

—1998年11月26日, 27日—

## 重み付き逆行列法による二次元電流分布推定

○土井達也<sup>1)</sup>, 斎藤兆古<sup>2)</sup>, 増田則夫<sup>3)</sup>, 遠矢弘和<sup>4)</sup>

1)足利工業大学, 2)法政大学工学部, 3)4)日本電気株式会社

### Computation of Two-dimensional Current Distribution by The Weighted Inverse Matrix Method

Tatsuya DOI<sup>1)</sup>, Yoshifuru SAITO<sup>2)</sup>, Norio MASUDA<sup>3)</sup>, and Hirokazu TOHYA<sup>4)</sup>

1) *Ashikaga Institute of Technology*, 2) *Hosei University*, 3)&4) *NEC Corporation*

#### Abstract

We carry out a research concerning with a Fourier series strategy for solving inverse problems. The two-dimensional electric current distribution is computed from the locally measured magnetic fields by our new strategy. At first, simple examples have been solved and compared with experimented solutions to verify the validity of our strategy. Secondly, our inverse strategy has been applied to the electric current distribution searching on simplified printed circuit boards (PCB).

#### 1. まえがき

近年の電子機器の高周波化に伴う電子機器の放射電磁界は、深刻な電磁干渉を喚起する要因となりつつある。いわゆる、EMC (Electromagnetic Compatibility) 問題である。特に、電子機器から放射する磁界は、他の機器の誤動作等を引き起こす可能性がある。このような放射磁界を抑制するためには、電子機器近傍の放射磁界から磁界源を特定し、放射磁界を低減する試みが求められる。しかしながら、電子機器の多様な形状・構造に起因して、局所的に測定された磁界分布しか得られない。このため、局所的に測定された磁界分布から放射磁界源を推定する問題、すなわち、逆問題を解くことに問題は帰する。

従来から、筆者らは、逆問題解析の一方法として、SPM (Sampled Pattern Matching) 法を提案し、非破壊検査や生体系逆問題への有効性を報告してきた<sup>(1)</sup>。さらに、ノートパソコンからの漏洩磁界分布からその磁界源を推定する問題

へSPM法を適用し、主要な放射磁界源となる電流分布が推定可能であることを報告した<sup>(2)</sup>。

本稿では、逆問題解析の一方法としてフーリエ級数を用いた重み付き逆行列法を提案する。本稿で提案する方法は、解がフーリエ級数展開可能であると仮定し、三角関数で重み付けされた重み行列を用いて解を得る方法である。

最初に、二次元電流分布推定問題に関する計算シミュレーションを行い、提案する方法の妥当性を検証する。

次に、プリント基板上の放射磁界源推定問題へ本方法を適用する。本稿で取り上げる実験例は典型的な放射磁界源モデルである。

さらに、実際の応用例として、コンピュータのマザーボードに装着されているマイクロプロセッサ (Micro Processing Unit; 以後、MPU と略記) 中の磁界源 (電流分布) 推定問題を取り上げる。

1) 電気電子工学科講師, 〒326-8558 足利市大前町 268-1, TEL)0284-62-0605 FAX) 0284-62-4633

2) 電気電子工学科教授, 〒184-8584 小金井市梶野町 3-7-2, TEL& FAX)042-387-6200

3) デバイス評価技術研究所 EMC 技術センター主任, 〒216-8555 川崎市宮前区宮崎四丁目 1-1,

TEL)044-856-8428 FAX) 044-856-2350

4) デバイス評価技術研究所 EMC 技術センター長, 同上

## 2. 重み付逆行列法

### 2.1. システム方程式

一般に、多くの逆問題のシステム方程式は、

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}, \quad (1a)$$

または、

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdots & \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & c_{n3} & \cdots & c_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix}, \quad (1b)$$

$m \gg n$ ,

となる。ここで、 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Y}$  および  $\mathbf{C}$  は、それぞれ、 $m$  次の入力ベクトル、 $n$  次出力ベクトル、およびシステム行列である。また、 $n$  と  $m$  は、それぞれ、測定点数と推定対象領域内の分割個数を表す。

### 2.2. 解法

(1) 式は、未知数  $m$  が式の数  $n$  より圧倒的に多く、システム行列が長方形である不適切なシステム方程式である。このため、(1) 式の解を得るには、何らかの拘束条件を付加する必要がある。例えば、最小ノルム法は、解が存在する空間中で解のノルムを最小とする拘束条件適用する方法である。

