

近傍電磁界を用いた波源位置推定の誤差評価

井上 智博[†] 陳 強[‡] 澤谷 邦男[‡]

[†]東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: † {tomohiro, 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は、不要波の波源位置を知ることが重要である。筆者らは波源近傍の測定面上で測定した電界分布を用いて、波源の位置を推定する手法について検討している。本報告では、SPM法 (Sampled Pattern Matching)と行列方程式を解く方法で波源位置推定を行い、それぞれの推定誤差を評価した結果を述べる。

キーワード EMC, SPM 法, 行列方程式, 波源位置推定, 推定誤差

Error Evaluation of Estimation of Source Locations by Using Near Field

Tomohiro INOUE[†] Qiang CHEN[‡] and Kunio SAWAYA[‡]

[†] Faculty of Engineering, Graduate school of Engineering, Tohoku University 6-6-05 Aoba, Aramakiyaza, Aoba-ku, Sendai, 980-8579 Japan

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

Abstract Estimating the source locations of electromagnetic (EM) waves is important for suppressing the emission of unwanted EM waves from electronic devices. To specify the source locations, many estimation methods using near field have been researched. In this paper, the source locations of EM waves are estimated by Sampled Pattern Matching (SPM) method and solving matrix equation. The results of estimations and evaluated errors are reported in this paper.

Keyword EMC, SPM method, matrix equation, estimation of source locations, error evaluation of estimation of source locations

1.1. 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。また、コンピュータのクロック周波数の高速化も急速に進み、数 GHz 帯で動作する電子機器が増加している。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。有効な EMC 対策をとるために、電子機器から漏洩する電波の波源位置を知ることが重要である。

従来の関連研究では、波源近傍の測定面上で測定した電界分布の相対的な位相情報を用いる手法[1]などが報告されている。しかし、この方法による波源位置推定の空間分解能は、良くて $1/2$ 波長であり、推定精度としては十分とは言えない。

そこで筆者らは、波源近傍の測定面上で測定した電界分布を用いるSPM法[2](Sampled Pattern Matching)と行列方程式を解く方法[3]による波源位置推定について検討を行っている。

本報告では、シミュレーションを用いてSPM法と行列方程式を解く方法で波源位置推定を行い、それぞれの推定の誤差を評価した結果について述べる。

2. 波源位置推定の方法

図 1 に電界分布の測定モデルを示す。最初に、波源が測定面上に作る電界分布を測定する。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 e は(1)式のように表せる。

$$e = (e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_M) \quad (1)$$

ここで、 M は測定点の総数である。本報告ではこの電界強度はモーメント法により求める。モーメント法ではデルタギャップを用いているため、受信電圧は受信電界強度に比例し、(1)式は(2)式のように表せる。

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_M) \quad (2)$$

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数値的に求める。仮想波源 j が測定点 i に作る電界強度を Z_{ij} とすると、仮想波源 j が測定面に作る電界分布 Z_j は(3)式のように表せる。

$$Z_j = (Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{ij}, \dots, Z_{Nj}) \quad (3)$$

