Location Technique for Multiple Partial Discharge Sources using Independent Component Analysis and Direction of Arrival Method of Electromagnetic Waves based on Bayesian Network

Hirokazu Ishimaru Member (Nagoya Institute of Technology, ishimaru@nitech.ac.jp)

Masatake Kawada Member (The University of Tokushima, kawada@ee.tokushima-u.ac.jp)

Keywords: independent component analysis, bayesian network, partial discharge, radio sensing, electric power apparatus and facilities

1. Introduction

The purpose of this paper is to present a new method designed for locating multiple partial discharge (PD) sources using Independent Component Analysis (ICA) and direction of arrival method of electromagnetic (EM) waves based on Bayesian Network. The proposed method consists of the following steps. First, the observed signals are converted from the time domain to the frequency domain through the short time Fourier transform (STFT). As the result of this process, ICA for convolved mixture turns into ICA for instantaneous mixture. In order to separate mixed signals, we use the fast ICA algorithm that is based on negentropy as a measure of nongaussianity. Next, we apply the direction of arrival method using Bayesian Network to the separated source signals by ICA. Signal sources are estimated by calculating intersection point from the arrival angle. Simulation results showed that our method located multiple signal sources when multiple source signals were simultaneously generated.

2. ICA

Assume that n source signals are observed by m sensors. The estimated source signals $\mathbf{y}(t) = [y_1(t), \dots, y_n(t)]^H$ are expressed as:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{x}(t) \dots\dots\dots (1)$$

where $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_m]$ is the unmixing matrix, $\mathbf{W}^H$ stands for the Hermitian of $\mathbf{W}$, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^H$ is the observed signals. The fixed-point algorithm for one unit is

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_k \leftarrow & E \left[\mathbf{x} \left(\mathbf{w}_k^H \mathbf{x} \right)^* g \left(\left| \mathbf{w}_k^H \mathbf{x} \right|^2 \right) \right] \\ & - E \left[g \left(\left| \mathbf{w}_k^H \mathbf{x} \right|^2 \right) + \left| \mathbf{w}_k^H \mathbf{x} \right|^2 g' \left(\left| \mathbf{w}_k^H \mathbf{x} \right|^2 \right) \right] \mathbf{w}_k \\ & \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\mathbf{w}_k \leftarrow \frac{\mathbf{w}_k}{\|\mathbf{w}_k\|} \dots\dots\dots (3)$$

where $\mathbf{a}^*$ designates the complex conjugate of $\mathbf{a}$ and $g(b) = 1/(0.1 + b)$.

3. Simulation

We conducted a numerical simulation for locating multiple PD sources. Four source signals and four antennas (two 2-tuples) were set in the observable area. Any two sources were simultaneously generated. Convolutively mixed signals were received by two antenna pairs. The received signals were digitized at a sampling rate of 2.5 GHz using a digital oscilloscope.

Fig. 1. Averaged estimation error

Fig. 2. Estimation result

The estimation error of distance and angle are shown as in Fig. 1. Average error was 0.59 m (distance) and 3.38 deg (angle) in the observable area size 10m*10m. Average error increased proportional to observable area size. The location results of area size 60 m*60 m are shown as in Fig. 2. Figure 2. shows the estimation error is less than 10 m. As the results of the simulation, the proposed method is available to locate multiple PD sources.

独立成分分析とベイジアンネットを適用した電磁波到来角推定法による複数部分放電源の位置標定

正 員 石丸 宏一*,** 正 員 川田 昌武**

Location Technique for Multiple Partial Discharge Sources using Independent Component Analysis and Direction of Arrival Method of Electromagnetic Waves based on Bayesian Network

Hirokazu Ishimaru*,**, Member, Masatake Kawada**, Member

We propose the new locating method for multiple partial discharge sources using independent component analysis (ICA) and direction of arrival method of electromagnetic (EM) waves based on Bayesian Network. The proposed method consists of the following steps. First, the observed signals are converted from the time domain to the frequency domain through the short time Fourier transform (STFT). As the result of this process, ICA for convolved mixture turns into ICA for instantaneous mixture. In order to separate mixed signals, we use the fast ICA algorithm (FastICA) that is based on negentropy as a measure of nongaussianity. Next, we apply the direction of arrival method of EM waves using Bayesian Network to the separated source signals by ICA. Signal sources are estimated by calculating intersection point from the arrival angle. Simulation results showed that our method located multiple signal sources when the observed signals were the convolved mixture of original sources.

