

ネットワークアナライザ活用の基礎技術に関する研究

小田原幸生
電子・情報担当

Basic Study for Utilization of a Network-Analyzer

Yukio ODAWARA
Electronic and Information Engineering Division

要 旨

高周波信号の伝播では信号は波動として振る舞い、オームの法則を基本とする一般回路とは数学的取扱いや計測方法が異なる。そこで、この高度な計測器であるネットワークアナライザの新規導入を機に、アンテナ及び基板伝送路の開発、製作、測定の実例を通じ、基本的な活用法の確認を行った。

1. はじめに

近年、無線機器や高速通信、大容量データを取り扱うコンピュータ機器が身近になり、電子技術に関わってきた技術者がこれらの回路に触れる機会が多くなった。当センターには従来から電波・高周波信号強度を測定するスペクトラムアナライザがあるが、昨年度、新しく高周波伝送路の特性（反射率、インピーダンス等）を計測するネットワークアナライザが導入された。そこで、これらの機器を研究や技術指導で有効に活用するため、アンテナや基板上の高周波伝送路の開発、製作、測定を通じ、基本的な活用方法を確認した。ネットワークアナライザの写真を Fig.4 に、仕様を Table 1 に示す。

2. 315MHz 帯スリーブアンテナの製作

利用に際し免許を要しない微弱無線では簡易な線条アンテナが使われることが多いが、厳密に製作したアンテナを使えば通信範囲は拡大する。そこで、Fig.1 に示すようにアンテナと信号線の同軸ケーブルを同一軸に配置し、利便性の高いスリーブアンテナの製作例を示す。スリーブアンテナはスリーブ（金属管）による負極エレメントと導線による正極エレメントから成り、構造的にダイポールアンテナに類似している。しかし、スリーブの中に同軸ケーブルを通すため、スリーブと同軸ケーブルが相互に影響し性能を損なうことがないように製作することがポイントとなる。

2.1 スリーブ長の調整

スリーブと同軸ケーブル外部導体（網線）は同軸導体を形成し、高周波回路のマッチングで使われるスタブとなっているので、アンテナ同調周波数で相互のインピーダンスが最大となるようスタブの長さを調節する。スリ

Table 1 ネットワークアナライザの仕様

型 式	E5071C
メーカー名	アジレント・テクノロジー
適用周波数	300kHz~4.5GHz
ポート数	2
その他機能	TDR (Time Domain Reflectometry) ※1

※1 時間領域解析

同軸ケーブル(信号線)

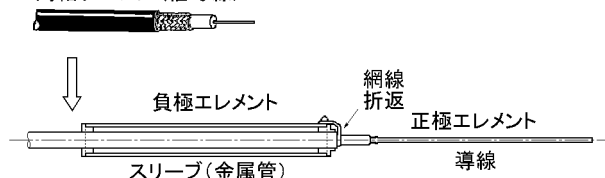


Fig.1 スリーブアンテナの構造

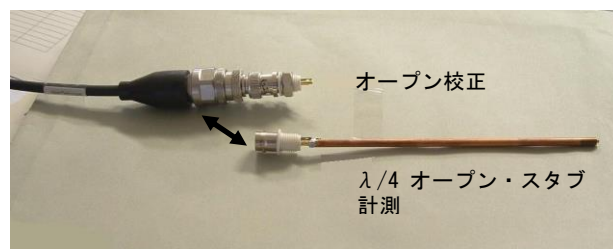


Fig.2 スリーブ長の計測

ーブと同軸ケーブル網線は Fig.1 に示すように網線折返して接続（短絡）されているので、 $\lambda/4$ ショート・スタブ（ λ :波長）を形成する。この場合、スリーブ長は、網線折返部を非接続としてオープン・スタブとし、相互の抵抗がゼロになる長さと同じであるので、作業の容易さからこの方法を用いた。

