

# 改良SPM法による複数コヒーレント波源上の 電流分布推定の実験的検討

甄 源 チャカロタイ ジェドヴィスノブ 陳 強 澤谷 邦男

東北大学大学院 工学研究科 電気通信工学専攻

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 Sampled Pattern Matching 法 (SPM) が挙げられる。しかしながら、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、その問題を解決した改良 SPM 法が提案され、数値的に検討されている。本報告では、改良 SPM 法により波源上の電流分布推定を実験的に行った結果、波源間に位相差がある場合でも、波源の電流分布推定が可能であることがわかった。

キーワード SPM 法, 相関係数, 波源推定, 位相差

## Experimental Study on Current Distribution Estimation of Multiple Coherent Sources by Improved SPM Method

Yuan Zhen, Jerdvisanop Chakarothai, Qiang Chen, and Kunio Sawaya

Department of Electrical and Communication Engineering School of Engineering,  
Tohoku University.

**Abstract** In order to suppress the unwanted electromagnetic wave which is radiated from electrical circuits and devices, it is necessary to know the electric current distribution on the electronic circuits. The *sampled pattern matching* (SPM) method has been used to estimate current distribution by using near field distribution. However, because the conventional SPM method can not estimate the location of current sources when there is a phase difference between the current sources, the *improved sampled pattern matching* method is proposed. In this paper, we have performed an experimental study and successfully estimated current distribution by improved SPM method with a phase difference between the current sources.

**Keywords** SPM method, correlation coefficient, source identification, 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の電流分布を知ることが重要である。基板上の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、プリント基板上の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。その手法の一つとして、Sampled Pattern Matching 法 (SPM) という手法が挙げられる [3]。従来の SPM 法は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である。その後、

SPM 法は高周波領域で電子デバイスの電磁波源の推定に用いられた [4]。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。しかしながら、従来の SPM 法の相関係数を求める際に絶対値をとることによって、位相情報が失われるため、波源間に位相差があるモデルに対しては波源推定ができない。そこで、波源間に位相差があるモデルに対しても、波源推定が可能な改良 SPM 法が提案された [5]。本報告では、2 節は SPM 法と改良 SPM 法の原理、3 節は計算モデルと実験モデル、4 節は電流分布の推定結果、そして 5 節は結論について述べる。

### 2 原理

まず、Fig. 1 に電子デバイスあるいは電子回路が真空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。

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

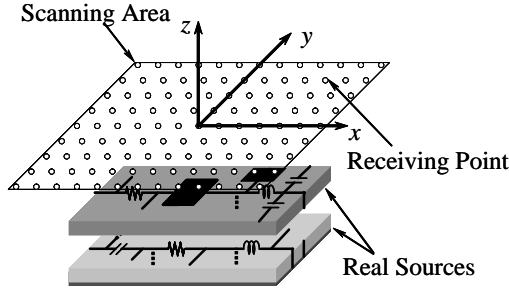


Figure 1: 波源の電界分布の計算モデル。

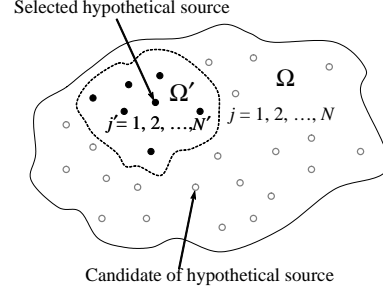


Figure 3: 仮想波源の集合。

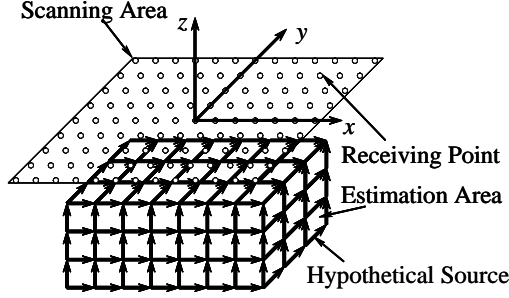


Figure 2: 仮想波源の電界分布の計算モデル。

ここで、 $M$  は測定点の総数である。  $T$  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。

次に、波源を含むように推定領域を取り、Fig. 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  $F_j$  は次式のように表せる。