キーワード：独立成分分析，ベイジアンネット，部分放電，電磁波センシング，電力機器・設備

Keywords: independent component analysis, bayesian network, partial discharge, radio sensing, electric power apparatus and facilities

1. はじめに

電力機器・設備の絶縁材料劣化に伴って生じる部分放電 (PD: Partial Discharge) の早期検出，位置標定技術の開発は，電力を安定供給する上で重要となっている。PD は広帯域電磁波を放射することから，電磁波センシング技術による電力機器・設備の絶縁診断技術の開発が国内外機関において進められている^{(1)~(11)}。

電力系統は各種機器・設備から構成されており，電磁波センシング技術を導入する上で，複数箇所から PD がほぼ同時に発生する可能性や，機器，設備による電磁波の反射に伴うマルチパスの影響を考慮する必要がある。

そこで，本論文では独立成分分析 (ICA: Independent Component Analysis)⁽¹²⁾⁽¹³⁾ とベイジアンネットによる電磁波到

来角推定法⁽¹¹⁾を用いた複数 PD 源の位置標定法を提案し，数値シミュレーションにより，本提案手法の有効性を示す。なお，数値シミュレーションでは，PD 源からの直接波がアンテナで観測可能な環境を想定した。

2. 独立成分分析による受信電磁波信号分離

〈2・1〉定式化 複数箇所が発生した PD 源からの放射電磁波を受信する場合，観測信号は各 PD から各アンテナへの到達時刻が異なることや，反射によるマルチパスの影響から畳み込み混合となる。

n 個の PD 源の原信号 (放射電磁波) を

$$\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T \dots\dots\dots (1)$$

とし，放射電磁波の伝達時間ごとの減衰係数を a_{ij} (インパルス応答) とすると，各アンテナにより受信した観測信号は，

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n \sum_{\tau=0}^{\infty} a_{ij}(\tau) s_j(t - \tau) \dots\dots\dots (2)$$

$$= \sum_{j=1}^n a_{ij} * s_j(t)$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(t) * \mathbf{s}(t) \dots\dots\dots (3)$$

* 名古屋工業大学
〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町
Nagoya Institute of Technology
Gokisocho, Showa-ku, Nagoya 466-8555
** 徳島大学大学院
〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1
The University of Tokushima
2-1, Minami-Johsanjima, Tokushima 770-8506

で定義される。ここで、 m は観測信号数（アンテナ数）、 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^T$ であり、 $n \leq m$ である。 $\mathbf{A}$ は a_{ij} を要素とする混合行列である。実際の観測では、この混合行列 $\mathbf{A}$ は、電磁波伝搬空間の特性、PD とアンテナ間の距離による減衰、アンテナ特性、アンテナ間の相互結合等の要素が含まれている。

なお、 $n > m$ の場合は、混合が非可逆となるため、混合行列 $\mathbf{A}$ の逆行列を計算することによって独立成分を求めることはできない⁽¹²⁾。このような状況では過完備基底の ICA となるが、最尤推定を用いることで独立成分を推定することができる⁽¹⁴⁾。ただし、計算量は FastICA と比べて膨大となる。そこで、本論文では $n \leq m$ の場合についてのみ取り扱った。

本論文では、観測信号に (4) 式の短時間フーリエ変換 (STFT: Short-Time Fourier Transform) を適用して、時間周波数領域で表現する。

$$X(f, t_s) = \sum_t e^{-j2\pi f t} x(t) \text{win}(t - t_s) \dots (4)$$

ここで、 f は周波数、 t_s は窓関数の時間位置、 $\text{win}(t)$ は窓関数である。STFT により、(3) 式は、

$$\mathbf{X}(f, t_s) = \mathbf{A}'(f) \mathbf{S}(f, t_s) \dots (5)$$

$\mathbf{X}$: $\mathbf{x}$ の短時間フーリエ変換

$\mathbf{A}'$: $\mathbf{A}$ の短時間フーリエ変換

$\mathbf{S}$: $\mathbf{s}$ の短時間フーリエ変換

に変換され、各周波数において瞬時混合の問題と見なすことができる。このように、STFT を適用することで畳み込み混合を瞬時混合の問題に単純化して周波数ごとに ICA を行う。

提案法では、混合行列 $\mathbf{A}$ は不明であると仮定しているが、実際には、過去の診断結果から混合行列 $\mathbf{A}$ に関する事前知識が利用できる場合も考えられる。過去の観測事例から、PD 放射電磁波の信号伝搬に関する事前知識が得られる場合は、混合行列 $\mathbf{A}$ の各要素を確率分布として扱い、これらのベイズ事前分布を用いることで ICA 推定に事前知識を取り入れ、効率的に推定を行うことができる⁽¹⁵⁾。

〈2・2〉 白色化 ICA の前処理として観測信号の白色化を行う。白色化により、次節で求める分離行列の推定を直交行列に限定することになり、復元信号を互いに無相関化することができる。ICA の前処理は、はじめに観測信号の標本平均 $E[\mathbf{X}]$ を用いて、観測信号 $\mathbf{X}$ を

$$\mathbf{X} \leftarrow \mathbf{X} - E[\mathbf{X}] \dots (6)$$

により、平均 0 に中心化する。次に、白色化行列

$$\mathbf{V} = \mathbf{E} \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{E}^H \dots (7)$$

