

寄稿

MIMO その実力に迫る



電気通信大学 教授
工学博士
唐沢 好男
Yosio KARASAWA

高機能モバイル情報通信やユビキタスネットワーク時代の足音が近づき、それを支えるワイヤレス情報伝送技術の研究が元気である。その研究開発動向は本誌のNo. 13⁽¹⁾に、それを支える種々の要素技術についてはNo. 14⁽²⁾に取り上げられているので、本稿では、その要素技術の一つ、MIMOに焦点を当て、この技術を詳しく述べる。MIMOは送受信の双方にアレーアンテナを用いて情報伝送を行うシステムであり、最近の無線通信技術の国際会議での最もホットなテーマになっている。

MIMOはその学問的な体系において、アンテナ構成とその制御方法を実現するアレー信号処理の技術、効率的な情報伝送を実現する情報理論・符号化技術（時空間符号化技術）、チャネルの推定やモデリングを行う電波伝搬の技術に大別される。本稿では、ワイヤレス情報通信への応用に主眼をおいて、電波伝搬的視点からその実力に迫ってみたい。

1. MIMO とは

MIMOはMulti-Input Multi-Output（またはMultiple-Input Multiple-Output）の略語で、多入力・多出力システムの総称である。通信の分野では、送受信の双方にアレーアンテナを用いて情報伝送を行うシステムに用いられることが多く、この場合は、高度なスペースダイバーシチの技術と位置づけられる。広く解釈すれば、マルチユーザ環境での通信システム（多元接続方式）や干渉波除去・分離方式、直交偏波共用方式、周波数領域にデータを展開して並列伝送するOFDM（直交周波数分割多重）もMIMOといえるが、ここでは、送受信にアレーアンテナを用いるシステムを対象とする。

なお、送受信のアンテナ構成によって、以下のよう

- SISO (Single-Input Single-Output) : 送受信とも単一アンテナ
- SIMO (Single-Input Multi-Output) : 送信側が

単一アンテナ、受信側がアレー

- MISO (Multi-Input Single-Output) : 送信側がアレー、受信側が単一アンテナ
- MIMO (Multi-Input Multi-Output) : 送受信ともアレー

SISOを基本として、SIMOは受信側にスペースダイバーシチやアダプティブアレーを取り入れるシステム、MISOは送信ダイバーシチやダウンリンクビームフォーミングと呼ばれるシステムである。この定義だけでは、MIMOは送受信のアダプティブアレー、すなわち、SIMOとMISOを単純に組み合わせただけに見えるであろうが、本稿で詳しく述べるように、実際には機能の質的な拡張になっている。図1は、MIMOの伝送イメージと学問分野を示している。送り方（情報理論・符号理論）、受け方（アレーの適応信号処理）、途中の電波の伝わり方（電波伝搬）に、深い専門知識が求められる。本稿では、電波伝搬の視点から、MIMOを見ることにしたい。

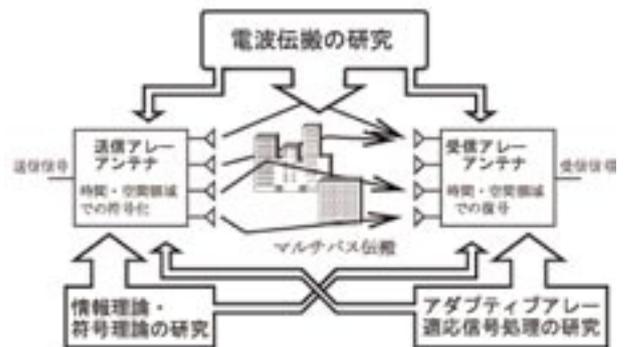


図1 MIMOの伝送イメージと関連する学問分野

2. MIMOへの期待：その背景

MIMOの技術紹介に入る前に、なぜそれを必要とするかの背景を述べたい。

$$C = \log_2 (1 + S/N) \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (1)$$

はシャノンが導いたチャンネル容量の式である。Sは信号電力、Nは雑音電力であり、チャンネル容量Cは、1秒、1Hzあたりに送ることができるビット数である。どんなに送り方の工夫をしても、これ以上送ることができないという上限値である。SN比が大きいときは、

$$C = \log_2 (S/N) \quad (S \gg N) \quad (2)$$

となる。これは、SN比の増加に対して、伝送ビット数は対数的にしか増えないことを意味している。10ビット送ることができるSISO伝送路があったとする。SN比がさらに2倍になると、1ビット増えて11ビットを送ることができるが、増加の比率で見れば1割アップにしか過ぎない。これではあまりにも効率が悪い、しかしこれがSISO伝送の宿命である。

もし、複数の伝送路を手に入れることができたらどうだろう。図2はこの配分を示している。送信の総電力一定の条件で考えてみたい。伝送路一本(SISOチャンネル)で10ビット送ることができるとする。2本では18ビット、4本では32ビットになる。伝送路の数を増やすことによって、チャンネル容量をどんどん増やすことができる。しかし、この算定ができるのは、式(2)の近似式が成立するSN比が大きいところでの話である。SN比が小さいときは、どんなに伝送路の数を増やしてもその効果が現れないことを、式(1)で確認してほしい。