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

## 2.1 SPM 法

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、次式のように表せる。

$$P_{\text{SPM}} = \arg \max \left\{ \frac{|\langle \mathbf{E}, \mathbf{G} \rangle|}{\sqrt{\langle \mathbf{E}, \mathbf{E} \rangle} \sqrt{\langle \mathbf{G}, \mathbf{G} \rangle}} \right\}, \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{G} = \mathbf{F}_j + \sum_{j'=1}^{N'} \mathbf{F}_{j'}, \quad (4)$$

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

$\mathbf{F}_j$  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したものである。Fig. 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である。 $N'$  は選出された仮想波源の数であり、 $N'$  が  $N_s$  に達すれば、選出は終了となる。複素ベクトル同士の内積は次式のように表せる。

$$\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \sum_{i=1}^M a_i^* b_i \quad (5)$$

したがって、従来の SPM 法では、式 (5) の内積は複素数として求めるため、絶対値を取る必要があった。これは電界分布の位相情報が失われる原因となる。

## 2.2 改良 SPM 法

従来の SPM 法の相関係数の取り方では、位相情報が失われるのに対して、改良 SPM 法では、次式のように内積は新たに定義される。

$$\langle \mathbf{A}, \mathbf{B} \rangle = \sum_{i=1}^M \text{Re}(a_i^* b_i) \quad (6)$$

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。

$$P_{\text{SPM}}(k) = \arg \max \left\{ \frac{\langle \mathbf{E}, \mathbf{G}(k) \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{E}, \mathbf{E} \rangle} \sqrt{\langle \mathbf{G}(k), \mathbf{G}(k) \rangle}} \right\} \quad (7)$$

$$\mathbf{G}(k) = \left( \mathbf{F}_j + \sum_{j'=1}^{M'} \mathbf{F}_{j'} \right) e^{j\Delta\phi} \quad (8)$$

ここで、仮想波源の位相は  $\Delta\phi$ 、 $P_{\text{SPM}}(k)$  は相関係数となる。位相項である  $\Delta\phi$  は残るため、波源推定に利用される。

## 3 解析および実験モデル

Fig. 4 に示すように、波源として 2 つの半波長ダイポールは推定領域の  $y$  方向に配置される。波源のパラメータは Table 1 に示す。波源間の位相差は  $0^\circ$  と  $100^\circ$  2 つの場合分けをする。解析と実験の周波数は 1 GHz とする。

波源分布推定のモデルは Fig. 5 に示す。シミュレーションと実験モデルのパラメータは Table 2 に示す。

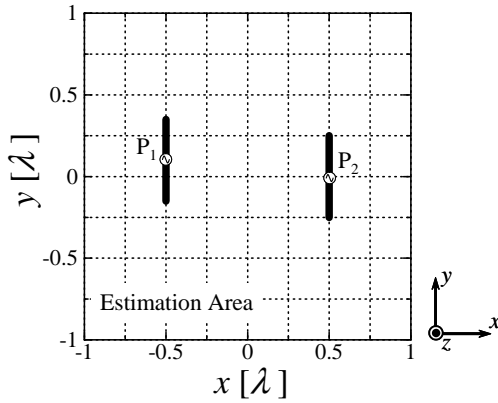


Figure 4: 波源の位置.

Table 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)
Initial phase	(θ <sub>1</sub> , θ <sub>2</sub> )	(0°, 0°)
	(θ <sub>1</sub> , θ <sub>2</sub> )	(0°, -100°)
Analysis frequency	(f <sub>1</sub> , f <sub>2</sub> )[GHz]	(1, 1)

推定領域の大きさは、 $L_x = L_y = 2\lambda$  である。測定距離  $d_z = 0.1\lambda, 0.3\lambda, 0.5\lambda$ 、走査範囲  $S_x = S_y = 2\lambda$ 、測定点数は  $M_x \times M_y = 169, 625, 1681$  点、測定点間隔は測定点数の変化に応じて  $d_x = d_y = 0.167\lambda, 0.083\lambda, 0.05\lambda$  とした。選出する仮想波源の数は  $N_s = 100$  とし、仮想波源の位相は波源  $P_1$  との相対位相である  $\Delta\phi$  とした。また、 $d_z = \lambda$  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。

改良 SPM 法の妥当性を検証するために、波源に対する近傍測定を行う。測定システムは Fig 6 に示す。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  $0^\circ$  と  $100^\circ$  の 2 つの場合に分け、初期位相差を設定する。そして、ダイポール付の光変調器を受信プローブとした光電界センサーを用い、高周波同軸ケーブルの代わりに光ファイバを用いることによって、精度の良い電界分布を測定することが可能である。測定システムの波源配置は Fig. 4 に示し、波源のパラメータも Table 1 に示す。測定パラメータは解析モデルで述べたシミュレーションパラメータと同じである。

