



Title	FPGAを用いた無線信号向け独立成分分析処理回路の実装
Author(s)	井ノ元, 利典; 塩見, 英久; 岡村, 康行
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. MW, マイクロ波. 2008, 108(195), p. 75-80
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/51308
rights	Copyright©2008IEICE
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

FPGAを用いた無線信号向け独立成分分析処理回路の実装

井ノ元利典[†] 塩見 英久[†] 岡村 康行[†]

[†] 大阪大学基礎工学研究科 〒560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

E-mail: †shiomi@ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし ブラインド推定技術はアダプティブアンテナや、MIMO 通信、コグニティブ無線などにおいて非常に有用である。画像処理や音声信号処理で盛んに研究が進められている独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA) は、事前知識による制約が少なく簡便な手法である。信号分離をリアルタイムで行うためには、ICA 処理を極めて高速に処理を行う必要がある。本報告では、この ICA 処理を FPGA (Field Programmable Gate Array) により実現することで高速化を図る。Xilinx 社の FPGA である XC4VFX12 を使用し、4 送信 4 受信の無線通信系で一様に分布する送信信号の分離を行うための回路を作製した。PC による信号分離のシミュレーションに比べ、FPGA を用いた計算により高速化を実現できた。今後更なる改良を進めることで、リアルタイム処理の実現も考えられる。

キーワード FPGA, 独立成分分析, ブラインド信号分離

Implementation of the Independent Component Analysis Processing Circuit for the Radio Signals Using FPGA

Toshinori INOMOTO[†], Hidehisa SHIOMI[†], and Yasuyuki OKAMURA[†]

[†] Graduate School of Engineering Science, Osaka University
Machikaneyama 1-3, Toyonaka-shi, Osaka, 560-8531 Japan

E-mail: †shiomi@ee.es.osaka-u.ac.jp

Abstract Blind estimation technology is very useful for an adaptive array antenna, a MIMO communication system and cognitive wireless communication system. Independent component analysis (ICA) which is studied briskly in the field of image processing or signal processing, is convenient means because there are few restrictions of previous knowledge. In this report, FPGA implements a part of processing of the complex value fastICA which is a way method of ICA. The transmission signal of uniform distribution was separated in the wireless communications system of 4 transmission 4 reception. High-speed processing was realized compared with the simulation in PC. Realization of a real-time operation is also considered by adding improvement from now on.

Key words FPGA, Independent Component Analysis, Blind Signal Separation

1. ま え が き

独立成分分析 (Independent Component Analysis: ICA) は近年著しく発展したブラインド推定技術である。信号の統計的独立性だけを手がかりにして、カクテルパーティ効果と呼ばれる混雑したノイズの中から所望の信号を見つけ出す方法であり、画像処理や音声信号処理の分野を中心に発達してきた。Hyvarinen のロバストで高速なアルゴリズムである fastICA の登場により、様々な分野への応用が進んでいる。電波技術へ適用する検討もいくつか為されており、適応アンテナへの応用と実験が行われているが、まだ検討は初期の段階である。

本報告では、4 送信 4 受信の無線通信系を考え、送信機の送信信

号 S を一様分布の信号として、任意の混合行列を作用させた観測信号 X に対して、fastICA アルゴリズムに基づいてブラインド信号分離を行った結果について報告する。

まず、独立成分分析によるブラインド信号分離の概要を述べる。次に、独立成分分析処理を行う回路のアーキテクチャについて述べ、実際に作製した回路により、混信した観測信号 X に対して作製した独立成分分析処理回路により信号分離を行った結果について述べる。