これらのデータを用いて、以下のSPM法または行列

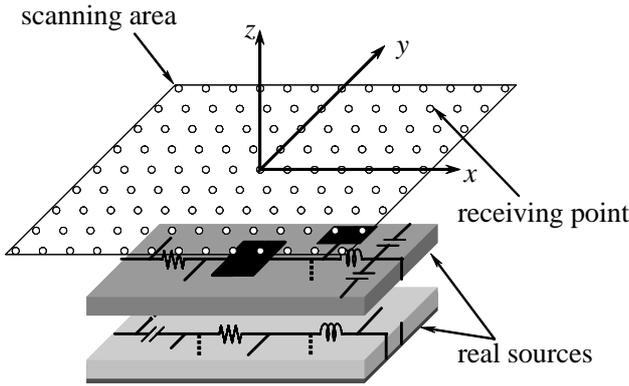


図1 電界分布の測定モデル

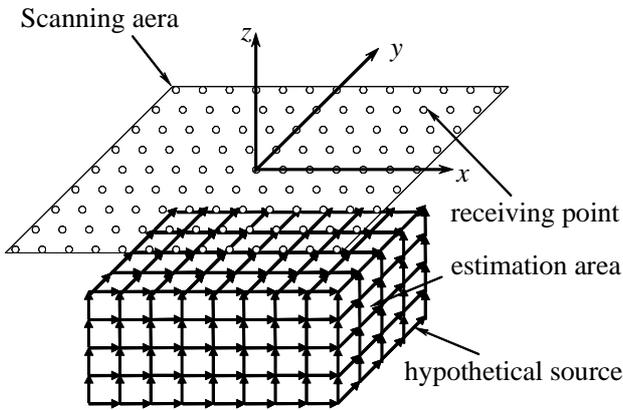


図2 仮想波源の配置

方程式を解く方法により、波源位置推定を行う。

2.1. SPM 法による波源位置推定手法[2]

SPM法による波源位置推定では、波源と仮想波源の相関係数を求め、相関の高い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、選出された N_s 個の仮想波源の配置により波源の位置を推定する。相関係数は波源の電圧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。1個目の仮想波源の選出には(4)式を、2個目以降の仮想波源の選出には(5)式を用いる。

$$P_{SPM} = \arg \max \left(\frac{\sum_{i=1}^M |V_i^H \cdot Z_{iA}|}{\sum_{i=1}^M |V_i| \sum_{i=1}^M |Z_{iA}|} \right) \quad (4)$$

$$P_{SPM} = \arg \max \left(\frac{\sum_{i=1}^M |V_i^H \cdot Z_{iA}|}{\sum_{i=1}^M |V_i| \sum_{i=1}^M |Z_{iA} + Z_{iB}|} \right) \quad (5)$$

ここで、 P_{SPM} は相関係数である。 Z_{iA} はまだ選出されていない仮想波源の電界分布であり、 Z_{iB} はそれ以前に選

出された仮想波源の電界分布を足し合わせたものである。

2.2. 行列方程式を解く方法による波源位置推定手法[3]

行列方程式を解く方法での波源位置推定では、各々の仮想波源に電流係数を付加し、行列方程式を解くことによりこの電流係数を求める。求めた電流係数により、波源位置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、(6)式が得られる。

$$V_i = \sum_{j=1}^N Z_{ij} I_j \quad (6)$$

(6)式は(7)式のように行列方程式として表すことができる。

$$[Z][I] = [V] \quad (7)$$

ここで、 $[Z]$ は $M \times N$ 次元のインピーダンス行列であり、 $[I]$ 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。測定点数 M と仮想波源の配置数 N の大小により、以下のように変分法と最小二乗法を使い分ける。

1) 変分法 ($M < N$ のとき)

測定点数 M が仮想波源の配置数 N より少ない場合、変分法により(8)式の一般化逆行列を用いて解く。

$$[I] = [Z]^H ([Z][Z]^H)^{-1} [V] \quad (8)$$

2) 最小二乗法 ($M \geq N$ のとき)

測定点数 M が仮想波源の配置数 N より多い場合、最小二乗法により(9)式の一般化逆行列を用いて解く。

$$[I] = ([Z]^H [Z])^{-1} [Z]^H [V] \quad (9)$$

ここで、 $[Z]^H$ は $[Z]$ のエルミート共役行列である。

2.3. 推定の誤差評価手法

波源として半波長以下のダイポールを仮定する場合、推定の誤差 ε を(10)式により求める。

$$\varepsilon = \frac{\sum_{j=1}^N |r_j| \cdot |I_j|}{\sum_{j=1}^N |I_j|} \quad (10)$$

