

# ウェーブレット変換によるカレントビューア信号の多重解像度解析

青木誠、早野誠治、斎藤兆古（法政大学工学部）

## Multi-Resolution Analysis of the Current Viewer Signals

M.Aoki\*, S.Hayano, Y.Saito, (College of Engineering Hosei University)

### Abstract

Previously, we have proposed a current viewer in order to visualize the current distributions in the electronic circuits. We have succeeded in obtaining the good results for one-dimensional current distributions after de-convoluting the space transfer characteristics from the current viewer's output signals.

In the present paper, we try to visualize the two-dimensional current distributions in a printed circuit by combining the space characteristic de-convolution with the vector wavelets transforms.

At first, we independently measure the output signals when scanning the current viewer in the direction of x- and y-directions.

Second, we carry out the de-convolution operations to remove the space transfer characteristics from the output signals.

Third, we constitute the two-dimensional current vectors by combining the de-convoluted x- and y-directed signals.

Finally, we apply the vector wavelet transform to the noisy current vectors in order to extract the major current vector distributions.

As a result, it is revealed that a series of convolutions among the major current vectors extracted by the wavelet transforms employing different base functions visualizes the current vectors in the two-dimensional printed circuit without any threshold operations.

**Keywords** : Current viewer, Wavelet transform, De-convolution, Convolution

### 1. まえがき

近年の小型電子機器の広範な普及は、MPU(Micro Processing Unit)の小型化とMPUの動作を支える電子回路網の小型・軽量化によつてなされたと言っても過言でない。MPUのみならず周辺の電子回路の小型・軽量化の多くは、従来のワイアを用いた配線を印刷技術で可能としたことになされている。いわゆる、プリント基板(PCB, Printed Circuit Board)技術の進展によって小型軽量電子機器の開発が可能となった。従来のワイア配線による電子回路と比較して、回路の複雑さや集積密度は幾何級数的に増加している。このため、電子回路の故障診断は、非破壊的に行うことが困難であり、結果として、電子回路中の特定個所の故障であつても基板全体を交換しなければならない状況である。

本論文は、平面状の電子回路基板上を走査して得られるカレントビューアの出力信号へ2次元ベクトルウェーブレット変換を適用し主要電流ベクトルを抽出し、さらに異なるウェーブレット変換基底関数を用いた主要電流ベクトルを畳み込み演算処理を行うことで、2次元プリント基板中の電流分布経路を可視化する。

カレントビューアは、アンペアの周回積分の法則を直接利用するロゴスキーコイルを変形した構造からなり、センシングコイルは電流が流れる銅線の全周を取り囲ま

ない構造である。このため、カレントビューアはプリント基板表面で電流の作る磁界を最も効果的に測定可能とする磁気センサーである。カレントビューアはプリント基板中の電流を非接触で片面から測定可能とする反面、カレントビューアの出力信号は必然的に電流とカレントビューア間の空間特性を含有する。すなわち、カレントビューアの出力信号は、磁界源となる電流のみならず、センシングコイルと電流間の空間特性を畳み込んだ(convoluted)情報である。さらに、センシングコイルも理想的な形で実現されず、物理的工作精度に起因する空間・周波数特性を持つ。センシングコイルおよびセンシングコイルと電流間の空間特性をカレントビューアの出力信号から削除する演算をデコンボリューション(deconvolution)と言うが、本論文では、このデコンボリューションを実測値の空間特性を用いて実行する。

2次元プリント基板中の支配的電流分布を抽出するためにウェーブレット変換を適用する。カレントビューアは、その原型であるロゴスキーコイルが1次元電流測定を前提とするため、カレントビューアも1次元指向性を持つ。すなわち、カレントビューアは、2次元平面上に分布する電流ベクトルのx,y成分を、それぞれ独立に測定可能とする。従つて、カレントビューアの出力は、カレントビューアをx,y方向へ走査して得られた出力信号