2. ブラインド信号分離

異なる位置に配置された N 個の送信機から互いに異なるマイクロ波信号を送信するとき、送信機から十分に離れた

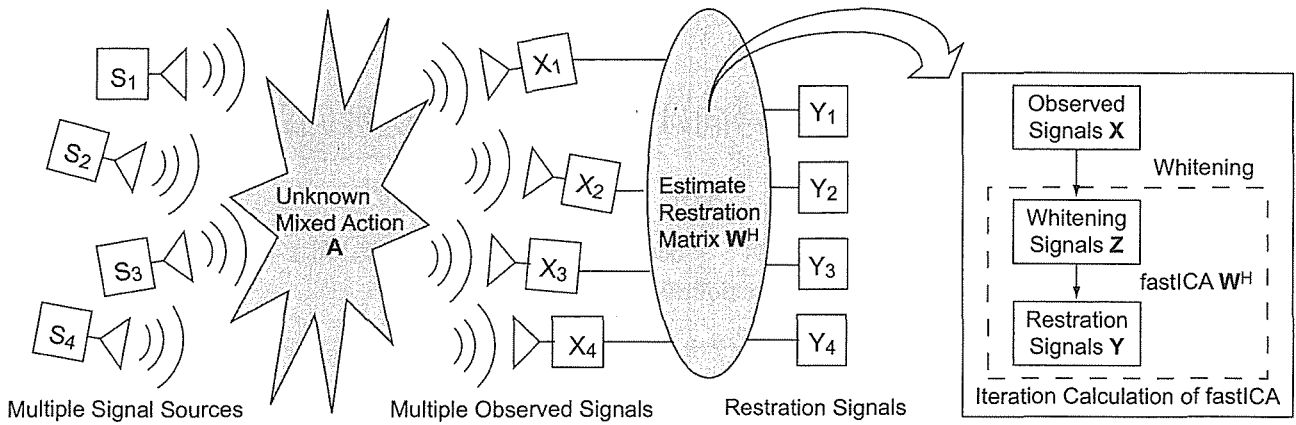


図1 ブラインド信号分離の流れ

M 要素のアレイ受信機で観測された混合信号から所望の送信信号だけを分離する問題を考える。任意の時間 t における N 個 1 組のマイクロ波送信信号のフェーザ表示をベクトル $s(t) = \{x_1(t) \cdots x_M(t)\}^T$ とする。第 j 送信機のみから信号 s_j を送信したとき、第 i 受信機で観測される信号を $a_{ij}s_j$ とすると、任意の信号 s を送信したとき、信号 $x = As$ が観測される。観測信号は送信信号の線形結合で示され、結合係数 a_{ij} を要素とする行列 A をチャネル行列と呼ぶ。

チャネル行列 A が既知の場合、観測信号 x から所望の信号 s_j を分離することは容易であり、分離ベクトル $b_j^H A = u_j^T$ となる分離ベクトルと観測信号との内積をとればよい。 u_j は第 j 要素のみが 1 の単位ベクトルである。チャネル行列 A が未知の場合にも、観測時間においてチャネル行列 A が不変であり、何らかの手段で観測時間内の $[t_1, t_2]$ における送信信号 $s_j([t_1, t_2])$ が得られるならば、最小自乗法により b_j^H が得られ、これを用いて観測時間内の任意の時点 t における受信信号 $x(t)$ から所望の信号 $y_j(t) \approx s_j(t)$ を分離できる。この送信信号 $s_j([t_1, t_2])$ を教師信号、最小自乗法により b_j^H を得る過程を学習過程と呼び、しばしば送受信間の通信プロトコルなどにより実施方法が規定され、この約束事を守ることを前提にシステムが構築される。

しかしながら、実際には学習過程が不都合であり、教師信号が利用できない場合もある。例えば、チャネル行列 A が不変である期間が極端に短い場合には、学習過程の負荷が高くなることで相対的に通信容量が低下することが考えられる。また、回線確立以前の通信システムや RFID システムなど、未知の送信信号を検出したい場合には原理的に教師信号が利用できない。このような場合をブラインド信号分離と呼び、教師信号ありの信号分離よりも解決が困難な問題となる。

ブラインド信号分離では、教師信号以外の事前知識や一般的な過程を手がかりとして信号分離を行う。例えば、送信信号間の無相関性を仮定すること、送信信号の統計的性質に対する事前知識を利用すること、アレイ受信機の電波到来方向に対する応答を利用すること、などである。包絡線一定化規範では、QPSK デジタル変調など包絡線が一定な送信信号を仮定し、分離信号 y_j の包絡線ひずみが最も小さくなるように分離ベクトル b_j^H を決定する。MUSIC では、送信信号間の無相関性を仮定し、受信