を用いて白色化を行う。 $\mathbf{E}$ は $\mathbf{X}$ の共分散行列 $E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H]$ の固有ベクトルからなる直交行列である。 $\mathbf{D}$ は $\mathbf{E}$ の固有値からなる対角行列であり、 $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_m)$ で表され

る。また、 $\mathbf{H}$ は共役複素転置を表す。白色化により、観測信号 $\mathbf{X}$ は

$$\mathbf{z} = \mathbf{V}\mathbf{X} \dots (8)$$

に線形変換される。

〈2・3〉 FastICA 本論文では ICA の計算上の効率的な手法である FastICA を用いており、以下にそのアルゴリズムを説明する。ICA では分離行列 $\mathbf{W}$ により、変換された信号

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}\mathbf{z} \dots (9)$$

の各成分が独立となるような $\mathbf{W}$ を求める。本論文では、ICA の推定において独立性の基準に非ガウス性の最大化を用いる。また、非ガウス性の定量的な尺度となるコントラスト関数に

$$J(\mathbf{w}) = E \left[G \left(|\mathbf{w}^H \mathbf{z}|^2 \right) \right] \dots (10)$$

を使用する⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾。ここで、 G は滑らかな偶関数で、 $\mathbf{w}$ は m 次元複素ベクトルであり、 $E[|\mathbf{w}^H \mathbf{z}|^2] = 1$ である。コントラスト関数による推定値が外れ値に対して頑健 (Robust) となるためには、 G が緩やかな増加関数であれば良いことから、本論文では G および、その導関数 g を、

$$G(y) = \log(0.1 + y) \dots (11)$$

$$g(y) = 1.0 / (0.1 + y) \dots (12)$$

とする。

1 つの独立成分を推定するベクトルを $\mathbf{w}_k$ とすると、分離行列 $\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_n)^H$ を推定する FastICA のアルゴリズムは下記の通りである⁽¹²⁾⁽¹⁶⁾。

[Step 1] ICA の前処理として、観測信号を平均 0 に中心化した後、白色化する。

[Step 2] 推定する独立成分の数を n とし、 $k = 1$ とおく。

[Step 3] ノルム 1 のベクトル $\mathbf{w}_k$ をランダムに設定する。

[Step 4] 次式で $\mathbf{w}_k$ を更新する。ただし、* は複素共役である。

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_k \leftarrow & E \left[\mathbf{z} (\mathbf{w}_k^H \mathbf{z})^* g(|\mathbf{w}_k^H \mathbf{z}|^2) \right] \\ & - E \left[g(|\mathbf{w}_k^H \mathbf{z}|^2) + |\mathbf{w}_k^H \mathbf{z}|^2 g'(|\mathbf{w}_k^H \mathbf{z}|^2) \right] \mathbf{w}_k \\ & \dots (13) \end{aligned}$$

[Step 5] 次式で $\mathbf{w}_k$ の直交化を行う。

$$\mathbf{w}_k \leftarrow \mathbf{w}_k - \sum_{j=1}^{k-1} (\mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_j) \mathbf{w}_j \dots (14)$$

[Step 6] 次式で $\mathbf{w}_k$ の正規化を行う。

$$\mathbf{w}_k \leftarrow \frac{\mathbf{w}_k}{\|\mathbf{w}_k\|} \dots (15)$$

[Step 7] $\mathbf{w}_k$ が収束していなければ、Step 4 に戻る。

[Step 8] $k = n$ ならば終了。それ以外は、 $k = k + 1$ とし、Step 3 に戻る。

〈2・4〉ICAの任意性 ICAでは原信号 $\mathbf{s}$ および混合行列 $\mathbf{A}$ に関する事前知識を利用せずに分離を行う。そのため、独立性を基準に分離された信号は、原信号の振幅値と符号、順序を推定できないという任意性が残る。ここで順序とは、分離後の信号 $\mathbf{y}$ の行成分の並び順を示し、対応する独立成分（原信号）がICAを行う度に異なることを意味する。本論文では、時間周波数領域においてICAにより分離した信号を、独立成分ごとに周波数統合し、個々の信号を復元する。なお、各周波数成分における信号の振幅値と符号を観測時の出力値に復元し、 $\mathbf{y}$ に示される独立成分の順序を揃える必要があることから、分離行列の逆行列を利用することで信号観測時の振幅値、符号を復元する。(8)、(9) 式より、

$$\mathbf{y} = \mathbf{WVX} \cdots \cdots \cdots (16)$$

となり、両辺の左から分離行列の逆行列、白色化行列の逆行列を順に掛け、左辺と右辺を入れ替えると、

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{V}^{-1} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{y} \\ &= \mathbf{V}^{-1} \mathbf{W}^{-1} \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \cdots + \mathbf{V}^{-1} \mathbf{W}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \cdots + \mathbf{V}^{-1} \mathbf{W}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} q_1^1 \\ \vdots \\ q_j^1 \\ \vdots \\ q_m^1 \end{pmatrix} + \cdots + \begin{pmatrix} q_1^i \\ \vdots \\ q_j^i \\ \vdots \\ q_m^i \end{pmatrix} + \cdots + \begin{pmatrix} q_1^n \\ \vdots \\ q_j^n \\ \vdots \\ q_m^n \end{pmatrix} \cdots \cdots \cdots (17) \end{aligned}$$