本稿で提案する重み付逆行列法では、解が三角関数を用いた級数で表現可能であると仮定する。

ここで、解空間  $\alpha$  で解  $s(\alpha)$  が、

$$s(\alpha) = s_0 + s_1 \cos(\alpha) + s_2 \sin(\alpha) + s_3 \cos(2\alpha) + s_4 \sin(2\alpha) + \cdots, \quad (4)$$

と表現可能であるとする。

このとき、解空間  $\alpha$  が  $m$  個に離散化されたとすると、(1) 式の解  $\mathbf{X}$  は、

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{S}, \quad (5a)$$

または、

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots \\ 1 & \cos[\Delta\alpha] & \sin[\Delta\alpha] & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ 1 & \cos[(m-1)\Delta\alpha] & \sin[(m-1)\Delta\alpha] & \cdots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{n-1} \end{pmatrix}. \quad (5b)$$

となる。ここで、 $\mathbf{W}$  と  $\mathbf{S}$  は、それぞれ、 $m$  行  $n$  列の重み行列と  $n$  次ベクトルである。

(1) 式と (5) 式から、解  $\mathbf{X}$  は、

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\{(\mathbf{C}\mathbf{W})^{-1}\mathbf{Y}\} \quad (6)$$

で求められる。

本稿で提案する重み付逆行列法では、解がフーリエ級数展開可能であると仮定し、三角関数を用いた重み行列を用いることで、(1) 式の解を一意的に求める。すなわち、不適切問題の解がフーリエ級数に展開可能であることを拘束条件として採用した解法である。

## 3. シミュレーション

図 1 に、磁界源推定問題の例を示す。図 1(a) と 1(b) に、それぞれ、正解の電流分布と測定磁界分布を示す。測定磁界分布は、対象領域上 20 [mm] の高さにおける法線方向磁界分布である。測定領域は、90x90 [mm] の領域を 10 [mm] 等間隔 100 点 (10x10) である。電流が存在する対象領域は、90x90 [mm] の領域を 225 点 (15x15) に離散化

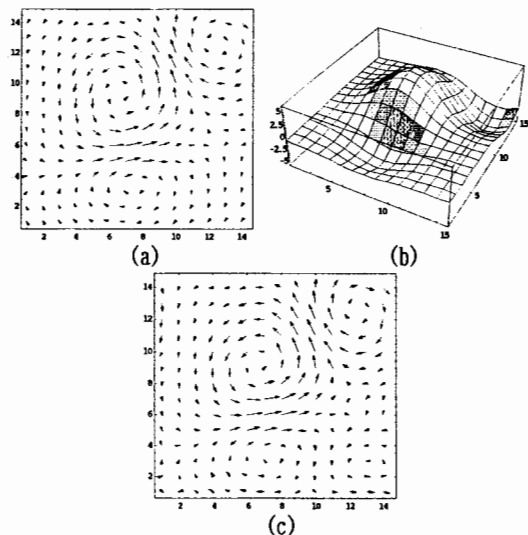


図 1. 磁界源推定問題の例。(a) 正解電流分布、(b) 測定された磁界分布、(c) 電流分布計算結果。

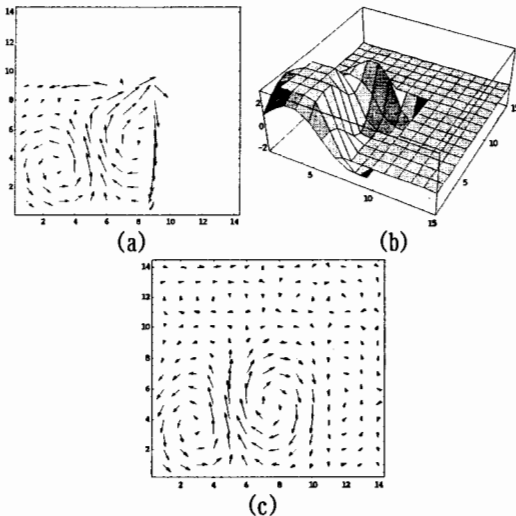


図 2. 磁界源推定問題の例。(a) 正解電流分布、(b) 測定された磁界分布、(c) 電流分布計算結果。

されたとした。換言すれば、この問題では、式の数が 100、未知数 225 個のシステム方程式を解くことに帰する。

図 1(c) は、(6) 式によって計算された電流分布を示す。

図 1(c) の結果は、重み付逆行列法が物理的に意味のある解を与えることを示している。また、正解の電流分布と、ほぼ等しい電流分布が得られていることがわかる。図 2 に、測定された磁界分布に不連続点のある場合の例を示す。図 2(a) と 2(b) に、それぞれ、正解の電流分布と測定された磁界分布を示す。磁界分布の測定と計算の条件は、図 1 の例と同様である。