ここで、 r_j は図3のように j 番目の仮想波源から最も近いダイポールアンテナの給電点へのベクトルである。

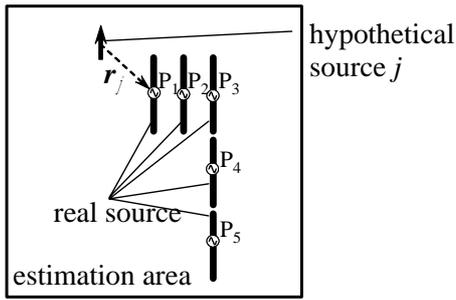


図3 推定誤差評価

I_j は仮想波源 j の電流係数であり、SPM法では選出された場合 $I_j = 1$ 、選出されなかった場合 $I_j = 0$ とする。行列方程式を解く方法では計算により求めた電流係数を I_j とする。

3. シミュレーションを用いた波源位置推定の誤差評価

3.1. 波源位置の推定モデル

波源位置推定に用いたモデルを図4に示す。測定面は $z=0$ の x - y 平面上にとった。走査範囲は $S_x=S_y=1.05\lambda$ 、測定点数は $M=15 \times 15=225$ 点、測定点間隔は $d_x=d_y=0.075\lambda$ とした。それぞれの測定点では y 方向の偏波のみ受信する。推定領域は測定面に平行に2次元にとり、大きさは $L_x=L_y=\lambda$ とした。測定距離は $d_z=0.1\lambda \sim 2.0\lambda$ とした。ノイズを加える場合は、測定距離 $d_z=1.0\lambda$ のときの最大受信電圧のSNRを“SNR”と定義して、測定距離によらず一定の大きさのノイズを加えた。

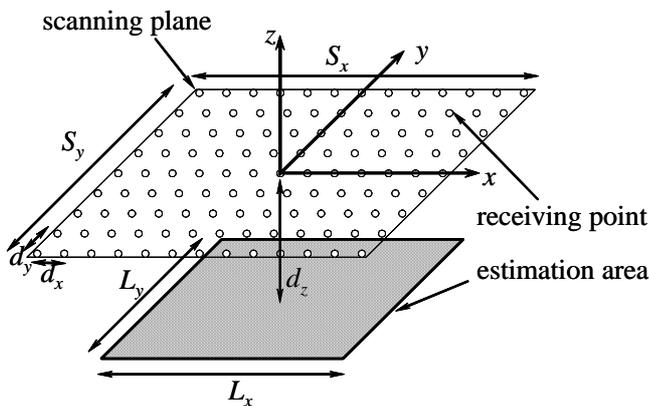


図4 推定のモデル

3.2. 波源と仮想波源配置

図5に推定する波源の配置を示す。波源として5個の $1/4$ 波長ダイポールを仮定し、推定領域内に配置する。5波源はコヒーレント波とした。周波数は 2.42 GHzとした。

仮想波源は図6のように x, y 方向に等間隔に配置する。配置数は、SPM法と変分法では $N=35 \times 35=1225$ 個で、最小二乗法では $N=10 \times 10=100$ 個とした。ここで、仮想

