フリースペース法測定における VNA の校正と

タイムドメインゲート処理の検討

坪井 瑞輝*

[要 旨]

当センターのフリースペース法測定では正確な測定を行うために使用前に校正を行っている。 その際、周波数によっては校正の直後でも反射率が 100%以上と表示される場合があるなど、 明らかに妥当でない値が得られることがあった。その原因についてはベクトルネットワークア ナライザー内部での信号処理に起因すると考え、校正およびタイムドメインのゲート処理につ いては、装置内部で行われている計算を外部でも行えるようにシステムを改良し、測定の適正 化を試みた。

1 はじめに

京都府中小企業技術センターでは 18GHz~ 110GHz のミリ波帯域において、フリースペース 法により電磁波遮蔽・吸収性能及び誘電率・透磁



図1 フリースペース法測定システム 写真(a) と概略(b)

* 応用技術課 副主查

率の測定が可能である。

当センターで使用しているフリースペース法測 定システム及び概略を図1に示す。本装置は、電 磁波放射・受信用のアンテナ対と、コリメート用 誘電体レンズ、試料ホルダー及びベクトルネット ワークアナライザー(VNA)で構成される。VNA は 高周波を受信する機能と、高周波を発生させる機 能を備えており、高周波回路の信号透過特性・反 射特性を任意の周波数について測定する事ができ る。WNA から出力された高周波はアンテナから電 磁波として空間へと伝搬され、誘電体レンズでコ リメートされて測定試料を透過し、反対側の誘電 体レンズとアンテナを通して VNA で受信される。 この値から試料の透過率を求めることができる。 また、試料で反射された電磁波も測定する事がで き、反射率の測定も可能である。透過波・反射波 の強度に加えて位相も測定する事ができ、試料の 誘電率・透磁率といった物性値を求めることもで きる¹⁾。

VNA で受信される信号は、試料による反射や減 衰だけでなく途中の経路でも反射や減衰の影響を 受ける。フリースペース法の測定では、アンテナ やケーブル、誘電体レンズの他、自由空間を伝搬 することでも信号は影響を受ける。これらの影響 を取り除くために、測定前には VNA の校正が行わ れている。

VNAの校正手法は様々なものが知られているが ²⁾、当センターのフリースペース法では Thru-Reflect-Line(TRL)校正³⁾を用いている。TRL 校 正ではネットワークアナライザーの先端部分に長 さの異なる2種の伝導路を取り付けて thru、 lineの測定を行い、先端を開放又は短絡して反 射波(reflect)の測定を行い、合計3つの測定か ら途中の経路の寄与(減衰や反射、位相の変化) を求める手法である。フリースペース法において は、アンテナ同士の距離を変えて thru と line を 測定し、reflect としては、試料ホルダーに反射 板を設置して測定を行う。

図2にTRL校正後のフリースペース法測定装置 により、金属板の反射率を測定した時のスペクト ルを示す。VNAの校正により途中の経路の影響は 取り除かれているが、反射波の信号には大きなノ イズが含まれている。





このノイズは信号の多重反射によって生じてい る。試料からの反射波・透過波の信号は、アンテ ナや誘電体レンズ等の素子により再度反射された り、その反射波がさらに別の素子で反射されるこ とで多重に測定されノイズとなって現れる。

この場合測定に必要な信号は試料により最初に 反射された信号のみであり、それ以外の多重反射 による信号は不要である。多重反射による信号を 取り除くためには、タイムドメインでのゲート処 理が有効である。これは周波数領域について得ら れたデータを時間領域に変換することで、必要な 信号のみを取り出す処理である。タイムドメイン は多くの VNA で機能が内蔵されており、当セン ターのシステムでも可能である。金属板による反 射波の信号にタイムドメインのゲート処理を行っ た結果を図3に示す。



図3 タイムゲート処理を行った金属板反射波

金属板の反射波の信号をみると、反射率が 0dB (100%)より大きくなっているところがあり、周 波数による反射率の変化が大きいなど、不合理な 値になっている。この原因としては信号処理に起 因することが考えられるが、校正やタイムゲート 処理は VNA 内部で行われているためその詳細につ いて検討することは難しい。また処理の内容も VNA の機種毎に異なっている。

そこで本研究では VNA の機種に依存せずに測定 を行えるようにすることや、校正・ゲート処理に ついて多様な選択肢を提供できるようにすること を目的とし、校正・ゲート処理を VNA 外部でも行 うことができるようにシステムの改良を行った。

2 TRL 校正について

まずTRL 校正³⁾の概要について説明する。

VNA では試料の反射・透過信号は途中の経路の 素子により、反射や減衰などの影響を受ける。こ れらの影響を図4に示すとおり、試料の前と後ろ それぞれまとめて表して、error box A と、 error box B とすることができる。



図4 装置構成と error box の概略

VNA から出発した信号は error box A を通って 反射・減衰してから試料に入射し、さらに error box B を通って VNA で測定される。error box に は信号の経路に同軸ケーブルやアンテナ、誘電体 レンズ、試料ホルダーなどによる反射や減衰、位 相の変化が該当する。