と変形できる。但し、 $\mathbf{V}^{-1} \mathbf{W}^{-1} [0, \dots, y_i, \dots, 0]^H = [q_1^i, \dots, q_m^i]^H$ である。この変形により、右辺 i 番目の項 (q^i) は i 番目の独立成分の観測信号を表し、各項の j 行目の成分 (q_j) は j 番目の観測地点（アンテナ）での値を表す。このように $\mathbf{y}$ を分解することで、独立成分ごとに各アンテナでの観測信号を復元することができる。

次に、順序の任意性を取り除くため、エンベロープ (Envelope) を利用して各周波数成分における独立成分の順序を並べ替える⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾。ここで、(17) 式の右辺 i 番目の項 $\mathbf{z}(f, t_s; i)$ を

$$\begin{aligned} \mathbf{z}(f, t_s; i) &= \mathbf{V}^{-1} \mathbf{W}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} q_1^i \\ \vdots \\ q_m^i \end{pmatrix} \cdots \cdots \cdots (18) \end{aligned}$$

とおき、エンベロープを推定するためのオペレータ ε を

$$\varepsilon \mathbf{z}(f, t_s; i) = \frac{1}{2M+1} \sum_{\tau=t_s-M}^{t_s+M} \sum_{j=1}^m |\mathbf{z}_j(f, \tau; i)| \cdots \cdots (19)$$

と定義する。ただし、 M は適当な正の定数、 $\mathbf{z}_j(f, t_s; i)$ は $\mathbf{z}(f, t_s; i)$ の第 j 成分とする。本論文では、 M の値を決定するため、予め模擬波形 (5章で用いる (25), (26) 式。なお、信号源の配置は5章のシミュレーションと異なる複数の配置とした。) による信号分離のシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、ICAにより分離した信号と原信号の平均二乗誤差が最小となる M の値を求めた。これにより、 $M=5$ とした。

エンベロープの相関によって独立成分の類似性を測ることで、各周波数において同じ原信号と推定される独立成分の組合せを求める。以下に、並べ替えの手順を示す⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾。

[Step 1] 独立成分のエンベロープの相関が小さい順に周波数を並べ替える。エンベロープの相関は次式で定義する。

$$\text{sim}(f) = \sum_{i \neq j} \frac{\varepsilon \mathbf{z}(f; i) \cdot \varepsilon \mathbf{z}(f; j)}{\|\varepsilon \mathbf{z}(f; i)\| \cdot \|\varepsilon \mathbf{z}(f; j)\|} \cdots \cdots (20)$$

$$\text{sim}(f_1) \leq \text{sim}(f_2) \leq \cdots \leq \text{sim}(f_N) \cdots \cdots (21)$$

[Step 2] 周波数 f_1 の独立成分の順序を基準とする。 $k=2$ とおく。

$$\mathbf{U}(f_1, t_s; i) = \mathbf{z}(f_1, t_s; i), \quad (i = 1, \dots, m) \cdots \cdots (22)$$

[Step 3] 周波数 f_k のエンベロープと周波数 f_1 から f_{k-1} までは統合した ($k=2$ のとき、周波数 f_1 の) エンベロープの相関を最大化する順列 $\sigma(i)$ を決定する。これは、 $i = 1, \dots, m$ において可能な順列の中で、

$$\sum_{i=1}^m \varepsilon \mathbf{z}(f_k; \sigma(i)) \cdot \left(\sum_{j=1}^{k-1} \varepsilon \mathbf{U}(f_j; i) \right) \cdots \cdots (23)$$

を最大化することで求めることができる。

[Step 4] Step 3 で求めた順列 $\sigma(i)$ に基づいて、

$$\mathbf{U}(f_k, t_s; i) = \mathbf{z}(f_k, t_s; \sigma(i)), \quad (i = 1, \dots, m) \cdots \cdots (24)$$

とおく。

[Step 5] $k < m$ ならば $k = k+1$ とし、Step 3 に戻る。

以上により、順序の任意性を取り除いたスペクトログラム $\mathbf{U}(f, t_s; i)$ を得ることができる。

〈2・5〉信号の復元 ICAにより得られたスペクトログラム $\mathbf{U}(f, t_s; i)$ に逆フーリエ変換を適用して信号を復元する。これにより、複数PD源からの放射電磁波をPDごとに分離することができる。

3. ベイジアンネットによる到来角推定法

各独立成分の到来角推定には、ベイジアンネットを用いた確率的な推定法を適用する⁽¹¹⁾。この方法でのベイジアンネットの構成を図1に示す。T1_n, T2_n は、各時刻における両アンテナの受信信号の状態を表すノードであり、ノー

図 1 ベイジアンネットの構成
Fig. 1. Configuration of Bayesian network.

