

高速デバイスの高周波特性評価手法の確立

近藤 崇*¹⁾

Implementing an evaluation method for high-frequency characteristics in high-speed devices

Takashi Kondo*¹⁾

The study achieved a calibration method for a vector network analyzer using a TRL method. A theoretical value for the measurement accuracy of a TRL method is calculated. It was able to measure high frequency characteristics of high-speed devices with higher accuracy. The highest available frequency for the TRL system is 40 GHz. The measurement accuracy is ± 0.8 dB approximately at reflective characteristics.

キーワード： ネットワークアナライザ, TRL 法, 残留誤差, ビーティーライン

Keywords : Network analyzer, TRL method, Residual error, Beatty line

1. まえがき

基板実装部品などの非同軸系デバイスの特性を測定する場合、比較的低い周波数帯での測定であれば何らかのフィクスチャを用いて同軸系に変換して測定することも可能であろう。しかし高周波特性を測定する場合においては、これらのフィクスチャは完全に無視できない存在となる。高周波になるほど、同軸系に変換する部位に対して波長が非常に短くなることに起因する問題が顕在化するためである。

本研究は、ネットワークアナライザの校正を TRL (THRU - REFLECT - LINE) 法で実施することにより、都産技研で従来測定できなかった高速デバイスの高周波特性の測定を可能にする試みである。

2. ネットワークアナライザの校正⁽¹⁾

ネットワークアナライザ (VNA) の校正とは、VNA が既知のデバイス (標準器) を正確に測定し、測定値と実際の値との間のベクトル差を把握する処理である。VNA は、測定時にこのデータを使用して未知のデバイスの測定値からシステムチック誤差を取り除く。システムチック誤差は、主にマイクロ波帯において、VNA の測定精度を決定する最も重要な誤差要因である。

校正後の測定精度は、VNA の確度、誤差補正モデルの正確さ、標準器のモデリングの正確さに依存しており、特に標準器に対する依存度は大きい。

VNA で使用可能な校正には、レスポンス校正、レスポンス&アイソレーション校正、 S_{11} 1ポート校正、 S_{22} 1ポート

校正、フル2ポート校正、TRL 2ポート校正の6種類が存在する。SOLT 法に代表されるフル2ポート校正及び TRL 2ポート校正は、システムチック誤差の構成要素のうち、最も多くの誤差項を補正するものである。

2.1 SOLT 法校正の問題点 SOLT 法によるフル2ポート校正は、比較的高い測定精度が得られる一般的な校正手法として広く使用されている。同軸系であれば、ほとんどの種類の同軸コネクタに対して SOLT 標準器が測定器メーカーなどから提供されている。

しかし、非同軸デバイスを測定する場合は使用するフィクスチャに対応した標準器を作製して定義する必要がある。この標準器を正確に定義するのは一般的に困難であり、Kaバンドに及ぶ高周波においてはほぼ不可能と言える。

2.2 TRL 法による校正 TRL 2ポート校正は、従来の SOLT フル2ポート校正に代わる校正法である。マイクロストリップ (非同軸) 環境におけるデバイス測定に対して、より単純で便利な標準器を使用する。即ち、THRU, REFLECT, LINE の各標準器の特性評価のための条件は厳しいものではなく、これらの標準器をより簡単に作製できる。

TRL 法による誤差モデルを図 1 に示す。TRL 校正では、10 回の測定を実行して 8 個の未知の項 (ϵ_{xx}) を求める。従来の誤差項、即ち、順方向と逆方向の方向性 (E_{DF} , E_{DR})、伝送トラッキング (E_{TF} , E_{TR})、反射トラッキング (E_{RF} , E_{RR})、順方向と逆方向のソースマッチ (E_{SF} , E_{SR})、順方向と逆方向のロードマッチ (E_{LF} , E_{LR}) は、これら 8 個の未知の項から得ることができる。