を合成して得られるベクトル信号となる。このため、単純な 2 次元ウェーブレット変換でなく、ベクトルウェーブレット変換を適用する[1]。ベクトルウェーブレット変換はベクトル化されたカレントビューアの出力信号から支配的信号ベクトルを抽出するために用いるが、測定・計算に起因する誤差ベクトルを削除するためには、何らかの閾値演算を行わねばならない[2]。これは閾値決定問題を解かねばならないことを意味する。本論文では、経験的要素を必要とする閾値演算を避けるため、異なる基底関数を用いたベクトルウェーブレット変換結果を畳み込み演算する方法を提案する。その結果、閾値演算を行うこと無く、誤差ベクトル分布を削除した主要電流ベクトルの可視化が可能であることを報告する。

## 2. デコンボリューションと 2 次元電流分布推定法

### 2.1 デコンボリューション

一般に信号は何らかのビューアを通して人間が観察できる視覚情報へ変換される。例えば電流を非接触で観察するためには、電流を直接観察出来ないため、電流が発生する磁界を通して観察することになる。この場合、

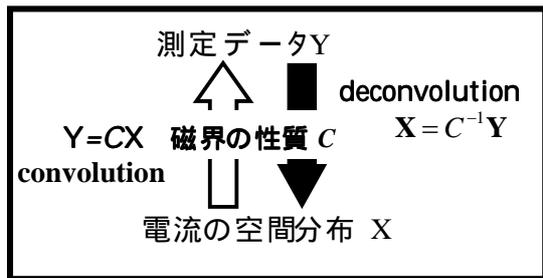


Fig.1.Relationship between the convolution and deconvolution

電流が源情報であり、情報を伝達する媒体が磁界に対応する。このため、人間が得られる情報は電流の情報が磁界の性質で変形されたものである。これは電流と磁界の性質をconvolution（畳み込んだ）した情報が人間に与えられることを意味する。従って、人間が磁界を通して得た情報から磁界の性質をde-convolution（逆畳み込み演算）すれば、目的の電流情報を正確に把握できることとなる。このように信号が媒体を通じて伝達された場合、媒体の性質を取り除く作業をde-convolutionするという。カレントビューアにおいて、測定データにあたるカレントビューアの出力信号をYとし、磁界の性質にあたるカレントビューアの空間特性をCとしてde-convolutionを行い、源情報である電流の空間分布Xを推定する。図1にconvolutionとde-convolutionの関係を示す。

### 2.2 カレントビューアによる 2 次元電流分布測定

カレントビューアは平面上に存在する直線電流を高解像度に測定するセンサーである。図 2(a)に示すように直線電流に対して平行方向にコイルを走査した場合、電流位置にセンサーが到達すると電流から生じる磁束をすべて鎖交し、センサー出力は最大となる。しかし、図 2(b)のように直線電流に対して垂直方向にコイルを走査して

も磁束が鎖交しないため、センサー出力は得られない。表 1 に平行・垂直方向電流に対するセンサー出力例を示す。カレントビューアは電流分布に対して平行方向のみの電流による磁界を検出するため、平行・垂直方向の出力信号間で直交性が成り立つ。よって、図 3 に示すように、測定面に対してカレントビューアの方向を x 方向、y 方向に平行に設置し、対象面上を走査して、2 次元電流分布測定を行う。磁界の空間伝達特性を取り除くため、x,y 方向、それぞれの測定データに対してデコンボリューションを行い、2 次元電流ベクトル分布を計算する。

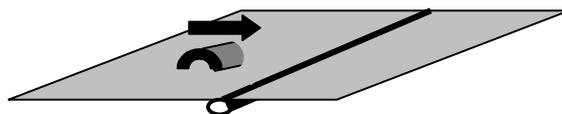


Fig. 2(a) Current viewer set in parallel to a current carrying conductor

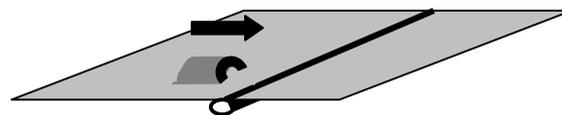


Fig. 2(b) Current viewer set in perpendicular to a current carrying conductor

Table 1 Typical current viewer outputs

|        | 平行に設置     | 垂直方向に設置   |
|--------|-----------|-----------|
| センサー出力 | 5.986[mV] | 0.039[mV] |

