



Title	独立成分分析によるMIMO受信荷重の直接推定に関する基礎検討
Author(s)	塩見, 英久; 岡村, 康行
Citation	電子情報通信学会技術研究報告. A・P, アンテナ・伝播. 2008, 108(5), p. 19-22
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/51307
rights	Copyright©2008IEICE
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

独立成分分析による MIMO 受信荷重の直接推定に関する基礎検討

塩見 英久[†] 岡村 康行[†]

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

E-mail: †{shiomi,okamura}@ee.es.osaka-u.ac.jp

あらまし MIMO 通信においてチャネル測定誤差は通信性能を劣化させる要因のひとつである。本報告では、チャネル測定精度に依存しない MIMO 受信荷重の直接決定方法を提案する。独立成分分析によるブラインド信号分離技術により、複数のアンテナから送信された信号を干渉なく受信することが可能であることを示した。チャネル行列の逆行列を用いる方法と提案手法とをシミュレーションにより比較したところ、チャネル測定誤差が過大な環境において提案手法がよく機能することを確認した。

キーワード 独立成分分析, MIMO, ブラインド信号分離

Direct Estimation of Weight Vectors using Independent Component Analysis for MIMO Receiver

Hidehisa SHIOMI[†] and Yasuyuki OKAMURA[†]

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

E-mail: †{shiomi,okamura}@ee.es.osaka-u.ac.jp

Abstract The error of channel measurement for a MIMO communication is one of the factors to debase the communication capacity. In this report, we propose a channel-measurement free direct determination method of the MIMO receiving weights. The simulation of the signal separation of the independent signals from each transmitting antenna was demonstrated. From the simulation results, the proposed method was worked well than a conventional method under the inaccurate channel measurement condition.

Key words Independent Component Analysis, MIMO, Blind Signal Separation

1. まえがき

MIMO 通信において、送受信荷重の決定方法は最も重要な課題のひとつである。多くの場合、チャネルの測定情報を基に送受信荷重を決定する手法が用いられる。しかしながら、装置校正誤差や非線形歪み、測定遅延などに起因するチャネルの測定誤差が通信性能を劣化させることがある [1]。本研究では、チャネル測定誤差が過大な環境において、チャネルの測定をおこなわずに通信信号から受信荷重を直接推定することによる通信性能の改善を試みた。受信荷重の直接推定には独立成分分析によるブラインド推定技術を用いた。独立成分分析は複数の観測点で測定した観測信号を線形結合により互いに最も独立な信号に分離する荷重を決定する手法である。これまでの検討で、著者らはシミュレーション及び実験にて適応アンテナの制御に独立成分分析を適用しブラインド信号分離が可能であることを示した [2]~[5]。本報告では、 $M=N=4$ の場合において、チャネル行列に複素ガウス分布する誤差が加算されている場合の各チャネ

ルの SINR をモンテカルロシミュレーションにより評価する。

2. シミュレーションモデル

本報告では簡単のため 4 送信 4 受信 MIMO 通信について考える。また、各々の送信アンテナから別々の独立な信号が送信され、電力は当分配されるものとする。図 1 にシミュレーションする通信モデルを示す。送信信号を MIMO エンコーダにて 4 系統の信号 $s_1(t), s_2(t), s_3(t), s_4(t)$ に分解し、各々の信号を対応する送信アンテナへ等電力で給電、放射する。ここで、送信信号ベクトルを $s(t) = [s_1, s_2, s_3, s_4]^T$ とする。送信信号は各々時間に対して平均 0、分散 1 の一様分布する複素数値信号であるとする。放射された電波信号は伝搬環境の影響を受けつつ受信アンテナへ到来する。受信アンテナでは到来信号を複素振幅 $x_i(t)$ として観測する。ここで、 i は各々の受信アンテナに割り振った単一の番号を示す。受信アンテナで観測した信号 $x(t) = [x_1 \cdots x_N]^T$ は式 (1) のように表せる。