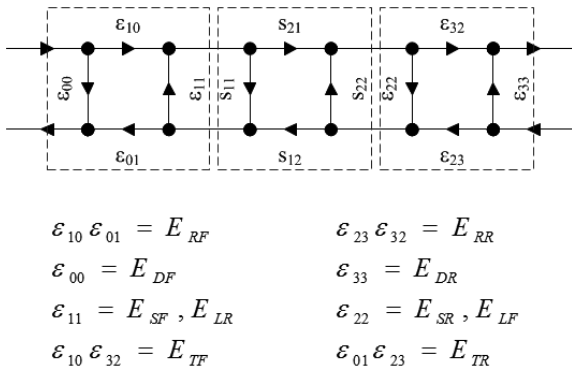


図1. TRL 法による誤差モデル

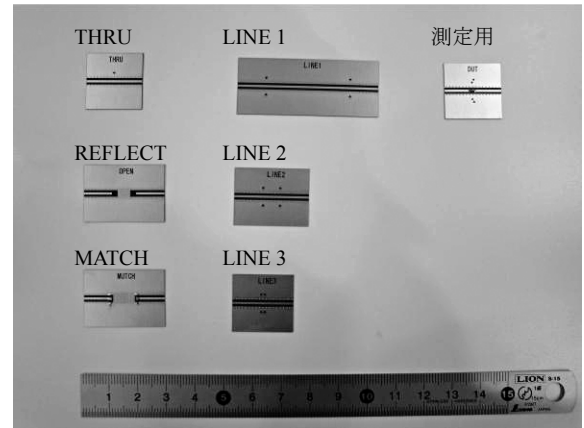


図2. 設計・作製した TRL 標準器

3. TRL 校正に用いる標準器の設計⁽¹⁾

本研究において設計・委託製造した TRL 標準器を図 2 に示す。今回実施した各標準器の設計手順は以下のとおりである。

(1) THRU 標準 TRL 校正による測定の基準面は、通常、THRU 標準の中央に確立される。

40 GHz までの信号伝送を考慮し、不要な伝送モードの発生を抑止するよう、基板材料やその板厚、GND ビアの間隔などを決定した。使用した基板材料は 254 μm 厚の PTFE 基板で、その比誘電率は 2.2 である。

特性インピーダンス (Z_0 、一般的に 50 Ω) は LINE 標準と同一である必要がある。電磁界シミュレータを用いて 50 Ω となる線路幅を求めた。線路幅を 10 μm 単位で変化させて解析し、反射損失が最小となる値を求めた結果、線路幅を 760 μm とした。

(2) REFLECT 標準 反射係数が 1 に近い標準器である。最適な反射係数は 1.0 であるが、既知である必要はない。通常、開放もしくは短絡で実現する。

(3) LINE 標準 伝送遅延時間により特性化された線路長を有する標準器である。最適な線路長は、所望の周波数範囲の算術平均の周波数における 1/4 波長である。その電気長 l_e は次式で定義される。ここで、 C_0 は真空中の光速、 f_1 及び f_2 はそれぞれ周波数範囲の開始及び終了である。

$$l_e[m] = \frac{c_0[m/sec]}{\left(\frac{f_1[Hz] + f_2[Hz]}{2}\right) \times 4} \dots\dots\dots (1)$$

この電気長 l_e の物理長 L は、実効比誘電率 ϵ_{eff} を用いて次式で与えられる。

$$L[m] = \frac{l_e[m]}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \dots\dots\dots (2)$$

L による遅延時間 t_d は、(1)式を用いて次式で与えられる。

$$t_d[sec] = \frac{l_e[m]}{c_0[m/sec]} \dots\dots\dots (3)$$

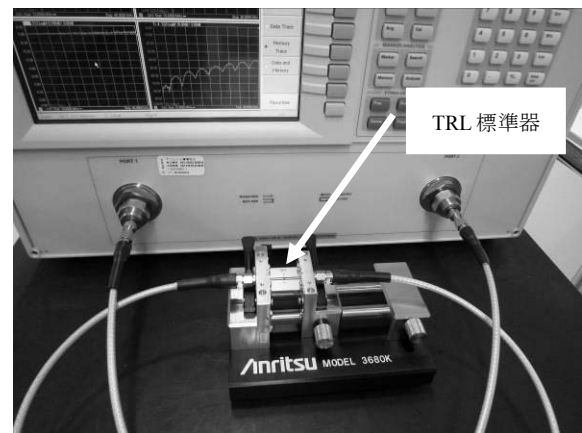


図3. フィクスチャを使用した校正

ここで、線路の挿入位相は 20°~160° となるように周波数範囲を定めなければならない。したがって 1 つの LINE 標準が使用可能な帯域幅は最大で 8:1 に制限される。これを超える周波数範囲を校正する場合、異なる線路長を有する複数の LINE 標準を使用することが可能である。本研究では DC ~ 40 GHz の校正を可能とするため 3 つの LINE 標準を設計した。なお、DC を扱うには無限長の線路が必要となるが、MATCH 標準を用いることでこれに替えることができる。

