

TDNF 法を用いた変調波源の位置推定

小野寺 亮, 陳 強, 澤谷 邦男 (東北大学大学院工学研究科)

概要:電子機器間の干渉問題の有効な対策をとるためには,電子機器内部にある不要電磁波の波源位置を推定することが重要である.従来の波源位置推定の研究では,変調波の近傍界測定法の問題から,変調波源に対する位置推定についてはあまり検討されていない.本報告では,従来の波源位置推定法である逆行列法と,変調波の近傍界測定に有効な TDNF(Time Domain Near Field) 法を組み合わせた波源位置推定法を提案する.また,数値解析により本手法の有効性について検証したので報告する.

キーワード: TDNF 法, 逆行列法

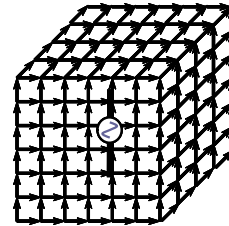


図 1: 全面波源配置法

1. まえがき

近年, GHz 帯の電磁波を利用した機器・システムが着実な普及を見せている. また, 電子機器の小型化や, 動作の高速化も急速に進んでいる. それに伴い, 電子機器から漏洩する不要電磁波が他の電子機器に影響を与える電磁波干渉の問題が深刻化してきている. 干渉問題の有効な対策をとるためには, 電子機器内部にある不要電磁波の波源の位置推定が重要となる. 従来の研究では, これらの問題へのアプローチとして, 波源を仮想波源の集合に置き換えて波源位置を推定する方法が一般的である. 図 1 に示すように, 仮想波源の配置法の一つとして, 推定空間内に均一に置く全面波源配置法 [1], [2] がある. この配置法のメリットは, 線路やアンテナの位置・形状が未知の場合でも推定可能なことである. この配置法を用いた波源位置推定法の一つに, 仮想波源の電流係数を推定する逆行列法 [3], [4] が挙げられる. この手法は, 近傍界測定によって得た波源の電界分布と, 仮想波源と測定プ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ものである.

これまで, 逆行列法を用いた波源位置推定について様々な研究がなされてきた. しかしながら, 従来の研究は主に波源が単一周波数の場合について行われており [5], [6], 変調波源に関してはあまり検討されていない. 理由として, 従来の近傍界測定法では変調波を測定する際に多くの手順を踏む必要があり, 簡易に測定することができないためだと考えられる. つまり, 変調波源の位置推定を行うためには, 変調波に対して有効な近傍界測定法が必要となる. この要望に対し, 変調波にも対応可能な近傍界測定方法である TDNF (Time Domain Near Field) 法が提案された [7], [8]. この方法では, まず, 変調波源からの近傍界を時間領域で測定し, 相関行列を作成する. 作成された相関行列を固有値分解することにより, 波源からの近傍界を複数のコヒーレントとみなせる等価的な近傍界によって表現する.

本報告では, 逆行列法における近傍界測定に TDNF 法を応用した, 変調波源の位置推定法を提案する. また本手法の有効性を数値解析により検証したので報告する.

2. 理論

2.1 TDNF 法

波源を囲む半径 r_1 の球面上の N 点の電界測定点において, 電界の θ, ϕ 成分 $E_i^\theta(t), E_i^\phi(t) (i = 1, 2, \dots, N)$ を時間領域で測定する. 各測定点における電界の各成分の相関を計算する. 例として, θ 成分同士の相関は,

$$C_{i,j}^{\theta\theta} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T E_i^\theta(t) E_j^{\theta*}(t) dt \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

のように計算する. $\theta\phi, \phi\theta, \phi\phi$ 成分の相関も同様にそれぞれ計算し, $2N \times 2N$ の相関行列を生成する. 生成された相関行列に固有値分解を施した後, 値の大きな p 個の固有値 ($\lambda_1 \sim \lambda_p$) とそれに対応する固有ベクトル ($\phi_1 \sim \phi_p$) を選出する. l 番目の固有値 $\lambda_l (1 \leq l \leq p)$ と固有ベクトル ϕ_l の積 $\sqrt{\lambda_l} \phi_l$ が, 測定球上の等価電界となる.

