

システム要求に応じた MIMO 用受信アルゴリズム

MIMO Receiving Algorithms Appropriate to System Requirements

田邊 康彦 青木 亜秀 マグナス サンデル

■ TANABE Yasuhiko ■ AOKI Tsuguhide ■ Magnus Sandell

無線通信の分野で、複数の送受信アンテナを用いて通信を行う MIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送方式が注目を集めている。MIMO 伝送では目的に応じて様々な送信方式が考案されており、その中の一つとして、高速化を実現する空間多重方式が挙げられる。空間多重方式は複数の送信アンテナから異なる信号を同時に送信する方式であり、受信機はこれらの信号が混信した信号を受信する。このような受信信号から送信信号を正確に推定する必要があるが、受信アルゴリズムによって通信品質が大きく異なる。一方で、システムによっては通信品質ではなく消費電力や処理遅延を小さく抑えることが要求される場合もあり、東芝は異なる特長を持つ様々な受信アルゴリズムを提案している。

Multiple input multiple output (MIMO) transmission has recently been attracting attention in the field of wireless communication systems, and various transmission methods have been proposed. Spatial multiplexing, where two or more different signals are transmitted in parallel using multiple transmitting antennas, is one of the MIMO transmission methods available to realize high-speed transmission. A receiver has to recover this mixture of signals in the air, and its performance greatly depends on the receiving algorithm. On the other hand, system requirements may differ and high performance is not always demanded; sometimes the priority might be placed on reducing the computational load.

In response to these diverse requirements, Toshiba has developed a number of receiving algorithms with different features appropriate for the respective systems.

1 まえがき

送信端末及び受信端末の双方において、複数のアンテナ及び複数の無線機を用いて伝送を行う MIMO (Multiple Input Multiple Output) 伝送が注目を集めている。MIMO 伝送では通信に用いる周波数帯域幅を拡張することなく、通信路容量をアンテナ数(無線機の数)に比例して増加させることができるため、通信速度を向上させ、通信品質を改善する技術として期待されている。

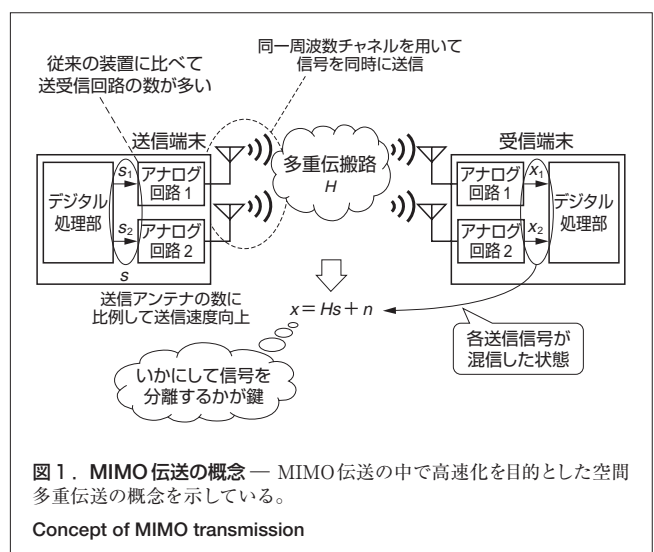
このような MIMO 伝送技術の一つとして空間多重方式が挙げられる。空間多重方式は、各送信アンテナから異なる信号を並列に伝送する方式であり、送信アンテナ数に比例して伝送速度を高めることができる。しかし、各送信アンテナから異なる信号を同時、かつ同一周波数で送信するため、受信端末はこれらの信号が混信した信号を受信することになる。そこで、このような受信信号から各送信アンテナが送信した信号を推定する必要があるが、推定を行う手法(以下、受信アルゴリズムと呼ぶ)によって推定精度が大きく異なる特徴がある。一方、携帯端末などでは推定精度よりも装置の消費電力や処理遅延を小さく抑えることが要求される場合もあり、システムによって重要視される項目が異なるため、最適な受信アルゴリズムも異なってくる。

東芝は特長が異なるいくつかの方式を提案しており、こ

では、その中から三つの受信アルゴリズムについて述べる。

2 空間多重方式を用いた MIMO 伝送

各送信アンテナから異なる信号を並列に送信する空間多重方式を図1に示す。図1は送信アンテナが2本の場合の例であり、送信端末のデジタル処理部において生成される変調信号 s_1 と s_2 をそれぞれ異なるアナログ回路を通して並列