ドへの受信信号の入力は両アンテナで受信した信号のどちらか一方で閾値を超えた時刻から開始する。ノードの状態は {ON, OFF} の 2 値であり、入力開始から最初に受信信号が閾値を超えた時刻に “ON”，それ以外は “OFF” とする。Channel は最初に閾値を超えたチャンネルを表すノードであり、{ch1, ch2} の 2 状態を持つ。Angle は到来角を表すノードで、0～180° の整数として {0, 1, ..., 179, 180} の 181 状態を持ち、1° 単位で到来角を推定する。

ここでは、複数設定した閾値に対してそれぞれ信号の到達時間差を利用して到来角を求める。さらに、各閾値においてベイジアンネットから得た確率で重み付けした平均を計算することで信号の到来角を推定する。

4. 位置標定アルゴリズム

本論文で提案する位置標定法の手順を図 2 に示し、以下にその概要を述べる。アンテナで受信した信号を STFT により時間周波数領域に変換する。次に、周波数成分ごとに白色化、ICA を行い、信号を分離する。分離後の独立成分は、逆行列を用いて振幅値、符号の任意性を解消した後、エンベロープを利用して順序の入れ替えを行い、周波数成分を統合する。統合した信号に逆フーリエ変換 (IDFT: Inverse Discrete Fourier Transform) を適用して観測信号を復元し、独立成分ごとに到来角の推定を行う。到来角の推定には、信号の振幅を利用したベイジアンネットによる確率的推定法を利用する。このような STFT から到来角推定までの過程を各所のアンテナで受信した信号について行う。最後に、各所の観測信号から得た独立成分間の相関を求めることで、同一 PD からの信号を識別し、その信号を用いて到来角の交点計算、PD の位置標定を行う。

5. 位置標定シミュレーション

提案手法に基づき、2 箇所から同時に放射した模擬信号の位置標定シミュレーションを行った。シミュレーションでは、観測領域内に 4 つの信号源を置き、そのうち任意の 2 箇所から同時に発生した信号を 2 箇所に設置した 2 チャンネルのアンテナ (間隔 1 m) ⁽¹⁾⁽¹¹⁾ で観測し、位置標定を行ったと仮定した。図 3 に信号源とアンテナの配置図を示す。

観測領域のサイズは 6 通りであり、各サイズにおいて全ての信号源の組合せで推定を行った。観測領域のサイズとアンテナ、信号源の座標を表 1 に示す。同表において、例

図 2 位置標定の手順
Fig. 2. Procedure of locating signal sources.

えば、10 m×10 m のサイズ (図 3) では X 座標 -5 m から 5 m、かつ Y 座標 0 m から 10 m の領域が観測領域を示している。2 組のアンテナは観測領域の境界となる 2 辺の各中点に配置し、信号源は 10 m×10 m の座標を基準に領域の一边の距離に比例した位置ベクトルの座標に配置した。

図 4 に信号源から放射する模擬信号を示す。同図は (25) 式、(26) 式に示す 50 MHz から 550 MHz まで 50 MHz 刻みで加算した正弦波の合成波であり、これらの信号は周波数成分の振幅値、窓関数が異なる。なお、本論文のシミュレーションでは、放射、受信電磁波の電界強度を電圧値に変換して表示している。

$$s1(n) = W1(n) \sum_{m=1}^{11} \{ \sqrt{m} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot m \cdot n \cdot \Delta t) \} \dots \dots \dots (25a)$$

$$W1(n) = 0.4 - 0.4 \cos \left(2 \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{N} \right) \dots \dots \dots (25b)$$

$$s2(n) = W2(n) \sum_{m=1}^{11} \{ \sqrt{12-m} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot m \cdot n \cdot \Delta t) \} \dots \dots \dots (26a)$$

$$W2(n) = \begin{cases} 0.8 & \text{if } (N/4 \leq n \leq N/2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \dots \dots \dots (26b)$$

但し、N は解析窓幅 (ポイント数) である。

2 つのアンテナで受信する観測信号は

$$x1(t) = a_{11} \cdot s1(t - \tau_{11}) + a_{12} \cdot s2(t - \tau_{12}) \dots \dots \dots (27a)$$

$$x2(t) = a_{21} \cdot s1(t - \tau_{21}) + a_{22} \cdot s2(t - \tau_{22}) \dots \dots \dots (27b)$$

表 1 アンテナと信号源の座標
Table 1. The antenna and signal source position.