Fig.2 に示すように、BNC コネクタに何も接続しない

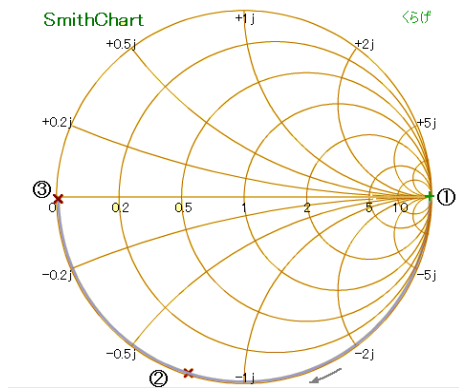


Fig.3 スミスチャート（スリーブ長の調整）

状態で、ネットワークアナライザのオープンの位相補正をする。これは Fig.3 のスミスチャートの①の位置に対応する。次に、金属管の内部に同軸ケーブルを通す際、同軸ケーブルが管の中心に来るように、同軸ケーブルの周りに熱収縮チューブを重ね位置を調整する。そして、この同軸ケーブル外部導体を BNC コネクタ中心端子に、金属管をグランド端子に接続し、ネットワークアナライザでスミスチャートを求め、Fig.3 ②の位置を得る。この際、②の位置はスミスチャートの外周に沿って動き、①～②の長さはスリーブ長に比例する。比例関係によりインピーダンス 0Ω になる③の位置に来るようにスリーブの長さを調整し、スリーブ長が求まる。

2.2 正極エレメントの取り付け

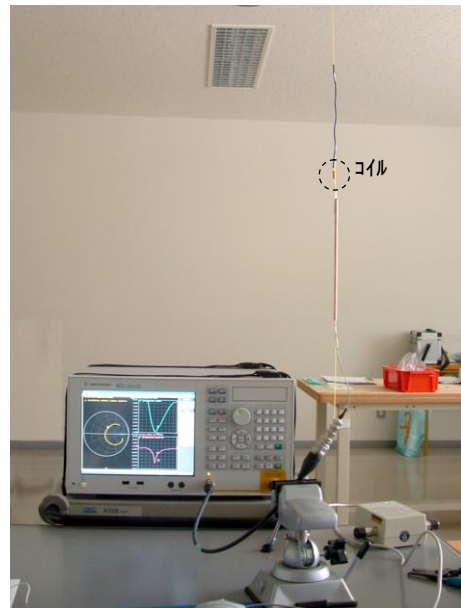


Fig.4 ネットワークアナライザ（E5071C）によるスリーブアンテナの測

前項で求めたスリーブに任意長の同軸ケーブルを通し、網線折返部で同軸ケーブル外部導体を金属管に接続する。そして、同軸ケーブルの芯線に電線または銅線による正極エレメントを取り付け、ネットワークアナライザで SWR 測定を行い、使用周波数で SWR が 1 に近づくように正極エレメント長を調整する。この時、エレメント長を短縮し、アンテナ特性インピーダンスを下げるため、コイル（ローディングコイル）を付けることもある。