LINE 標準の L を設計した結果、LINE 1 は 29.4 mm で 0.62 GHz ~ 3.1 GHz、LINE 2 は 5.9 mm で 3.1 GHz ~ 15.5 GHz、LINE 3 は 1.2 mm で 15.5 GHz ~ 77.5 GHz にそれぞれ対応させることとした。

(4) MATCH 標準 特性インピーダンスで終端された標準器である。これにより低い周波数の校正が DC まで可能となる。本研究における設計では、0.62 GHz までを MATCH 標準がカバーすることとした。

4. ネットワークアナライザの TRL 校正

作製した TRL 標準器を用い、10 MHz ~ 40 GHz に対応したネットワークアナライザの TRL 校正を実施した。校正及び測定には、マイクロストリップ環境での測定に適したフィクスチャを使用し、このフィクスチャに各標準器を順

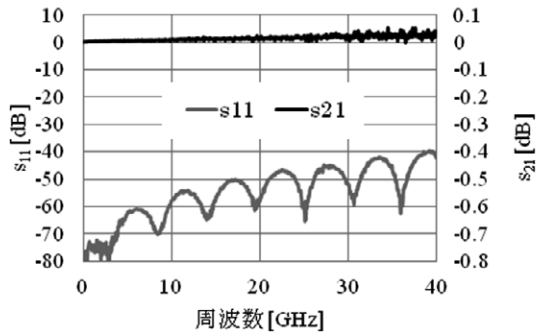


図4. THRU 標準の測定結果

次装着して校正した (図3)。

TRL 校正の実施後に THRU 標準を測定した結果を図4に示す。この測定が意味するものは線路長のない伝送線路を測定することであり、理想的には挿入損失及び反射損失がともに0となる ($s_{21} = 0$ dB, $s_{11} = -\infty$ dB)。図4から、 s_{21} は 0 ± 0.1 dB 以内、 s_{11} は -40 dB 以下という結果が得られ、40 GHz までの高精度な測定が可能となったことがわかった。

5. TRL 校正による高速デバイスの測定

高速デバイスの測定例として、TRL 校正を実施したネットワークアナライザで広帯域チップキャパシタを測定した。図5に測定結果を示す。デバイスのカタログ値と同等の特性を実測により得ることができた。

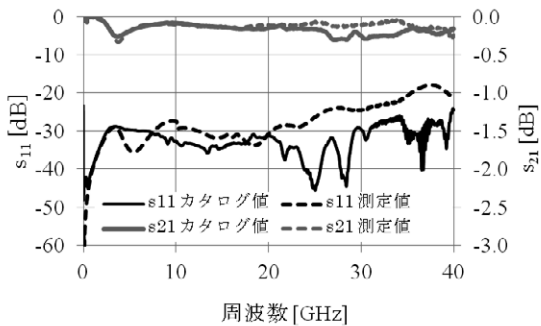


図5. 広帯域チップキャパシタの測定例

微小な挿入損失や反射損失をKaバンドに及ぶ広帯域で測定するのは困難であり、高い測定技術を要する。高周波になるほど、波長が測定基板などの物理長に比べて非常に短くなることにより、低周波では無視できた不連続などが顕在化するためである。さらに、微小な特性の測定には測定精度の高さが求められる。