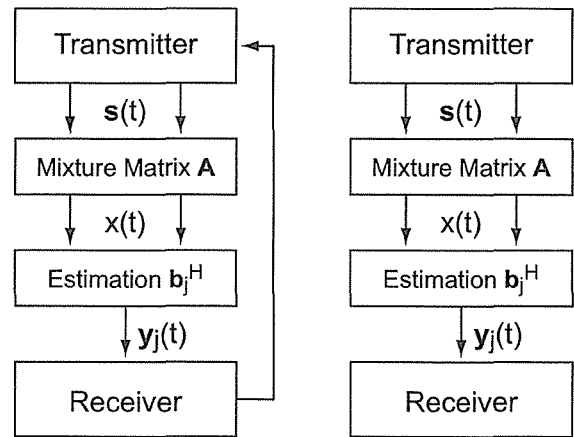


図2 (a) 教師信号有り信号分離 図3 (b) ブラインド信号分離

信号 x を無相関化した後、アレイ応答特性を手がかりに電波の到来方向を推定し、そこから分離ベクトル b_j^H を決定する。

ブラインド信号分離では、教師信号のフィードバックループが無いため、送受間制御の不安定性が発生しえず、ブラインド推定アルゴリズムが十分安定して動作する前提において、システム全体の安定性が増すものと期待できる。また、アンテナ処理系とベースバンド処理系を完全に分離できるため、システム設計の容易化、並列動作による高速化も期待できる。ただし、これまでのブラインド信号分離アルゴリズムは事前知識の制約が強すぎる、または、アルゴリズムが複雑すぎて誤差要因が多いなどの理由から実用上の困難が多かった。

2.1 独立成分分析

独立成分分析では、送信信号間の統計的独立性を仮定することにより分離ベクトル b_j^H を推定する。従来の統計的無相関性を仮定する分析手法に対して、統計的独立性を仮定することが特徴である。式 (1) で定義されるマイクロ波信号の統計的独立性は、無相関性 $E\{s_1 \cdots s_N\} = E\{s_1\} \cdots E\{s_N\}$ よりもずっと強い性質であり、これに着目することでブラインド信号分離を実現する。

$$E\{g_1(s_1) \cdots g_N(s_N)\} = E\{g_1(s_1)\} \cdots E\{g_N(s_N)\} \quad (1)$$

ここで、 $E\{\cdot\}$ は $\cdot$ の期待値を、 $g_j(\cdot)$ は任意の関数を示す。

統計学の中心極限定理に示されるように、互いに独立な N 個 1 組のマイクロ波信号の線形結合の示す確率分布は、 N が大きくなるほど正規分布に近づく。反対に、確率分布が正規分布から乖離するほど、元の独立なマイクロ波信号に近づく。したがって、観測信号 $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{s}$ の線形結合である分離信号 $\mathbf{y}_j = \mathbf{b}_j^H \mathbf{x}$ の確率密度分布が正規分布から最も乖離するように $\mathbf{b}_j^H$ を選ぶと、互いに最も独立な成分の 1 つである $\mathbf{y}_j$ が得られる。

ある確率分布と正規分布との距離を測る尺度がいくつか提案されており、式 (2) で定義される確率変数 x に対するネグントロピー $J(x)$ がしばしば用いられる。

$$J(x) = H(x_{gauss}) - H(x) \quad (2)$$

$$H(x) = - \int p_x(\eta) \log p_x(\eta) d\eta \quad (3)$$

ここで、 x_{gauss} はガウス分布の確率変数、式 (3) $H(x)$ はエントロピーを示す。定義から分かる通り、ネグントロピーは最も乱雑なガウス分布の変数に対しては 0 となり、最も秩序立った独立な変数に対しては最大な値をとり、常に非負な値をとる尺度である。計算コストの点から、近似式 $J(x) \propto [E\{G(x)\} - E\{G(x_{gauss})\}]^2$ がよく用いられており、 $G(x) = \log \cosh(x)$ が提案されている。独立成分分析では、この非ガウス性の尺度を最大 (あるいは最小) とするような分離ベクトル $\mathbf{b}_j^H$ を任意の最適化手法により求める。しばしば独立成分分析で用いられる代表的な最適化アルゴリズムに、最急降下法、ニュートン法、不動点法がある。

多くの独立成分分析アルゴリズムでは、効率的な最適化のために白色化と呼ばれる前処理を必要とする。白色化信号 $\mathbf{z}$ は、 $\mathbf{V}\mathbf{x}$ なる線形変換により得られ、白色化行列 $\mathbf{V}$ は $\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{E}^H$ で与えられる。ここで、 $\mathbf{D}$ は $\mathbf{x}$ の自己相関行列 $\mathbf{C} = \{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} / N_s$ の固有値を対角成分にもつ対角行列、 $\mathbf{E}$ は $\mathbf{D}$ に対応する固有ベクトルを並べた行列、 N_s は時間軸上でのサンプル数である。この白色化信号 $\mathbf{z}$ に対して独立成分分析処理を行うことにより、分離行列 $\mathbf{W}^H$ を推定することができ、このとき、分離信号 $\mathbf{y}$ は $\mathbf{y} = \mathbf{W}^H \mathbf{z}$ により得られる。