### 2.3 2 次元電流分布推定

#### 2.3.1 実験方法

縦・横共に 10[cm]の正方形の推定対象プリント基板に等しい正方形の測定面を設け、カレントビューアを測定面に対して x 方向、y 方向に走査し磁界測定を行う。電流分布と磁界測定間隔の解像度は等しく 1[cm]とし、離散化点は 11×11 点とする。実験の概略図を図 3 に示す。また、実験に使用したカレントビューアの諸定数を表 2 に示す。



Fig. 3 Schematic diagram of the experiments

Table 2 Various constants of a tested current viewer

|     | 半径 r [mm] | 幅 d [mm] | 長さ l [mm] | 巻数 N |
|-----|-----------|----------|-----------|------|
| コイル | 7.2       | 3.6      | 27        | 97   |

#### 2.3.2 2 次元空間分布特性のデコンボリューション

実験に用いたカレントビューアは、現時点で活用できる最も位置分解能が高いものである。図 4 に検証実験用に設定した電流モデルを示す。さらに、図 5(a), (b)にカレントビューアを x、y 方向へ走査して得られた実験

値を示す。電流分布経路の概略を知るために、両測定データの単純和を図6に示す。図6の結果は図4のモデル電流の経路を概ね再現している。

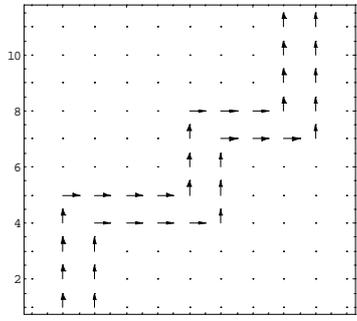


Fig. 4 Model current vectors

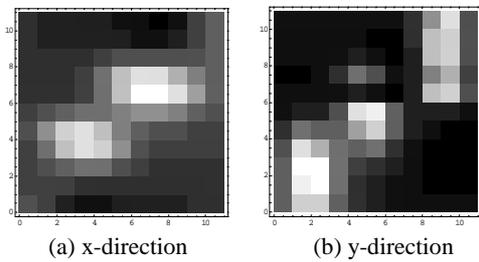


Fig. 5 Output signal distributions

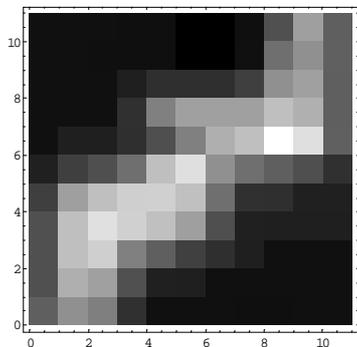


Fig. 6 Estimated current path by a simple sum of the x- and y-directed signals

図5の実験値に対してカレントビューアの空間特性をデコンボリューションすることで電流ベクトル分布を推定する[3,4]。図7に実測値によるカレントビューアの空間特性とそのシステム行列を示す。

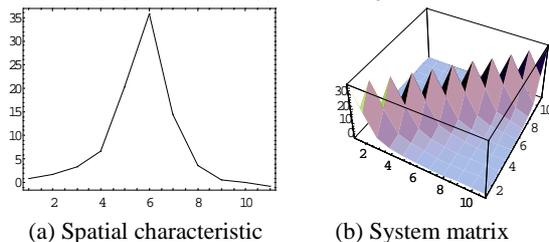


Fig. 7 Experimentally obtained spatial characteristic and system matrix for de-convolution of the current viewer