Observable area [m]	Antenna pair 1	Antenna pair 2	Source1	Source2	Source3	Source4
10m*10m: X[-5,5], Y[0,10]	ch1(0,0), ch2(1,0)	ch1(5,4), ch2(5,5)	(-2.5,7.5)	(-2,3)	(2,4)	(2,7)
20m*20m: X[-10,10], Y[0,20]	ch1(0,0), ch2(1,0)	ch1(10,9), ch2(10,10)	(-5,15)	(-4,6)	(4,8)	(4,14)
40m*40m: X[-20,20], Y[0,40]	ch1(0,0), ch2(1,0)	ch1(20,19), ch2(20,20)	(-10,30)	(-8,12)	(8,16)	(8,28)
60m*60m: X[-30,30], Y[0,60]	ch1(0,0), ch2(1,0)	ch1(30,29), ch2(30,30)	(-15,45)	(-12,18)	(12,24)	(12,42)
80m*80m: X[-40,40], Y[0,80]	ch1(0,0), ch2(1,0)	ch1(40,39), ch2(40,40)	(-20,60)	(-16,24)	(16,32)	(16,56)
100m*100m: X[-50,50], Y[0,100]	ch1(0,0), ch2(1,0)	ch1(50,49), ch2(50,50)	(-25,75)	(-20,30)	(20,40)	(20,70)

図 3 信号源とアンテナの配置図

Fig. 3. Configuration of source signals and antennas.

τ_{nm} : 信号源 m からアンテナのチャンネル n までの原信号の到達時間。

となり、時間の遅れを含む時空間的混合となる。なお、両 PD 源から放射される電磁波は同一空間を伝搬、同一の受信アンテナの利用、ベジアンネットによる到来角推定法において、相互結合の影響をベースライン付近の到来角（ベースラインから 16° の範囲）のみに抑えていることから、本シミュレーションでは、各信号源とアンテナまでの距離 R のみを混合行列 $\mathbf{A}$ の要素とした。係数 a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} は各信号源からアンテナまでの距離 R を用いて $1/R$ とし、有効桁数は距離による減衰を考慮して小数点以下 5 桁とした。

上記のシミュレーション環境において、提案法による信号源の位置標定を行った。観測領域のサイズ $60\text{ m} \times 60\text{ m}$, source1 と source4 から放射された信号 s_1 , s_2 (図 4) を Antenna pair1 (ch1, ch2) で受信した信号 x_1 , x_2 を図 5 に示す。同図の ch1, ch2 での観測信号 x_1 , x_2 は (27) 式を用いて作成している。信号受信時のサンプリング時間は 0.4 ns , 解析窓幅は 2048 point (819.2 ns), STFT の窓関数はハニ

(a) Signal1

(b) Signal2

図 4 原信号

Fig. 4. Source signals.

グ窓 (Hanning window), 幅は 512 point (204.8 ns), 窓関数の単位移動時間幅は 16 point (6.4 ns) とした。

観測信号 x_1 , x_2 から, ICA により推定した信号を図 6 に示す。同図の振幅は (17) 式により, アンテナの ch1 での受信時を推定したものである。同図と図 4 の原信号を比較すると, 概ね良好に分離できていることが分かる。

提案法により求めた信号源位置と設定位置との距離の平均誤差を図 7 に示す。また, 位置標定の過程で求めた信号の到来角の平均誤差を図 8 に示す。図 7, 図 8 より, 観測領域 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ では距離の誤差が 0.59 m , 到来角の誤差は 3.38 deg である。誤差は距離, 到来角共に観測領域のサイズにほぼ比例して大きくなり, $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ では距離 8.86 m , 到来角 4.68 deg となっている。到来角に比べ, 距離の誤差が大きくなっているが, これは同じ到来角の誤差であっても信号源がアンテナから遠くなるに従い, 交点を求める際の誤差が大きくなるためである。また, 交点を求

(a) Ch1

(b) Ch2

図5 観測信号

Fig. 5. Observed signals.

(a) Signal1

(b) Signal2

図6 分離信号

Fig. 6. Separated signals.

める際の到来角の誤差がプラス方向であるか、マイナス方向であるかの組合せも距離の誤差に影響している。このような誤差はアンテナの設置数を増やし、複数の交点から重心を求めることで減じることができる⁽⁵⁾。なお、観測領域

図7 距離の平均推定誤差

Fig. 7. Averaged estimation error (distance).

図8 到来角の平均推定誤差

Fig. 8. Averaged estimation error (angle of arrival).

図9 推定結果

Fig. 9. Estimation result.

40 m×40 m では、ICA による分離が不完全な推定結果が含まれていたため、誤差が大きくなっている。

一例として、図9に観測領域 60 m×60 m の位置標定結果を示す。なお、同図中の source1～4 周辺の*印等は本手法による推定位置である。推定は各信号源について、残りの3つの信号源とそれぞれ同時に信号が発生した場合を仮定して行ったため、推定結果は各信号源に対して3つずつ示している。同図より、本手法が複数信号源の位置標定に対して有効であることが分かる。

図 10 原信号

Fig. 10. Source signals.

図 11 距離の平均推定誤差

Fig. 11. Averaged estimation error (distance).