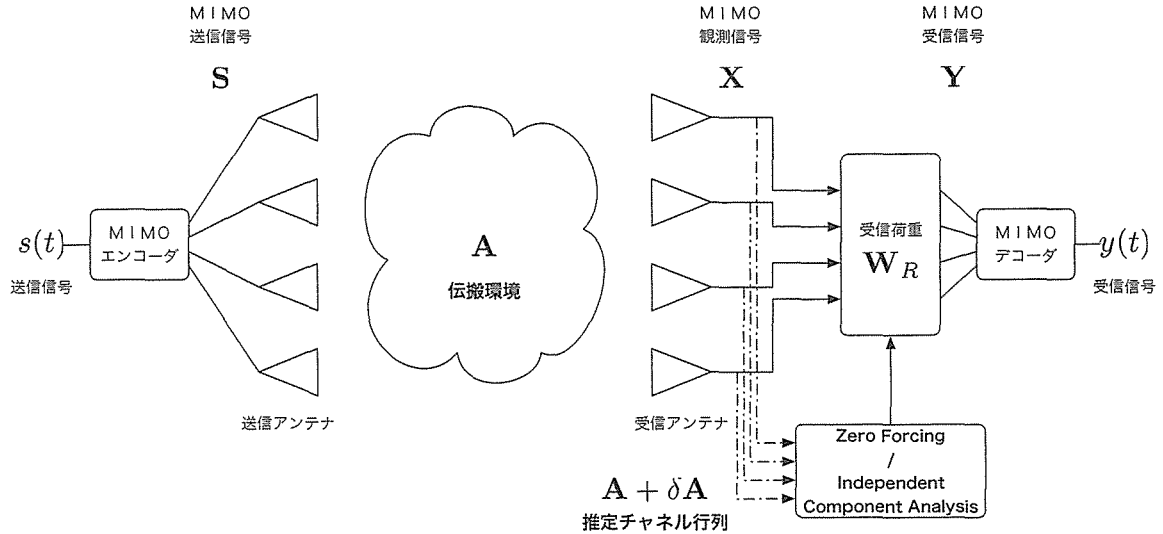


図1 シミュレーションモデル

$$x(t) = As(t) + n(t) \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix}$$

ここで、 A はチャネル行列、 n は受信機が付加する雑音を示す。チャネル行列の各要素を $a_{ij} = x_{ij} + jy_{ij}$ とおいたとき、 x_{ij} 及び y_{ij} は平均値が0で同じ分散 σ_a^2 を有する互いに独立なガウス過程にて発生するものとする。このとき、 x_{ij} 及び y_{ij} の結合確率密度関数は式(2)に示す二変数の正規分布で与えられるものとした。

$$f_{a_{ij}}(x_{ij}, y_{ij}) = \frac{1}{2\pi\sigma_a^2} \exp\left(-\frac{x_{ij}^2 + y_{ij}^2}{2\sigma_a^2}\right) \quad (2)$$

$s_i(t)$ の(平均, 分散)を(0,1)と正規化すると、 σ_a^2 は受信信号の平均電力に等しくなる。チャネル行列は未知であり時変であるが、その変動は通信時間に比して十分にゆっくり変化するため、検討する時間範囲ではチャネル行列は時不変であるとする。

観測信号 $x(t)$ を受信荷重 W_R を係数として式(3)線形結合することにより、復元信号 $y(t) = [y_1, y_2, y_3, y_4]^T$ が得られる。得られた復元信号を MIMO デコーダにより適切に合成することで受信信号 $y(t)$ が得られる。ただし、受信荷重 W_R の各列要素はノルム 1 に正規化されているものとする。

$$y(t) = W_R^H x(t) \quad (3)$$

3. 受信荷重の決定方法

複数の送信アンテナから異なる信号 s_i を送信するため、信号間干渉を解消するために適切な受信荷重を決定しなければならない。受信荷重の決定には様々な方法が提案されているが、ここでは簡単な逆行列による復元を比較対象として用いる。ここでは、未知のチャネル特性をなんらかの方法(パイロット信号を用いた MMSE 法など)で行列 $A + \delta A$ として推

定できたとする。 δA は測定誤差である。このとき、復元行列を $W_R^H = (A + \delta A)^{-1}$ で与える。チャネル測定誤差 δA が十分小さい場合、 $W_R^H \approx A^{-1}$ となるため、 $y(t) \approx s(t)$ となることが期待できる。しかしながら、誤差が大きい場合、信号分離特性が劣化すると考えられる。