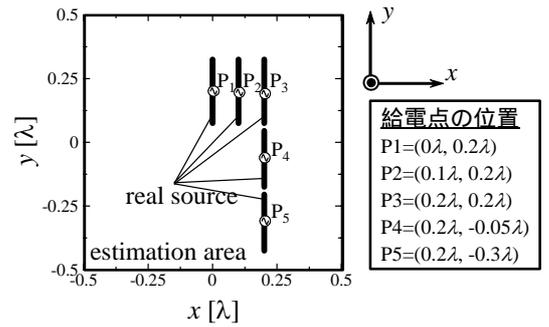


図5 波源配置

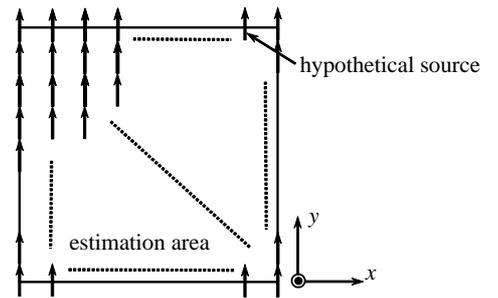


図6 仮想波源配置

波源として全長 0.03λ の微小ダイポールを用いた。

SPM法での仮想波源の選出数は $N_s=100$ 個とした。

3.3. SPM法による波源位置の推定と誤差

$d_z=0.1\lambda, 0.5\lambda$ としたときのSPM法による波源位置推定の結果を示す。推定結果として選出した仮想波源を表示する。

1) SPM法による波源位置推定と誤差

図7と図8はNoise Freeでの推定結果である。 $d_z=0.1\lambda$ では波源位置を精度よく推定できており、 $\varepsilon=0.066$ となった。 $d_z=0.5\lambda$ では推定に偏りがあるものの波源位置を推定できており、 $\varepsilon=0.092$ となった。

図9と図10はSNR=20 dBでの推定結果である。SNR=20 dBのノイズを加えても推定精度にあまり変化はなく、 $d_z=0.1\lambda$ では $\varepsilon=0.071$ 、 $d_z=0.5\lambda$ では $\varepsilon=0.10$ となった。

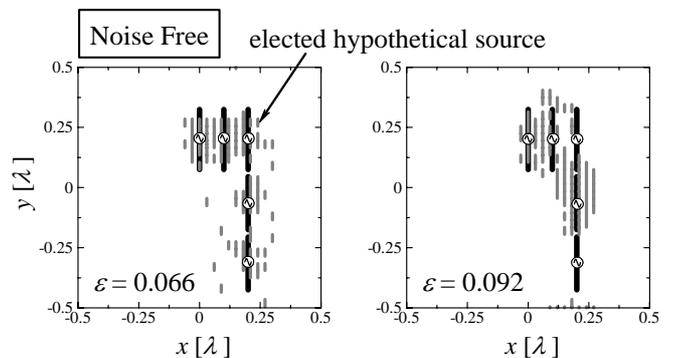


図7 $d_z=0.1\lambda$

図8 $d_z=0.5\lambda$

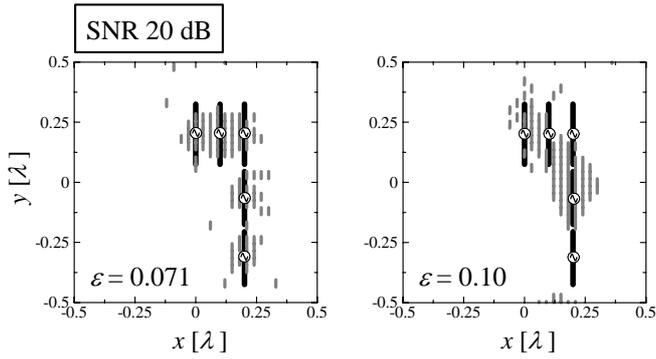


図 9 $d_z=0.1\lambda$

図 10 $d_z=0.5\lambda$

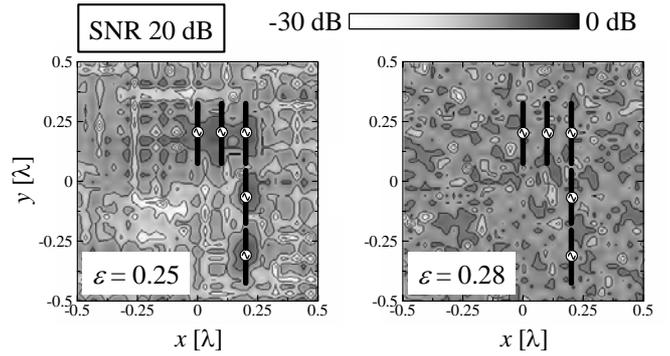


図 13 $d_z=0.1\lambda$

図 14 $d_z=0.5\lambda$

3.4. 行列方程式を解く方法による波源位置の推定と誤差

$d_z=0.1\lambda$, 0.5λ としたときの行列方程式を解く方法による波源位置推定の結果について示す。推定結果として推定した仮想波源上の電流分布を表示する。