では、複数の伝送路を手に入れるにはどうしたらよいであろうか。その答えが「MIMO」である。以下、この仕組みを述べたい。

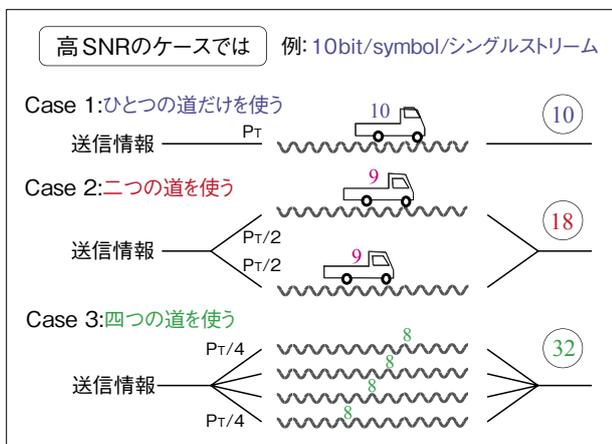


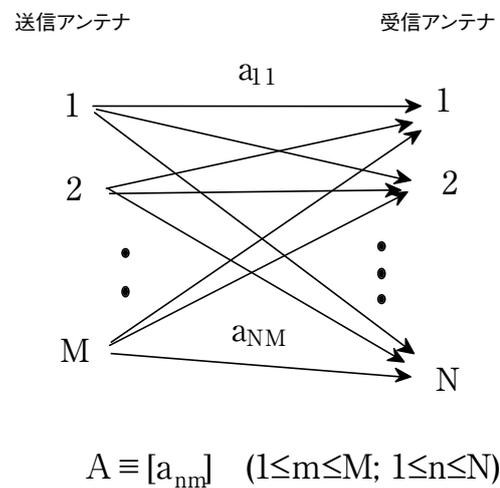
図2 複数の道を手に入れることができたなら

3. MIMOチャンネルの表現

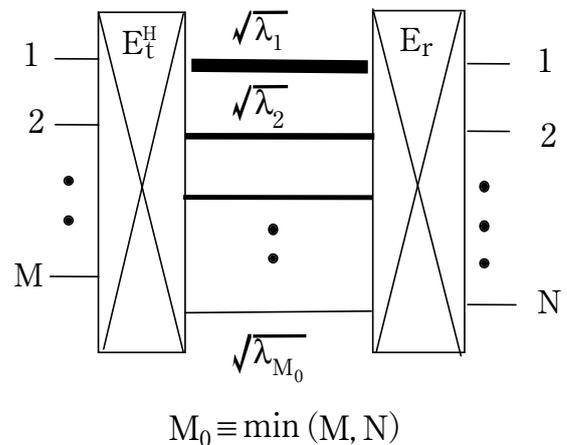
3.1 固有パス

複数の伝送路を手に入れられるのは、電波環境がマルチパス環境であることによってである。しかもこの伝送路は、物理的に存在する個々のパスではなく、仮想的なものである。この説明には、数学的手段が必要であるが、ここではポイントだけを述べる(詳細は文献(3), (4)を見てほしい)。

図3(a)は送受信間の素子アンテナ毎のチャンネル応答を $N \times M$ の行列Aで表したものである。この行列は 相関行列と呼ばれる新たな行列 AA^H および $A^H A$ (上付添字Hは複素共役転置)の固有値、 λ_i ($i = 1, 2, \dots, M_0; M_0 = \min(M, N)$);固有値の値は2



(a) チャンネル応答行列



(b) SVDに基づく等価回路

図3 MIMOチャンネルの等価回路表現

つの行列とも同じ) と各々に対応する固有ベクトル $\mathbf{e}_{c1}, \mathbf{e}_{c2}$ を用いて以下のように分解できる。これを特異値分解 (SVD) と言う。

$$\mathbf{A} = \mathbf{E}_t \mathbf{D} \mathbf{E}_r^H = \sum_{i=1}^{M_0} \sqrt{\lambda_i} \mathbf{e}_{c1} \mathbf{e}_{c2}^H \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで,

$$\mathbf{D} = \text{diag} \left[\sqrt{\lambda_1} \quad \sqrt{\lambda_2} \quad \dots \quad \sqrt{\lambda_{M_0}} \right] \quad (4a)$$

$$\mathbf{E}_t = \left[\mathbf{e}_{c1} \quad \mathbf{e}_{c2} \quad \dots \quad \mathbf{e}_{cM_0} \right] \quad \dots\dots\dots (4b)$$

$$\mathbf{E}_r = \left[\mathbf{e}_{r1} \quad \mathbf{e}_{r2} \quad \dots \quad \mathbf{e}_{rM_0} \right] \quad \dots\dots\dots (4c)$$

$$M_0 = \min (M, N) \quad \dots\dots\dots (4d)$$

である。図3(b)は同図(a)を式(3)のSVD に基づき等価回路で表したものである。チャネルの等価回路に整合するように、送信系のビームフォーミングネットワークを \mathbf{E}_t に、受信系を \mathbf{E}_r^H とすることにより、 M_0 個の信号が独立に $\sqrt{\lambda_i}$ の利得でお互いに干渉なく、伝送できる事がわかる。すなわちマルチパス環境下に有るMIMOは $\min (M, N)$ 本の独立な伝送路を手に入れているわけである。

この仮想的な伝送路をここでは固有パスと呼ぶ。各々の固有パスの振幅利得は $\sqrt{\lambda_i}$ であり、固有値 λ_i の大きさに応じてパスの太さが異なる。MIMO伝送の性能 (チャネル容量, 平均誤り率など) は、伝送路 (チャネル) の情報として、この固有値を知ることができれば、後は全て計算によって求めることができる。この意味で、伝搬チャネルの特性把握とは、相関行列の固有値を把握することに帰着できる。