図 2(c) に、(6) 式によって計算された電流分布を示す。

図 2(c) の結果は、測定された磁界分布に不連続点のある場合でも、局所的な磁界分布から対象領域中の主要な電流分布を計算可能であること示している。

シミュレーション結果は、(1) 式のシステム方程式の解がフーリエ級数で表現可能であり、重み付き逆行列法が物理的に意味のある解を与えることを示している。

## 4. プリント基板上の磁界源推定

### 4.1. 磁界源モデル

電子機器のプリント基板には環状と線状電流による放射磁界源が混在する。ここでは、プリント基板上の放射磁界源推定に関する基礎的

な実験を行い、重み付逆行列法を用いてプリント基板上の放射磁界源推定を行った。放射磁界源モデルとして、ループアンテナ、マイクロストリップラインの 2 例について実験的検討を行った。さらに、実際の応用例として、コンピュータのマザーボードに装着されている MPU 中の磁界源(電流分布)推定を行った。

#### 4.1.1. ループアンテナ

図 3 に、ループアンテナを磁界源モデルとした磁界源推定の例を示す。図 3(a) と 3(b) は、それぞれ、概略図と測定された放射磁界分布を示す。ループアンテナに 20 [MHz] の電流を通電し、ループアンテナ上 15 [mm] の高さで法線方向磁界分布をサーチコイルで測定した。測定領域は、200x200 [mm] の領域を 10 [mm] 等間隔 225 点 (15x15) である。測定にはオシロスコープ (SONY TEKTRONIKS TDS684B) を使用した。

図 3(c) に、測定された磁界分布 [図 3(b)] から (6) 式によって計算された電流分布を示す。電流分布は、対象領域内の 441 点 (21x21) で計算した。

図 3(c) の結果は、ループアンテナに流れる主要な環状電流分布を重み付逆行列法で同定可能なことを示す。

#### 4.1.2. マイクロストリップライン

図 4 に、直線状マイクロストリップラインを磁界源モデルとした磁界源推定の例を示す。図 4(a) と 4(b) は、それぞれ、概略図と測定された放射磁界分布を示す。マイクロストリップライ

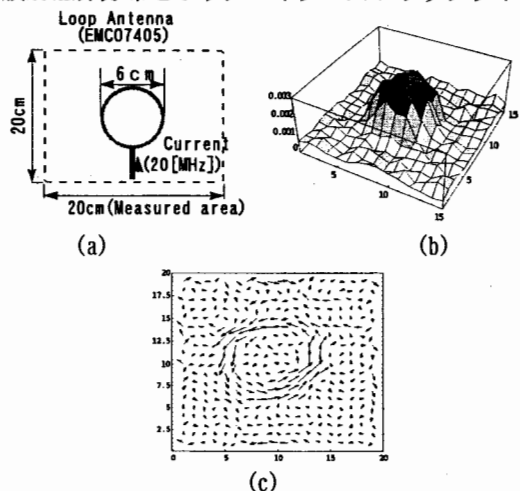


図 3. ループアンテナ中の電流分布推定。(a) 概略図、(b) 測定された磁界分布、(c) 電流分布計算結果。

に 20 [MHz] の電流を通電し、マイクロストリップライン上 15 [mm] の高さで法線方向磁界分布をサーチコイルで測定した。測定領域は、100x100 [mm] の領域を 10 [mm] 等間隔 225 点 (15x15) である。測定条件は、ループアンテナと同様である。

図 4 (c) に、測定された磁界分布 [図 4 (b)] から (6) 式によって計算された電流分布を示す。電流分布は、対象領域内の 441 点 (21x21) で計算した。

