

# SPM法を用いた波源の電流振幅分布の推定

甄 源<sup>†</sup> チャカロタイジェドヴィスノブ<sup>†</sup> 陳 強<sup>†</sup> 澤谷 邦男<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻

〒980 8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6 6 05

E-mail: †{shingen,jerd,chenq,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 電子機器から放射される不要電磁波を抑制するために、不要波の波源位置を知ることが重要である。波源近傍で測定した電界分布を用い、波源の位置を推定する手法として改良 Sampled Pattern Matching (SPM) 法が提案されており、複数の波源間に位相差がある場合に対しても各波源位置を推定することができるが、波源の電流の振幅を推定することができない。本論文では、改良 SPM 法と行列方程式を解く方法のハイブリッド法を提案している。本手法では、改良 SPM 法による波源位置推定を行い、推定された波源の位置情報を用い、さらに逆行列を解く手法を用い、波源の電流振幅分布を得る。また、シミュレーション及び実験により本手法の有効性を示す。

キーワード SPM 法, 相関係数, 電流の振幅分布推定, 位相差

## Estimation of Current Sources Magnitude Using SPM Method

Yuan ZHEN<sup>†</sup>, Jerdvisanop CHAKAROTHAI<sup>†</sup>, Qiang CHEN<sup>†</sup>, and Kunio SAWAYA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Department of Electrical and Communication Engineering,

Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980 8579 Japan

E-mail: †{shingen,jerd,chenq,sawaya}@ecei.tohoku.ac.jp

**Abstract** To suppress the electromagnetic wave which is leaked from electrical circuits and devices, it is necessary to know the location of current sources. The *improved sampled pattern matching* (SPM) method was proposed to estimate location of current sources by using near-field distribution. Improved SPM method can estimate the location of current sources with phase difference but it is invalid to estimate the magnitude of current sources. In this paper, we propose a method for estimating magnitude of current sources by using both improved SPM method and solving the matrix equation with direct inversion method which uses the location of current sources obtained from improved SPM method. The method is verified and compared with the experiment results.

**Key words** SPM method, correlation coefficient, estimation of current sources magnitude, phase difference

### 1. はじめに

近年、GHz 帯の電波を利用した機器・システムが着実な普及を見せている。コンピュータのクロック周波数の高速化も急速に進み、ほとんどの電子デバイスに高密度のプリント基板 (PCB) 技術が広く使われている。それに伴って電子機器間の電磁波干渉の問題が深刻化してきている。電子機器間の不要電磁波を抑制するために、電子デバイスの基板上的電流分布を知ることが重要である。基板上的電流はコモンモードとディファレンシャルモードに分類することができる [1], [2]。実際、コモンモード電流はディファレンシャルモード電流より強い電磁雑音を発生していることから、コモンモード電流は電磁環境を悪化させる可能性が高いということがわかる。したがって、電磁干渉の原因を解明するために、プリント基板上的電流の位相情報は電流

の振幅情報と同じく重要であり、基板上電流の振幅と位相の両方を測定することが必要である。

従来の関連研究では、電流分布推定へのアプローチとして、仮想波源を用いて仮想波源から放射される電界分布もしくは磁界分布と電子機器から放射される実測の電界分布もしくは磁界分布を比較することによって、電流分布を推定する方法が一般的である。このような波源分布推定法として、仮想波源を選出していき、その選出した仮想波源の配置で電流の位置と大きさを推定する SPM 法 [3], [4] と、仮想波源の電流係数を推定する行列方程式を解く方法 [5], [6] がある。前者は電界の振幅情報を用いて波源分布を推定する手法であり、生体磁気分野において脳磁図作成に用いられている技術 [3] である。近年では電子機器などの高周波領域にも応用 [4] されてきており、高い推定精度を実現している。後者は波源の電界分布と、仮想波源と測定ブ