2.2 逆行列法

仮想波源の電流分布である \mathbf{I} ベクトルを未知数としたとき, 波源の放射電界分布から成る \mathbf{V} ベクトルと, 仮想波源と測定プローブ間の相互インピーダンスから成る \mathbf{Z} 行列を用いて,

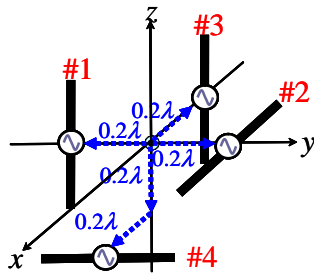
$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{Z}^H \mathbf{Z}]^{-1} [\mathbf{Z}^H \mathbf{V}] \quad (2)$$

のように行列方程式を解くことで, 仮想波源上の電流分布を求める. このとき, 仮想波源上で電流が強く分布する位置に波源があると推定することができる. 本研究では, TDNF 法で求めた固有値と固有ベクトルの積で表される等価電界を用いて \mathbf{V} 行列を作る.

3. 数値解析

3.1 変調波源モデル

波源は, 図 2 のような 4 素子の 0.5λ ダイポールアンテナとする. アンテナ #1 ~ #4 に印加する電流の周波数はそれぞれ異なっており, 変調波源となっている. 搬送周波



#1 $I_1 = I_0 \exp[j\omega_c t]$
 #2 $I_2 = I_0 \exp[j(\omega_c - \Delta\omega_1)t]$
 #3 $I_3 = I_0 \exp[j(\omega_c + \Delta\omega_1)t]$
 #4 $I_4 = I_0 \exp[j(\omega_c + \Delta\omega_2)t]$

図 2: 変調波源のモデル

数, 周波数の差, 印加電流, 測定点, 測定時間等の諸元は表 1 に示す. 式 (1) を使った相関係数の計算はベースバンドで行ったが, その際に必要な測定時間, 測定間隔を十分に確保してシミュレーションした.

3.2 仮想波源モデル

仮想波源は図 3 のように 0.2λ ダイポールアンテナを $4 \times 4 \times 4$ の格子状に配置したモデルを設定する. 仮想波源の長さ, 一辺の長さ, 仮想波源の総数等のパラメータは表 2 に示す.

4. 解析結果

4.1 固有値分解

TDNF 法を適用し固有値分解したところ, 4 個の固有値が得られた. 1 番目の固有値は $\lambda_1 = 3.11 \times 10^7$, 2 番目の固有値は $\lambda_2 = 2.67 \times 10^7$, 3 番目の固有値は $\lambda_3 = 2.44 \times 10^7$,

表 1: 解析諸元

Carrier frequency f_c	900 MHz
Frequency difference Δf_1	10 kHz
Frequency difference Δf_2	20 kHz
Input current	1 A
Measurement points (θ direction)	$10^\circ, 20^\circ, \dots, 170^\circ$
Measurement points (ϕ direction)	$0, 10^\circ, \dots, 360^\circ$
Number of measurement points N	629
Radius of observation sphere r_1	0.71λ
Sampling period Δt	$10 \mu\text{sec}$
Acquisition time $K\Delta T$	1 msec
Number of sampling points K	100

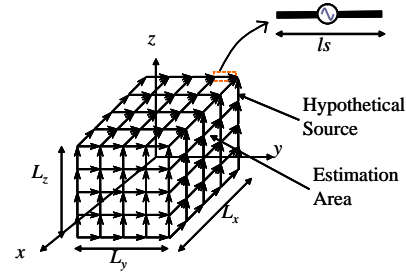


図 3: 仮想波源のモデル

4 番目の固有値は $\lambda_4 = 1.00 \times 10^7$, である. これは, 図 2 の放射する近傍界を, 互いに直交したコヒーレントな近傍界 $\sqrt{\lambda_1}\phi_1, \sqrt{\lambda_2}\phi_2, \sqrt{\lambda_3}\phi_3, \sqrt{\lambda_4}\phi_4$ によって等価表現できたことを意味する.