3.2 マルチパス環境における固有パスの性質

マルチパス環境の代表として、チャネル応答行列 \mathbf{A} の各要素が複素正規分布 (振幅がレイリー分布) し、かつ、お互いの変動が無相関である場合を取り上げる。マルチパスの到来方向の角度的な広がり大きいレイリーフェージング環境で、屋内環境や市街地環境に良く見られる。

図4は、マルチパス環境における、送受信のアンテナ数が同じ ($N=M$) 場合の固有値の平均値である。

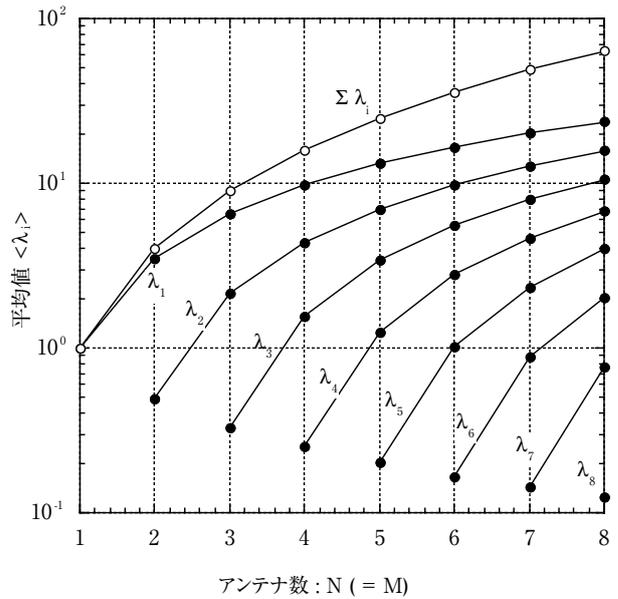


図4 レイリーフェージング環境における固有値の平均値 ($N=M$ の場合)

図中の \circ は固有値の総和で、 N^2 の値を持つ。 $N=M$ としているので、固有値の数 M_0 はアンテナ数 N になる。図より、アンテナ数 N が少ない場合、例えば $N=2$ では第1固有値と第2固有値の差が大きい (二つのパスの太さの違いが大きい) が、 N が大きくなると、同程度のものがたくさん存在することがわかる。図2の例で示したような同じ太さのパスとは言えないが、後に示すように、これで複数パスを手に入れたことの十分な効果が得られることになる。

4. マルチストリーム伝送：情報をたくさん送りたい

シャノンによって導かれたチャネル容量の式 ((1) 式) は、上限を与える式であって、それを実現する具体的な方法を教えてくれているわけではない。ここでは、代表的な2つの伝送方式：空間分割多重方式⁽⁵⁾と固有モード伝送⁽⁶⁾を紹介する。同時に複数のストリーム情報を伝送するため、マルチストリーム伝送に分類される。MIMOの特長を活かした大容量伝送を目指したものである。

4.1 情報の送り方

MIMOの情報伝送は野球のキャッチボールに例えられる。普通のキャッチボールと違うのは、ピッチャーが千手観音のような複数の手でたくさんのボールを同時に投げ、キャッチャーもこれを複数の手で巧みに受ける点にある。

送信側にチャネルの情報がない場合の送り方として、送信のアンテナ毎に等電力で別々の情報を乗せ

る方式がある。空間分割多重伝送方式と呼ばれる。米国のベル研究所で開発され、かつ、MIMOブームの牽引役を果たしているV-BLAST (Vertical-Bell Laboratories LAYered Space-Time architecture)⁽⁵⁾、⁽⁷⁾がこの方式である。自由空間伝送では、ある程度距離が離れると第一固有値のパスのみが卓越し、このような伝送では分離識別受信が不可能になる。一方、マルチパス環境では、3.1節で述べたように、 $M_0 (= \min \{M, N\})$ の独立パスが存在する。このため、 $M \leq N$ であれば、分離識別受信が可能になる。受信側では、パイロット信号等を用いたチャネル情報 (CSI: チャンネル応答行列Aのこと) を事前に行うことができ、その情報をもとに、干渉除去やアダプティブアレーで一般的に用いられる規範や最適化アルゴリズムがそのまま適用できる。図5はこの方式と受信側で用いられる各種適応信号処理規範を示している。

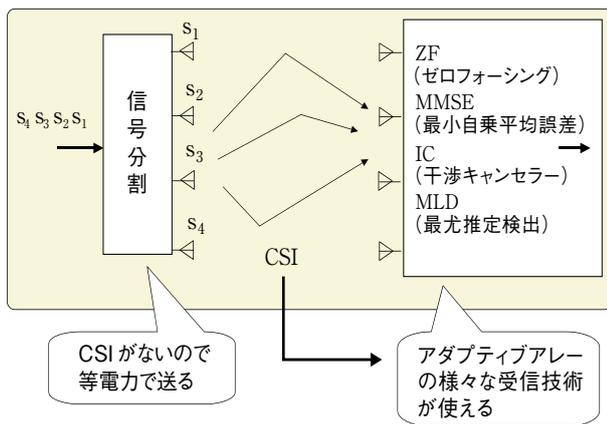


図5 空間分割多重伝送方式

送受信でチャネルの情報を共有することができれば、送信側でもその情報を活かすことができるので、より多くの情報伝送が可能である。MIMOチャネルの表現に特異値分解を用いる方法を3.1節で述べた。 M_0 個の系列を送送するための各々の送受信ウェイトを、各固有モードを実現する固有ベクトルとする。このような伝送方法は固有モード伝送と呼ばれる。図6は $M=3, N=4$ の場合の固有モード伝送の仕組みを表している。

