜などの身近にある植物の品種の違いや品質の変化を解析する方法として、さまざまな化学分析法や物理分析法があります。ここでは電気的な解析法の一例として、(写真1, 図1)ベクトル・ネットワーク・アナライザ(Vector Network Analyzer; VNA)を使ったインピーダンス解析法を紹介します。

果物や野菜の品種/品質はインピーダンスで定量的に測定できる!

● 植物のインピーダンス測定の世界…NanoVNAが便利
VNAを用いて果物や野菜に電気信号を入力すれば、電気回路と同様に反射や透過した電気信号が測定できます。例えば、図1に示すように、品種の違いはインピーダンスやアドミタンスの差異となって表れます。果物や野菜には抵抗素子やコンデンサ素子が含まれているわけではありませんが、果物や野菜を疑似的な電気回路とみなすことで、測定結果の詳細な解析が可能になります。

● VNAでインピーダンスを測定するしくみ

VNAは、低インピーダンス(50 Ω)の高周波伝送システム系で構成されているため、広帯域/低雑音の差動増幅器が使える、高周波測定に優れています。

ポケット型VNAは、方向性結合器やシンセサイザの構成/機能を大幅に簡略化して、価格をベンチトップ型の1/100以下にしています。本稿で使用した携帯型VNAによる測定の基本構成を図2に示します。

信号発生器(シンセサイザ)からの信号は、結合器(抵抗ホイートストン・ブリッジと2連のバランで構成)を経て、測定試料(DUT)に送られます。DUTで反射した信号(V_r)は結合器とSW₃を経てミキサに送られ、シンセサイザからのLO信号とヘテロダイン検波されて12 kHzの信号にダウン・コンバージョンされます。12 kHzの低周波信号は、OPアンプと12ビットのA-D変換を経て、マイコンにおいて大きさと位相の情報(Sパラメータ)に変換されます。これを用いて、計算でインピーダンスに変換します(コラム1参照)。

シンセサイザから結合器を経由して生成される基準

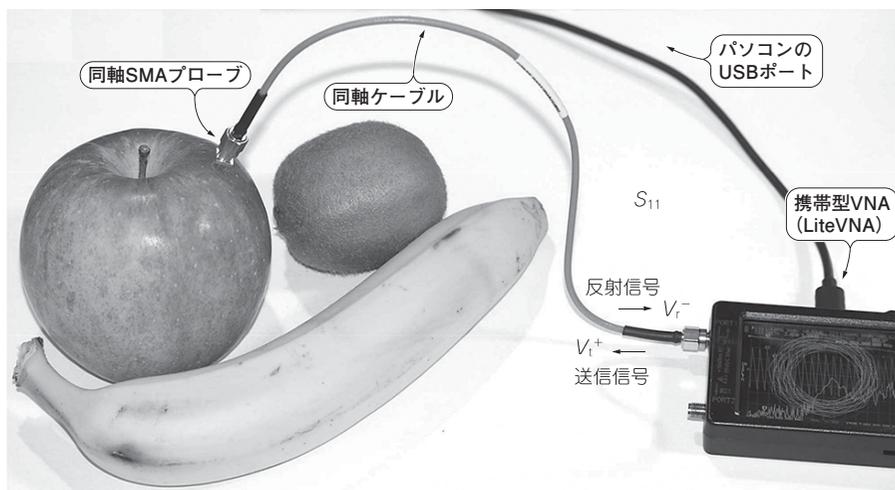


写真1 何ごとも等価回路としてNanoVNAで測れる
LiteVNAで果物のSパラメータを6 GHz対応測定しているようす。品種や品質、味や成分などを調べるのにもVNAによる電気計測が役立つ!

ソフトウェアやURL等に変更されることがあるので、適宜読み替えてください

スミス・チャートの 数学ダイジェスト

— NanoVNA の必修科目

知念 幸勇

● 反射係数と入力インピーダンスからインピーダンス・チャートはどのように導くのか

スミス・チャートは周波数やインピーダンスのダイナミック・レンジの広い高周波回路において、それらのパラメータの変化(-∞~+∞)を半径=1の限られた円内に収めて、反射係数 S_{11} と重ねて表示できるなどのメリットがあります。スミス・チャートがなじみにくいのは、極座標表示と数式の導き方に由来していると考えられます。

スミス・チャートのインピーダンス表示は、反射係数 S_{11} と入力インピーダンス Z_{in} の式から円の方程式を導き、抵抗 r リアクタンス x をパラメータとした円を重ね合わせたグラフです。その導出と作成の手順からスミス・チャートの仕組みが理解できます。