ローブとの相互インピーダンスから逆行列を解くことにより仮想波源上の電流分布を求める手法である。逆行列を解く方法として変分法 [5]・最小二乗法・CG 法 [6] などがある。SPM 法では、推定領域内に仮想波源を均一に配置し、波源の電界分布と仮想波源の電界分布の間の相関係数を求め、相関の高い順に仮想波源を選出し、選出された仮想波源の配置により、波源位置を推定する。従来の SPM 法では波源間に位相差がある場合は推定できないため、位相差のある波源位置の推定できる改良 SPM 法が提案され、数値的に検討されている [7]。しかし、改良 SPM 法では、波源位置推定ができるものの、波源の電流振幅分布の推定ができない。それに対して、行列方程式を解く方法では、求めた電流係数により波源分布だけでなく波源上の電流分布まで推定することができる。本報告では、2つのアンテナを波源としたモデルに対し、改良 SPM 法と行列方程式を解く方法のハイブリッド法を提案し、シミュレーション及び実験によりその有効性を示す。2節は推定手法、3節は推定モデル及び提案法による波源の位置推定と電流振幅分布の推定結果、4節は結論について述べる。

## 2. 推定手法

まず、図1に電子デバイスあるいは電子回路が真空中に電磁波を放射するモデルを示す。波源が配置される面と平行な測定面では、近傍電磁界の測定を行う。各々の測定点の電界強度は数値的方法でもしくは実用的測定法で得られる。波源が測定点  $i$  に作る電界強度を  $e_i$  とすると、波源が測定面に作る電界分布は次式のようにベクトルで表される。

$$\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_M]^T, \quad (1)$$

ここで、 $M$  は測定点の総数、 $T$  は行列の転置を表す。電界強度の計算値はモーメント法により求める。ただし、シミュレーションの場合はモーメント法により求める。

次に、波源を含むように推定領域を取り、図2に示すように推定領域内に仮想波源を  $x, y, z$  方向に等間隔に  $N=N_x \times N_y \times N_z$  個配置する。そして、各々の仮想波源が測定面に作る電界分布をモーメント法により求める。仮想波源  $j$  が測定点  $i$  に作る電界強度を  $f_{ij}$  とすると、仮想波源  $j$  が測定面に作る電界分布  $\mathbf{F}_j$  は次式のように表せる。

$$\mathbf{F}_j = [f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{ij}, \dots, f_{Mj}]^T. \quad (2)$$

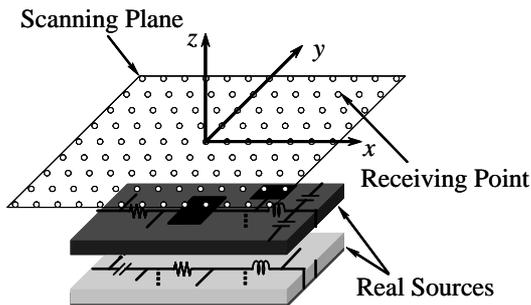


図1 波源の電界分布の計算モデル。

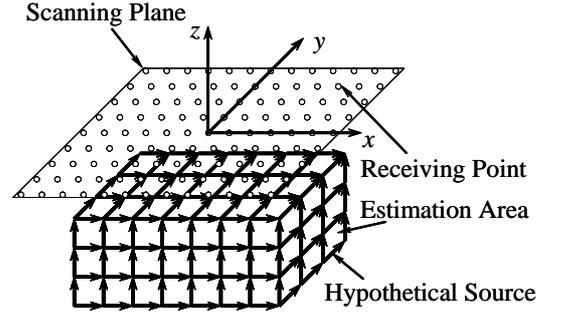


図2 仮想波源の電界分布の計算モデル。

### 2.1 改良 SPM 法

改良 SPM 法による波源分布推定では、波源の電界分布と仮想波源の電界分布の間の相関係数を求め、相関の高い順に仮想波源を選出する。このとき、仮想波源の選出数を  $N_s$  個とすると、 $N_s$  個の仮想波源が選出されるまで波源の分布を推定する。相関係数は波源の電界分布と仮想波源の電界分布を用いて Cauchy-Schwarz の関係式で求める。このとき、相関係数は波源と仮想波源の電界分布を複素ベクトルとして内積を取ったものとし、次式のように定義される。

$$\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \sum_{i=1}^M \operatorname{Re}(a_i^* b_i) \quad (3)$$