この測定例が示すものは、これまで都産技研が対応できなかったデバイスの特性評価の実現を実証するものである。

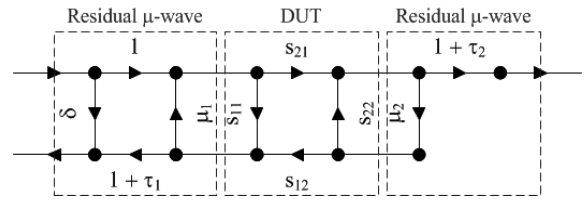


図6. 校正後のネットワークアナライザのシグナルフローグラフ

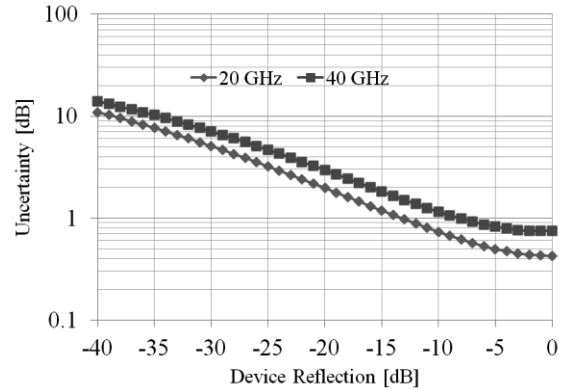


図7. TRL 校正における反射測定の誤差特性

6. TRL 校正における測定精度の導出⁽²⁾

図4, 図5では、TRL 校正により高速デバイスの測定が高精度に実現できることがわかったものの、その測定精度を定量的に求めるには至っていない。TRL 校正における定量的な測定精度の算出を行った。

校正後のネットワークアナライザのシグナルフローグラフを図6に示す。校正後のネットワークアナライザの測定精度の要因は、残留システムティックエラー、ランダムエラー、ドリフト及び不安定度に分類でき、このうち最も重要で取り除けない要因は残留システムティックエラーである。残留システムティックエラーは校正に使用する標準器の不完全性に起因し、主に残留方向性 (δ)、残留反射/伝送トラッキング ($\tau_{1,2}$)、残留ソース/ロードマッチ ($\mu_{1,2}$) で構成される。

反射測定における測定誤差 (Δs_{11}) を次式に示す。

$$\Delta s_{11} = \delta + \tau_1 s_{11} + \mu_1 s_{11}^2 + \mu_2 s_{21} s_{12} \dots \dots \dots (4)$$

図7は、(4)式を用いて算出した TRL 校正における反射測定の誤差特性である。例えば -5 dB の反射を有するデバイスを測定する場合、その測定精度は 40 GHz において約 0.8 dB であることがわかった。

なお、算出に当たり s_{21} 及び s_{12} は 0 dB とした。また、TRL 校正の場合の残留システムティックエラーは校正に使用する標準器の線路のインピーダンスで定義されるため、基板のみを考慮すると極小の値を示す。このため、残留方向性と残留ソース/ロードマッチについては、使用したフィクスチャのカタログ値を参照し、残留反射/伝送トラッキングについては 0 とした。

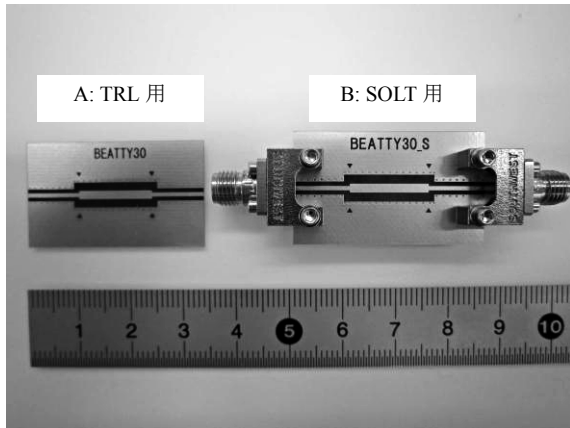


図8. 作製したビーティーライン

7. TRL 校正の検証⁽³⁾

校正の確度を検証する手段としては、一般的に以下の方法がある。即ち、a) 校正用標準器を測定する、b) 既知の値を持つ標準器を測定する、c) 検証用標準器を測定する、の3通りの手法である。

このうち、a)は最も簡単な反面、検証精度は悪い。ネットワークアナライザはどんな標準も正確なものとして扱ってしまうため、この方法は校正用標準器が「正確」であると保証された場合に限って有効である。なお、図4はこの方法により校正を検証した結果でもある。c)の方法は校正の確度を検証するには最も正確であるが、検証用標準器が必要なため、使用者側で検証するのは一般に不可能である。