## 4 推定結果

本節では、解析的方法と測定的方法で得られた波源の電界強度分布を用い、改良 SPM 法により波源分布推定の結果について述べる。以下のように波源間に位相差が  $0^\circ$  と  $100^\circ$  の 2 つの場合について述べる。測定距離は  $d_z = 0.5\lambda$ 、測定点数は  $M_x = M_y = 25$  とする。

### 4.1 波源間に位相差が $0^\circ$ の場合

まず、配置する仮想波源の位相に対する相関係数の値を Fig. 7 に示す。波源間の位相差は  $0^\circ$ 、 $P_{SPM}$  が  $\Delta\phi = 0^\circ$  付近で極大となることがわかる。次に  $\Delta\phi = 0^\circ$  のときの波源推定結果を Fig. 8 に示す。推定結果から実験によ

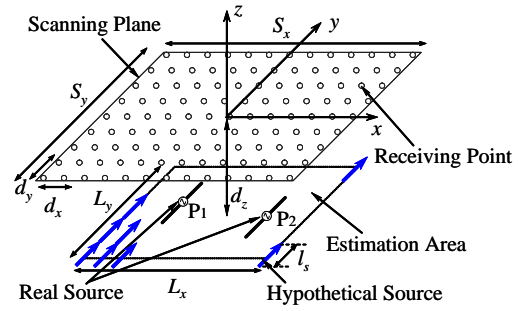


Figure 5: 波源分布推定のモデル.

Table 2: シミュレーションと実験モデルのパラメータ.

Measurement area	( $S_x, S_y$ )	( $2\lambda, 2\lambda$ )
		(13, 13)
Total number of measurement points	( $s_x, s_y$ )	(25, 25)
		(41, 41)
Space between measurement points	( $d_x, d_y$ )	(0.167λ, 0.167λ)
		(0.083λ, 0.083λ)
		(0.05λ, 0.05λ)
Distance from source plane	$d_z$	0.1λ
		0.3λ
		0.5λ
Hypothetical sources spacing	$l_s$	0.03λ
Length of hypothetical current source	$l_s$	0.03λ
Number of hypothetical current sources	$N$	$67 \times 67 = 4489$
Phase of hypothetical current sources	$\Delta\phi$	$0^\circ \sim 360^\circ$
Total number of selections	$N_s$	100

る推定結果はシミュレーションによる推定結果にほぼ一致し、波源推定ができることがわかる。

### 4.2 波源間に位相差が $100^\circ$ の場合

まず、配置する仮想波源の位相に対する相関係数の値を Fig. 9 に示す。波源間の位相差は  $100^\circ$ 、 $P_{SPM}$  が  $\Delta\phi = 0^\circ$  および  $-110^\circ$  付近で極大となることがわかる。次に  $\Delta\phi = 0^\circ$  および  $-100^\circ$  のときの波源推定結果を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。推定結果から実験結果とシミュレーションは、波源推定ができることがわかる。また、実験の測定誤差が生じ、シミュレーションによる推定結果より推定精度が劣化することもわかる。

## 5 むすび

本報告では、光電界センサーを用いた近傍電磁界測定において改良 SPM 法を用いることにより、実験による波源推定が実現された。改良 SPM 法は、電界強度の振幅と位相の情報両方を含め、相関係数を求めるため、波源間に位相差がある場合でも、有効な手法である。配置する仮想波源の位相に対する相関係数の変化から、波源間の位相差を特定することができると考えられるが、今後は波源間位相差の特定の精度と波源推定の精度が上るよう現在の改良 SPM 法を改良する。

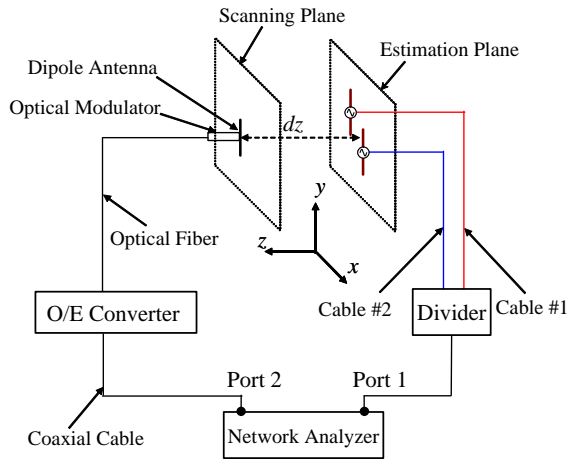


Figure 6: 近傍測定システム.