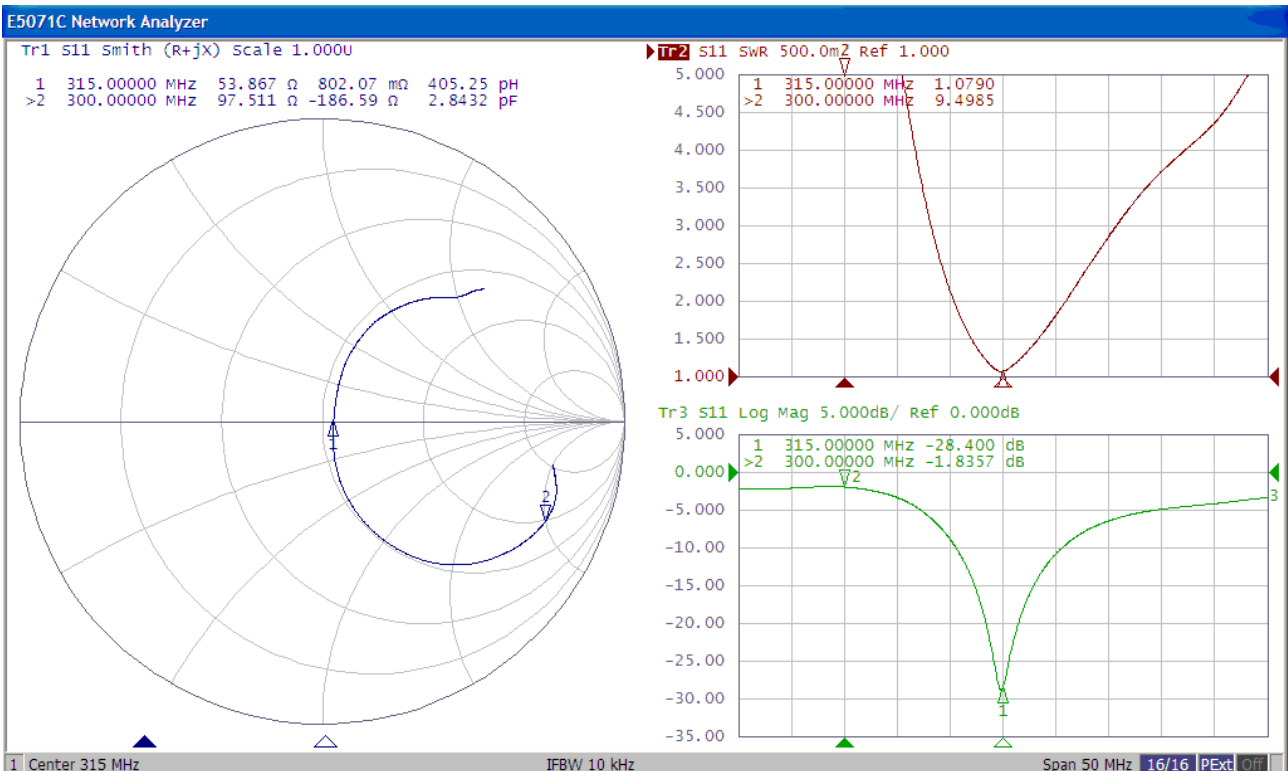


Fig.5 試作した 315MHz 帯スリーブ・アンテナのスミスチャート（左）、SWR（右上）、反射率 S11（右下）

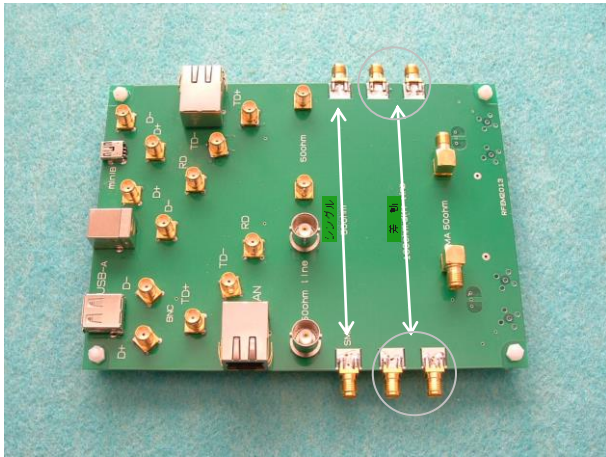


Fig.6 RF 評価基板 (部品面)

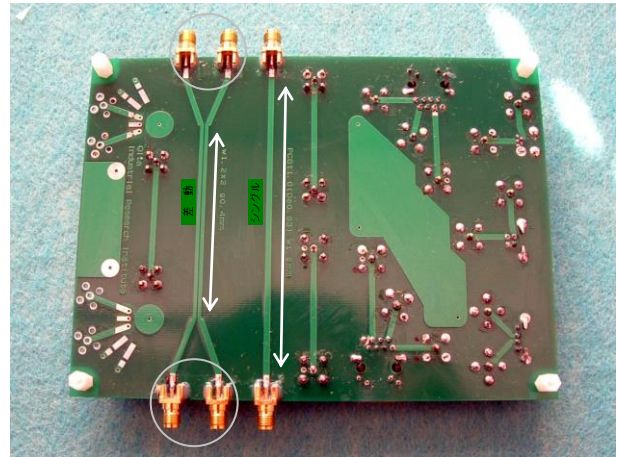


Fig.7 同 (ハンダ面)

Table 2 製作したスリーブアンテナの寸法等

スリーブ	外径 4mm, 長さ 167mm の銅管
同軸ケーブル	外径 1.3mm(潤工社 DFS020)
正極エレメント	170mm の被覆電線 外形 4mm, 9 巻, 35nH コイル付

製作したスリーブアンテナの寸法等を Table 2 に、ネットワークアナライザで特性を測定した結果を Fig.5 に示す。これより使用周波数 315MHz で SWR 1.08, 反射率-30dB となり、良好な特性となった。