次に、実際の PD 放射電磁波を考慮し、(28) 式に示すガウシアンパルスと CW (Continuous Wave) による波形を模擬信号源として同様のシミュレーションを行った。図 10 に信号源から放射される信号波形を示す。同図の信号はスペクトルが 3 dB 低下する周波数 f_0 が異なる。

$$s(n) = 0.1 \exp[-\{(n \cdot \Delta t - T)/0.29T\}^2] \cdot \sin(2\pi \cdot 0.2 \cdot 10^9 \cdot n \cdot \Delta t) \quad (28a)$$

$$T = 0.646/f_0 \quad (28b)$$

提案法により求めた信号源位置と設定位置との距離の平均誤差を図 11 に示す。同図より、観測領域 $10\text{m} \times 10\text{m}$ では誤差 0.60 m であり、上記のシミュレーションとほぼ同じ結果となった。誤差は観測領域のサイズに比例して大きくなっているが、図 7 と比較すると全体的に誤差は小さい。

これは、受信信号の立ち上がりから最大値までの時間が短くなったため、振幅の閾値を利用した到来角推定の誤差が減少し、その結果として、距離の誤差も減少したと考えられる。以上より、提案法が複数 PD 源の位置標定に対して有効であることが分かる。

6. まとめ

本論文では、複数箇所が発生した PD 源の位置標定法として、ICA とベイジアンネットによる電磁波到来角推定法を適用した手法を提案した。

模擬信号によるシミュレーションの結果、観測領域 $10\text{m} \times 10\text{m}$ であれば誤差 0.60 m 程度で受信信号の個々の信号源を推定できることを確認した。なお、観測領域が小さくなるに伴い、推定誤差が減少することから、観測領域が広域であっても、観測領域を狭めるように、本手法を段階的に複数回適用することで誤差 0.6 m 以下での推定が可能である。

本手法は、変電所構内の変圧器ブッシング、ガス遮断器ブッシングやケーブル端末等、及び送電・配電系統の各種機器等での PD 発生有無や位置標定に有効であると考えられる。また、ガス絶縁開閉装置 (GIS) 等内にアンテナを挿入した場合についても検討が必要であるが、各種劣化原因による放射電磁波や、異なった位置から放射される電磁波の分離にも利用できる可能性がある。また、実際の環境においては、ブッシングからの引き出し線やがいしなどからのコロナ放電と機器内の PD との識別が必要となることがある。これには、周波数分布によるパターン認識手法の適用が考えられる。

本論文では、発生した PD 源の数が予め分かっていることを前提に位置標定を行ったが、これは観測信号の空間相関行列の固有値を分析することで推定が可能である。

今後は、各種電力機器・設備における電磁波反射に伴うマルチパスの影響も考慮に入れた検討を行う予定である。

謝 辞

本研究は、科学技術振興機構、文部科学省 (科学研究補助金若手研究 (B)16760230)、徳島大学 (工学部研究プロジェクト)、財団法人池谷科学技術振興財団 (研究助成)、財団法人中部電力基礎技術研究所 (出版助成) 等により助成頂きましたことを付記し、ここに謝意を表します。

日頃より、貴重なご意見を賜ります徳島大学・伊坂勝生教授に謝意を表します。

(平成 17 年 11 月 16 日受付, 平成 18 年 7 月 6 日再受付)

文 献

- (1) M. Kawada: "Fundamental Study on Locating Partial Discharge Source using VHF-UHF Radio Interferometer System", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.5, pp.629-636 (2002-5) (in Japanese)
川田昌武:「VHF-UHF 帯電波干渉計システムによる部分放電源特定のための基礎研究」, 電学論 B, **122**, 5, pp.629-636 (2002-5)