図8は、図5(a),(b)、それぞれのカレントビューア出力を独立に図7のシステム行列を用いてデコンボリューションし、その結果を合成して得られた電流ベクトル分布を示している。

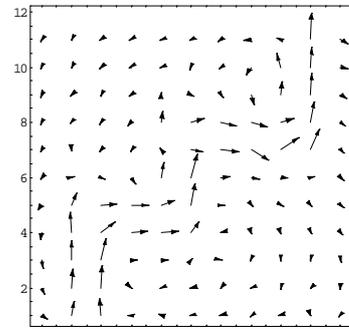


Fig. 8 Evaluated current vectors

図8から、ノイズベクトルを含有するが、図4の電流ベクトルが概ね再現されていることがわかる。

### 3. ウェーブレット変換

カレントビューアの出力から空間特性をデコンボリューションすることで図8の電流ベクトル分布を得た。この電流ベクトル分布には、本来導体が存在しない場所にも値の小さなベクトルが存在している。これは実験と計算、両者の誤差が反映したベクトルと考えられる。このようなノイズベクトル成分を取り除く確実な方法は閾値演算である。ところが閾値演算は、何らかの経験的要素を必要とする。すなわち、閾値の決定問題を解かねばならない。

本章では、閾値演算を行わず、ベクトルウェーブレット変換を用いてノイズベクトルを取り除く方法を検討する。

#### 3.1 ベクトルウェーブレット変換

まず、(1)式で与えられる2次元ベクトル $Z$ を考える。

$$Z = X + Y \quad (1)$$

ここで、ベクトル $Z$ は互いに直交する成分 $X, Y$ 成分からなる。よって(2)式が成り立つ

$$X \cdot Y = 0 \quad (2)$$

(1)式の両辺にウェーブレット変換行列 $W$ を掛算して

$$W \cdot Z \cdot W^T = W \cdot X \cdot W^T + W \cdot Y \cdot W^T \quad (3)$$

を得る。すなわち、ベクトルウェーブレット変換はベクトルを構成する成分毎にウェーブレット変換することでなされる。

#### 3.2 ノイズ処理

デコンボリューションによって得られた電流ベクトル

からノイズを削減するために電流ベクトルをウェーブレット変換する。ウェーブレット変換は、ウェーブレット変換されるデータが縦・横共に2のべき乗個の配列に格納されていなければならない。このため、11×11配列に格納されたカレントビューアの出力信号にゼロ要素を追加し、見かけ上縦・横ともに2のべき乗個の配列16×16へ変形する。また、ウェーブレット変換に採用した基底関数は、ドビュッシーの2,4,6,8,10,12,14,16次を用いた。ウェーブレットスペクトラムの計算例を図9に示す。

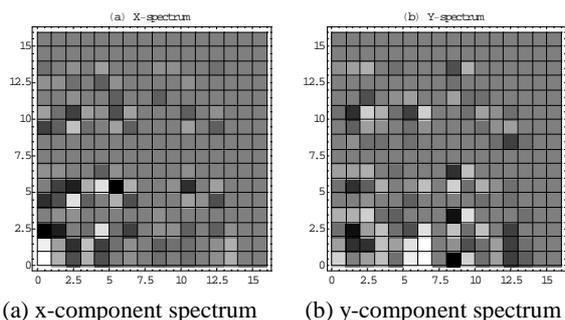


Fig.9. Examples of the vector wavelet transform using the Daubechies 2<sup>nd</sup> order base

図9から、バラツキはあるが、平均的にはマザーウェーブレット近傍に値の大きなウェーブレットスペクトラムが集まることがわかる。

ウェーブレット変換で常套的に用いられる領域法で電流ベクトルの主成分を抽出する[1]。本稿では、マザーウェーブレット近傍の8×8のスペクトラムを残し、残りを零とする。図10に領域法から得られた主要電流ベクトル分布を示す。