2.3 スリーブアンテナの製作のまとめ

本研究担当者は 2010 年度に畜産分娩監視システムの開発の中でスリーブアンテナの製作を行った⁽¹⁾。その際は携帯型 SWR メータを用い調整を行ったが、今回はネットワークアナライザによるスミスチャートや SWR 測定により、調整目標と現在の状態が定量的に把握でき、測定精度の高さと相まって効率的な製作ができた。

3. RF 評価基板の開発と測定

伝送路の設計とシミュレーションでは SONNET 試用

Table 3 RF 評価基板の仕様

基板材質 特性 サイズ等	FR-4, 厚 1mm (銅箔 35 μ m \times 2 を含む.) サイズ 120mm \times 160mm 比誘電率 4.0 \sim 4.2 (1GHz) Loss-tangent 0.012 \sim 0.014 (1GHz)
50 Ω シングル	配線幅 1.9mm \rightarrow 実測値 45 Ω
差動伝送路	配線幅 1.2mm \times 2, ギャップ 0.4mm 差動モード 100 Ω \rightarrow 実測値 85 Ω 同相モード 34 Ω \rightarrow 34 Ω 実際の配線長 67mm
その他評価回路	LAN, USB

版 (Sonnet Software, Inc.) を用い、基板設計ではフリーソフト、PCBE を用いた。開発した RF 評価基板の写真を Fig.6, Fig.7 に、仕様を Table 3 に示す。測定は、ネットワークアナライザが 2 ポートのため、差動モード、同相モードのインピーダンス、反射率は TDR により測定した。なお、本報告ではシングルモード伝送路の測定には触れない。