2) 変分法による波源位置推定と誤差

図 11 と図 12 はNoise Freeでの推定結果である。 $d_z=0.1\lambda$ では波源位置を精度よく推定しており、 $\varepsilon=0.095$ となった。 $d_z=0.5\lambda$ では波源位置を推定できず、 $\varepsilon=0.27$ となった。

図 13 と図 14 はSNR=20 dBでの推定結果である。 $d_z=0.1\lambda$ では波源位置の推定はできているものの誤差が大きく増加し $\varepsilon=0.25$ となった。 $d_z=0.5\lambda$ では推定できず、 $\varepsilon=0.28$ となった。

3) 最小二乗法による波源位置推定と誤差

図 15 と図 16 はNoise Freeでの推定結果である。 $d_z=0.1\lambda$ では波源位置を精度よく推定しており、 $\varepsilon=0.098$ となった。 $d_z=0.5\lambda$ では波源位置をできず、 $\varepsilon=0.25$ となった。

図 17 と図 18 はSNR=20 dBでの推定結果である。 $d_z=0.1\lambda$ では波源位置の推定はできているが、誤差が増加し $\varepsilon=0.15$ となった。 $d_z=0.5\lambda$ では推定できず、誤差 $\varepsilon=0.25$ となった。

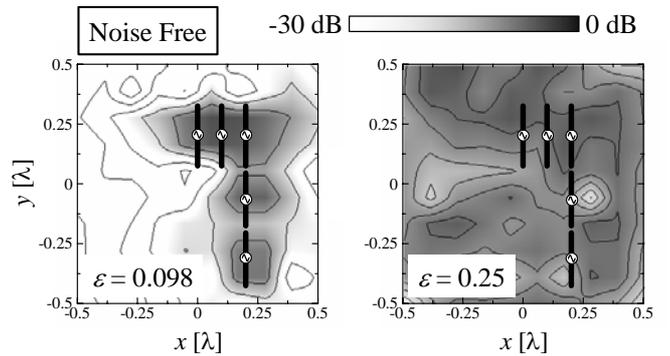


図 15 $d_z=0.1\lambda$

図 16 $d_z=0.5\lambda$

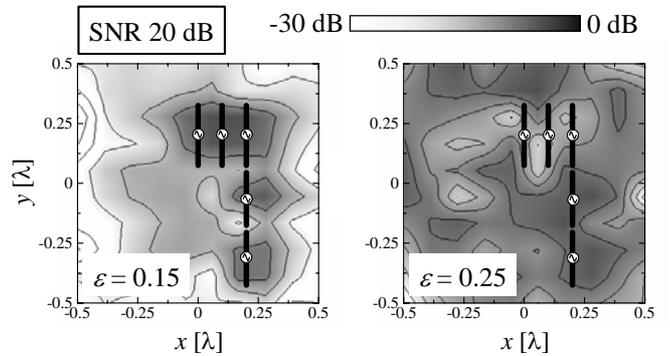


図 17 $d_z=0.1\lambda$

図 18 $d_z=0.5\lambda$

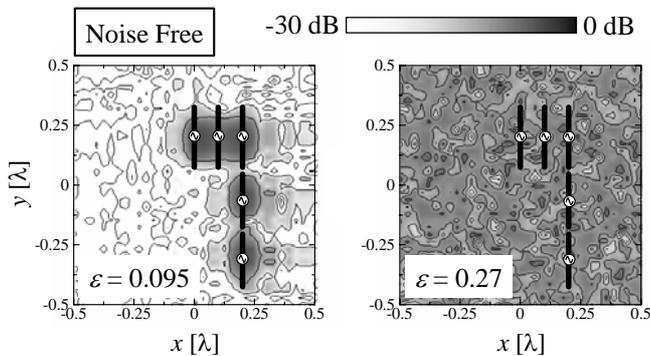


図 11 $d_z=0.1\lambda$

図 12 $d_z=0.5\lambda$

3.5. 波源位置推定の誤差評価

測定距離 d_z を $0.1\lambda\sim 2.0\lambda$ まで変化させてSPM法、行列方程式を解く方法による波源位置推定を行った。測定距離 d_z の関数として誤差 ε を図 19、図 20 に示す。

