

## 改良型開放端補正に用いる開放端部インピーダンスの計算方法の検討

遠藤和麻<sup>1</sup>, 笹森崇行<sup>2</sup>, 戸花照雄<sup>2</sup>, 磯田陽次<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 秋田県立大学大学院システム科学技術研究科電子情報システム学専攻

<sup>2</sup> 秋田県立大学システム科学技術学部電子情報システム学科

平衡給電アンテナの入力インピーダンスを 1GHz 程度の周波数まで測定する方法として、S パラメータ法が報告されている。我々は S パラメータ法により 1GHz 以上の周波数でも正確に測定するために、アンテナを取り付けるために用いる測定用ジグの開放端部インピーダンスを使用する改良型開放端補正を提案している。現在までのところ、我々が提案する改良型開放端補正は従来法である開放端補正よりも優れているものの、提案手法でもわずかなずれが生じていることが観測されている。この誤差の原因の一つとして、FDTD 法を用いて求める開放端部インピーダンスの数値計算誤差が考えられる。本研究では、S パラメータ法のさらなる測定精度向上を目指して、マイクロストリップ線路製ジグを取り上げ、開放端部インピーダンスを計算する新しい方法を検討する。この方法は、マイクロストリップ線路の途中で求めた反射係数から端部におけるインピーダンスを求めるものである。結果として、開放端部インピーダンスは従来法よりも正しい値が得られたと考えられるものの、最終結果であるダイポールアンテナの入力インピーダンスについては改善の余地がまだあることが明らかになった。

**キーワード:** S パラメータ法, 平衡給電アンテナ, セミリジッドケーブル, 開放端インピーダンス, 入力インピーダンス

近年、携帯電話や VHF 帯無線通信システム等において、無線機きょう体を手持つことによりアンテナの特性が変化することが指摘されている。これはきょう体上を流れる漏洩電流が原因であり、この漏洩電流を減少させる方法の一つとしてダイポールアンテナやループアンテナのような左右対称な構造を持つ平衡給電アンテナを使用する方法が提案されている。

平衡給電アンテナの入力インピーダンスを広帯域にわたって測定する方法として、S パラメータ法が報告されている。図 1 には S パラメータ法の測定系の例を示す。S パラメータ法はマイクロストリップ線路 (MSL) 等の伝送線路で構成された測定用ジグを用いてベクトルネットワークアナライザ (VNA) で S パラメータを測定し、計算によって入力インピーダンスを求める間接測定の一つである。原理的に広帯域測定が可能であるが、ジグの大きさが波長と

比較して無視できなくなる周波数以上では、ジグが測定値に影響を及ぼすことが問題として知られている。そこで我々は、ジグの影響を取り除くために縦続行列を用いて計算する方法を検討しており、伝送線路の開放端部のインピーダンスを用いる改良型開放端補正を提案している。現在までのところ、我々が提案する改良型開放端補正は従来法である開放端補正よりも優れているものの、提案手法でもわずかなずれが生じていることが観測されている。この誤差の原因の一つとして、FDTD 法を用いて求める開放端部インピーダンスの数値計算誤差が考えられる。

本研究では、S パラメータ法による平衡アンテナの入力インピーダンスの測定精度向上を目指して、改良型開放端補正に用いる開放端部インピーダンスの計算精度を改善する方法について検討する。

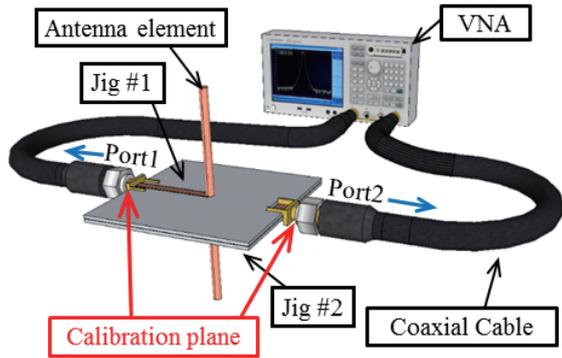


図1 測定系

測定方法

Sパラメータ法

平衡給電アンテナとしてダイポールアンテナを例にあげて説明する。アンテナへの給電電圧とアンテナ上の電流を図2のように定義する。アンテナ素子に接続されている2つの電源とグラウンドはVNAの2つのポートから給電しているためであり、このダイポールアンテナを2端子対回路として取り扱う。 $I = I_1 = -I_2$ である電源で平衡給電したときの差動電圧は $V_d = V_1 - V_2$ で表すことができる。アンテナ構造が左右対称であることから対称回路と相反回路であることを利用すると、平衡給電アンテナの入力インピーダンスは四端子パラメータを用いることにより式(1)で与えられる。