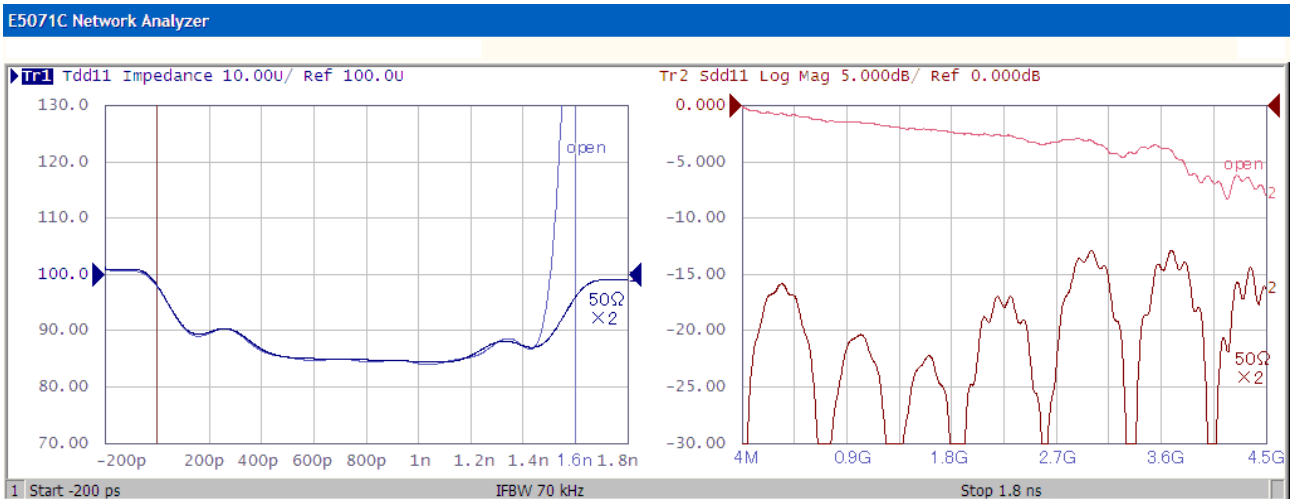


Fig.8 TDR によるマイクロストリップライン差動伝送路の差動モード・インピーダンス, 反射率

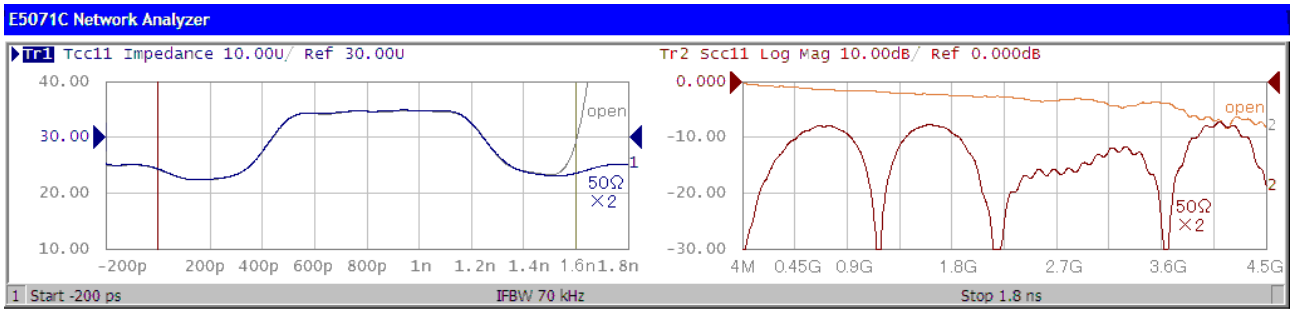


Fig.9 TDR によるマイクロストリップライン差動伝送路の同相インピーダンス, 反射率 (Scc11) の測定結果

3.1 マイクロストリップライン差動伝送路の測定

差動モードと同相モードのインピーダンス, 反射率の測定結果をそれぞれ Fig.8, Fig.9 に示す. この図で“open”と記したものは伝送路の終端を開放したものである. インピーダンス表示では横軸の単位は秒であるが, これはキャリブレーション基準位置から基板上の測定箇所までの信号伝播の往復時間に相当し, 1.6ns は配線長約 120mm に当たる. 開発における差動モード及び同相モードのインピーダンスの目標値と測定結果 (代表値) を Table 3 の中に記載した.

透過率の測定は 2 ポート・ネットワークアナライザでは精度的に不利であるので, 熊本県産業技術センターの 4 ポート・ネットワークアナライザ (アジレント・テクノロジー E8364C) により測定した. 機器の写真を Fig.10 に示す. 差動モードと同相モードの反射率, 透過率の測定結果をそれぞれ Fig.11, Fig.12 に示す. これによると, 反射率の測定結果ではいずれも当センターの 2 ポート・ネットワークアナライザの上限周波数 4.5GHz まで概ね一致した.

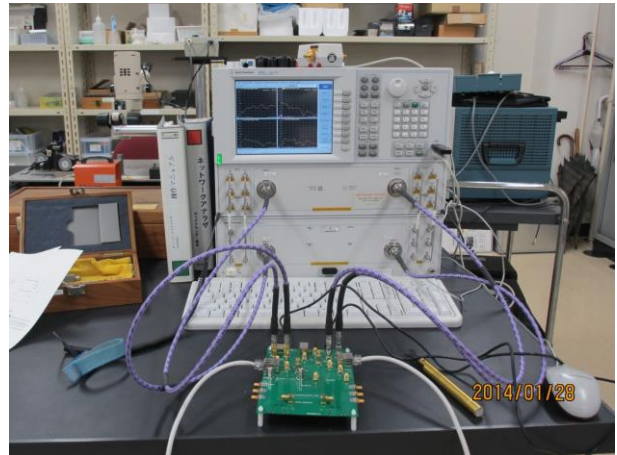


Fig.10 4ポート・ネットワークアナライザ (E8364C) (熊本県産業技術センター)

3.2 USB 伝送路の測定

USB2.0 は次の特徴を持つ.

- ①通信ケーブル
 - ツイストペア線 (差動インピーダンス $90\Omega \pm 15\%$) 1 組
 - ±電源ライン 1 組
 - ケーブル長 最大 5m
- ②伝送速度 (ハイスピードの場合)

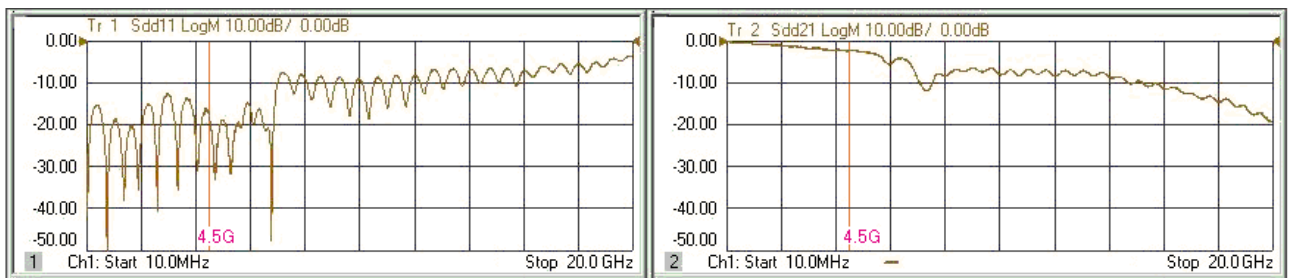


Fig.11 差動モード 反射率 Sdd11, 透過率 Sdd21 (4ポート・ネットワークアナライザ E8364C)