この方法では、絶対値を取る必要がなく、電界の位相情報を残すことができる。そして、改良された相関係数は次式のように表せる。

$$P_{\text{SPM}}(k) = \arg \max \left\{ \frac{\langle \mathbf{E}, \mathbf{G}(k) \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{E}, \mathbf{E} \rangle} \sqrt{\langle \mathbf{G}(k), \mathbf{G}(k) \rangle}} \right\} \quad (4)$$

ここで、

$$\mathbf{G}(k) = \left( \mathbf{F}_j + \sum_{j'=1}^{N'} \mathbf{F}_{j'} \right) e^{j\Delta\theta} \quad (5)$$

$$j \in (\Omega - \Omega') \quad \text{and} \quad j' \in \Omega'.$$

相関係数  $P_{\text{SPM}}(k)$  は仮想波源の位相が  $\Delta\theta$  のときの相関係数である。位相項である  $\Delta\theta$  は残るため、波源推定に利用される。 $\mathbf{F}_j$  はまだ選出されていない各仮想波源から生じる電界の分布、 $\mathbf{F}_{j'}$  は以前に選出された仮想波源から生じる電界の分布を合計

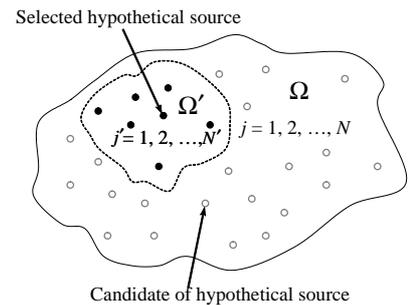


図3 仮想波源の集合。

したものである。図.3 に示すように、 $\Omega$  は候補とする仮想波源の集合、 $\Omega'$  は選出された仮想波源の集合、 $N'$  は選出された仮想波源の数である。 $N'$  が  $N_s$  に達すれば、選出は終了となる。

## 2.2 行列方程式を解く方法

行列方程式を解く方法での波源分布推定では、各々の仮想波源の電流係数  $I_j$  を行列方程式を解くことにより求めるため、求めた電流係数により波源分布だけでなく波源上の電流分布まで推定することができる。測定点  $i$  における電圧を  $V_i$ 、仮想波源  $j$  の未知電流係数を  $I_j$ 、仮想波源  $j$  と測定点の微小ダイポール  $i$  の間の相互インピーダンスを  $Z_{ij}$  とすると、次式が得られる。

$$V_i = \sum_{j=1}^N Z_{ij} I_j \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

行列方程式で表すと次式のようになる。

$$V = ZI \quad (7)$$

ここで、 $Z$  は  $M \times N$  次元のインピーダンス行列、 $I$  は  $N$  次元のベクトル、 $V$  は  $M$  次元のベクトルである。

この行列方程式は一般化逆行列を用いて解くことができる。測定点の総数  $M$  と仮想波源の配置数  $N$  の大小により、変分法と最小二乗法を使い分ける。

## 2.3 提案法

本論文の提案法は、ノイズに強い改良 SPM 法と波源上の電流振幅分布が推定できる行列方程式を解く方法とをハイブリッド化した手法である。本提案法の手順としては、まず測定面に  $N$  個の仮想波源を置き、改良 SPM 法により波源の位置推定を行う。そして、相関係数  $P_{SPM}(k)$  がある値以上の場合である複数の推定結果（すなわち選出された仮想波源の位置）をいったん記憶する。その記憶した場所だけに仮想波源をもう一度置く。ただし、仮想波源の置く数を  $Q$  とする。