2.2 複素数値 fastICA

本実験で用いた独立成分分析処理のアルゴリズムは複素数値 fastICA である。fastICA は Hyvarinen により考案され、後に複素数値を対象に拡張された、高速でロバストなアルゴリズムである。複素数値 fastICA の処理の流れを図 4 に示す。複素数値 fastICA では、観測信号 $\mathbf{X}$ に対して、前処理として白色化を行い、白色化信号 $\mathbf{Z}$ を得る。この白色化信号 $\mathbf{Z}$ に対して、独立成分分析処理を行い、分離信号 $\mathbf{Y}$ を得る。

まず、分離行列 $\mathbf{W} = \{\mathbf{w}_1 \cdots \mathbf{w}_M\}$ を初期化する。 $\mathbf{w}_i$ はランダムな方向を示す M 次元単位ベクトルである。次に、式 (4) にしたがって分離行列 $\mathbf{W}_i$ を更新する。ここで、 i は更新回数を示す。

$$\begin{aligned} \mathbf{w} \leftarrow & E \{ \mathbf{z}(\mathbf{w}^H \mathbf{z})^* g(|\mathbf{w}^H \mathbf{z}|^2) \} \\ & - E \{ g(|\mathbf{w}^H \mathbf{z}|^2) + |\mathbf{w}^H \mathbf{z}|^2 g'(|\mathbf{w}^H \mathbf{z}|^2) \} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) において、 $g(x) = \tanh(x)$ 、 $g'(x) = 1 - \tanh^2(x)$ である。

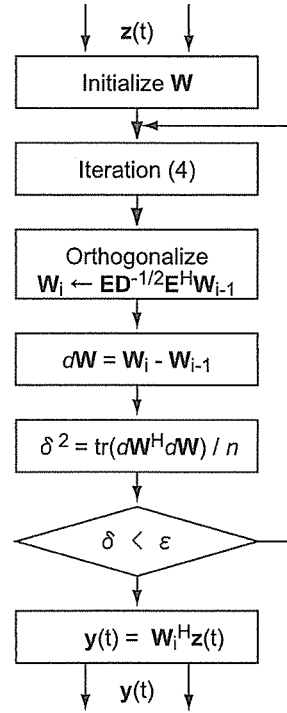


図 4 複素数値 fastICA の処理の流れ

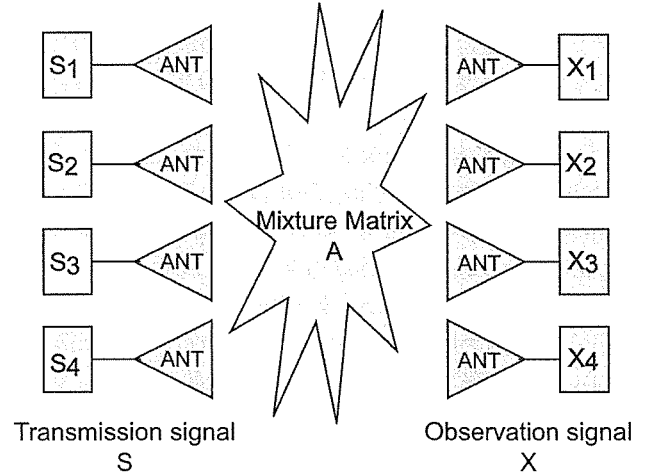


図 5 信号分離実験系

次に、得られた分離行列に対して直交化を行う。直交化は式 (5) により与えられる。ここで、 $\mathbf{D}$ は式 (4) で得られた $\mathbf{W}^H$ の固有値を並べた対角行列、 $\mathbf{E}$ は $\mathbf{D}$ に対応する固有ベクトルを並べた行列である。

$$\mathbf{W}_i \leftarrow \mathbf{E} \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{E}^H \mathbf{W}_{i-1} \quad (5)$$

この直交化した分離行列 $\mathbf{W}_i$ と更新前との変位が所望の誤差 ϵ 以上であれば、 $\mathbf{W}^H$ の更新を繰り返す。十分に収束したときの $\mathbf{W}^H$ が白色化信号 $\mathbf{Z}$ を最も独立な分離信号 $\mathbf{Y}$ に分離するための分離行列となる。