$$Z_{in} = \frac{2}{C}(A-1) \tag{1}$$

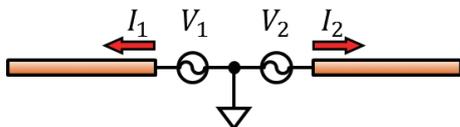


図2 ダイポールアンテナ

VNAによる測定値とSパラメータ法

図3には測定用ジグを接続したアンテナを2端子対回路で表した回路図を示す。VNAのポート1とポート2に接続する同軸ケーブルと測定用ジグをそれぞれケーブル#1, #2, 及び、ジグ#1, #2とする。SOLT校正では、校正面はケーブル#1, #2の先端である。校正面間の縦続行列 $K'$ はVNAで測定したSパラメータ

ータを式(2)へ代入することで得られる。

$$K' = \begin{bmatrix} \frac{(1+S_{11})(1-S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}} & R_0 \frac{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \\ \frac{1}{R_0} \frac{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}S_{21}}{2S_{21}} & \frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}}{2S_{21}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

図3に示すように、校正面間の縦続行列 $K'$ には測定用ジグ#1, #2の縦続行列である $K_{J1}$ と $K_{J2}$ が含まれるので、式(3)によりこれらを取り除くことにより、アンテナだけの縦続行列 $K$ を求める必要がある。

$$K = K_{J1}^{-1} K' K_{J2}^{-1} \tag{3}$$

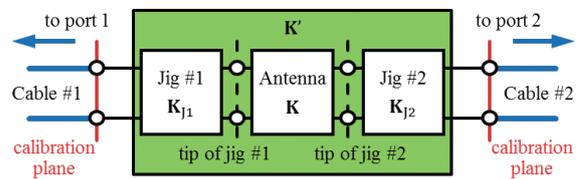


図3 測定用ジグを取り付けたアンテナの回路図

測定用ジグの縦続行列

測定用ジグの縦続行列を求める方法として、本論文では改良型開放端補正を用いる。改良型開放端補正はジグが伝送線路であることを利用して縦続行列を求める方法であり、アンテナ素子を取り付ける側の線路端部のインピーダンスを考慮している。この方法により、ジグの縦続行列は式(4)によって表される[8]。

$$K_{Jn} = \frac{1}{\sqrt{(Z_0^2 - Z_L^2)^2 - (Z_0^2 - Z_{Open}^2)^2}} \begin{bmatrix} Z_{Open}Z_L - Z_0^2 & Z_0^2(Z_L - Z_0) \\ Z_L - Z_0 & Z_{Open}Z_L - Z_0^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

ここで、線路の特性インピーダンスは $Z_0 = 50 \Omega$ であり、校正面から見た開放端線路の入力インピーダンス $Z_{Open}$ は測定値を用いる。開放端部のインピーダンス $Z_L$ はFDTD法を用いた数値計算により求める。

結果と考察

開放端部のインピーダンス

マイクロストリップ線路 (MSL) は誘電体基板の片面全体を覆う導体箔をグラウンドとして、もう一方の面上にある細長い導体箔 (ストリップ導体) を伝送線路として用いる構造であり、高精度な製作が容易である。従来は MSL の開放端部分において電磁界を求め、開放端部インピーダンスを計算していたが、S パラメータ法の結果にはまだずれが生じていた。その原因は、FDTD 法は差分法による近似計算であるため、MSL の端部のように計算モデルの構造が大きく変化するところでは電磁界の数値誤差が発生しやすいという欠点によるものと考えられる。そこで本研究では、開放端部から離れた地点における電磁界から開放端部のインピーダンスを求める方法を検討する。