次に、2.2 節で説明したように行列方程式を解く手法により各々の仮想波源の電流係数  $I_j$  を行列方程式を解くことにより求め、波源上の電流振幅分布を推定する。測定点  $i$  における電圧を  $V_i$ 、仮想波源  $j$  の未知電流係数を  $I_j$ 、仮想波源  $j$  と測定点の微小ダイポール  $i$  の間の相互インピーダンスを  $Z_{ij}$  とすると、次式

$$V_i = \sum_{j=1}^Q Z_{ij} I_j \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (8)$$

が得られ、この行列方程式を一般化逆行列を用いて  $I_j$  を解く。

## 3. 推定モデル及び提案法による推定結果

### 3.1 推定モデル

まず、図.4 に波源として用いた推定する 2 つの半波長ダイポールアンテナの配置を示す。波源のパラメータは表.1 に示す。波源間の位相差を  $160^\circ$  とし、解析周波数を 1 GHz とした。

次に、図.5 に推定モデルを示す。推定パラメータは表.2 に示す。推定領域の大きさは、 $L_x = L_y = 2\lambda$  である。測定距離  $d_z = 0.3\lambda$ 、走査範囲  $S_x = S_y = 2\lambda$ 、測定点数は  $M_x \times M_y = 625$

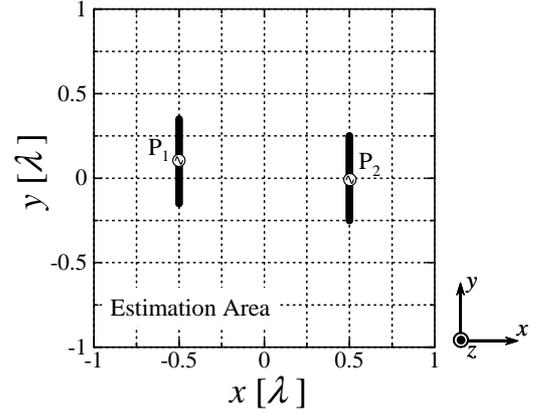


図 4 波源の位置。

表 1 波源のパラメータ。

Feed location	P <sub>1</sub>	(-0.5λ, 0.1λ)
	P <sub>2</sub>	(0.5λ, 0)
Phase	(θ <sub>1</sub> , θ <sub>2</sub> )	(0°, -160°)
Analysis frequency	(f <sub>1</sub> , f <sub>2</sub> )[GHz]	(1, 1)

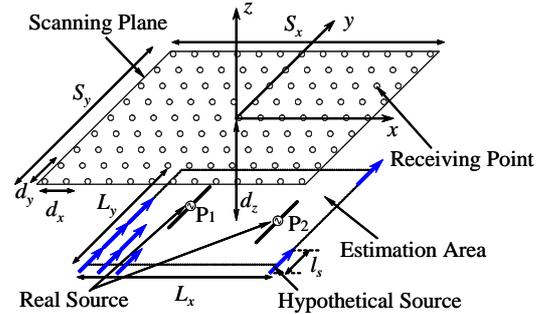


図 5 波源分布推定のモデル。

点、測定点間隔は測定点数の変化に応じて  $d_x = d_y = 0.083\lambda$  である。選出する仮想波源の数は  $N_s = 100$  とし、仮想波源の位相  $\theta_h$  を波源  $P_1$  との相対位相とする。また、 $d_z = 1\lambda$  のときの最大受信電圧と雑音の比を“SNR”とし、測定距離によらず一定の大きさのノイズを加えた。

波源から放射される電界分布は近傍電界測定により得られた。図.6 に測定システムを示す。受信プローブとしてダイポール付の光変調器を用いた。プローブに受信された電界は光変調器で光信号に変換され、高周波同軸ケーブルではなく光ファイバケーブルを通して伝送される。そして、変換された光信号は光電界復調器で電気信号に戻される。こうすることによって、電界分布の測定精度を上げることができる。受信プローブは被測定波源の面と測定距離  $d_z = 1\lambda$  の平行な面で移動される。ネットワークアナライザを用い、パワーを波源に供給するとともに、受信信号を受ける。測定した電界分布は波源の位置推定に用いられる。Fig 6 に示されるケーブル #2 の長さを調整することによって、波源間の位相差を  $160^\circ$  に設定することができた。測定システムの波源配置を図.4 に示し、波源のパラメータを表.1 に示す。

表 2 推定パラメータ.