3. FPGA を用いた独立成分分析回路の実現

FPGA(Field Programmable Gate Array) はプログラミン

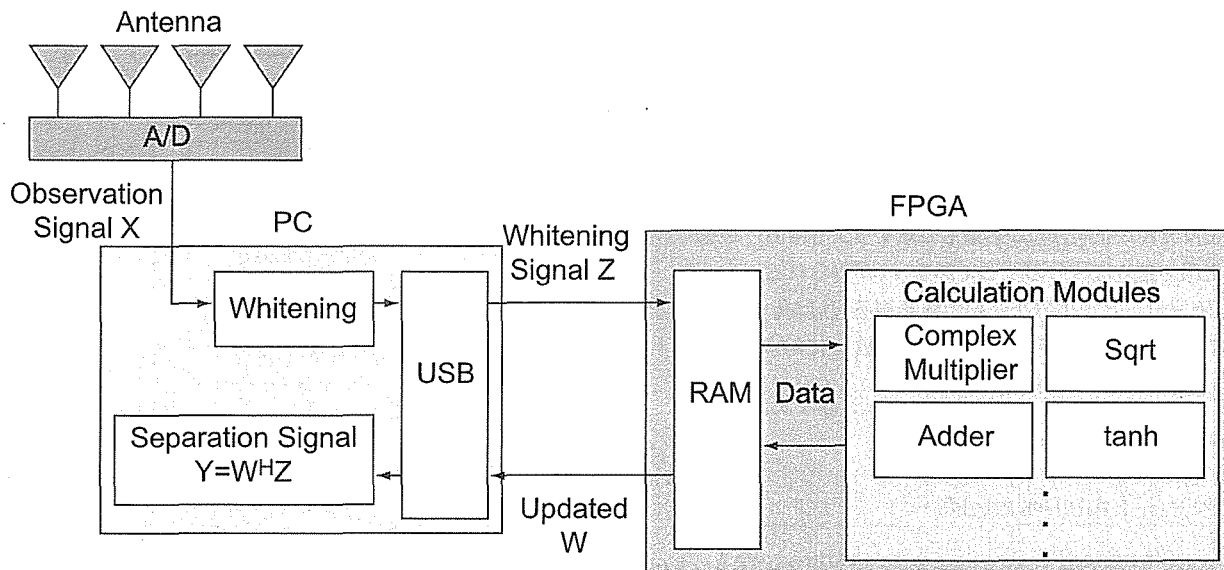


図 6 独立成分分析処理を行う回路構成

グが可能な LSI であり、回路構成の自由度が高く、複数の計算モジュールを並べることが可能である。したがって、並列処理を行うことが容易であり、画像処理用のアクセラレータや、PC と外部との I/O 部分など、処理全体のボトルネックとなっている部分を改善するために使用されている。また、規格が頻繁に変化する通信などへの応用も広がっており、現在様々な分野で使用されている。

FPGA では、基本的に数学関数を使用できず、三角関数などの数学関数を使用するためには、その関数を計算する回路を論理回路により作製するか、公開されている IP を使用するなどの工夫が必要になるが、現在、FPGA には複数の DSP が搭載されており、数値計算を含めて、LAN など様々な機能を実現するための IP (IP コア) が提供されている。IP コアは、大規模な論理回路の設計時に、特定の機能を持った回路の設計データであり、ソフトウェアにおけるライブラリに相当する。また、複数の乗算器などを搭載したものもあり、専用の回路を使用することにより、高速な計算が可能となる。したがって、行列の積・和などといった計算自体が単純で、並列性が高い計算に対して高速な計算が可能であると考えられる。

今回使用した複素数値 fastICA のアルゴリズムを含め、独立成分分析の計算は行列の積・和の計算が多く含まれているため、FPGA を用いた並列計算により高速化が可能であると考えられる。また、分離行列 $\mathbf{W}^H$ の計算や行列の直交化などの計算には、 $\tanh(x)$ の計算や平方根の計算などが必要であるが、適宜公開されている IP や LUT (Look Up Table) を使用することにより、任意の関数を実現し、種々の処理に対応する。

3.1 FPGA 上の回路構成

今回、独立成分分析処理を行うための回路は図 6 のような構成とした。まず、アンテナにより受信した観測信号 $\mathbf{X}$ を A/D 変換し、PC 上に読み込む。次に、PC 上で白色化処理を行い、白色化信号 $\mathbf{Z}$ を作製する。作製した白色化信号 $\mathbf{Z}$ を USB を介して FPGA 上のメモリに格納する。次に、FPGA 上に、 $\tanh$ や