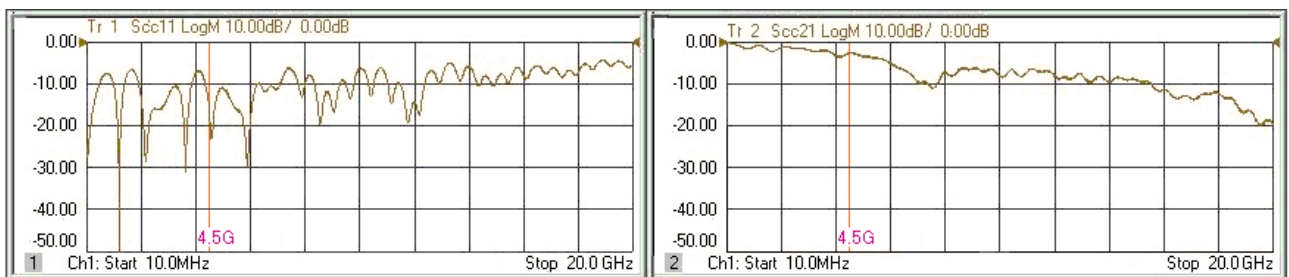


Fig.12 同相モード 反射率 Scc11, 透過率 Scc21 (4ポート・ネットワークアナライザ E8364C)

最大 480Mbps (基準クロック 240MHz)

測定箇所を Fig.13 に, 測定結果を Fig.14 に示す.

なお, USB ケーブル長は 1.5m で, USB-A 端子側をネットワークアナライザ測定ケーブルに繋ぎ測定した. 測定結果から, 基準点近くの差動インピーダンスは 80Ω であるが, 遠ざかるにつれ上昇している. これは TDR 測定で誤差が増すためと考えられる. 反射率は基準クロックの 5 倍の 1.2GHz (Fig.14 右チャート▽印) まで見て -13dB 以下で, USB 規格に照らして妥当な結果である.