限られた帯域幅、全送信電力 (各送信信号系列の電力の和) 一定の下で、最大のチャネル容量を実現する電力の配分方法は、Water fillingの方法 (注水定理) として、知られている⁽⁴⁾。最適な伝送を行うには、各モード毎にSNRに応じた符号化方式や変

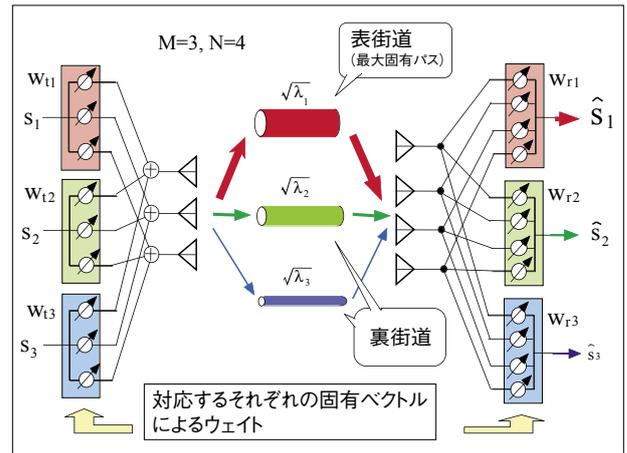


図6 固有モード伝送方式

調方式を採用入れることになるが、通常の無線伝送方式と共通することであるので、ここでは、これ以上立ち入らない。

4.2 チャンネル容量

送信側ではチャネルの情報 (CSI) を持たない場合 (モード1: 例: 空間分割多重方式), 事前の測定等により送信側・受信側の双方でCSIを共有している場合 (モード2: 例: 固有モード伝送) の夫々に対して、固有値の確率分布を用いてチャネル容量を求める式が得られている。ここではレイリーフェージング環境 (図3で固有値の平均値を求めた環境) について、計算結果のみを示す。図7はこれを示したもので、SISO換算でのSN比 $\gamma_0 = 0.1 (= -10\text{dB})$, $1 (= 0\text{dB})$, $10 (= 10\text{dB})$ に対して、3種類のチャネル容量を比較している。図で、 C_{mode1} はモード1での伝送、 C_{mode2} はモード2での伝送、 $C_{\text{mode2,MRC}}$ はモード2で、かつ、最大固有パスのみを用いるシングルモード伝送 (最大比合成伝送) である。図7より、(i) 伝送路のSNRが低い場合は、最大固有パスのみを用いるシングルモード伝送、すなわち最大比合成伝送でほぼ限界に近い性能が得られること、(ii) SNRが高い場合には、その電力を他の固有パスにも振り当て利用した方が高いチャネル容量を得られること、が読み取れる。また、(iii) SNRが高くなるとモード1とモード2で差がなくなってくること、すなわち、送信側がチャネル情報を持つことの有無による差が見えなくなってくること、がわかる。なお、図7は縦軸を対数メモリで表しているが、これを線形にすると C_{mode2} はほぼ直線になる。このことから、送受同数のアンテナの場合のチャネル容量はアンテナ数に比例すると理解してよい。

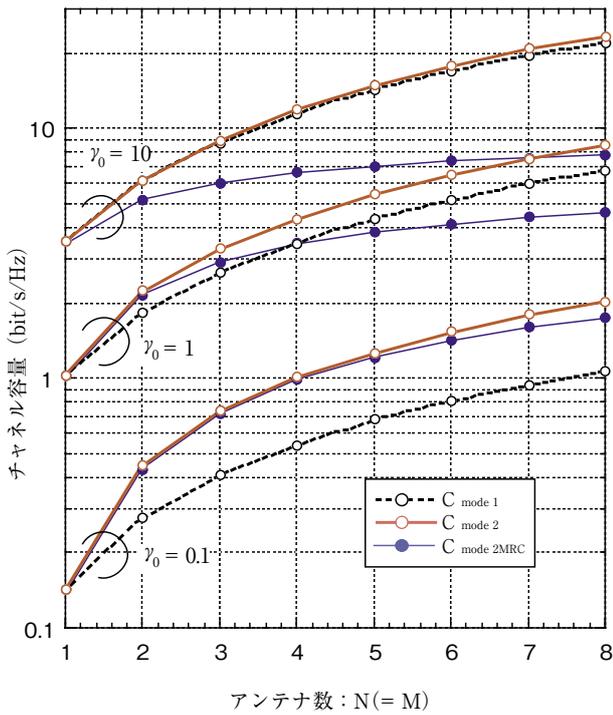


図7 SN比をパラメータとする三つの方式のチャネル容量比較

ここでは、チャネル容量で比較したが、ビット誤り率 (BER) も考慮した比較がより实际的である。これについては、文献(8)を見てほしい。

5. シングルストリーム伝送：情報を確実に送りたい

前節までは、MIMOがもつ一つの顔「情報をたくさん送る技術」を見てきた。ここでは、もう一つの顔「情報を確実に送る技術」に目を向けたい。

前述のモード2の伝送における最大固有パス単独利用伝送 (最大比合成伝送) は、低SN比の信号に対して、最適に近い伝送を実現している。この方式は、シングルストリーム伝送なので、マルチストリーム伝送のような積極的な意味でのチャネル容量増加にはつながらないが、送受のアレーアンテナの積MNに相当するスペースダイバーシチ効果が得られるので、「情報を確実に送りたい=通信の断を防ぎたい」場合に適している。送受信双方でチャネルの情報を共有していればそれを容易に実現できるが、送信側にチャネル情報を持たない場合には、情報の送り方に工夫が必要になる。ここでは、この技術を述べる。実は、これはMIMOの技術というよりは、送信ダイバーシチを実現する技術に分類される。