4.2 固有モードのパターン

固有モード $\phi_1 \sim \phi_4$ が示すパターンを, 図 4, 5, 6, 7 にそれぞれ示す. 偏波が複雑な場合, 各モードの放射パターンから物理的意味を見出すのは難しい.

4.3 逆行列法による波源位置の推定

変調波源に TDNF 法を適用して得られた等価近傍界 $\sqrt{\lambda_1}\phi_1, \sqrt{\lambda_2}\phi_2, \sqrt{\lambda_3}\phi_3, \sqrt{\lambda_4}\phi_4$ を, V_1, V_2, V_3, V_4 とする. 4 つの V ベクトルと 図 3 から計算された Z 行列を式 2 に代入し, 仮想波源の電流分布を表す 4 つの I ベクトル, I_1, I_2, I_3, I_4 を得る. 絶対値をとった 4 つの I ベクトル, $|I_1|, |I_2|, |I_3|, |I_4|$ を図 8, 9, 10, 11 にそれぞれ示す. 4 つの電流分布は, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ のモードの電流がどのように分布しているかを示している. しかしながら, 個別に見るだけでは波源の位置が推定できないため, それぞれの電流分布を足し合わせる必要がある.

4 つの I ベクトル $|I_1|, |I_2|, |I_3|, |I_4|$ の和をとった電流分布ベクトル $|I|$ を図 12 に示す. 図 12 から, 仮想波源上で電流が強く分布している位置と, 波源の #1, #2, #3, #4 のアンテナの位置が一致しているということがわかる. この結果から, TDNF 法と逆行列法を用いることにより, 変調波源の位置推定が可能であることが示された.

表 2: 仮想波源のパラメータ

Length of hypothetical source l_s	0.2λ
Length of one side L_x, L_y, L_z	0.8λ
Total number of hypothetical source	300

5. むすび

本報告では、インコヒーレントな実波源に対して TDNF 法を適用し、実波源からの放射電界を固有値と固有ベクトルの積で表される等価電界として求めた。TDNF 法によって求めた等価電界と、仮想波源と測定点の間の相互インピーダンスに逆行列法を適用することで、インコヒーレント波源の位置推定が可能であることを示した。

謝辞

参考文献

- [1] 早乙女英夫, 橋田和泰, 早野誠治, 斎藤兆古, “ Sampled Pattern Matching 法による生体内電流分布推定, ” T.IEE Japan, vol. 113-C, No.1, pp. 69-75, 1993.
- [2] 義本祐三, 吉田剛, 平和昌, 澤谷邦男, “ SPM 法と信号部分空間法との組み合わせによる電波源位置推定手法, ” 信学技法, AP2002-50, Jul. 2002.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 井上 智博, “ 近傍界測定による電磁源の波源分布推定法に関する研究, ” 修士学位論文, 2009.
- [6] 甄 源, “ 近傍界測定による波源の電流分布の推定に関する研究, ” 修士学位論文, 2010.
- [7] B. Fourestie, Z. Altman, J. Ch. Bolomey, J. Wiart, F. Brouaye, “ Statistical modal analysis applied to near-field measurements of random emissions ”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 50, no. 12, pp. 1803-1812, Dec. 2002.
- [8] B. Fourestie, J. Ch. Bolomey, T. Sarrebourg, Z. Altman, J. Wiart., “ Spherical Near Field Facility for Characterizing Random Emissions ”, IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 53, no. 8, pp. 2582-2589, Aug. 2005. [10] Matsumoto Y, Takeuchi M, Fujii K, Sugiura A, Yamanaka Y, “ A time-domain microwave oven noise model for the 2.4-GHz band ”, IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 45, no. 3, pp. 561-566, Aug. 2003.