図 4 (c) の結果では、測定された磁界分布に含まれるノイズによって、電流分布計算結果に誤

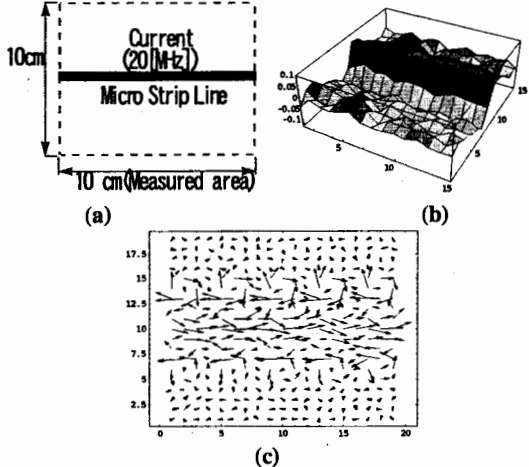


図 4. 直線状マイクロストリップライン中の電流分布推定。(a) 概略図、(b) 測定された磁界分布、(c) 電流分布計算結果。

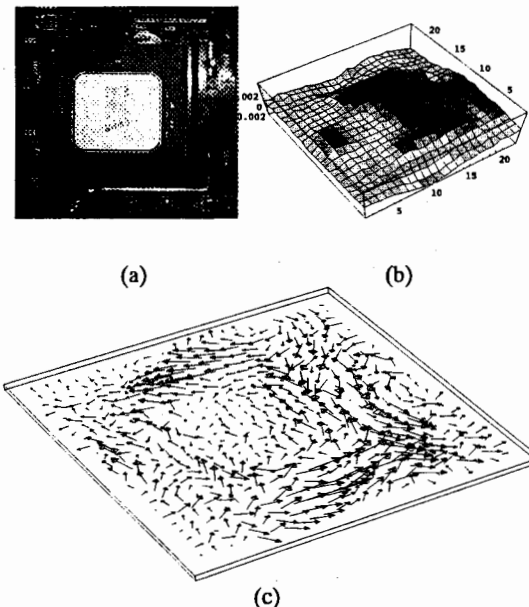


図 5. MPU 中の電流分布推定。(a) MPU、(b) 測定された磁界分布、(c) 電流分布計算結果。

差が含まれていることがわかる。しかし、図 4 (c) 中の主要な電流分布は、マイクロストリップライン上に存在し、主要な電流分布を同定可能であることが判る。

#### 4.1.3. MPU

図 5 に、コンピュータのマザーボードに装着された MPU 中の電流分布計算結果を示す。図 5 (a) と 5 (b) は、それぞれ、MPU と測定された放射磁界分布を示す。磁界の測定領域は、44x44 [mm] の領域を 2 [mm] 等間隔の 529 点 (23x23) である。磁界分布は、80 MHz 成分である。

図 5 (c) に、測定された磁界分布 [図 5 (b)] から (6) 式によって計算された電流分布を示す。電流分布は、対象領域内の 625 点 (25x25) で計算した。

図 5 (c) 中の、主要な電流分布は電源と GND (グラウンド) 間のライン部分に相当している。これは、電源と GND 間に接続されているバイパス用コンデンサがダイポールアンテナと同様の働きをしているためか、あるいは端子部を流れる電流が、主要な放射磁界源となっていると考えられる。結果として、本稿で提案する方法によって、MPU からの主要な放射磁界源を同定可能であることが確認できた。

## 5. 結言

本稿では、フーリエ級数を用いた重み付き逆行列法を提案した。本手法を二次元磁界源 (電流) 分布推定問題へ適用した。

計算機シミュレーションの簡単な例では、重み付き逆行列法によって局所的な測定磁界分布から支配的な電流分布を計算可能であることを示した。これは、電流分布がフーリエ級数展開可能であることを意味する。

さらに、プリント基板上の放射磁界源探査問題へ本手法を適用した。その結果、プリント基板上で測定された磁界分布から支配的な放射磁界源 (電流) 分布を計算可能であり、重み付き逆行列法が物理的に意味のある解を与えることが判明した。

## 参考文献

- (1) T. Doi, S. Hayano, and Y. Saito, J. Appl. Phys., Vol. 79, No. 8, pp. 5214-5216, 1994.
- (2) T. Doi, S. Yoshida, N. Masuda, H. Tohya and Y. Saito, the Record of the 29<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, pp. 1134-1139, 1998.