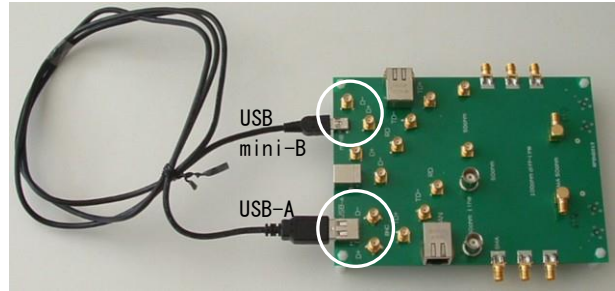


Fig.13 USB 伝送路測定箇所

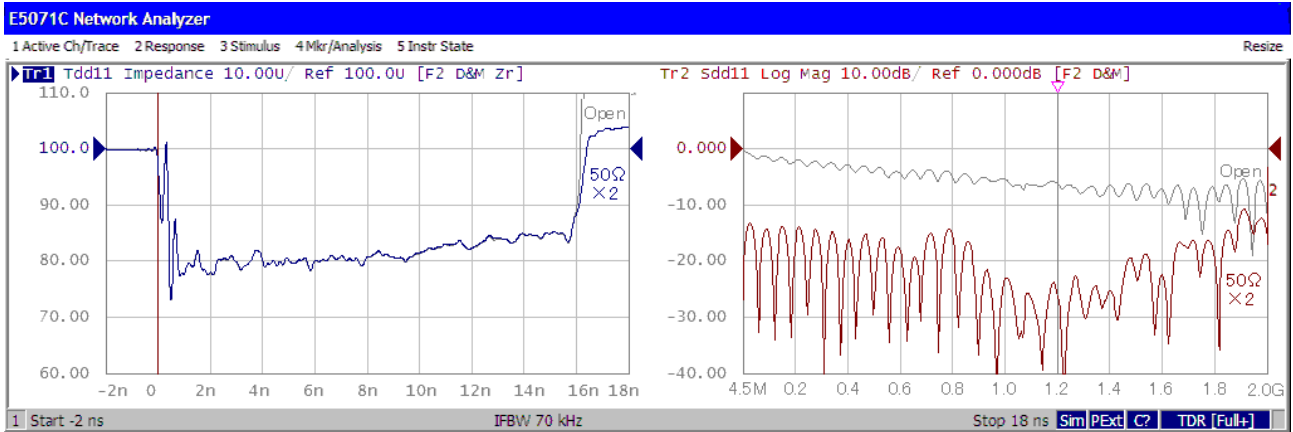


Fig.14 TDR による USB 差動伝送路の差動インピーダンス, 反射率 (Sdd11) の測定結果

3.3 LAN 伝送路の測定

LAN (100BASE-TX) は次の特徴を持つ.

①通信ケーブル

8 芯 4 組のツイストペア線 (差動インピーダンス 100Ω)
最大 100m

②伝送速度 最大 100Mbps (基準クロック 50MHz)

LAN 伝送路の測定ではパルストランス内蔵モジュラージャック (Pulse Electronics 社, J0011D21BNL) を使い, Fig.15 のように LAN ケーブル (3m) を繋ぎ, ミックスモード差動反射率(Sdd11)と差動透過率(Sdd21)を測定した. この時, ネットワークアナライザに繋がらないコネクタには 50Ω, SWR1.05 以下の終端抵抗を用いた. また, Fig.16 に示すミックスモードの計算式で S パラメータ (S11,S12, ...) は複素数として測定した.

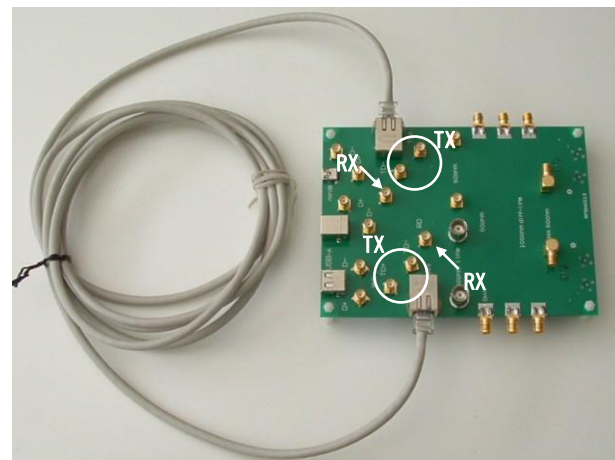
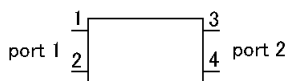


Fig.15 LAN 伝送路測定 (LAN ケーブル)

ミックスモード ポート構成



計算式

差動反射率

$$S_{dd11} = 0.5 \times (S_{11} - S_{12} - S_{21} + S_{22})$$

差動透過率

$$S_{dd21} = 0.5 \times (S_{31} - S_{32} - S_{41} + S_{42})$$

Fig.16 シングルモードか
ミックスモードへの計算式

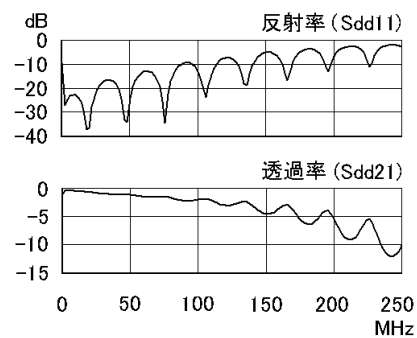


Fig.17 LAN TX 伝送路測定結果

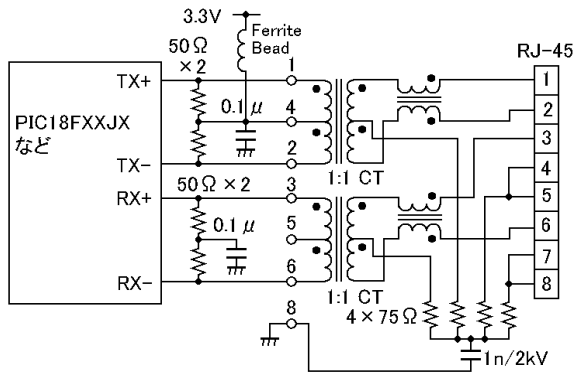


Fig.18 モジュージャック接続

Fig.17 の測定結果から、本章他の測定例と比べ全体的に反射率が高く、特に 100MHz 以上で反射率が-10dB を大きく超えるが、モジュージャックの仕様書と照らすと妥当な結果である。