Measurement area	$(S_x, S_y)$	$(2\lambda, 2\lambda)$
Total number of measurement points	$(s_x, s_y)$	$(25, 25)$
Space between measurement points	$(d_x, d_y)$	$(0.083\lambda, 0.083\lambda)$
Distance from source plane	$d_z$	$0.3\lambda$
Hypothetical sources spacing	$l_s$	$0.03\lambda$
Length of hypothetical current source	$l_p$	$0.03\lambda$
Number of hypothetical current sources	$N$	$67 \times 67 = 4489$
Phase of hypothetical current sources	$\theta_h$	$0^\circ \sim 360^\circ$
Total number of selections	$N_s$	100

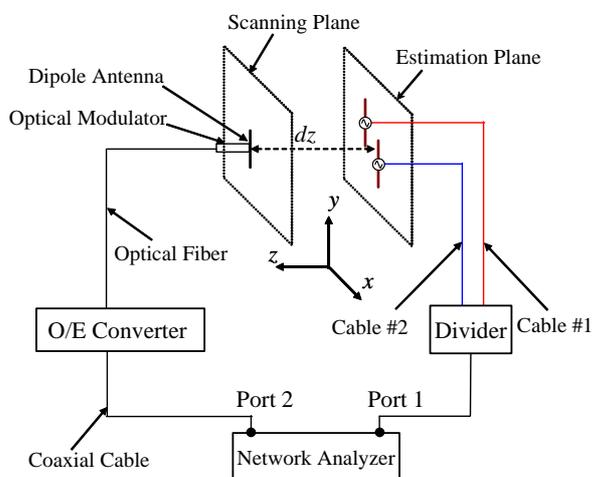


図 6 近傍測定システム.

### 3.2 推定結果

#### 3.2.1 行列方程式を解く方法による推定結果

行列方程式を解く方法を用いる場合、配置する仮想波源の数  $N$  ( $N = 4489$ ) は測定点数  $M$  ( $M = 625$ ) より多いため、変分法により推定を行った。実験による推定結果を図.7 に示す。シミュレーションによる推定結果 (ノイズなしと SNR=20dB の場合) を図.8 に示す。ただし、推定された電流振幅分布は求め

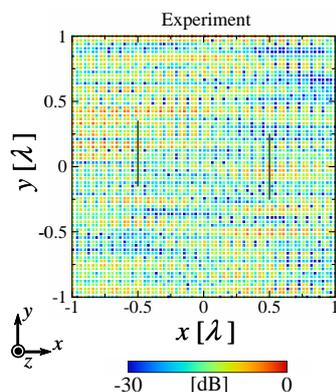


図 7 変分法による波源の電流振幅分布推定結果 (実験)。

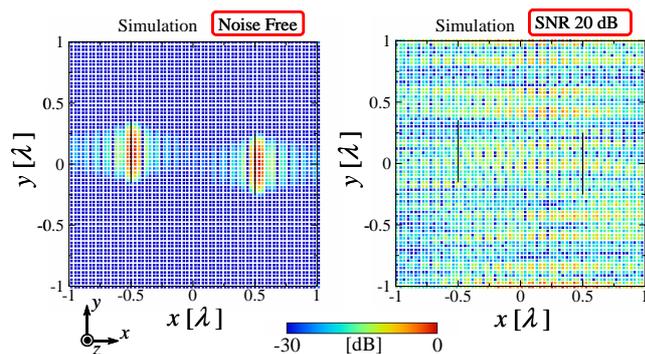


図 8 変分法による波源の電流振幅分布推定結果 (シミュレーション)。

た電流係数の最大値と規格化した。実験による推定では、電流係数が大きく求まる仮想波源が推定領域上に点在しており、推定ができなくなっている。ノイズなしの場合では、シミュレーションによる推定はできているのに対して、ノイズありの場合では、シミュレーションによる推定ができなくなっている。このことから、行列方程式を解く方法はノイズに弱いであることが検証できた。