に伝送する。この結果、1本のアンテナから信号を送信する場合に比べて伝送速度が2倍になる。このように、空間多重方式では送信アンテナ数に比例して伝送速度を増加させることができ、周波数帯域幅や変調多値数などを増加させずに伝送速度を向上させることができる。

空間多重方式で送信された信号は、屋内伝送においては天井や、床、壁、家具などの障害物で、屋外伝送においては道路や、ビル、通行人、車など様々な障害物で、反射・散乱・回折して受信される。この結果、各送信アンテナから送信した信号は、それぞれ異なる振幅及び位相で各受信アンテナに受信されるため、伝搬路における遅延広がりが変調信号のシンボル長よりも十分小さいと仮定すると、伝搬路応答は複素数を用いて表すことができる。

次に、各アンテナで受信する信号について考える。前述したように、各送信アンテナから同時に異なる信号 s_1 と s_2 が同一周波数で送信されるため、各アンテナで受信する信号は、送信アンテナ1及び2から送信された信号が混信している。そこで、受信アンテナ1及び2で受信する信号 x_1 及び x_2 は次式のように表すことができる。

$$x_1 = h_{1,1} \cdot s_1 + h_{1,2} \cdot s_2 + n_1 \quad (1)$$

$$x_2 = h_{2,1} \cdot s_1 + h_{2,2} \cdot s_2 + n_2 \quad (2)$$

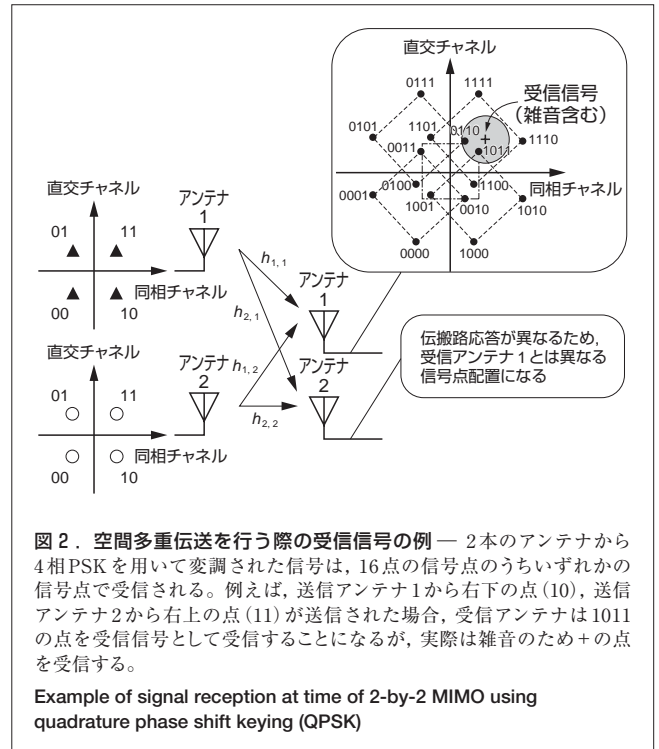
ただし、 $h_{i,j}$ は j 番目の送信アンテナと i 番目の受信アンテナ間の伝搬路応答、 n_1 、 n_2 はそれぞれアナログ回路1、2で付加される雑音を表している。

MIMO 伝送は一般に伝搬路応答が未知では復調できないため、あらかじめ既知の信号を送信し、受信端末に伝搬路応答を推定させる。この結果、式(1)、(2)において雑音が無視できる場合、未知変数は送信された信号 s_1 と s_2 だけになり、連立方程式を解くことにより送信された信号を一意に推定できる。しかし、一般に無線通信では雑音が無視できるほどの信号電力は得られないため、雑音の影響を受けた受信信号から送信信号を推定しなければならない。

3 空間多重伝送におけるMIMO受信アルゴリズム

前章で述べたように、空間多重方式を用いたMIMO伝送では、混信した複数のアンテナから送信された信号を雑音の影響が無視できない受信信号から推定しなければならない。受信アルゴリズムによって推定精度が異なるため、電波の環境がまったく同じ場合でも通信品質が大きく異なってしまう。

もっとも精度の高い受信アルゴリズムとして最尤(さいゆう)推定法が挙げられる。この推定法について、二つの送信アンテナを用いて各アンテナから4相PSK(Phase Shift Keying)変調した信号を送信する例を図2に示す。各アンテナから異なる送信ビットに対応して生成されたシンボルが