実際の使用例で、パルストランス内蔵のモジュージャックとドライバ回路 (IC) との接続の推奨回路の一例を Fig.18 に示す。これによると、モジュージャックのドライバ回路側に 50Ω 抵抗が集中定数として使われ、これに対し測定ケーブルでは分散定数であるので測定回路と使用形態が異なる。そこで、推奨回路を参考にし、RX 伝送路のシングルモード測定回路を Fig.19 に、測定結果を Fig.20 に示す。これによると、必要周波数帯域 250MHz 以下で反射率は-15dB 以下となり、他の例と同程度の反射率に収まる。

3.4 RF 評価基板の開発と測定のみとめ

①マイクロストリップラインによる基板伝送路の測定結果について

Table 3 に記したように、シングルモード伝送路の特性インピーダンスが目標の 50Ω に対して 45Ω、差動伝送路の差動インピーダンスが目標の 100Ω に対して 85Ω になり、当初、5%以内の精度を目指していたので、不十分な結果となった。

②USB 伝送路と LAN 伝送路の測定結果について

いずれも基板上の配線の影響は小さいと思われ、妥当な測定結果が得られた。

4. おわりに

RF 評価基板の開発で、基板上に形成したマイクロストリップラインの特性インピーダンスの精度が不十分であった点について、基板の製作委託先メーカーや、熊本県産業技術センターのネットワークアナライザ測定担当者から、“一般的に基板の材質や寸法には 1 割程度の誤差があり、簡単なテストにより特性を確認し、誤差をフ

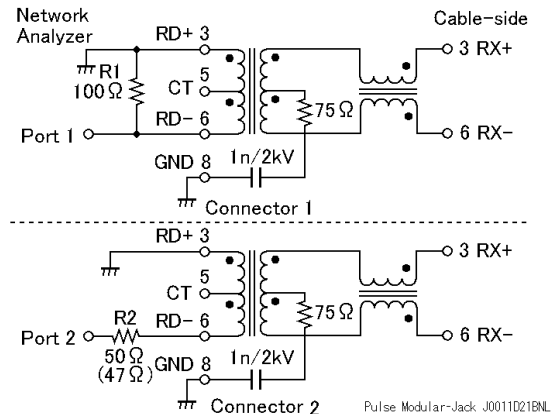


Fig.19 シングルモードでの RX 伝送路測定回路

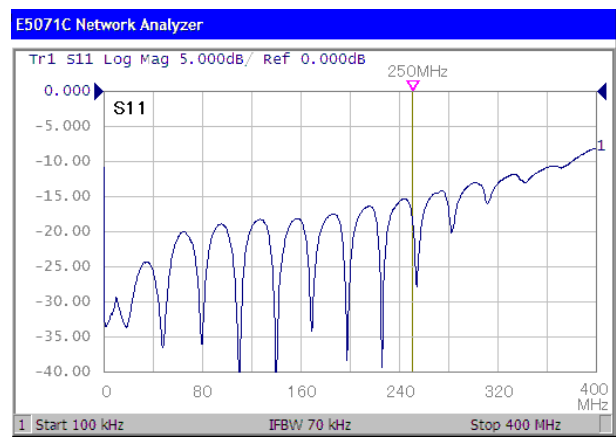


Fig.20 RX 伝送路測定結果 (シングルモード)

ィードバックした上で本格的な製作に入ることが大切”という助言を受けた。

未だ実施できていない TDR 測定のアイ・パターン表示機能等についても、今後、確認することになっている。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、高周波電磁界解析ソフトウェア“SONNET”の操作に関して度々ご助言いただいた(有)ソネット技研 取締役 石飛徳昌氏、4ポート・ネットワークアナライザによる測定でお世話になった熊本県産業技術センター ものづくり室 石松賢治氏、基板設計や測定結果の評価でご助言いただいたリキシステムズ 松垣佳克氏に謝意を表します。

参考文献

- (1) 大分県産業科学技術センターニュース、2010年度 第154号 “微弱無線利用計測における高感度受信と受信範囲拡大”