図8は、2素子のスペースダイバーシチ (SIMO) である。受信ウェイトを送受信アンテナ間のチャネル応答の複素共役とすることで、最大SN比受信が

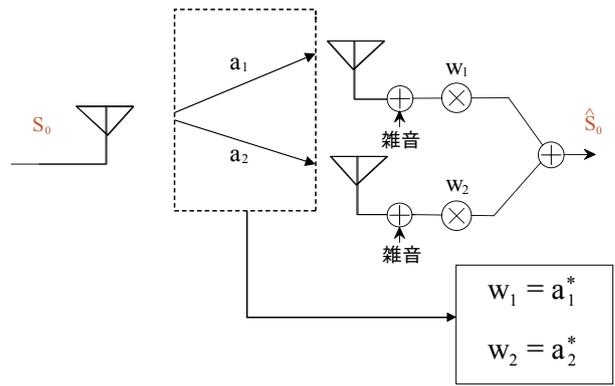


図8 スペースダイバーシチ最大比合成の原理

実現できる (最大比合成ダイバーシチ)。

では、送受信が逆の場合 (MISO)、すなわち送信側がアレーで、かつ、チャネルの情報を持たないとき、送り方はどうすればよいのだろうか？二つのアンテナから同じ情報を出しても、どこかに電波が出てゆかない方向 (アンテナパターンのヌル方向) ができてしまうであろう。万一その方向だけにパスがあったら通信ができなくなる。ダイバーシチどころか一本のアンテナ (SISO) より悪くなってしまうことになる。これに答えを与えたのが Alamouti である⁽⁹⁾。

Alamoutiが提案した時空間ブロック符号化 (STBC) と呼ばれる伝送方法を図9を用いて説明する。後のMIMO構成への拡張をも説明したいため、M=N=2の場合を示しているが、しばらくは受信アンテナ1のみを (すなわちMISO構成として) 見てほしい。連続して送りたい二つの信号 S_1, S_2 をまとめて一つのブロックにする。これを、一方のアンテナから、順番に $S_1, -S_2^*$ (*は複素共役) で、他方のアンテナから S_2, S_1^* で送る。この受信信号 r_1, r_2 を、CSIを予備知識としてブロック復号処理を行う。このような処理を行うと、 y_1, y_2 には符号間干渉の無い信号 S_1, S_2 が得られる。送信信号の電力を受信ダイバーシチの時と同じに設定すると、各々のアンテ

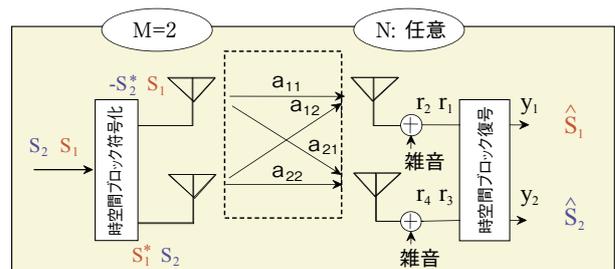


図9 時空間ブロック符号化伝送

ナからの平均送信電力は1/2ずつになるので、複号化された信号の平均SNRは受信ダイバーシチに比べて3dB低下するが、フェージング抑圧効果は同じである。このように、送信したい時系列データに対して時間領域と空間領域で信号を組み換えて伝送し、受信ダイバーシチと等価な効果を得ることが、時空間ブロック符号化 (STBC) 伝送の特徴になる。

受信処理がうまくいったのは、送信時の仕掛けが生きたからである。受信側で s_1 を最大SN比で取り出す演算が s_2 を打ち消す演算に、 s_2 を取り出す演算が s_1 を打ち消す演算になっているためである。M=2の場合には、送信信号を

$$G_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

と表すとき、

$$G_2^H G_2 = \left(|s_1|^2 + |s_2|^2 \right) I_2 \dots\dots\dots (6)$$

となる性質 (これを直交性という) がある。ここで I_2 は 2×2 の単位行列である。

2素子アンテナの場合には、入力信号をそのままの伝送速度 (レート) で伝送できるので、フルレート (= 符号化率1) の伝送方式である。アレーによるフェージング変動の抑圧は、受信側2素子のSIMO構成ダイバーシチの性能を持つ。このことを、フルダイバーシチの機能があると呼ぶ。このように、フルレート・フルダイバーシチはSTBC伝送の理想であるが、これを実現する符号はM=2の場合以外に存在しないことが明らかにされている⁽¹⁰⁾。そのため、 $M \geq 3$ については、それに準じるものとして、レートを落としたり、擬似直交符号とするなど、情報理論 (符号理論) を駆使した様々な符号が提案されている⁽¹¹⁾。