図 4 には MSL の解析モデルを示す。電源にパルス波を給電したときに観測点  $P_1$  と  $P_2$  で観測される

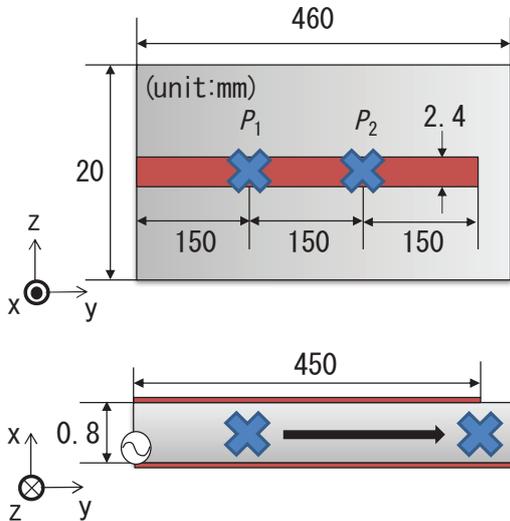


図 4 端部のインピーダンスの解析モデル

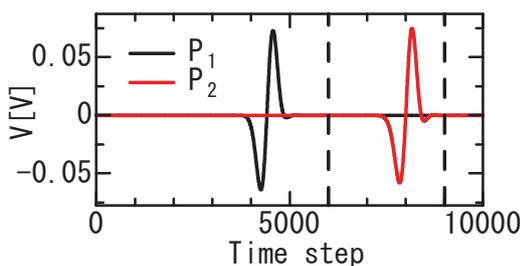


図 5 各観測点を通過するパルス電圧波

電圧波形を図 5 に示す。この時間領域波形をフーリエ変換により周波数領域波形に変換して求めた伝搬定数を図 6 に示す。この図より、MSL の減衰定数は 0 ではないことが分かる。

次に、反射係数を求めるために観測点  $P_1$  で観測される時間領域波形を図 7 に示す。電源から出たパルス波は約 4500 の時間ステップのときに観測点を通過し、開放端部で反射して戻ってきた波が約 19000 ステップで観測される。さらに、この時間領域波形をフーリエ変換により周波数領域波形に変換して求めた反射係数を図 8 に示す。ここでは観測点  $P_1$  で求めた反射係数を黒線、これを図 6 で示す伝搬定数を用いて MSL の開放端部へ移動した値を赤線で示す。この図より、開放端部における反射係数は周波数が低いときにはほぼ 1 であることが分かる。

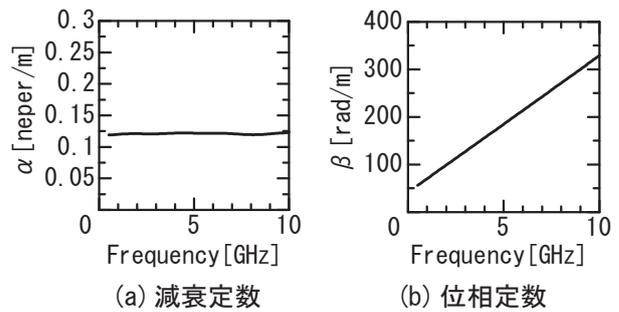


図 6 伝搬定数

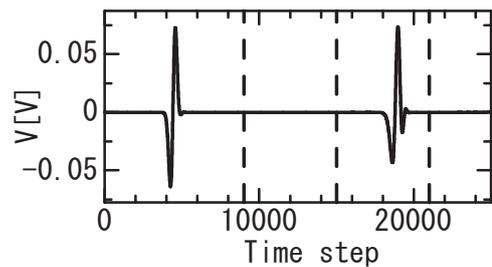


図 7 観測点  $P_1$  を通過するパルス電圧波

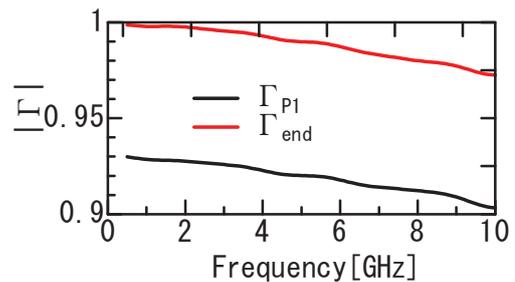


図 8 観測点  $P_1$  と開放端部における反射係数

図 9 には、図 8 に示した反射係数から計算した開放端部のインピーダンスを示す。実部である抵抗については、従来の方法で求めた場合には負の値になることが問題であったが、本手法では全周波数範囲で正の値になった。一方、わずかに波打つ結果になっている点は今後の改善が必要である。

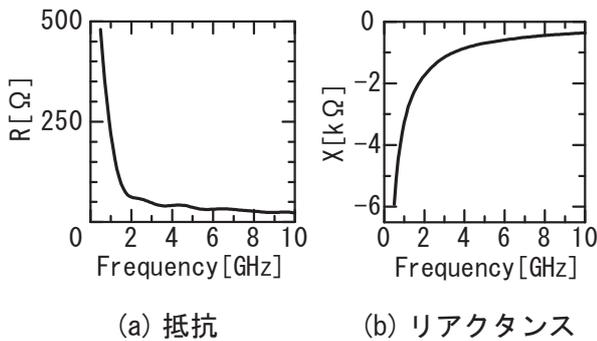


図 9 開放端部のインピーダンス

ダイポールアンテナの入力インピーダンスを S パラメータ法で求める。ダイポールアンテナと S パラメータ法用ジグの解析モデルを図 10 に示す。ジグは  $40 \times 40 \times 0.8 \text{mm}^3$  の誘電体基板を 2 枚用いており、グラウンド面同士を接続した構造である。ダイポールアンテナは直径 1mm、長さ 34.8mm の導線を 2 本使用し、MSL へ取り付けれる。

