法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-06

離散値系ウェーブレット変換による電子回路 基板中の電流分布解析

增田, 則夫 / 齊藤, 兆古 / TOHYA, Hirokazu / SAITO, Yoshifuru / MASUDA, Norio / MIDORIKAWA, Yoichi / 遠矢, 弘 和 / 緑川, 洋一

(出版者 / Publisher) 社団法人電気学会 / The Institute of Electrical Engineers of Japan

(雑誌名 / Journal or Publication Title) 電気学会論文誌 A, 基礎・材料・共通部門誌 / 電気学会論文誌 A, 基礎・材料・ 共通部門誌

(号 / Number) 7-8 (開始ページ / Start Page) 792 (終了ページ / End Page) 798 (発行年 / Year) 1998-07-01

離散値系ウェーブレット変換による 電子回路基板中の電流分布解析

学生員 緑川 洋一 (法政大)

正員 增田 則夫 (日本電気(株)資源環境技術研究所)

正員 斎藤 兆古 (法政大)

正員 遠矢 弘和 (日本電気(株)資源環境技術研究所)

Discrete Wavelets Analysis of Current Distributions on the Printed Circuit Boards

Yoichi Midorikawa, Student Member (Hosei University)

Norio Masuda, Member (Resources and Environment Protection Research Labs., NEC Corporation) Yoshifuru Saito, Member (Hosei University)

Hirokazu Tohya, Member (Resources and Environment Protection Research Labs., NEC Corporation)

Discrete wavelets transform is widely used for the wave and image analysis. Particularly, multi-resolutional analysis is extremely useful tool for the noise reduction. On the other side, electromagnetic field coming from the printed circuit boards (PCB) is becoming one of the noise sources according to the rising up the operation frequency of central processing unit (CPU). In order to reduce the noise coming from PCB, it is extremely important to grasp the dominant current distributions on the PCB.

In the present paper, we apply the discrete wavelets analysis to the noise reduction of the current vector distributing on the PCB. Numerical and practical examples demonstrate that the noise current vectors are dramatically removed by our approach.

キーワード:ウェーブレット解析、ベクトル、電磁ノイズ、プリント基板 Keyword: wavelet transform, vector, electromagnetic fields noise, printed circuit boards

1. まえがき

近年フーリエ変換を拡張した概念に基づく連続系ウェー ブレット変換が提案され、フーリエ変換では得られなかっ た原空間情報(たとえば時間波形ならば時間軸情報)が近 似的にも得られることから、波形解析へ広範に応用される ようになった^{1,2}。他方、連続系ウェーブレット変換を離散 値系で取り扱うことから基底関数が直交する離散値系ウェ ーブレット変換が導かれ、この離散値系ウェーブレット変 換は単純な線形変換であり、波形や画像のデータの圧縮や ノイズ低減に有効であることが知られている³。

一方、パーソナルコンピュータやワークステーションの

高機能・高速化の必要にともない CPU の動作周波数は高速 化の一途をたどっている。このような CPU の動作周波数増 加によって演算速度の高速化が実現されているが、計算機 周辺へ放射する電磁界ノイズの大きさと周波数も増加し、 電磁環境工学的観点から何らかの対策が必要となりつつあ る。この問題を解決する基礎研究として、CPU を搭載した プリント基板から生ずる磁界分布測定から基板上の電流ベ クトル分布が推定可能となりつつある^{45,7,8}。

本論文は、電流ベクトル分布のようなベクトルデータの 処理に、一般にスカラデータの処理に用いられる離散値系 ウェーブレット変換を拡張し、ベクトルデータ内の支配的 なベクトル分布を抽出するベクトルデータノイズ処理の1