以上述べてきた方法はM=2, 任意のNに対するMIMOに容易に拡張できる (N=2の場合は図9)。M=2以外の場合も、上に述べたと同様に、レートを落としたり、擬似直交符号とするなどで対処できる。繰り返しになるが、STBCに代表される時空間符号化伝送 (STC) は送信ダイバーシチ (MISO) の技術であり、MIMO独自の技術ではない。しかしながら、MIMOへの応用分野を得て、その力を発揮する場が広がったと位置づけられる。この伝送には複数のストリームがあるように見えるが、情報

そのものは1系統であり、送信アンテナが最悪1本になっても情報の欠落は無いため、これはシングルストリーム伝送と理解したい。

6. 研究開発課題

6.1 広帯域情報伝送

これまでは、MIMO情報伝送の基本を述べるために、狭帯域の信号、すなわち、伝搬路の周波数特性が帯域内でフラットの場合を扱ってきた。情報伝送信号が広帯域である場合、すなわち、将来のMIMO情報伝送においてはそれが通常になるであろう環境においては、周波数選択性フェージング環境での取り扱いが求められる。この対処については大別して二つの伝送方式が考えられる。一つは、データを周波数領域に展開しての伝送、すなわち、OFDMに代表されるマルチキャリア伝送であり、もう一つは、タップ付き遅延線を構成要素とする時間領域の等化器の技術である。

OFDMは広帯域情報を狭帯域の多数のサブチャネルに展開するマルチキャリア伝送である。この狭帯域化とサイクリックプリフィックスと呼ばれるガードインターバルの働きによって、各サブチャネルは符号間干渉を持たない狭帯域伝送とみなすことができる。図10はMIMO-OFDM伝送の基本構成を示している。ビームフォーミングの部分はブラック

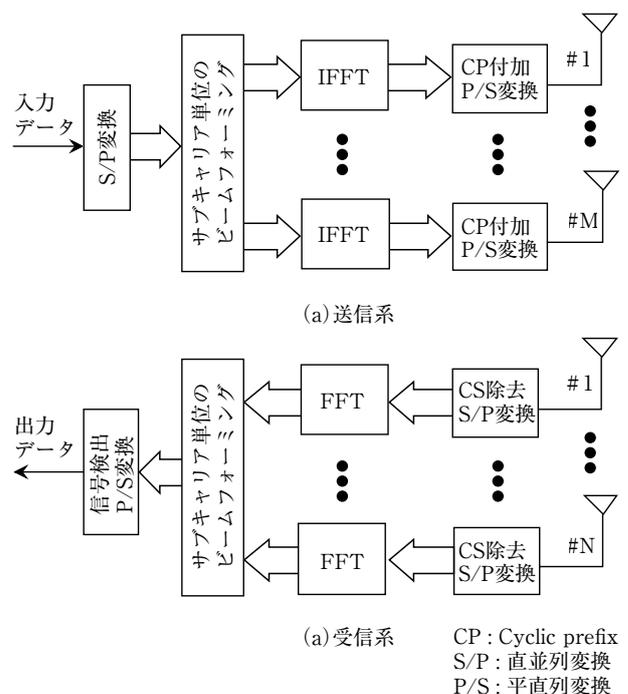


図10 MIMO-OFDM システムの基本構成

ボックスにしているが、ここは、これまでに述べてきた種々の方法、すなわち、時空間符号化伝送、固有モード伝送、最大比合成伝送など、を実現する回路構成がそのまま適用できる。時系列で与えられる情報信号が周波数領域に展開されて伝送され、伝送路の特性はその周波数領域の特性で決まるのであるが、符号化やアレーの重み付けは、周波数領域に変換される前の時系列データに対して行うことが味噌である。OFDMはそれ自身の伝送方式に留まらず、多元接続方式であるCDMAと組み合わせたMC-CDMA等への応用も幅広く、高度無線LANや新世代移动通信をMIMO-OFDMの応用研究も多岐に渡っている^{(12), (13)}。

時間領域での信号処理に基づく広帯域伝送の技術も重要な課題である。先行波のチャンネルとL個の遅延チャンネル(複数の同一遅延波を遅延チャンネル毎にまとめたものであって、素波の数ではない)よりなるマルチパスチャンネルにおいては、 $M \times N$ アレーによる送受信ウェーブ制御型ビームフォーミング(狭帯域ビームフォーミング)によって、最大 $L=M+N-2$ の遅延チャンネルの遅延波をキャンセルできる⁽¹⁴⁾。遅延チャンネル数が少ない場合には、その自由度の余力を使って、着目するチャンネル(通常は先行波)の最大SNR受信を実現することができる。このように、 M, N の数が大きくなれば、ビームフォーミングのみで遅延波のキャンセルが可能であるが、その効果をより十分なものとしたり、遅延波も積極的に取り込んで、全体としての信号対干渉・雑音電力比(SINR)を高めたい場合には時間領域の信号処理が必要になる。構成や制御がかなり複雑になるため、現時点では原理的な面での研究に留まっている^{(15), (16)}。

6.2 マルチユーザシステム応用

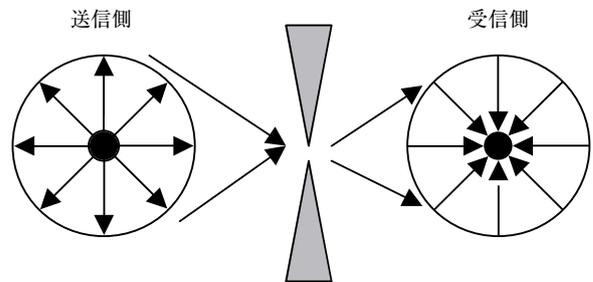
基地局と複数の移動局で構成される移动通信システムは、全体として多入力・多出力システムであるため、それ自身が広い意味でMIMOである。しかしここでは、狭義の意味で、送受信の双方がアレー構成であるマルチユーザシステムを対象としている。