そこで、測定誤差が大きい場合に良好な信号分離特性を与える、受信荷重を独立成分分析を用いて決定する方法を提案する。独立成分分析は1986年、Herault と Jutten により最初に提案され、1997年、高速で安定した fast-ICA が Hyvärinen と Oja により提案され、特に音声信号処理と医療画像処理への応用が活発に行われている。無線通信への応用も始まっており、適応アンテナのブラインド制御への応用例がいくつか報告されている[2]~[8]。独立成分分析は送信信号 $s(t)$ の各要素 s_i が互いに統計的に独立に発生すると仮定し、観測信号 $x(t)$ の線形結合で得られる受信信号 $y(t) = W_R^H x(t)$ が互いに独立となるように復元行列 W_R を決定する方法である。互いに独立となった受信信号 y と送信信号 s は要素各々の分散と要素の順番との不定性を除いて一致する。したがって、観測信号 x を独立成分分析することにより送信信号 s を復元する行列 W_R が直接得られることとなる。パイロット信号などを用いずに受信荷重を直接推定するため、装置校正誤差や非線形歪み、測定遅延などに起因するチャネルの測定誤差による通信性能の劣化に強い荷重決定方法である。また、独立成分分析はセミパラメトリック推定法であるため、一般にブラインド推定法としてしばしば用いられるノンパラメトリック推定法と比較して計算量が大変少ないことも無線通信への応用に適している。

無線信号を独立成分分析で処理する際に最も人気のある方法は、複素数値 fastICA [9] である。信号の独立性を測る基準として情報エントロピーを、これを最小化する方法として不動点法を用いる方法である。具体的には、復元行列 W_R の各列要素 w_i について、式(5)を w_i の変化が収束するまで反復することで得られる。

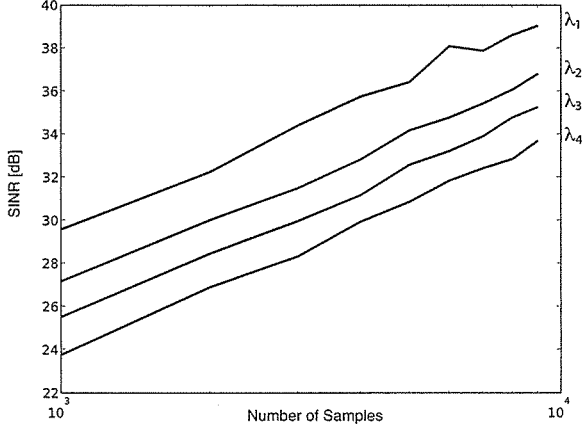


図 2 各チャネル信号の信号対干渉雑音比と推定に用いる信号のサンプル数との関係 (SNR = 100dB, N=4, Iter = 100)

$$w_i \leftarrow E \left\{ z (w_i^H z)^* g \left(|w_i^H z|^2 \right) \right\} - E \left\{ g \left(|w_i^H z|^2 \right) + |w_i^H z|^2 g' \left(|w_i^H z|^2 \right) \right\} w_i \quad (4)$$

$$w_i \leftarrow w_i / |w_i|$$

ここで、 $g(x) = \tanh(x)$ 、 $g'(x) = 1 + \tanh(x)$ であり、 z は x を無相関化 (球面化) した信号である。

4. 計算結果

受信機の雑音指数が 0 である場合、すなわち観測信号に受信雑音が含まれない場合には、独立成分分析により推定された受信信号 y は送信信号 s と一致する。しかしながら、観測信号に受信雑音 n が含まれる場合には、 y と s の一致精度は雑音電力とサンプル数に依存して変化する。図 2 に受信信号の SINR と推定に用いる信号のサンプル数との関係を示す。ここで、SINR は式 (??) で計算した。また、SNR は各受信機で観測される信号電力 $E[x_i^2]$ と加算される雑音電力 $E[n_i^2]$ との比を示す。

$$SINR = \frac{E[y\hat{s}^*]^2}{E[y\hat{y}^*] - E[y\hat{s}^*]^2} \quad (5)$$

また、信号数 $N = 4$ 、シミュレーションの試行回数を $Iter = 100$ 回とし、図示した SINR は全試行に対する SINR の相加平均とした。図より、サンプル数と SINR との間には線形の関係があり、おおよそ 1 対 1 の関係にあることがわかる。20dB 程度の SINR を得るには、最大チャネルで約 100 点程度、最小チャネルで約 400 点程度のサンプル数が必要となることがわかる。