● 反射係数 S_{11} と入力インピーダンスの式を1つの式にまとめる

S パラメータの反射係数 S_{11} と入力インピーダンス Z_{in} の関係は、式(1)で表せます。この式を変形すると、式(2)が得られます。ここで $Z_0 = 50 \Omega$ ですが、規格化して $Z_0 = 1$ とおきます。

$$Z_{in} = \frac{Z_0(1+S_{11})}{1-S_{11}} \dots\dots\dots (1)$$

$$S_{11} = \frac{Z_{in}-Z_0}{Z_{in}+Z_0} \dots\dots\dots (2)$$

入力インピーダンス Z_{in} と反射係数 S_{11} は複素数なので、それぞれ抵抗 r とリアクタンス x を含む式(3)と変数 u, v を含む式(4)で表せます。

$$Z_{in} = r + jx \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{11} = u + jv \dots\dots\dots (4)$$

式(2)、式(3)、式(4)をまとめると、 Z_{in} と S_{11} の関係式は式(5)になります。

$$u + jv = \frac{(r-1) + jx}{(r+1) + jx} \dots\dots\dots (5)$$

● 実数部と虚数部の等式から2つの式に分ける

式(5)を展開すると、実数部と虚数部の等式は、それぞれ式(6)、式(7)となります。

$$v(1+r) + ux = x \dots\dots\dots (6)$$

$$u(1+r) - vx = r - 1 \dots\dots\dots (7)$$

変数 u, v とパラメータ r を含む式と、変数 u, v とパラメータ x を含む式を導くため、式(7)より、 x を r の式(8)、 r を x の式(9)で表します。

$$x = \frac{v(1+r)}{1-u} \dots\dots\dots (8)$$

$$r = \frac{x(1-u) - v}{v} \dots\dots\dots (9)$$

● 2つの式から u, v, r の2次式を導く

式(8)を式(6)に代入して、変数 u の2次の一般形の式(10)を導きます。

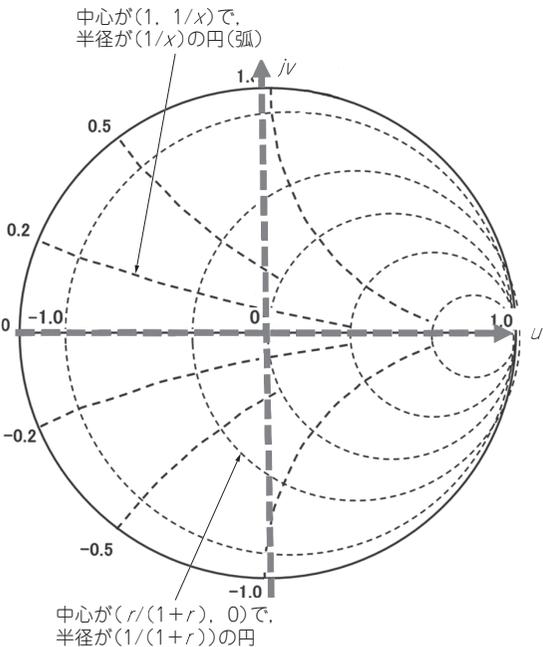


図1 スミス・チャートのインピーダンス座標は、反射係数 $S(u, v)$ の座標上の(1, 0)点で内接する、 r と x をパラメータとする2種類の円が重なって表示されている

スゴすぎる…6.3 GHz対応LiteVNA でマイ科学分析ラボに挑戦

——なんと磁気共鳴まで！ ロースハムの誘電体・磁性体特性

八幡 和志

今までは、VNA(ベクトル・ネットワーク・アナライザ)を使った測定を行うには数百万円クラスの投資が必要だったのが、3万円程度で実験できるようになりました。

今回は、多分、今までに測られていないであろう食品のスライス・ハム(ロース)をサンプルに使用して、その誘電現象や磁性現象を測ってみました(写真1)。研究に使うような精密なものではなく、簡単に入手できるもので測定系を作ってみました。

スゴすぎる NanoVNA のポテンシャル

● そもそも電子部品/回路の特性が調べられる

高周波を取り扱う回路を作ろうとすると、その周波数で機能を発揮できる電子部品を選ぶ必要があります。高周波で動作する電子部品かどうかは、材料の性質、つまり物性で決まってきます。

例えば、電解液式のアルミ電解コンデンサは、電解液のなかのイオンの動きやすさで、高周波特性の上限が決まります。また、コイルの磁心は、電源回路用のトランスでは軟鉄などが使われていますが、高周波回路のインダクタにはフェライトなどが使われています。