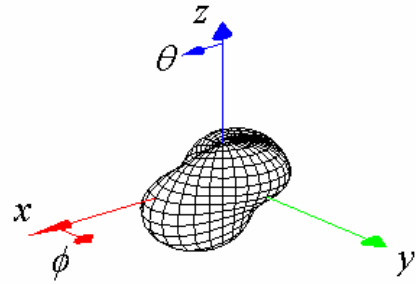


図 4: 1 番目のモードの放射パターン $|\phi_1|$

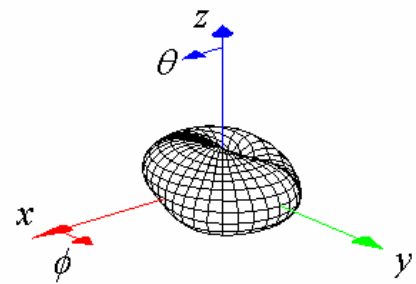


図 5: 2 番目のモードの放射パターン $|\phi_2|$

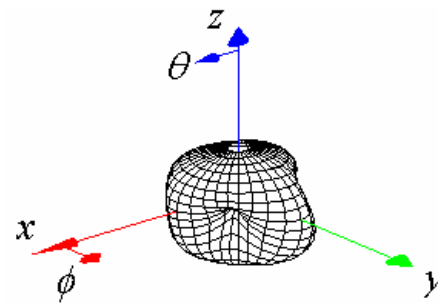


図 6: 3 番目のモードの放射パターン $|\phi_3|$

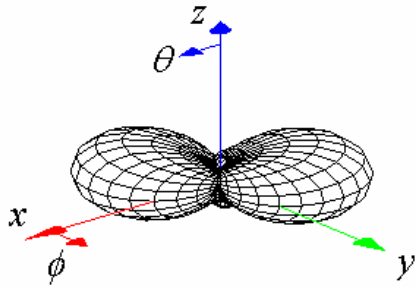


図 7: 4 番目のモードの放射パターン $|\phi_4|$

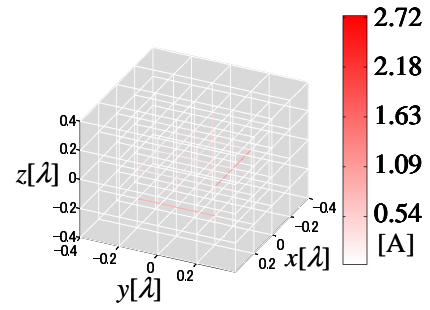


図 10: 3 番目の電流分布 $|I_3|$

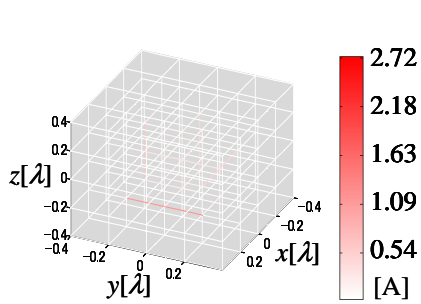


図 8: 1 番目の電流分布 $|I_1|$

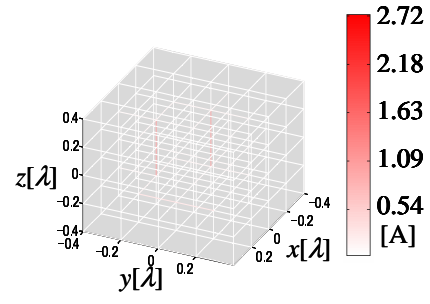


図 11: 4 番目の電流分布 $|I_4|$

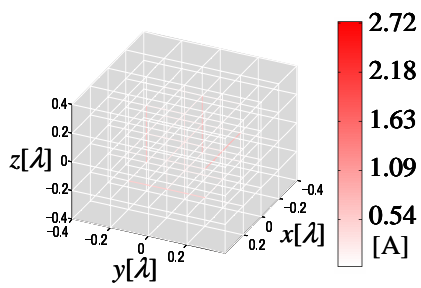


図 9: 2 番目の電流分布 $|I_2|$

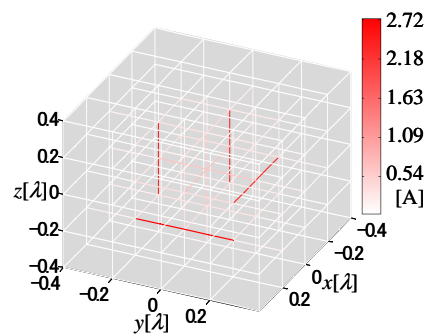


図 12: 4 つの電流分布の和 $|I|$