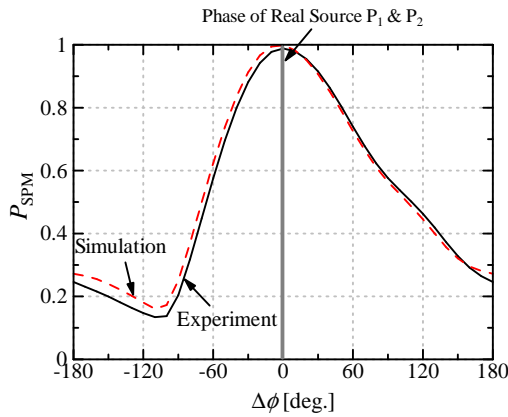


Figure 7: 仮想波源の位相変化に対する相関係数 (波源間の位相差は 0°).

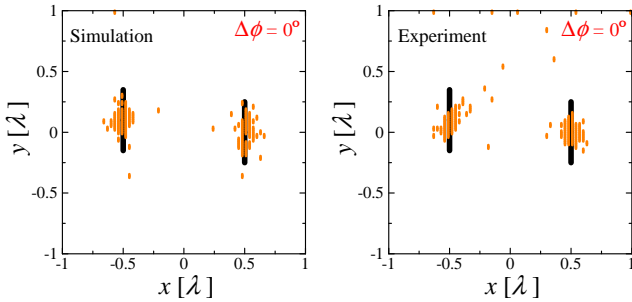


Figure 8: シミュレーションと実験の推定結果 (波源間の位相差は 0°)

## References

- [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.

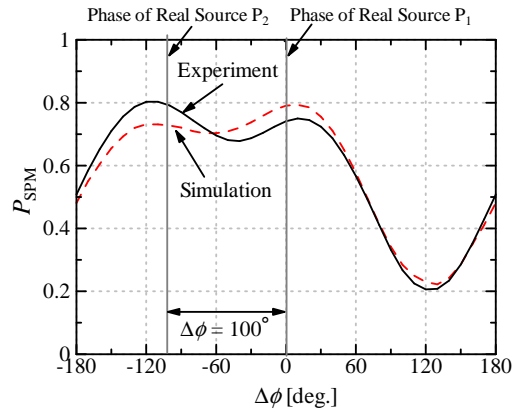


Figure 9: 仮想波源の位相変化に対する相関係数 (波源間の位相差は 100°).

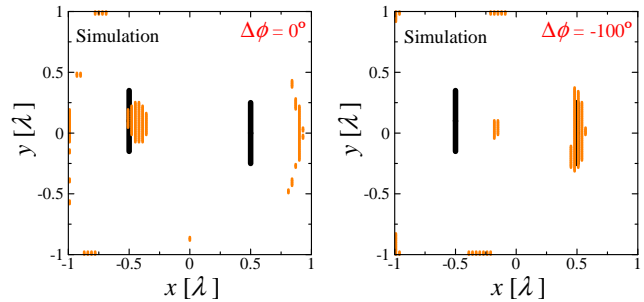


Figure 10: シミュレーションの推定結果 (波源間の位相差は 100°)

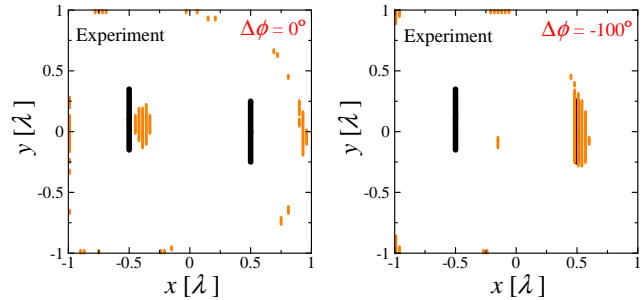


Figure 11: 実験の推定結果 (波源間の位相差は 100°)

- [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] 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
- [6] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Field*, *The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory*, Wiley-Interscience