送信され、これらの信号が伝搬路応答で加重合成される。この結果、図2に示すように16点の信号点“●”のうち、いずれか1点を受信するが、雑音が付加されることにより、“+”の点のようにずれた受信信号として得られる。そこで、受信信号とすべての信号点の距離を計算し、もっとも受信信号に近い信号点のビットを送信されたビットと推定することによって、最適な信号判定を実現できる。しかし、受信する可能性のある信号点は、通信に用いる変調方式の変調多値数及び送信アンテナの数に伴って指数関数的に増加してしまう問題点がある。例えば、無線LANの規格であるIEEE802.11a(米国電気電子技術者協会規格802.11a)や11gで用いられている64QAM(Quadrature Amplitude Modulation)を4本のアンテナから送信する場合、 $64^4 = 1,677$ 万7,216点となり、実時間で信号点を探索することが困難になる。

3.1 Max-Log-MAP Sphere Decoding

前述のような問題を解決する手法の一つとして、Sphere Decodingが知られている。Sphere Decodingではすべての信号点と受信信号の距離を計算するのではなく、図2に示すように、受信信号を中心とした一定の領域内にある信号点だけの距離を計算する(図2の例では“0110”と“1011”の2点)。この結果、演算量を大幅に削減することができ、少ない演算量で最適なMIMO受信を実現できる。

一方、送信する情報を誤り訂正符号化した後、変調を施して送信する場合を考える。このとき、復号方式が硬判定復号の場合は、Sphere Decodingを用いて受信信号にもっとも近い信号点(最尤点)のビット列を求めるだけで構わないが、

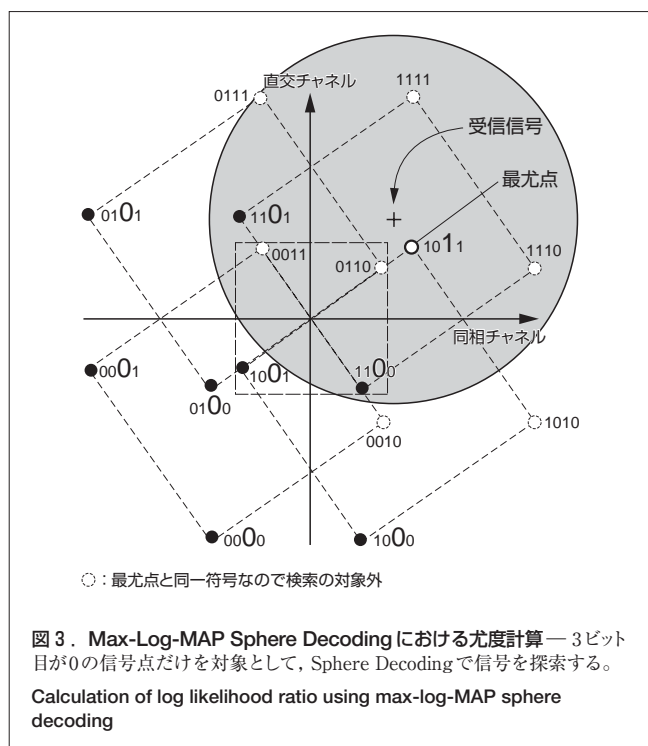
軟判定復号を行う場合は、各ビットの尤度（信頼度情報）を求める必要がある。この場合、最尤点と受信信号の距離のほかに、最尤点と異なるビットを持つ信号点のうち、少なくとも受信信号からもっとも近い信号点の距離を求める必要がある（図2の例では、最尤点“1011”のほかに、1ビット目が0の点、2ビット目が1の点、3ビット目が0の点、及び4ビット目が0の点の計5点）。

しかし、図2のように Sphere Decoding を適用した場合、距離を計算する信号点は2点だけであり、3ビット目が0の点の距離を求めることができない。また、距離を計算する領域を拡大し、軟判定復号を行うために必要な信号をすべて同時に求めようとすると、Sphere Decoding による演算量削減効果が小さくなってしまふ。

Max-Log-MAP (Maximum A Posteriori probability) Sphere Decoding⁽¹⁾は以上の問題を解決するために考案した手法である。まず、図2に示した従来の Sphere Decoding と同様に最尤点を求め（図2の例では“1011”の点）、その後、各ビットの尤度を求めるため再度 Sphere Decoding を適用する。