#### 3.2.2 提案法による推定結果

波源間に位相差が  $160^\circ$  の場合について改良 SPM 法により推定を行った。配置する仮想波源の位相  $\theta_h$  に対する相関係数の値を図.9 に示す。  $P_{SPM}$  が  $\theta_h = 0^\circ$  及び  $-160^\circ$  付近で極大となることがわかる。  $\theta_h = 0^\circ$  と  $-160^\circ$  のときの波源位置の推定結果を図.10 に示す。推定結果から、実験とシミュレーションによる推定結果はほぼ一致し、推定誤差はあるが、波源の位置推定はできたと言える。

次に図.9 の  $P_{SPM}$  が 0.7 以上のときの推定結果は  $\theta_h$  が  $-180^\circ \sim -140^\circ, -30^\circ \sim 30^\circ, 170^\circ$  ( $10^\circ$  間隔) の 13 個である。この 13 個の結果から選出された仮想波源の位置にもう一度仮想波源を置き、最小二乗法による波源の電流振幅分布推定を行った。ただし、実験の場合  $Q = 474$ , シミュレーションの場合  $Q = 456$ 。実験による推定結果を図.11 に示す。シミュレーションによる推定結果 (ノイズなしと SNR=20dB の場合) を図.12 に示す。た

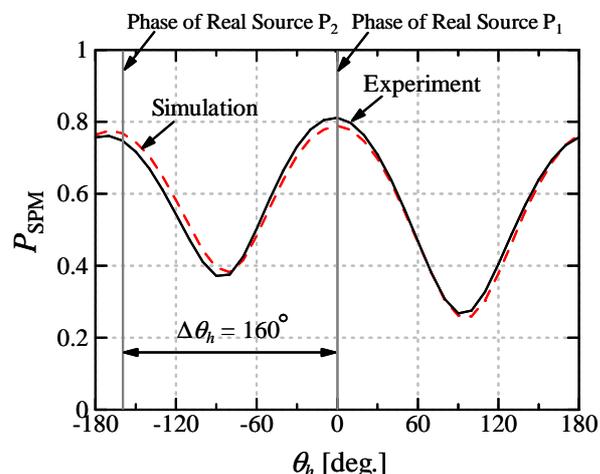


図 9 仮想波源の位相変化に対する相関係数.

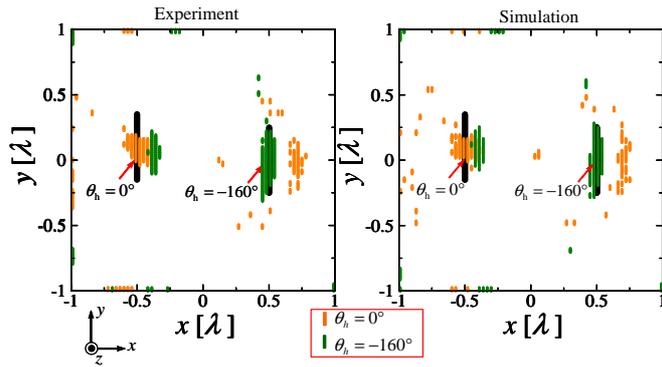


図 10 改良 SPM 法による波源の位置推定結果.