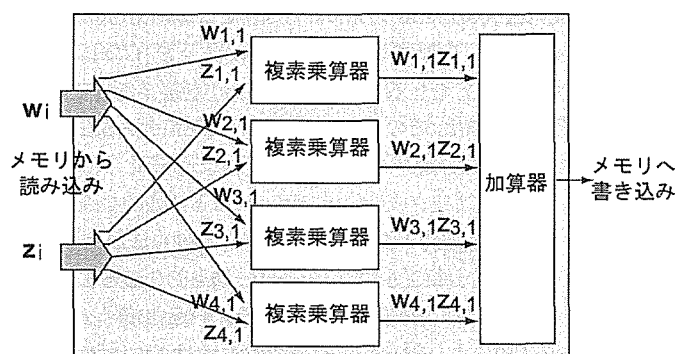


図 7 計算モジュールの例

$\sqrt{\cdot}$ 、複素数乗算器など、fastICA アルゴリズムの計算に必要なモジュールを作製し、白色化信号 $\mathbf{Z}$ などの FPGA 上のメモリに格納したデータに対して複素数値 fastICA のアルゴリズムに基づいて計算を行い、分離行列 $\mathbf{W}^H$ の推定の計算を行う。分離行列 $\mathbf{W}^H$ の更新を複数回 FPGA 上で行い、十分に収束したときの $\mathbf{W}^H$ が白色化信号 $\mathbf{Z}$ を分離するための行列であるため、この $\mathbf{W}^H$ を再び USB を介して PC に送信し、 $\mathbf{Y} = \mathbf{W}^H \mathbf{Z}$ の計算から、分離信号 $\mathbf{Y}$ を求める。

FPGA 上に作製する計算モジュールは、特に行列の積和などの単純な計算で、並列計算が容易なものに対しては、図 7 のように、ベクトルを一度にメモリから読み込み、複数の乗算や加算といった計算を同時に計算させることにより全体の処理に必要な時間の短縮を図る。

今回使用した FPGA は Xilinx 社の Virtex-4 XC4VFX12 である。今回は動作確認のため、複素数の固定小数点数とし、計算精度と回路規模を考慮し、FPGA 内での数値は 18bit の複素数値の固定小数点数を使用した。また、複素数値 fastICA のアルゴリズムにより信号の分離を行うためには、数百点程度のサンプル数の観測信号が必要であるため、今回はサンプル数を 512