文

論

方法を提案する。

通常、離散値系ウェーブレット変換は離散化された時間 波形やイメージデータなどのスカラーデータに適用される。 ところで、電流ベクトルなどのベクトル量を離散化して得 られるデータは互いに直交する成分から構成される。この ような離散化されたベクトルデータにスカラーデータの処 理に用いられる離散値系ウェーブレット変換を如何に適用 するかが本論文の課題である。すなわち、離散値系ウェー ブレット変換をベクトルデータの解析に拡張し、データの 特徴抽出を行うものである。一般に、局所的な磁界分布情 報から電流ベクトル分布を求める問題は逆問題とよばれ不 適切問題を解くこととなり解に誤差を多く含む^{45,7~11}。この ような逆問題解析手法により求められた具体的な電流ベク トル分布に離散値系ウェーブレット変換を適用し、CRU を 搭載するプリント基板上の支配的電流ベクトル分布を抽出 する。

2 ベクトルウェーブレット変換

<2.1> 基礎方程式 いま、Zが2のべき乗個の要素からなるデータベクトル、Wがウェーブレット変換行列と すれば、離散値系ウェーブレット変換は次式で行われる⁶。

$$\mathbf{Z}' = W\mathbf{Z} \tag{1}$$

Z'をウェーブレットスペクトラムと呼ぶ^{3.6}。逆変換は 変換行列Wの転値行列W^Tを左からZ'へ掛け算することで 行われる。

Zが互いに直交するX, Yの2成分からなる2次元ベクトルを離散化して得られたデータ、すなわち

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} + \mathbf{Y}$$
(2)
$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} (x_{11}, y_{11}) & \cdots & \cdots & (x_{1n}, y_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{m1}, y_{m1}) & \cdots & \cdots & (x_{mn}, y_{mn}) \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} (x_{11}, 0) & \cdots & \cdots & (x_{1n}, 0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{m1}, 0) & \cdots & \cdots & (x_{mn}, 0) \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} (0, y_{11}) & \cdots & \cdots & (0, y_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (0, y_{m1}) & \cdots & \cdots & (0, y_{mn}) \end{bmatrix}$$

とする。 x_{j_i}, y_{j_i} は位置(i,j)点におけるそれぞれx方向成分、y方向成分である。但し、各成分は直交しているから、両者の内積は $\mathbf{X} \bullet \mathbf{Y} = \mathbf{0}$ である。この場合、(1)式の自然な拡張として、ウェーブレット変換は、

Z'	$=W\mathbf{Z}$	
	$= W\mathbf{X} + W\mathbf{Y}$	(3)
	$= \mathbf{X'} + \mathbf{Y'}$	

で行われる。

よって、ベクトルウェーブレット変換はベクトルを構成 する各成分毎に変換することでなされる。

<2.2> ノイズ低減

2.2.1 サンプルデータ ここでは具体的なベクトルデー タを取り上げて検討する。ベクトルデータとは、x,y平面上 の任意の点における電流の大きさと方向を矢印で表した電 流ベクトルの分布データなどである。図1にサンプルデー タを示す。図1で、(a)は真のデータ、(b)は振幅と方向を それぞれ確率分布が正規分布となる乱数により作成したノ イズデータ、さらに(c)は(a)と(b)の和からなるノイズを含 んだデータである。ここでの課題は、このノイズを含んだ データ(c)から如何に(b)のノイズ成分を低減し、(a)図に示 す真のデータ成分を抽出するかである。

2.2.2 データ圧縮法 通常、ウェーブレットスペクトラ ムZ'は先頭要素から順に原データZの平均的情報から局 所的情報を集約する要素で構成されている³。従って、平均 的情報(低次のウェーブレットレベル情報)を残し局所的情 報(高次のウェーブレットレベル情報)を除くことでデータ が圧縮される。すなわち、一次元データの波形解析の場合 ^{3.6}と同様に高次のウェーブレットレベルの情報をノイズと 見なし除くことでノイズが低減されることとなる。これが データ圧縮によるノイズ除去の原理である⁶。

図 2 にドビッシーの 2 次基底を用いて図 1 (c) のサンプル データをウェーブレット変換したスペクトラムを示す。図 2 (a), (b) は図 1 (c) のサンプルデータの x 方向成分のみ y 方 向成分のみからなる X, Y 行列をそれぞれウェーブレット変 換した結果である。図 2 (c) はウェーブレットスペクトラム の大きさを示す。図中の濃度の濃い部分は値が小さく、濃 度が明るい部分ほど値が大きい。従って、X', Y'何れの スペクトラム成分も原点付近へ値の大きいスペクトラムが 集まっていることが判る。