次に、逆行列により復元行列を求める場合に、各チャネル信号の SINR とチャネル推定誤差との関係を計算した。ここで、送信荷重 $W_T = [1, 1, 1, 1]^T$ 信号のサンプル数 $M = 5000$ とした。また、チャネル推定誤差行列 δA の各要素を $\delta a_{ij} = \delta x_{ij} + j\delta y_{ij}$ とおいたとき、 δx_{ij} 及び δy_{ij} は平均値が 0 で同じ分散 $\sigma_{\delta a}^2$ を有する互いに独立なガウス過程にて発生するものとする。このとき、 δx_{ij} 及び δy_{ij} の結合確率密度関数は式 (6) に示す二変数の正規分布で与えられるものとした。また、チャネル推定誤差は $\sigma_a^2/\sigma_{\delta a}^2$ [dB] で代表させた。

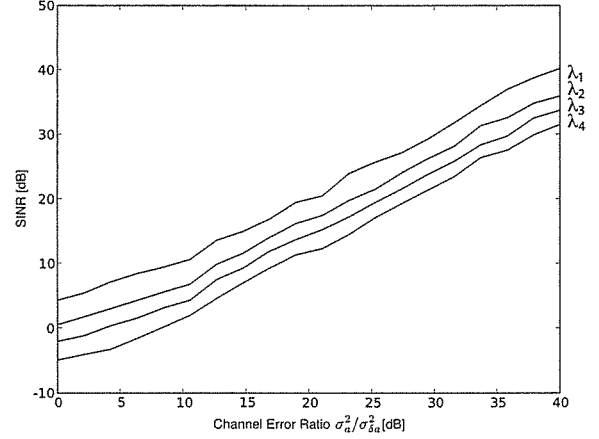


図 3 逆行列により復元行列を求める方法における各チャネル信号の信号対干渉雑音比とチャネル推定誤差との関係 (SNR = 100dB, N=4, M=5000, Iter = 100)

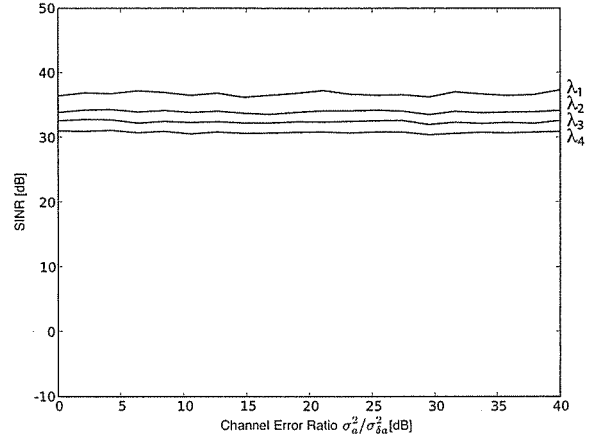


図 4 提案手法により復元行列を求める方法における各チャネル信号の信号対干渉雑音比とチャネル推定誤差との関係 (SNR = 100dB, N=4, M=5000, Iter = 100)

$$f_{\delta a_{ij}}(\delta x_{ij}, \delta y_{ij}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\delta a}^2} \exp\left(-\frac{\delta x_{ij}^2 + \delta y_{ij}^2}{2\sigma_{\delta a}^2}\right) \quad (6)$$

図 3 に計算結果を示す。チャネル推定誤差が増加するに従って、ほぼ線形に SINR が劣化してゆく様子がわかる。これは、復元信号に推定誤差により発生する誤差信号が干渉信号成分として含まれるためであり、誤差信号の電力はチャネル推定誤差の分散 $\sigma_{\delta a}$ に比例することがわかった。また、提案手法により直接復元行列を求める場合の SINR とチャネル推定誤差との関係を計算した結果を図 4 に示す。独立成分分析は、受信信号が互いに統計的に独立となるように復元行列を決定するため、SINR はチャネル推定誤差とは無関係にほぼ一定値を示す。

最後に、送信荷重 W_T と受信荷重 W_R を測定チャネル $A + \delta A$ の特異値分解により求めた場合の計算結果を図 5 に示す。チャネル推定誤差が小さい場合、逆行列による方法と比較して送信ダイバーシチの効果により SINR が向上していることがわかる。また、送信荷重は特異値分解により求めるが、受信荷重は