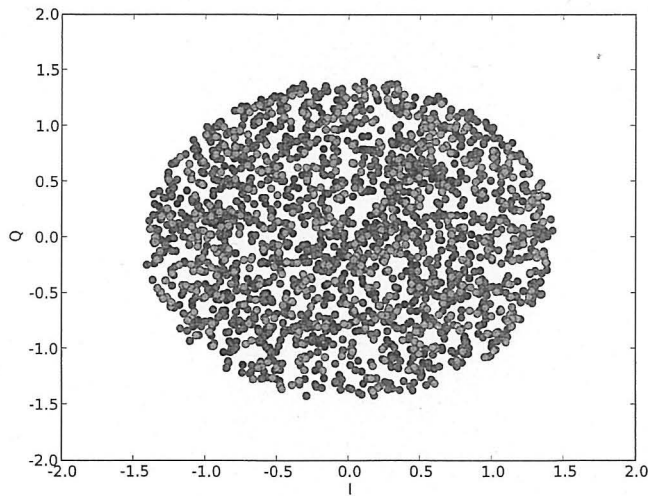


図 8 送信信号 S

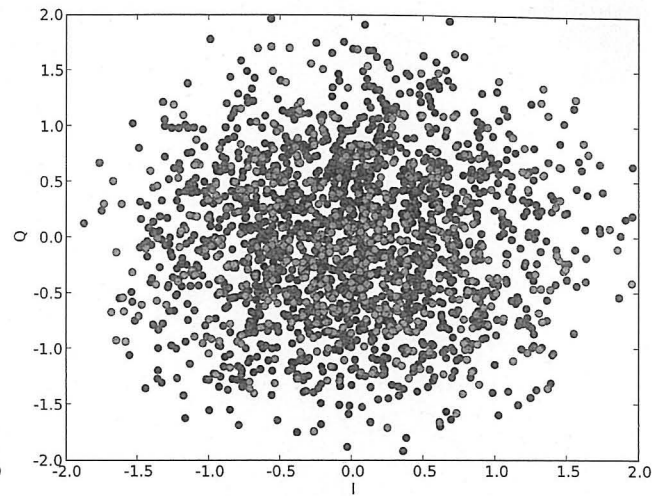


図 9 観測信号 X

点とした。

以上の条件で、今回、複素数値 fastICA 処理を行う回路を作製したとき、使用した FPGA 上の回路リソースは表 1 のようになった。

表 1 使用した FPGA リソース

Logic Utilization	Used
Number of Slices	4325(79%)
Number of Slice Flip Flops	2418(22%)

表内の”Slice”は FPGA 上での論理回路ブロックを表し、複数の LUT(Look Up Table)とフリップフロップ、マルチプレクサなどから構成されている。表 1 は、その Slice の使用率と、Slice 内のフリップフロップの使用率を表している。

3.2 ブラインド信号分離の実験結果

今回、複素数値 fastICA 処理により信号分離を行う回路の動作を確認するために、図 5 のような、4 送信 4 受信の無線通信系を考える。ここで、混合行列 $\mathbf{A}$ として任意の行列を与える。このとき、送信信号 $\mathbf{S}$ として図 8 のような一様分布の信号を送信したとき、送信信号 $\mathbf{S}$ に対して、混合行列 $\mathbf{A}$ を作用させたとき、観測信号 $\mathbf{X}$ として、図 9 のような分布の信号が得られた。

この観測信号 $\mathbf{X}$ に対して、複素数値 fastICA 処理のための前処理として白色化処理を行った結果が図 10 である。この白色化信号 $\mathbf{Z}$ に対して複素数値 fastICA アルゴリズムに従い、分離行列 $\mathbf{W}^H$ の推定を行い、分離信号 $\mathbf{Y}$ を求める。

3.2.1 計算時間

今回 FPGA 上に作製した回路の動作周波数は 90 [MHz] である。複素数値 fastICA アルゴリズムに基づいて分離行列 $\mathbf{W}^H$ の更新を行った結果を表 2 に示す。今回計算に使用した PC は Intel Celeron 1.73[GHz], 2.5 GB RAM である。この結果が

表 2 fastICA 計算時間の比較

	計算時間
PC	4.84 [s]
FPGA	98.7 [ms] (計算時間:75.7 [ms], データ転送時間:23.0[ms])

ら、FPGA を使用することにより PC での計算に比べて高速な計算が可能であると確認できた。今回試作した回路は複素数値 fastICA 処理の動作確認を目的としたものであるため、今後、回路構成などを改良することにより、計算時間の向上も可能であると考えられる。また、USB を用いたデータの転送についても改良の余地があり、全体の処理速度の向上が可能だと考えられる。

3.2.2 信号分離結果

図 10 に対して複素数値 fastICA アルゴリズムにより分離行列 $\mathbf{W}^H$ の推定を行った。今回の一様分布の送信信号 $\mathbf{S}$ に対しての計算では、分離行列 $\mathbf{W}^H$ の更新を 14 回行った時点で分離行列 $\mathbf{W}^H$ は十分に収束した。この分離行列 $\mathbf{W}^H$ を用いて、分離行列 $\mathbf{Y}$ を $\mathbf{Y} = \mathbf{W}^H \mathbf{Z}$ の計算から求めた結果、図 11 の分離信号 $\mathbf{Y}$ が得られた。

式 (6) は、各サンプル時刻における、送信信号 $\mathbf{S}$ と分離信号 $\mathbf{Y}^H$ の相関を計算したものである。 $E\{\cdot\}$ は $\cdot$ の期待値である。もし送信信号 $\mathbf{S}$ と分離信号 $\mathbf{Y}$ が完全に一致していれば、相関行列の計算結果として単位行列が得られる。したがって、この相関行列を計算することにより、送信信号 $\mathbf{S}$ と分離信号 $\mathbf{Y}$ の傾向がどの程度一致しているのかを評価することが出来る。

$$E\{\mathbf{S}\mathbf{Y}^H\} = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.05 & \underline{0.99} & 0.08 \\ 0.06 & 0.10 & 0.06 & \underline{1.00} \\ \underline{1.00} & 0.06 & 0.05 & 0.09 \\ 0.03 & \underline{1.00} & 0.04 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (6)$$