本研究では、b)の方法で校正の検証を実施した。既知の値を持つ標準器として、ビーティーラインと呼ばれる標準器を採用した。本研究で設計・作製したビーティーラインを図8に示す。ビーティーラインは、 $50\ \Omega$ の伝送線路の間に、 $50\ \Omega$ とは異なるインピーダンスを有する一定の長さの線路を意図的に挿入した線路である。本研究では、 $30\ \Omega$ 、 $14\ \text{mm}$ 長の線路を挿入した。このビーティーラインは、周波数特性においてある周期的な特性を示す。即ち、 $1/2$ 波長の整数倍の周波数においては $50\ \Omega$ の線路として($s_{11} = -\infty$)、 $1/4$ 波長の奇数倍の周波数においては $18\ \Omega$ の線路として($s_{11} = -6.547\ \text{dB}$)振る舞うのである。この特性が正確かつ滑らかに得られていれば、校正が正確に実施できたと判断することができる。

図9に、TRL校正したネットワークアナライザでビーティーライン(図8A)の反射特性を測定した結果を示す。反射特性は、その最大となる点が理論値である $-6.547\ \text{dB}$ に近く、図7で得られた測定誤差 Δs_{11} を満足し、かつ滑らかに得られていることがわかる。この結果から、本研究で確立したTRL校正手法の妥当性と、理論値以内での測定精度が得られることが実証された。

次に同等のビーティーラインを、図8Bに示すように同軸系に変換してSOLT校正したネットワークアナライザで測定した。図10は、その結果とTRL校正での測定結果を重畳

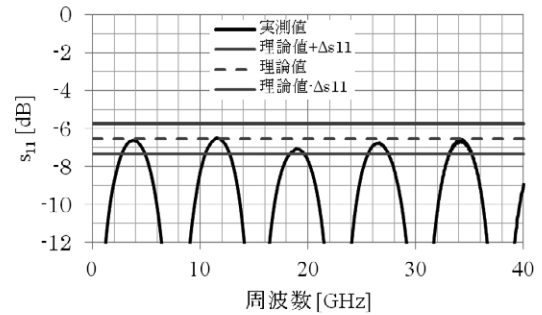


図9. ビーティーラインの反射特性の測定結果

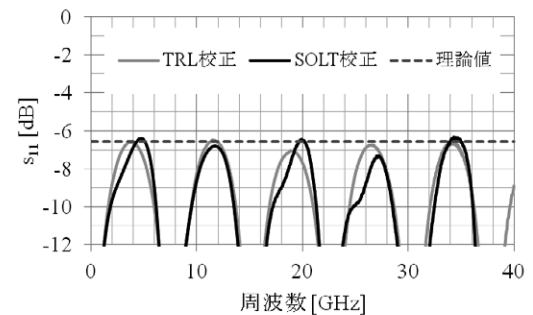


図10. SOLT校正とTRL校正によるビーティーライン測定

したものである。SOLT校正による測定では、波形が顕著に歪んでいることから正しい結果が得られないことが判明した。一方TRL校正では、歪みのない滑らかな特性が得られている。マイクロストリップ環境におけるTRL校正の、SOLT校正に対する優位性が実証された。

8. まとめ

ネットワークアナライザをTRL校正することで、都産技研で従来測定できなかった高速デバイスの高周波特性の測定が可能となった。 $40\ \text{GHz}$ の測定上限周波数を実現し、その測定精度は反射特性において概ね $\pm 0.8\ \text{dB}$ であることを示した。

誤差特性の算出においては、反射測定に対する誤差特性は算出できたが伝送特性に対する誤差特性の算出までには至らなかった。今後は、伝送特性の誤差特性の算出も含めさらに精度向上のための実験を進めていく。

(平成24年5月18日受付、平成24年7月5日再受付)

文 献

- (1)「ベクトル・ネットワーク・アナライザを使用したインフィクスタチャ測定」, Application Note 1287-9, Agilent Technologies
- (2) Douglas Kent Rytting: "NETWORK ANALYZER ACCURACY OVERVIEW", 58th ARFTG Conference Digest-Fall (2001).
- (3) "3680 Series Universal Test Fixture", Operation and Maintenance Manual, Anritsu Company.