図 11 にはダイポールアンテナの入力インピーダンスを示す。ここでは本手法で求めた端部インピーダンスを使用した改良型開放端補正の結果と従来手法で求めた結果を、基準値であるデルタギャップモデルの計算値と比較する。本手法で提案する方法で求めた端部インピーダンスを用いることにより、従来法の結果よりもわずかに改善していることが分かる。しかしながら、デルタギャップモデルの計算値には、十分には一致しないことが明らかになった。

まとめ

本研究では、S パラメータ法による平衡アンテナの入力インピーダンスの測定精度向上を目指して、改良型開放端補正に用いる開放端部インピーダンスの計算精度を改善する方法について検討した。その結果、開放端部インピーダンスは従来法よりも正し

い値が得られたと考えられるものの、最終結果である入力インピーダンスについては改善の余地がまだあることが示された。

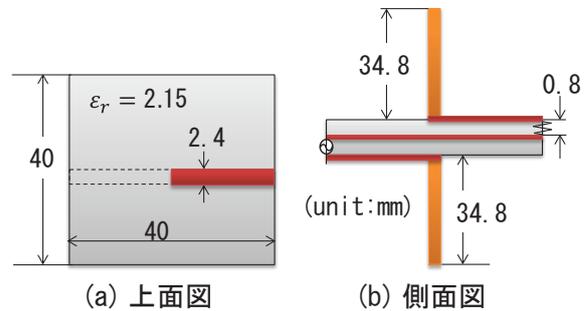
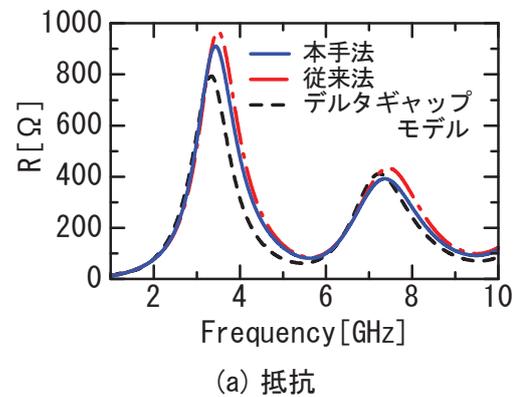
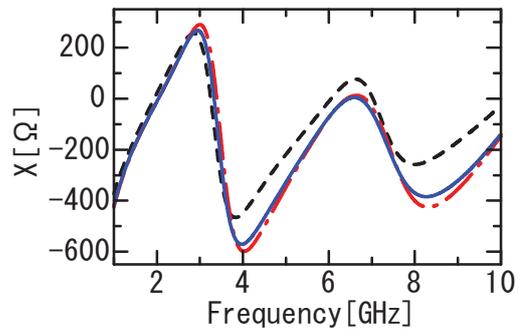


図 10 ダイポールアンテナの解析モデル



(a) 抵抗



(b) リアクタンス

図 11 ダイポールアンテナの入力インピーダンス

文献

Sasamori, T., & Fukasawa, T. (2014). S-parameter method and its application for antenna measurements, IEICE Trans. Commun., E97-B (10), 2011-2021.

〔平成28年7月20日受付〕  
〔平成28年7月31日受理〕

## Examination of Calculation Method of the Open-End Impedance for Use with the Modified Open Correction

---

Kazuma Endo<sup>1</sup>, Takayuki Sasamori<sup>2</sup>, Teruo Tobana<sup>2</sup>, Yoji Isota<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Course of Electronics and Information Systems, Graduate School of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

<sup>2</sup> *Department of Electronics and Information Systems, Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University*

Recently, the S-parameter method using a vector network analyzer and measurement jig instead of a balun has been proposed, whereby the differential input impedance of a balanced fed antenna can be determined. Because a balun is not used, impedance can be measured over a wide bandwidth. However, with increasing measured frequency, measurement accuracy is known to decrease because the influence of the jig cannot be disregarded in the measurement. To remove the influence of the jig from measurements involving the S-parameter method, we have proposed a modified open correction using the ABCD-matrix. In this research, to improve the measurement accuracy of the S-parameter method, we propose a new method to calculate the impedance at the open end of the jig from the electromagnetic field at a place apart from the open end using the FDTD method. We show that the results of the input impedance of the dipole antenna measured using the proposed method are slightly superior to the results obtained using the conventional method.

**Keywords:** S-parameter method, modified open correction, open end capacitance, input impedance