マルチユーザの場合もシングルユーザの場合と同様に、パイロット信号によるトレーニング等により、全てのユーザと基地局(あるいはアクセスポイント)とのチャンネル情報(CSI)が既知であって、かつ、マルチユーザ干渉を打ち消すだけのアレー自由度が

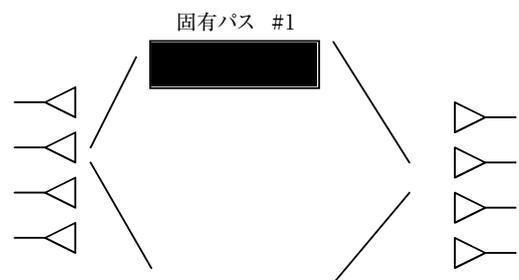
あれば、シングルユーザのケースと同様に、所望波信号を十分なSNRで識別受信をすることが可能である。マルチユーザシステムについては、今後、様々な構成提案がなされるものと予想される。前節で述べた、広帯域信号に対しても、マルチユーザシステム応用の研究が盛んになってくるであろう⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾。

6.3 電波伝搬に関連する問題

送信局の周囲、受信局の周囲が散乱体に囲まれている、かつ、パス方向の空間的広がりが大きいマルチパスリッチな環境であっても図11に示すような例において第2固有値以下がゼロに近付き、第1固有値のみが卓越する環境になる⁽²⁰⁾。このことは、MIMOチャンネルのモデル化においては、送信局周囲の伝搬環境(パス方向の角度広がり)、受信局周囲の伝搬環境ばかりでなく、途中の伝搬構造が影響を与えることを意味している。この例はキーホール問題として知られているが、外からの電波が、小さな窓や狭空間を介して屋内に浸透する場合にも共通する。固有パスは、実空間のパスとは直接対応しない仮想的なものであるが、実空間でパスが一つに絞り込まれれば、仮想空間でも固有パスの数は一つになる。送受信点において、パスの角度的な広がりがあれば、スペースダイバーシチ効果は維持されるが、



(a) 小ホールで結ばれたマルチパスチャンネル



(b) 固有パスモデル

図11 キーホールモデル: 固有パスが一つだけになるケース

MIMOの特徴であるマルチストリーム伝送ができない環境になっている。

伝搬途中にキーホールのような特殊な構造を持たないマルチパスリッチな環境，例えば，3.1節で述べたモデルは，クロネッカーモデルと呼ばれている。現実の環境は，クロネッカーモデルやキーホールモデルといった理想化されたモデルではなく，その中間状態に位置するものが多いと予想される。伝搬特性は，MIMOの情報伝送能力に大きな影響を及ぼすが，このような視点からの伝搬解析は未だほとんど行われておらず，伝搬モデルの研究の重要性が高まっている。

6.4 環境適応機能の拡張：MIMOソフトウェアアンテナ

4節，5節で述べてきたように，技術の系譜には二つの流れがある。一つは，高スループットを目指した技術，すなわち，複数のアンテナから複数のデータを同時刻に送信するマルチストリーム伝送，もう一つは，時空間ブロック符号化（STBC）伝送に代表される信頼性を高める技術（＝回線の断をなくす技術：シングルストリーム伝送技術）である。前者はSNRが高いときにその実力を発揮するものであり，後者は，低SNRの伝送時に品質の良いデータ伝送を実現する。この二つの機能（＝高スループットと高信頼）が同時に実現できるわけではなく，通信目的に応じて選択することになる。そこで，SNRの変化に応じて，これらの方式（アルゴリズム）が適応進化するような機能を具備できれば，環境適応性に優れたMIMO通信方式が実現できることに

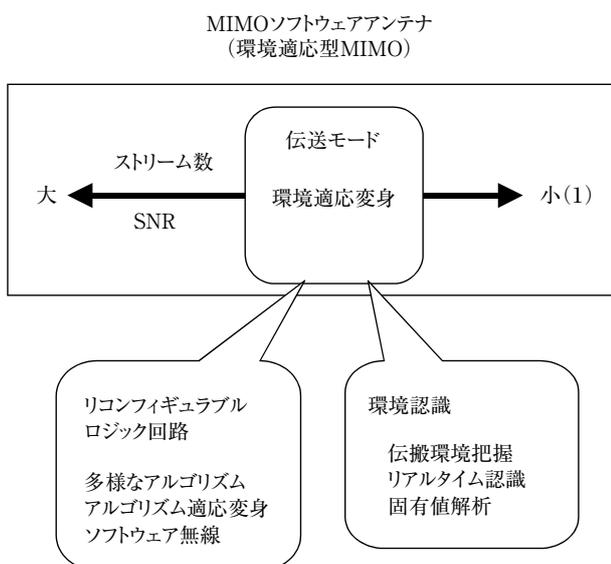


図12 MIMOソフトウェアアンテナのイメージ

なる。筆者らは，アダプティブアレーアンテナの将来技術として，ソフトウェアアンテナの概念を提示している⁽²¹⁾。図12は，ソフトウェアアンテナの概念をMIMOに取り入れたMIMOソフトウェアアンテナのイメージである。今後，このような環境適応性に優れたMIMOの研究が進んでゆくと予想される。