図2で、ウェーブレットスペクトラムの大きい値の含ま れる元のデータの 1/4 の(1,1)から(8,8)の正方領域のみを 残し他の要素を総てゼロとして、逆変換し再現されたベク トル分布を図3に示す。図1(a),(b)と比較すれば、図3は 明らかにノイズが低減され、図1(a)に類似したベクトル分 布である。よって、ウェーブレットスペクトラムの原点付 近要素のみを残し他の要素を総てゼロとする単純なデータ 圧縮法でノイズベクトルの低減が可能であることがわかる。 また、図4にウェーブレットスペクトラムを残す領域を (1.1)から全領域(16.16)まで変化させたとき、図 1(a)との 一致度合いを示す相関係数⁽³⁾を示す。ここで、相関係数は X 成分、Y成分ごとに求め、これらの平均値とした。この結果 より、図1(c)と図1(a)のデータ間の相関係数は0.691であ るのに対して、図3の結果と図1(a)のデータ間の相関係数 は 0.841 となる。また、図4より残す領域を元の領域の (16,16)から(8,8)の 1/4 領域とした場合が相関係数が最大 となっている。





Fig.4. Correlation coefficient. (The data compressed method.)

2.2.3 多重解像度解析法 データの多重解像度解析とは ウェーブレットスペクトラムを一括して逆変換せず、各ス ペクトラムの持つ情報を抽出する解析である。これは、ウ ェーブレットスペクトラムの組を個々にウェーブレット逆 変換することで行われる³。

図4にドビッシーの2次基底によるサンプルデータ図1 (c)の多重解像度解析結果を示す。解像度レベルは5段階であり、ウェーブレットレベル1,2,3,4,5 はそれぞれ全体を 1x1、2x2,4x4,8x8,16x16の正方領域に分割した各領域中の ベクトルを示している。



明らかに、ウェーブレットレベル 5 のベクトルはランダ ムな方向を持つノイズベクトル分布である。図 5(e)のウェ ーブレットレベル5のベクトルと図1(a)のベクトルデータ との相関係数は0.0922となり小さい。図1(c)のサンプル データからこのノイズベクトル分布を除いた結果を図6に 示す。

図6の結果と図1(a),(c)を比較すれば、図1(c)からノイ ズベクトルが低減されていることが判る。また、ウェーブ レットレベル1から各レベルまでの総和と図1(a)との相関 係数を図7に示す。この結果、図1(c)と図1(a)の相関係数 が0.691であるのに対し図6の結果は相関係数0.841とな る。多重解像度解析法によるノイズベクトルの低減法は、 除かれるノイズベクトル分布が予め抽出できる特徴を持つ。





図6. ウェーブレットレベル1から4の和から再 現されたベクトル分布

Fig.6 Vector by the summation of wavelet level components $(1 \sim 4)$.



図 7. 相関係数(多重解像度解析法) Fig.7. Correlation coefficient. (Multi dimensional analysis)

<2.3> ループアンテナの電流分布

2.3.1 実験による電流ベクトル分布 図8(a)に測定対象 としたループアンテナを示す。この2つのループアンテナ に同一周波数の電流を流す。電流は図8(b)のように流れる。 推定面直上の法線方向成分磁界Hzの分布をサーチコイルに より測定し、逆問題解析法の一手法である直接逆行列法を 用いて推定した電流ベクトル分布を図9に示す^{7,8,10,11}。実験 は20MHz,40MHz,80MHzの各周波数について同様の方法でそ れぞれ行った。一般に、逆問題解析法による推定結果は厳 密解を与えず、周辺に分散したした形の分布で求まる。図9 からループアンテナ周辺に大きな電流ベクトルが存在して いることがわかる。しかし測定時のノイズや局所的な磁界 分布情報から電流ベクトル分布を求める逆問題解析法によ る推定であるため誤差などがあり、ループアンテナ以外の ところにも電流ベクトルが存在し2つのループ電流を明確 に区別できない^{4,5,7,8,9,10,1}。