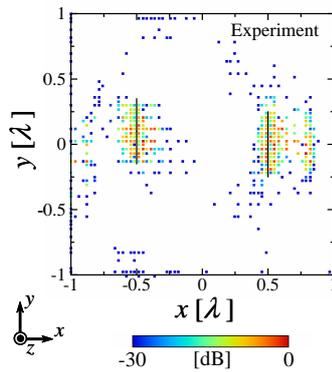


図 11 提案法による波源の電流振幅分布推定結果 (実験).

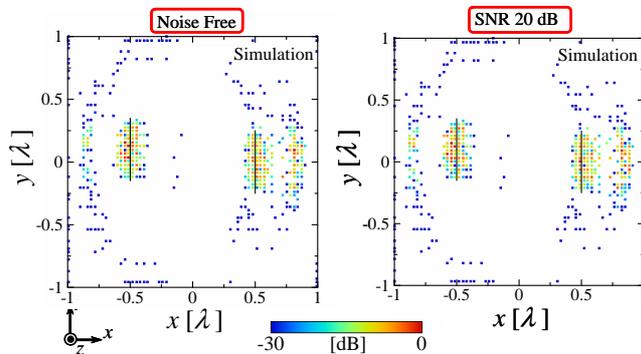


図 12 提案法による波源の電流振幅分布推定結果 (シミュレーション).

だし、推定された電流振幅分布は求めた電流係数の最大値と規格化した。推定結果から、実験とシミュレーションによる推定はノイズに強く、波源の電流振幅分布の推定ができていると言える。推定された波源の電流振幅分布にばらつきはあるが、電流の強い部分はほぼ波源の近くに分布している。推定に誤差が生じる主な原因は、改良 SPM 法による波源の位置推定に誤差が生じることと行列方程式を解く際の数値的安定度が低下することだと考えられる。

#### 4. む す び

本報告では、位相差のある複数波源モデルに対し、波源の等価電流の位置と振幅分布を推定できるハイブリッド法を提案した。本手法を用いて、2つの半波長ダイポールアンテナを波源とし

たモデルに対し、本手法による波源の電流振幅分布推定を実験とシミュレーションにより行った。その結果、ノイズの有無に関わらず、本手法による波源の電流振幅分布推定では、実験とシミュレーションによる推定ができたと言える。ノイズありの場合では、行列方程式を解く方法による推定はできないのに対し、本手法による推定はできた。

#### 文 献

- [1] C. R. Paul, D. R. Bush, "Radiated emission from common-mode currents," IEEE Int. Symp. on EMC, pp. 197-203, 1987.
- [2] F. Han, L. Zhang, "Radiation characteristics of transmission line in PCBs," IEEE Int. Symp. on EMC, pp. 153-156, 1995.
- [3] H. Saotome and Y. Saito, "An estimation method of current distribution in biological systems by the sampled pattern matching method," T.IEE Japan, vol. 113-C, No.1, pp. 69-76, 1993.
- [4] Y. Yoshimoto, K. Taira, K. Sawaya, R. Sato, "Estimation of Multiple Coherent Source Locations by Using SPM Method Combined with Signal Subspace Fitting Technique," IEICE Trans. Comm., Vol. E88-B, No. 8, Aug. 2005.
- [5] Peter Petre and Tapan Kumar Sarkar, Fellow, IEEE, "Planar Near-Field to Far-Field Transformation Using an Equivalent Magnetic Current Approach," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 40, No. 11, pp. 1348-1356, Nov. 1992.
- [6] 土井 達也, 増田 則夫, "プリント基板に搭載された MPU の放射磁界源推定," T.IEE Japan, vol. 120-A, No. 10, pp. 871-877, 2000.
- [7] J. Chakarothai, T. Inoue, Y. Zhen, Q. Chen, K. Sawaya, "Estimation of Current Distribution of Multiple Coherent Sources by Using Improved SPM Method," ACT, EMCJ99-132, Nov. 2009.
- [8] R. F. Harrington, Time-Harmonic Electromagnetic Field, The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory, Wiley-Interscience.