3ビット目の尤度を求める場合の例を図3に示す。最尤点の3ビット目が1なので、3ビット目が1の点（図3の白抜き点）は探索の対象外とし、3ビット目が0の点だけの距離を、Sphere Decoding を用いて計算する。このような計算を各ビットに対して適用することにより、確実に Max-Log-MAP で近似された各ビットの尤度を求めることができる。

Max-Log-MAP Sphere Decoding は高精度な受信を実現できるが、複数回 Sphere Decoding を適用する必要がある



ため、演算量が増加してしまふ。そこで、演算量の増加を防ぐため、信号の探索回数に制限を加えたり、各ビットの尤度を求める際に計算した距離を共有したりすることによって、演算量を削減している⁽¹⁾。

3.2 SGA

この節では、二つ目のMIMO受信方式としてSGA (Sequential Gaussian Approximation) について説明する⁽²⁾。前節で述べたMax-Log-MAP Sphere Decodingは、複数のアンテナから送信された信号を同時に推定する際の演算量を削減する方式であるが、伝搬路の状況や雑音電力に応じて演算量が異なり、設計が複雑になる問題点がある。SGAはこのような問題を解決するため、図4に示すように各信号を再帰的に順次推定していく手法である。

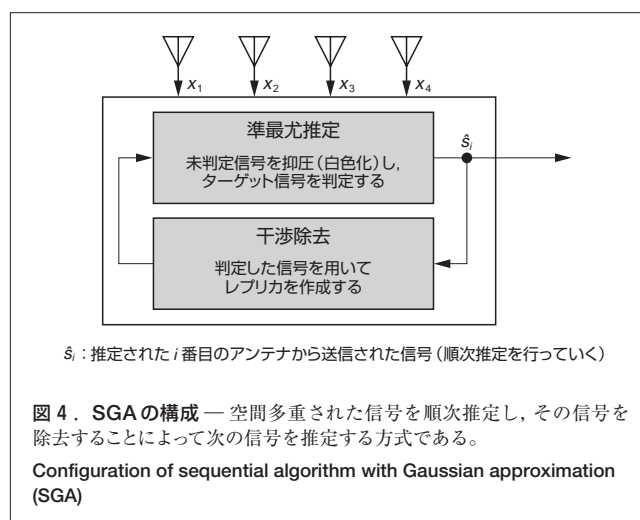
SGAでは推定する信号を次の三つに分類する。

- (1) 既に推定した信号
- (2) 推定を行うターゲット信号
- (3) 未推定の信号

この分類をした後、(1)についてはレプリカを生成して干渉を除去し、(3)については信号がガウス分布に従うと仮定して白色化する。以下に、具体的な処理手順について説明する。

まず、1番目の送信アンテナから送信された信号1をターゲットとし、ほかのアンテナから送信された信号を抑圧（白色化）しながら最尤推定を行う。ここで、伝搬路を介して得られる信号がガウス分布に従うと仮定すると、受信信号から信号1を除いた信号の相関行列を用いると、(3)の信号の影響を抑圧した距離を計算することができる。

次に、ここで得られた判定結果を用いて2番目の送信アンテナから送信した信号の推定を行う。このとき、1番目の送信アンテナから送信された信号は(1)に分類して、3番目以降の送信アンテナから送信された信号は(3)に分類し、1番目の送信アンテナから送信された信号を推定した場合と同様に、不要信号として抑圧しながら推定を行う。



以上の過程をすべての送信信号の推定が完了するまで適用する。このようにSGAは、各アンテナから送信された信号を再帰的に処理していくため演算量が伝搬路によらず一定であり、処理遅延を一意に見積もることができる。一方で、すべてのビットの尤度を計算できる保証がなく、一部のビットの尤度を近似する可能性があるため、Max-Log-MAP Sphere Decodingに比べて受信性能は若干劣化してしまう。

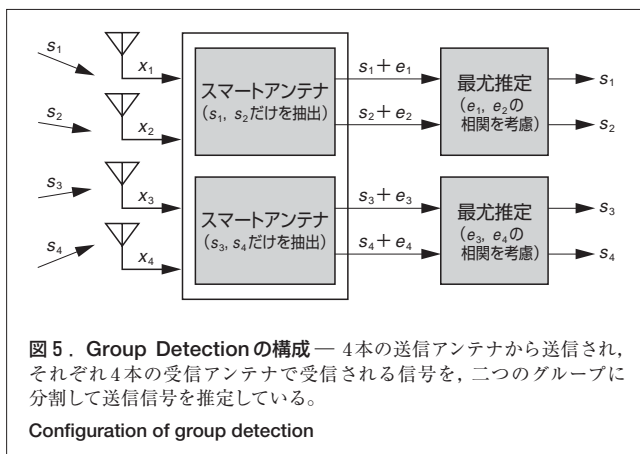
3.3 Group Detection

Max-Log-MAP Sphere DecodingやSGAは、最尤推定法に比べると演算量は削減されているものの、送信アンテナ数の増加に伴い演算量は増加してしまう。Group Detection⁽³⁾は各アンテナから送信された信号を複数のグループに分割し、グループごとにグループ内に含まれる信号だけを最尤推定で行う方式である。