いずれも使える周波数の上限は、インピーダンス周波数特性の測定で見極めることができます。

今回は、インピーダンス周波数特性の測定で得られる複素数のSパラメータから、複素インピーダンスを計算し、その虚数成分から回路パラメータを導き、物性パラメータにしました。

● 食品などの科学分析にも使える

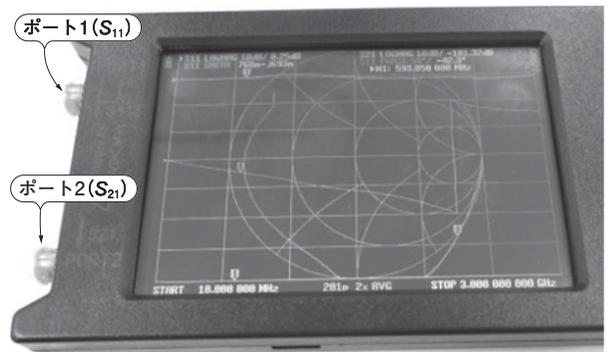
回路素子の測定はすでに取り組みられている方も多いところですが、本稿で紹介するのは、回路素子ではない、^{なまもの}生物についての電気的な測定です。人体への電磁波の影響を観測したり、化学反応の解析をするなど、電気回路以外の分野にもNanoVNAを応用できます。

今回の実験では、6.3 GHzまで測定できるLiteVNAを使用しました(写真2)。なお、スライス・ハムをパッケージから出したままだと、水分が多すぎて測れないので、ホットプレートで100℃、30分程度の条件で乾燥目的で温めてから測定しました。

また、対象のインピーダンスの範囲によって、適した測定方法が異なります(コラム1参照)。



(a) ターゲットのスライス・ハム(水分が多すぎると測れないので、乾燥させてから小さく切って測定)



(b) 6.3 GHzまで対応しているLiteVNAを使用した

写真1 実験！スライス・ハム(ロースハム)を誘電体・磁性体としてLiteVNAで分析してみる

- 本書記載の社名、製品名について－本書に記載されている社名および製品名は、一般に開発メーカーの登録商標です。なお、本文中ではTM, ®, ©の各表示を明記していません。
- 本書掲載記事の利用についてのご注意－本書掲載記事は著作権法により保護され、また産業財産権が確立されている場合があります。したがって、記事として掲載された技術情報をもとに製品化をするには、著作権者および産業財産権者の許可が必要です。また、掲載された技術情報を利用することにより発生した損害などに関して、CQ出版社および著作権者ならびに産業財産権者は責任を負いかねますのでご了承ください。
- 本書に関するご質問について－文章、数式などの記述上の不明点についてのご質問は、必ず往復はがきか返信用封筒を同封した封書でお願いいたします。勝手ながら、電話でのお問い合わせには応じかねます。ご質問は著者に回送し直接回答していただきますので、多少時間がかかります。また、本書の記載範囲を越えるご質問には応じられませんので、ご了承ください。
- 本書の複製等について－本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも認められておりません。

JCOPY 〈(社)出版者著作権管理機構委託出版物〉

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構(電話03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp)の許諾を得てください。

NanoVNA 測定で電子回路マスタ

2025年11月15日 初版発行

© エンジャー / 川口 正 / 川藤 光裕 / 小宮 浩 / 鮫島 正裕 / じがへるつ / 高橋 知宏 / 知念 幸勇 / 早川 槇一 / 林 輝彦 / 八幡 和志 / 脇澤 和夫 2025
(無断転載を禁じます)

著 者 エンジャー 川口 正
川藤 光裕 小宮 浩
鮫島 正裕 じがへるつ
高橋 知宏 知念 幸勇
早川 槇一 林 輝彦
八幡 和志 脇澤 和夫

発行人 櫻 田 洋 一

発行所 CQ出版株式会社
東京都文京区千石 4-29-14 (〒112-8619)

定価はカバーに表示してあります。
ISBN978-4-7898-4796-4

☎ 03-5395-2123 (出版部)
☎ 03-5395-2141 (販売部)

乱丁・落丁本はご面倒でも小社宛てにお送りください。
送料小社負担にてお取り替えいたします。

編集担当者 新谷 あやこ, 上村 剛士
表紙・本文DTP 西澤 賢一郎
印刷・製本 三共グラフィック株式会社
Printed in Japan

ISBN978-4-7898-4796-4

C3055 ¥2700E

CQ出版社

定価 2,970円(本体2,700円)⑩



9784789847964



1923055027008

基本的なしくみ&使い方から自動PC計測や6GHz対応LiteVNAまで!

NanoVNA測定で 電子回路マスタ