2.3.2 電流ベクトル分布ノイズ処理 図10にデータ圧縮 法によって図9の電流ベクトル分布からノイズベクトルを 低減した結果を示す。ウェーブレット変換を行うためにデ ータ数を2のべき乗とする必要がある³。このため1成分当 たりの29×29個のデータに0要素を追加し、1ベクトル成 分当たり32×32個のデータとした⁹。1ベクトル成分当た り32×32個のスペクトラムを16×16個へ圧縮した。また、 採用した基底関数はドビッシーの8次である^{1,2,3,5,6}。図10 の結果は、明らかに図9中のループアンテナに流れる電流 分布を抽出している。なお、図9~12 に図8(b)に示す電流 経路を重ねて示した。

次に多重解像度解析を行いノイズを低減した結果を図 11 に示す。図 11 の結果は、図 10 の結果と同様に図 9 中のル ープアンテナに流れる電流分布を抽出している。尚、ノイ ズ電流ベクトルは最高次ウェーブレットレベルの電流ベク トル分布とした。図 12 は抽出されたノイズ電流ベクトル分 布である。明らかに、何れの周波数においてもランダムな 方向を持つ電流ベクトル分布である。





電学論 A, 118 巻 7/8 号, 平成 10 年



図 10. データ圧縮法によるノイズ低減結果 Fig.10 The noise reduction of current vector by the data compressed method.



図 11. 多重解像度解析法によるノイズ低減結果 Fig.11 The noise reduction of current vector by the multi dimensional analysis method.



図 12. 多重解像度解析法により抽出されたノイズ 電流ベクトル分布

Fig.12 The extracted noise current vector by the multi dimensional analysis method.

〈2.4〉 ワークステーション基板上の電流分布 2.4.1 実験による電流ベクトル分布 図 13 に測定対象とした、CPUの内部クロックは 80MHz、外部クロックは 40MHz、 周辺機器20MHz で動作している NEC 社製のワークステーションの基板を示す。図 13(a)は(b)側からの見通し図である。この 基板上の電流ベクトル分布を基板裏面の磁界分布測定からル ープアンテナの場合と同様に逆問題解析法により求めた結果 を図 14 に示す^{7.8}。磁界分布測定は、80MHz、40MHz、20MHz の各周波数についてそれぞれ行った。



2.4.2 電流ベクトル分布ノイズ処理 図 15 にデータ圧縮法 によって図 14 の電流ベクトル分布からノイズベクトルを低減 した結果を示す。ウェーブレット変換を行うためにデータ数を 2 のべき乗とする必要がある³。このため1ベクトル成分当た りの 27×27 個のデータに 0 要素を追加し、1 ベクトル成分当 たり 32×32 個のデータとした⁹。1 成分当たり 32×32 個のス ペクトラムを 16×16 個へ圧縮した。また、採用した基底関数 はサンプルデータと同様にドビッシーの 8 次である。

図 15 の結果は、明らかに図 14 中の主要電流分布を抽出



次に多重解像度解析を行いノイズを低減した結果を図 16 に示す。図 16 の結果は、図 15 の結果と同様に図 14 中の主 要電流分布を抽出している。尚、ノイズ電流ベクトルは最 高次ウェーブレットレベルの電流ベクトル分布とした。図 17 は抽出されたノイズ電流ベクトル分布である。明らかに、 何れの周波数においてもランダムな方向を持つ電流ベクト ル分布である。図 15, 16 から何れの周波数の電流も CPU およ びクロックドライバ付近を中心とした環状経路を流れること がわかる。80MHz においては CPU 周辺、40MHz は CPU 周辺から 分周期などの周辺、20MHz はクロックドライバ周辺の環状電流 となっている。この結果は、基板の動作周波数に対応している。

f 方向位置[×1.5cm]



Fig.16 The noise reduction of current vector by the multi dimensional analysis method. (a)80MHz, (b)40MHz and (c)20MHz.



(c)20MHz

図 17. 多重解像度解析法により抽出されたノイズ 電流ベクトル分布

Fig.17 The extracted noise current vector by the multi dimensional analysis method. (a) 80MHz, (b) 40MHz and (c) 20MHz.