7. されどMIMO

MIMOの技術を紹介し，その実力や課題を述べた。MIMOは通信の理想：「たくさんの情報を送りたい」，「確実に情報を送りたい」に応えることができる。しかしそれは両立するものではなく，どちらかを選ばなければいけない。MIMOがもつ二つの顔である。この二つの顔を含む様々な顔が，環境に応じて変化するMIMOソフトウェアアンテナの概念も紹介した。

MIMOは，現在IEEEにおいて標準化が進められている高度無線LANへの適用を足がかりに，新世代移動体通信への発展が期待されている。MIMOはアンテナをたくさん使うのだから，よい性能が出るのはあたりまえ（＝良い性能が出なくては話にならない）とも言える。その能力を限界まで引き出すのがシステム設計者の腕の見せ所になる。過剰な期待は禁物，されどMIMOである。

参考文献

- (1) 中嶋信生，“新世代ワイヤレスシステムの研究開発動向，” SPC Tech. Rep., no. 13, pp. 3-10, 2002.
- (2) 鈴木博，“無線通信におけるOFDM技術—移動通信の話題を中心にして—，” SPC Tech. Rep., no. 14, pp. 3-12, 2002.
- (3) 唐沢好男，“MIMO伝搬チャンネルモデリング，” 信学論B, vol. J86-B, no. 9, pp.1706-1720, 2003.
- (4) 中嶋信生（編），新世代ワイヤレス技術（第3章 MIMO），丸善，2004.
- (5) G.D. Golden, G.J. Foschini, R.A. Valenzuela, and P.W. Wolniansky, “Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture,” Electronics Letters, vol. 35, no.1, pp. 14-16, 1999.
- (6) H. Sampath, P. Stoica, and A. Paulraj, “Generalized linear precoder and decoder design for MIMO channels using the weighted MMSE

- criterion," IEEE Trans. Commun., vol. 49, no. 12, pp. 2198-2206, 2002.
- (7) G.J. Foschini, G.D. Golden, R.A. Valenzuela, and P.W. Wolniansky, "Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays," IEEE J. Select. Areas. Commun., vol. 17, no. 11, pp. 1841-1852, 1999.
- (8) 大鐘武雄, 西村寿彦, 小川恭孝, "MIMOチャネルにおける空間分割多重方式とその基本特性," 信学論B, vol. J87-B, no. 9, pp.1162-1173, 2004.
- (9) S.M. Alamouti, "A simple transmit technique for wireless communications," IEEE Jour. Selec. Areas Commun., vol. 16, pp. 1451-1458, 1998.
- (10) V. Tarokh, N. Seshadri, and A.R. Calderbank, "Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance critrion and code construction," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 2, pp. 744-765, 1998.
- (11) A. Hottinen, O. Tirkkonen, and R. Wichman, *Multi-antenna tranceiver techniques for 3G and beyond*, John Wiley & Sons td., 2003.
- (12) K.K. Wong, R.S.K. Cheng, K.B. Letaief and R.D. Murch, "Adaptive antennas at the mobile and base stations in an OFDM/TDMA systems," IEEE Trans. Commun., vol. 49, no. 1, pp. 195-206, 2001.
- (13) Y. Li, J.H. Winters and N.R. Sollenberger, "MIMO-OFDM for wireless communications: Signal detection with enhanced channel estimation," IEEE Trans. Commun., vol. 50, no. 9, pp. 1471-1477, 2002.
- (14) H.H. Pham, "The weights determination scheme for MIMO beamforming in frequency-selective fading channels," IEICE Trans. Commun., vol. 87-B, no. 8, pp. 2243-2249, 2004.
- (15) K.K. Wong, R.D. Murch and K.B. Letaief, "Optimizing time and space MIMO antenna system for frequency selective fading channels," IEEE Jour. Selec. Areas Commun., vol. 19, no. 7. pp. 1395-1407, 2001.
- (16) T. Taniguchi, H.H. Pham, X.N. Tran, and Y. Karasawa, "Maximum SNR design and performance analysis of MIMO communication systems with tapped delay line structure," The 15th IEEE Personal, Indoor and mobile Redio Communications (PIMRC) , Spain, Sept. 2004.
- (17) N. Stamoulis, N. Al-Dhahir and A.R. Calderbank, "Further results on interference cancellation and space-time block codes," Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, 2001.
- (18) A.F. Naguib, "Combined interference suppression and frequency domain equalization for space-time block coded trans-mission," Proc. IEEE ICC'03, Alaska, USA, pp. 3261-3266, May 2003.
- (19) X.N. Tran, T. Taniguchi, and Y. Karasawa, "Spatio-temporal equalization for space-time block coded transmission over frequency selective fading channel with co-channel interference," IEICE Trans. Fundamentals, March 2005. (to appear) .
- (20) D. Chizhik, G.J. Foschini, M.J. Gans, and R.A. Valenzuela, "Keyholes, correlations, and capacities of multielement transmit and recive antennas," IEEE Trans. Wireless Communs., vol. 1, no. 2, pp. 361-368, 2002.
- (21) 唐沢好男, "アダプティブアンテナからソフトウェアアンテナへ," 計測と制御, vol. 41, no. 7, pp. 519-523, 2002.