送信アンテナ1及び2で送信された信号をグループ1に、送信アンテナ3及び4で送信された信号をグループ2に分類する場合のGroup Detectionの構成を図5に示す。

はじめに、各グループに含まれる信号だけを抽出する必要がある、スマートアンテナ技術を用いて信号の分離を行う。この結果抽出された s_1 及び s_2 にはそれぞれ有相関の不要信号 e_1 及び e_2 が含まれる。そこで、SGAで用いた手法と同様に不要信号を抑圧しつつ最尤推定を適用することによって、グループ内の信号を最尤推定する。この推定を全グループに適用する。

このように、Group Detectionでは空間多重された信号を仮想的にグループ内の信号数に削減できるため、後段の最尤推定で探索する信号数を大幅に削減することができる。なお、後段の最尤推定は、最尤推定の代わりにMax-Log-MAP Sphere DecodingやSGA、その他の方式に置き換えることが可能であり、他の方式と併用して演算量削減を実現できる。しかし、スマートアンテナを用いて信号を分離するため、スマートアンテナの性能に受信性能が大きく制限される問題点がある。この問題を解決するため、一つのアンテナ



ナから送信された信号を複数のグループにオーバーラップさせたり、グループ内の信号の組合せを変えて複数のグループに含ませたりすることで、性能改善を実現している⁽³⁾。

4 あとがき

ここでは、複数の送受信アンテナを用いて伝送を行うMIMO伝送のうち、高速化を目的として各送信アンテナから独立な信号を並列に伝送する空間多重方式のMIMO受信アルゴリズムについて述べた。MIMOは様々な無線通信に適用可能な伝送方式であり、大規模な固定無線と携帯用小型端末では要求される仕様が異なる。したがって、受信アルゴリズムも推定精度だけが要求されるのではなく、用途によっては消費電力や回路規模、処理遅延を小さくすることが要求される。

当社は、高い受信性能を得ることを主目的としたMax-Log-MAP Sphere Decodingや、演算量の削減を主目的としたGroup Detection、処理遅延が小さいSGAなど、異なる特長を持つ様々な方式を提案してきた。ここでは、これらの方式の概要を述べるにとどまったが、パラメータの調整や処理の一部変更によって、性能と演算量を細かく制御することができる。したがって、製品化の際は、対象となる製品の要求に適した受信アルゴリズムを提供することが可能であり、システムの最適化に貢献することが期待される。

文献

- (1) Mong Suan Yee. "Max-Log-MAP sphere decoder". IEEE International Conference on Acoustic Speech and Signal Processing (ICASSP). Philadelphia, PA, USA, 2005-03, IEEE Signal Processing Society, p.18 - 23.
- (2) Yugang Jia, et al. Gaussian approximation based mixture reduction for near optimum detection in MIMO systems. IEEE Trans. Commun. Letters. **11**, 9, 2005, p.997 - 999.
- (3) Aoki, T, et al. Reduced Complexity Max-Log-MAP Sphere Decoder Using Group Detection in MIMO-OFDM Systems. IEICE Trans. Commun. **E88-B**, 11, 2005, p.4220 - 4228.



田邊 康彦 TANABE Yasuhiko, Ph.D.

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー 研究主務、工博。無線LANの物理層の研究・開発に従事。電子情報通信学会、IEEE会員。
Mobile Communication Lab.



青木 亜秀 AOKI Tsuguhide

研究開発センター モバイル通信ラボラトリー。無線LANの物理層の研究・開発に従事。電子情報通信学会、IEEE会員。
Mobile Communication Lab.



マグナス サンデル Magnus Sandell, Ph.D.

東芝欧州研究所 通信研究所チーフリサーチャーフェロー、工博。信号処理・デジタル通信の研究に従事。IEEE会員。
Toshiba Research Europe Ltd.
Telecommunications Research Lab.