- (2) M. Hikita: "Future Trend of Discharge Measurement Technique for Diagnosis of Insulation Performance of Electric Power Apparatus", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.6, pp.695-698 (2001-6) (in Japanese)
匹田政幸:「電力機器の絶縁診断における部分放電測定技術の動向」, 電学論 B, **121**, 6, pp.695-698 (2001-6)
- (3) H. Maekawa, M. Doi, and S. Kawamoto: "Identification for Sources of Partial Discharge in Gas Insulated Switchgears", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9) (in Japanese)
前川 洋・土井雅史・川本俊治:「ガス絶縁開閉装置における部分放電源の同定」, 電学論 B, **120**, 8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9)
- (4) H. Tsutada, N. Nagata, M. Miyashita, M. Kamei, S. Inoue, K. Takashima, and T. Usami: "Detection of Partial Discharge Using First Peak Height and Cumulative Wave Parameter of Internal Electromagnetic Wave in GIS", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.3, pp.333-339 (2000-3) (in Japanese)
薦田広幸・長田典子・宮下 信・亀井光仁・井上 悟・高嶋和夫・宇佐美照夫:「GIS 内部電磁波の第一波高値と累積波形指標を用いた部分放電識別」, 電学論 B, **120**, 3, pp.333-339 (2000-3)
- (5) Y. Suzuki, M. Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsuura, and M. Kawasaki: "Location of Partial Discharge by Superimposed Positioning Optimization on the Time Delay of Arrival", *T. IEE Japan*, Vol.118-B, No.2, pp.157-163 (1998-2) (in Japanese)
鈴木雄一・川田昌武・河崎善一郎・松浦慶士・川崎 誠:「位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定」, 電学論 B, **118**, 2, pp.157-163 (1998-2)
- (6) M. Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsuura, and M. Kawasaki: "Non-Contact Detection of Electromagnetic Noise Occurrence due to Partial Discharges by Spatial Phase Difference Method", *T. IEE Japan*, Vol.115-B, No.10, pp.1168-1173 (1995-10) (in Japanese)
川田昌武・河崎善一郎・松浦慶士・川崎 誠:「電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法」, 電学論 B, **115**, 10, pp.1168-1173 (1995-10)
- (7) M. Kawada, J. Abe, and Z. Kawasaki: "Location of Partial Discharge by Superimposed Positioning Optimization on the Time Delay of Arrival", *T. IEE Japan*, Vol.118-B, No.7/8, pp.908-909 (1998-7/8) (in Japanese)
川田昌武・安部淳一・河崎善一郎:「ウェーブレット変換を用いた電磁波時空間位相差法による部分放電検出」, 電学論 B, **118**, 7/8, pp.908-909 (1998-7/8)
- (8) A. Tungkanawanich, Z. Kawasaki, and K. Matsuura: "Location of Multiple PD Sources on Distribution Lines by Measuring Emitted Pulse-Train Electromagnetic Waves", *T. IEE Japan*, Vol.120-B, No.11, pp.1431-1436 (2000-11)
- (9) C.H. Peck and P.J. Moore: "A Direction-Finding Technique for Wide-Band Impulsive Noise Source", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, Vol.43, No.2, pp.149-154 (2001-5)
- (10) H. Okubo: "Recent Research Activity and Future Trend of Electrical Insulation Diagnostic Technique for Electric Power Apparatus", *T. IEE Japan*, Vol.119-B, No.4, pp.434-437 (1999-4) (in Japanese)
大久保仁:「電力機器の診断技術の現状と今後の課題」, 電学論 B, **119**, 4, pp.434-437 (1999-4)
- (11) H. Ishimaru and M. Kawada: "Fundamental Study on Direction Finding Technique for Electromagnetic Waves Emitted from a Partial Discharge using Bayesian Network", *IEEEJ Trans. PE*, Vol.125, No.2, pp.177-183 (2005-2) (in Japanese)
石丸宏一・川田昌武:「ベイズアンネットによる部分放電放射電磁波の方位角推定法に関する基礎研究」, 電学論 B, **125**, 2, pp.177-183 (2005-2)
- (12) A. Hyvärinen, J. Karhunen, and E. Oja (根本 幾・川勝真喜訳): 詳解独立成分分析—信号解析の新しい世界, 東京電機大学出版局 (2005-2)
- (13) 村田 昇: 入門 独立成分分析, 東京電機大学出版局 (2004-7)
- (14) T.-W. Lee, M.S. Lewicki, M. Girolami, and T.J. Sejnowski: "Blind Source Separation of More Sources Than Mixtures Using Overcomplete Representations", *IEEE Signal Processing Lett.*, Vol.6, No.4, pp.87-90 (1999-4)
- (15) K.H. Knuth: "A Bayesian Approach to Source Separation", Proceedings of the First International Workshop on Independent Component Analysis and Signal Separation: ICA'99, pp.283-288, Aussois, France (1999-1)
- (16) E. Bingham and A. Hyvärinen: "A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis of Complex Valued Signals", *Int. J. Neural Systems*, Vol.10, No.1, pp.1-8 (2000-2)
- (17) N. Murata, S. Ikeda, and A. Ziehe: "An Approach to Blind Source Separation Based on Temporal Structure of Speech Signals", *Neurocomputing*, Vol.41, Issue 1-4, pp.1-24 (2001-10)

石丸 宏一 (正員) 1977 年 2 月 14 日生。1999 年 3 月同志社大学工学部知識工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科知識工学専攻修士課程進学。2000 年 3 月退学。同年 4 月名古屋工業大学工学部システムマネジメント工学科勤務。2006 年 10 月徳島大学大学院博士後期課程入学。統計的信号処理の研究に従事。

川田 昌武 (正員) 1971 年 1 月 25 日生。1998 年大阪大学大学院電気工学博士後期修了。同年名古屋工業大学工学部助手, 2002 年徳島大学工学部講師, 2003 年助教授。2005 年米国 USC 客員 (文科省)。博士 (工学)。電力機器診断, 信号処理, 環境生体電磁, 脳電磁情報研究に従事。IEEE 会員。