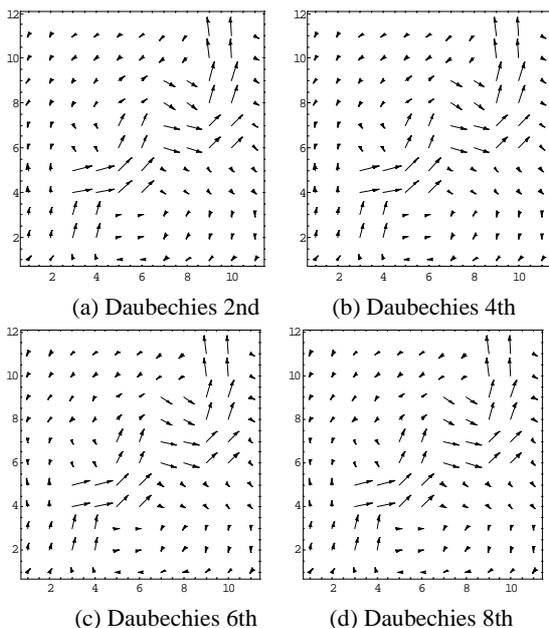


Fig. 10 Major current vectors extracted by employing the different types of wavelet base functions.

### 3.3 電流ベクトルのコンボリューション

図10に示す異なる基底関数を用いて抽出した主要電流分布ベクトルで、何れの基底関数に対しても共通となる不変な電流ベクトルを抽出する。

異なる基底関数を用いたウェーブレット変換で抽出された支配的電流成分、それぞれの最大値を1へ正規化した後、電流成分を格納した配列要素間の積を計算する。すなわち、ウェーブレット変換で抽出された支配的電流間の畳み込み演算を行うことで何れのウェーブレット変換基底関数に対しても共通となる不変な電流分布を抽出する。図11が結果である。電流ベクトルの大きさに相違があるが、図4のモデル電流ベクトル分布を良好に再現している。

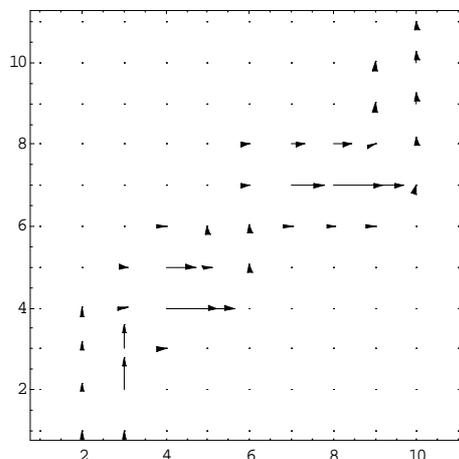


Fig. 11 Visualized current vector distribution by means of the convolution operations among the current vectors in Fig. 10

## 4. まとめ

本稿では、電流に対する指向性の強いカレントビューアを用いて2次元の電流分布の可視化を試みた。1次元電流分布測定 of 単純な拡張では、測定・計算に伴う誤差が喚起するノイズベクトルが削減できない。ノイズベクトルを削減する方法として、異なる基底関数を用いたウェーブレット変換を用いて主要電流ベクトルを抽出した後、何れのウェーブレット変換基底に対しても共通となる電流ベクトルをコンボリューション演算で抽出する方法を提案した。その結果、経験的要素を必要とする閾値演算を適用することなく、電流ベクトル分布の可視化にある程度成功した。

### 参考文献

- [1] 斎藤兆古著、ウェーブレット変換の基礎と応用（朝倉書店、1998年4月）
- [2] 篠原佳直 著：「誘導加熱用励磁コイルに関する考察」、法政大学大学院工学研究科修士論文、1997年3月
- [3] 青木誠、他、：「カレントビューアの開発」、電気学会マグネチックス研究会資料、1998年、MAG-98-113.
- [4] 青木誠、他、：「カレントビューアに関する研究」、電気学会マグネチックス研究会資料、1998年、MAG-98-265.