VNA で直接測定可能な値は、この error box A、 試料、error box B を全て含めた S パラメータで あり、一方で求めたいものは試料のみの S パラ メータである。S パラメータ行列を T パラメータ 行列⁴⁾ で表記すると、このような直列の接続は 簡単に表記できる。ここでS パラメータ行列は、

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$$

であり、T行列は

$$\mathbf{T} = \frac{1}{S_{21}} \begin{pmatrix} S_{12}S_{21} - S_{11}S_{22} & S_{11} \\ -S_{22} & 1 \end{pmatrix}$$

と表される。

測定される S パラメータ行列を S_M、それぞれ の error box の S パラメータ行列を S_A、S_B、試料 の S パラメータ行列を S _{試料}とし、それぞれを T 行列で表記したものを T_M、T_A、T_B、T _{試料}とする。 T_M(S_M)が直接測定可能な値であり、T _{試料}(S _{試料})が 求めたい値である。T_Mは次式で表される。

$$T_M = T_A \cdot T_{\text{strains}} \cdot T_B$$

したがって T_A、 T_Bが分かれば、 $T_{atkl} = T_A^{-1} \cdot T_M \cdot T_B^{-1}$

より T _{試料}、 S _{試料}も得られる。

TRL 校正では thru、line、reflect の3つの測 定により T_A、T_B を求める。thru の測定ではアン テナを基準位置に設置し透過信号の測定を行う。 line の測定が thru の測定とほぼ同じであるがア ンテナ位置を4分の1波長程度距離を離して行う。 なお、当センターの装置ではマイクロメーターを 用いてアンテナの前後位置調整を行っている。

最後に reflect の測定では、基準面に金属板を 設置して反射信号の測定を行う。金属板は反射率 がほぼ 100%であり、反射係数Γは-1となる。

本研究では TRL の校正について、上記 thru、 reflect、line の測定を VNA の校正機能を使用せ ずに、外部の PC で処理をして行った。

数値計算にはプログラム言語の python と、 python の数値計算モジュールである NumPy を使 用した。thru、reflect、line の測定値からの T_a 、 T_b の導出については文献³⁾を参照して行った。

試料ホルダーに何も設置していない時の透過波の信号と、金属板を設置したときの反射波の信号について TRL 校正を行った値を図5に示す。



図5 TRL 校正を行った透過波信号(a) と 反射波信号(b)

0dB はそれぞれ透過率 100%と反射率 100%に対応している。透過波の信号強度は 0dB となっている。一方で反射波の信号には多重反射によるノイズが見られている。これらのノイズについて、タイムドメインでゲートをかけることにより取り除いた。

3 タイムドメインのゲート処理について

VNA の測定値に逆フーリエ変換を行う事で時間 領域の波形に変換できる。

図5に示した反射波の強度を、位相の値と合わ せて逆フーリエ変換を行い時間領域に変換した結 果を図6に示す。今回この逆フーリエ変換につい ても VNA 内蔵の機能を使用せず、PC 上で python および NumPy モジュールを用いて行った。なお、 グラフの横軸は時間に光速度をかけることで位置 の次元に変換している。



図6 タイムドメインに変換した反射波信号

距離 0 cm のピークが試料による反射波に対応し ており、120 cm やその整数倍に見られるピークが 多重反射の信号を示している。120 cm はちょうど 試料ホルダーから、アンテナ・同軸ケーブルの接 続部までの距離の2倍に一致しており、両者の間 を往復した信号が120 cm の位置およびその整数倍 で現れていると考えられる。小さいピークは間に ある誘電体レンズなどによる反射波であると考え られる。ここにゲート処理を行うことにより、不 要な信号を取り除く。図7 にゲート関数をかけて 多重反射の信号を除去したものを示す。



図7 不要な反射をカットした反射波信号の タイムドメイン表示

再度フーリエ変換により周波数領域に変換すると、 図8に示す特性が得られた。



図8 タイムドメインゲート処理を行った 金属板反射信号

ノイズが除去され、反射波の信号強度は約-2dB、 位相は約 180 度(S11=-1)となった。金属板の反 射率としては、合理的な結果といえる。

4 まとめ

VNA 内部で行っていた TRL 校正と、タイムドメ インのゲート処理について外部でも行うことがで きるようにシステムの改良を行った。これにより ネットワークアナライザーで TRL 校正を行ったと きに見られた金属板の反射率が 0dB 以上になった り、周波数により大きく変わることは見られなく なった。

図9に本システムを使用してアルミナについ て反射率を測定した結果を示す。



図9 アルミナ厚み 1mm(a) と 5mm(b)の反射率

アルミナのような誘電率が高い試料や、厚みの ある試料で反射率・透過率を測定する場合、試料 内で多重に反射して反射波の到達時間が広がるた め、ゲート幅が適当でないと試料による信号も カットしてしまう恐れがある。今回ゲート処理を VNA 外で処理できるようにしたことで、本システ ムでは測定後からでもゲート幅を調整することで きるようになった。

(参考文献)

- "Measurement of Dielectric Material Properties" Application Note; Rohde & Schwarz:Munich, Germany, 2006.
- 2) Anritsu Application Note "LRL/LRM Calibration Theory and Methodology"
- ENGEN G. F. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 27 (12), 987–993, 1979
- 4) S パラ再入門 広島大学 天川修平