電学論A, 118 巻 7/8 号, 平成 10 年

3. まとめ

本論文では、離散値系ウェーブレット変換をベクトルデ ータに適用し、ベクトルデータに含まれるノイズを低減す る方法を提案した。さらに、これを実際のプリント基板上 の主要電流ベクトル分布抽出へ適用した。

その結果、プリント基板上のノイズベクトル成分を分離 した主要な電流ベクトル分布が抽出でき、プリント基板か ら生ずる放射電磁界の発生源推定など逆問題解析の一端を担 う技術として有効であることが分かった。

(平成9年9月8日受付,平成10年3月2日再受付)

文献

- (1) 山口昌哉、山田道夫、"ウェーブレット解析"、科学、 Vol. 60, No. 6, June, pp. 398-405 (1990).
- (2) 山田道夫、"ウェーブレット解析とその応用"、電子 情報通信学会誌、Vol. 76、No. 5、pp. 518-528 (1993).
- (3) 斎藤兆古、"Mathematica によるウェーブレット変換" 朝倉書店 (1996).
- (4) 原田、早野、斎藤、"誘導加熱コイルの最適設計に関 する基礎的検討"、電気学会マグネティックス研究会 資料、MAG-96-187 (1996).
- (5) 斎藤兆古、"不適切な線形システムの Wavelet 変換解 析"電気学会マグネティックス研究会資料、MAG-97-49、 PP. 27-31 (1997).
- (6) 緑川、早野、斎藤、 "離散値系ウェーブレット変換に よるノイズフィルタ評価の検討"、電気学会論文誌 A、 Vol. 117-A, No. 2, pp. 128-133 (1997).
- (7) 増田、緑川、斎藤、遠矢、"電子回路基板中の電流分 布推定に関する研究"、電気学会マグネティックス研 究会資料、MAG-97-128 (1997).
- (8) 篠原、早野、斎藤、"直接逆行列法を用いた渦電流分 布推定"、平成9年度電気学会全国大会予稿、Vol.2, pp. 348-349 (1997).
- (9) K.Yoda and Y.Saito, "A Wavelet Transform Approach to Inverse Problems of Vandermonde Type Systems" IEEE Trans.Magn, Vol.33,No.2, pp1955-1957 (1997).
- (10) 土井達也、斎藤兆古、遠矢弘和、"ループ電流モデ ルによる磁界系逆問題解析"、電気学会マグネティッ クス研究会資料、MAG-96-151 (1996).
- (11) 斎藤兆古、"電磁界系逆問題解析技術の進歩"、電気 学会論文誌A解説、114卷6号、pp. 432-438 (1994).



(学生員) 1970年 7月 4日生。1995年 3月 法政大学大学院工学研究科電気工学専攻修。 士課程修了。現在、同大学大学院工学研究 科電気工学専攻博士後期課程在学中。主と して、高周波空心変圧器、ノイズフィルタ-に関する研究に従事。日本AEM学会会員。



(正員) 1961年 7月4日生。1984年 3月東京 工業大学工学部機械工学科卒業。1986年3月 東京工業大学大学院総合理工工学研究科修 士課程修了。同年、日本電気株式会社に入 社、現在日本電気株式会社資源環境技術研

情報通信学会、回路実装学会会員。



(正員) 1946年 7月24日生。1975年 3月法 政大学大学院工学研究科博士課程修了。同 年同大学助手、1976年同講師、1978年同助 教授、1987年同教授、現在に至る。電磁気 学、電気機器、および大学院電磁力学の講 座を担当。主として、計算電磁力学、およ び高周波変圧器に関する研究に従事。工学

博士。International Journal of Applied Electromagnet ics in Materials, Editorial Board。 IEEE、 電子情報通 信学会、 日本応用磁気学会、日本生体磁気学会、 日本AEM 学会会員。



(正員) 1945年 6月4日生。1968年 3月鹿児 島大学工学部電気工学科卒業。同年、日本 電気株式会社に入社、1992年12月より資源 環境技術研究所EMCセンター長。以後、EMC 技術の研究開発に従事。電子情報通信学会 会員。