図 11 の分離信号 $\mathbf{Y}$ の分布と送信信号 $\mathbf{S}$ の分布を比較すると、

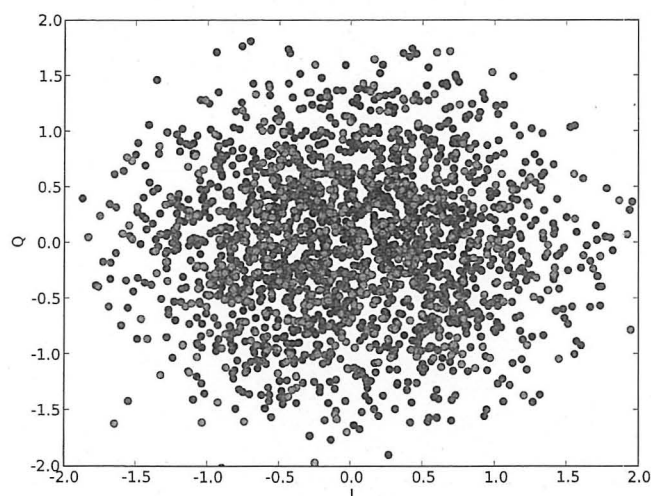


図 10 白色化信号 Z

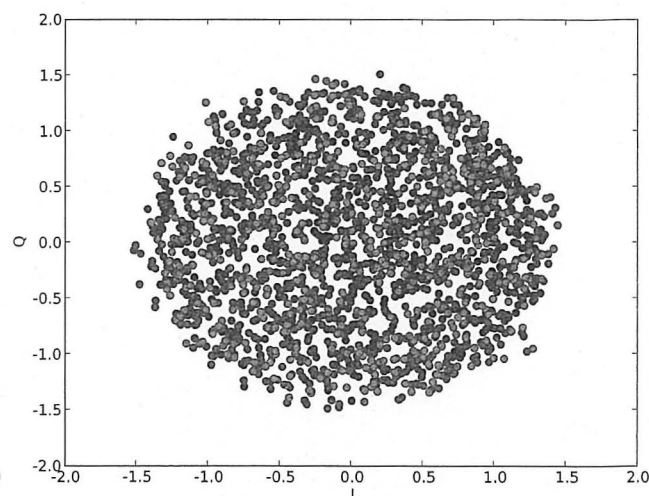


図 11 分離信号 Y

図 9 の観測信号 X の分布に比べ、送信信号 S に近い分布が得られている。このことから、複素数値 fastICA 処理を行うことにより、観測信号 X から送信信号 S の分布を分離することが可能であるということが確認できる。

また、送信信号 S と分離信号 Y の相関を求めた式 (6) を見ると、下線部の成分は大きさが 1 に近づいている。独立成分分析によるブラインド信号分離では、推定される信号の順番には任意性があるため、必ずしも対角成分が大きくなってはいない。しかし、相関行列の各列に 1 に近い成分があることから、分離信号 Y が送信信号 S に近づいていることを示し、信号の分離が可能であるということがわかる。

これらのことから、FPGA を用いた複素数値 fastICA 処理回路によりブラインド信号分離が可能である、ということが確認できた。

4. ま と め

本報告では、複素数値 fastICA 処理を行う回路の FPGA による実現について述べた。FPGA 上に複素数値 fastICA 処理を行う回路を作製し、4 送信 4 受信の無線通信系の混信信号の分離が可能であることを確認した。また、FPGA を用いることで PC により処理を行った場合に比べて、極めて高速な処理が可能であることを示した。以上のことから、今後、回路構成を改良し、より高速・高精度の処理を実現することにより、リアルタイムの信号分離処理の実現や、無線機への独立成分分析処理回路の実装を行うなどの応用も可能であると考えられる。

文 献

- [1] A.Hyvarinen, J.Karhunen and E.Oja, "Independent Component Analysis," John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [2] E.Bingham and A.Hyvarinen, "A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis of Complex-Valued Signals," Int.J.of Neural Systems, 10(1):1-8, 2000.
- [3] A.Hyvarinen and E.Oja, "A Fast Fixed-Point Algorithm for Independent Component Analysis," Neural Computation, 9:1483-1492, 1997.
- [4] G.Goslin, "A Guide to Using FPGAs for Application-Specific Digital Signal Processing Performance," Xilinx Inc.
- [5] B.Widrow, et.al., "Adaptive Antenna Systems," Proc.IEEE, 55(12):2143-2159, 1967.