図 19 はNoise Free での結果である。SPM法による推定の誤差は測定距離によらず小さく、精度の良い推定ができています。行列方程式を解く方法による推定の誤差は、 $d_z\leq 0.2\lambda$ の範囲で小さく推定が可能であるが、 $d_z\geq 0.5\lambda$ の範囲では誤差が大きく推定できない。

図 20 はSNR=20 dBでの結果である。SPM法による推定の誤差は、Noise Free のときとほとんど変わらず、精度の良い推定ができています。一方、行列方程式を解

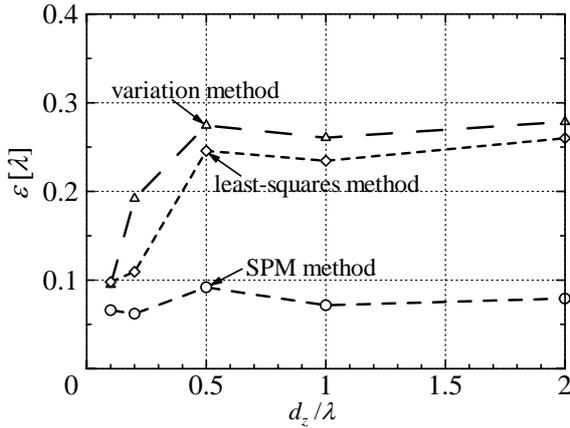


図 19 Noise Free での推定誤差

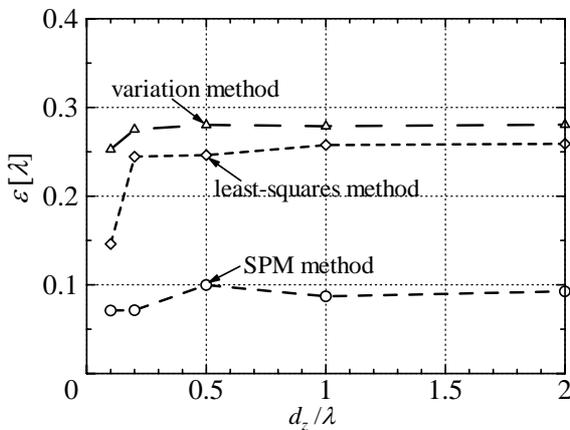


図 20 SNR=20 dB での推定誤差

く方法での推定の誤差は大きく増加している。波源位置の推定は $d_z=0.1\lambda$ でのみ可能であり、 $d_z \geq 0.2\lambda$ の範囲では誤差が大きく推定することができない。

4. まとめ

シミュレーションにより SPM 法と行列方程式を解く方法による波源位置推定の誤差評価を行った。SPM 法は測定距離が長くても誤差が小さく推定ができるが、行列方程式を解く方法では測定距離が短い範囲でのみ推定ができる。

ノイズを SNR=20 dB 加えた場合、行列方程式を解く方法ではノイズによる誤差の増加が大きく、測定距離がさらに短いときのみ推定ができる。一方で SPM 法による推定の誤差はノイズによる増加があまりなく、波源位置推定をすることができる。

文 献

- [1] 北吉, 澤谷, “装置からの電磁放射を対象とした電波ホログラムによる波源の可視化”, 信学論 (B-II), vol. J80-B-II, no.3, pp. 284-291, 1997
- [2] 早乙女, 斉藤他, “Sampled Pattern Matching 法によ

る生体内電流分布推定”, 電学論(C), vol. 113, no. 1, pp. 69-76, 1993.

- [3] Q. Chen, S. Kato, and K. Sawaya, “Estimation of Current Distribution on Multilayer Printed Circuit Board by Near-Field Measurement,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 2, May 2008