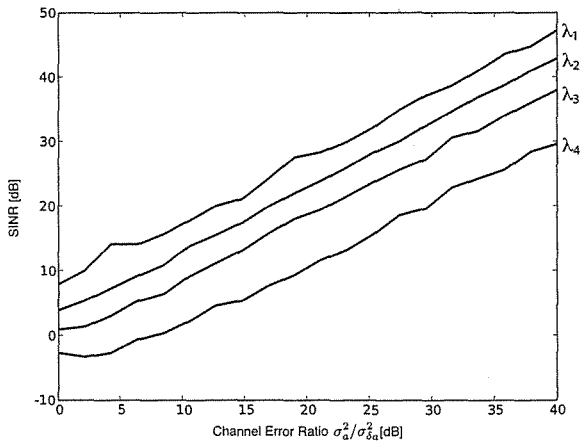


図5 特異値分解により受信荷重を求める方法における各チャネル信号の信号対干渉雑音比とチャネル推定誤差との関係 (特異値分解により送信荷重を決めた場合)

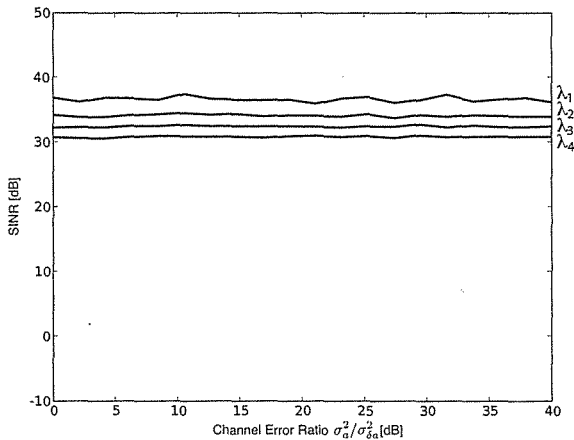


図6 提案手法により受信荷重を求める方法における各チャネル信号の信号対干渉雑音比とチャネル推定誤差との関係 (特異値分解により送信荷重を決めた場合)

提案手法にて求めた場合の計算結果を図6に示す。この場合も、SINRはチャネル推定誤差に関わらずほぼ一定値を示した。

5. まとめ

各送信アンテナが独立な信号を送出するタイプのMIMO通信システムにおいて、独立成分分析により受信荷重を直接推定する手法を提案し、チャネル推定誤差に対するSINRの変化を検討した。送受信アンテナが 4×4 の場合について検討した。提案手法では、サンプル数が400点程度あればすべてのチャネルでSINRが20dB程度確保できることがわかった。また、チャネル推定誤差にかかわらず一定のSINRが確保できることをシミュレーションにて確認した。

文 献

- [1] 高岡辰輔, ガチャニンハリス, 安達文幸, “OFDM/TDMにおけるチャネル推定誤差の影響,” 信学技報, CS2004-153, pp.7-12, 2005.
- [2] 高橋明日香, 塩見英久, 岡村康行, “独立成分分析による複数無線

- タグの同時読取に関する検討,” 信学総合大会, B-1-132, 2005.
- [3] 塩見英久, 中尾武志, 岡村康行, “独立成分分析によるアレイ信号処理とそのアンテナシステムへの応用,” 輻射科学研究会, RS05-13, 2006.
- [4] H.Shiomi, T.Nakao and Y.Okamura, “Novel Adaptive Algorithm using Independent Component Analysis for Array Antenna System,” ISAP06, TE2-2, Nov. 2006.
- [5] 矢田達郎, 塩見英久, 岡村康行, “独立成分分析によるマイクロ波混信信号のブラインド分離実験,” 信学技報, MW2007-92, 2007.
- [6] E.Carlos and J.Takada, “ICA based blind source separation applied to radio surveillance,” IEICE Trans. Commun., vol.E86-B, no.12, pp.3491-3497, Dec. 2003.
- [7] K. Yokoi, N. Hamada, “ICA-Based Separation and DOA Estimation of Analog Modulated Signals in Multipath Environment,” IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.11, pp.4246-4249, Nov. 2005.
- [8] 今井光治, 市毛弘一, 新井宏之, “FastICAによるデジタル変調信号のブラインド信号分離,” 信学技報, AP2006-35, pp.7-12, 2006.
- [9] A.Hyvarinen, J.Karhunen and E.Oja, “Independent Component Analysis,” John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- [10] 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.