Close Up

電波研究の玉手箱

第 8 講
MIMO のなせる業

電気通信大学名誉教授
唐沢 好男

毎号、電波技術の基本テーマの中に見え隠れする不思議を玉手箱につめてお届けしている。本講では、無線システムに不可欠な技術となっている MIMO を取り上げる。送受信装置の双方にアレーアンテナを具備する MIMO、構成上複雑極まりなく実利用に向かないように見えるシステムの何が魅力なのだろうか？その先の展望はどうだろうか？ここに踏み込んでみたい。

MIMO とは

MIMO（マイモ）は Multiple-Input Multiple-Output のことで、日本語では“多入力・多出力”である。これだけだと、一般的過ぎてイメージがわきにくいが、無線通信では、送信側・受信側の双方にアレーアンテナを用いるシステムを指す。OFDM のように周波数領域に多数のサブキャリアを展開して並列伝送するもの、あるいは、多元接続技術のように複数のユーザに同時に通信するシステムなどは機能の上で MIMO と言えなくもないが、アレーアンテナ対向に絞って狭義の意味で用いられている。

図 1 に示すように、MIMO は、信号の送り方・受け方を定める情報理論・符号理論、アレーアンテナの指向性制御に係わる空間信号処理（アダプティブアレー）、伝搬経路の特徴を生かすための電波伝搬など、その技術は幅広い。

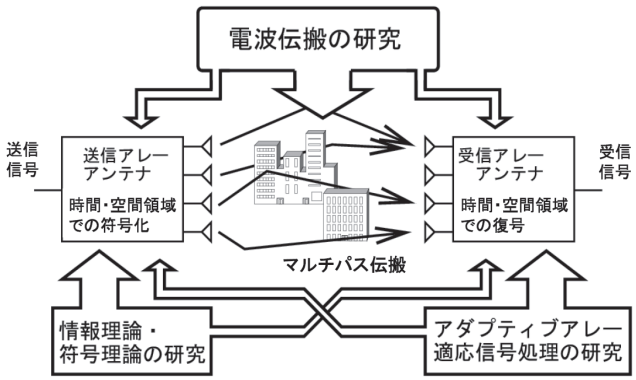

図 1　MIMO システム（関連技術が多岐に亘る）

MIMO は、1990 年代、無線 LAN の高速・大容量化へのニーズに応えて生まれ、第 4 世代以降の移動通信への展開を見せて、一気に花開いた技術である[1]。しかし、その学術的な基盤は 1960 年代に確立されたランダム行列に関する数学理論にあり、また、受信側にアレーアンテナを置いて信号劣化を防ぐスペースダイバーシチやアダプティブアレー、二つの偏波の直交性を利用する直交偏波通信（機能的には 2 × 2 の MIMO）、マルチユーザ通信技術など、これまで培われてきた様々な技術がその土台になっている。

なぜ MIMO?

劣悪な電波環境の中で良好な通信を実現する高機能アンテナとしてアダプティブアレーの研究開発が長く進められてきた。新しい時代のアンテナとして大きな期待をもたれながらもなかなか実利用に繋がらない現実がある（注：一部の PHS 基地局応用を除いて）。複数アンテナによる構成が複雑であること、他の技術によって問題が回避できるなどの理由が大きい。それに対して MIMO は送受信双方にアレーアンテナを置く複雑度倍増のシステムなのに脚光が当たっている。なぜなのだろうか？一言で言えば、ほかの方法では実現が難しかった通信速度（スループット）を上げることが MIMO にはできるからである。以下、そこに焦点を当ててみたい。

シャノンの情報理論に見る不都合な真実

前講でも述べたように、シャノンは雑音のある通信路において、誤りなく情報伝送ができる通信速度の上限を通信路容量（channel capacity）C（単位：ビット / 秒；bps）と定め、以下の式を与えている。

$$C = W \log_2\left(1 + P_S / P_N\right) \quad [\text{bps}] \quad (1)$$

ここで、W は通信路（あるいは伝送信号）の帯域幅、P_S は信号成分の、P_N は雑音成分の平均電力、P_S/P_N は SN 比である。この式からわかることは、帯域幅が定められた通信においては、SN 比が良くなっても、伝送可能なビット数はその対数でしか増えてゆかないことである。例えば、単位周波数当たりの通信路容量 C/W が 10［bps/Hz］で伝送できているとき、2 倍頑張って SN 比を 3dB 上げても、報酬は +1 ビット、すなわち、11［bps/Hz］になるだけである。

変調方式で考えてみよう。1 シンボルで 8 ビット運べる 256QAM がある。SN 比が 4 倍（6dB）上がると 1024 QAM にできるが、運べるビット数は 2 つ増えて 10 ビットである。多値度を上げてゆくほど、装置製作上の困難さは加速度的に大きくなるが、その代償が +2 ビットではあまりにも辛い。SN 比を上げる方向での伝送速度増加への努力には限界があるのである。

でも、これは情報伝送における逃れられない宿命、すなわち、“不都合な真実”である。

不都合な真実から逃れるには

式(1)を見ると容量は帯域幅に比例しているので、これを大きくしてゆくのはどうだろう。ただ、帯域幅を大きくすると別の問題が起きてくる。雑音電力も帯域幅に比例して大きくなる（$P_N \propto W$）のである。ゆえに、SN 比を保ったまま帯域幅を増やすということは、信号電力も比例して増やしてゆかなければならず、望む形ではない。一方、送信電力を抑えたまま帯域幅を広げてゆくとどうであろうか。図 2 に示すように、帯域幅の拡散率を K として、この K を大きくとることによって帯域幅を KW に増やすのである。1Hz あたりの雑音電力密度を P_{N0} とすると P_N=KWP_{N0} なので、(1)式は

$$\lim_{K\to\infty}\left\{KW \log_2\left(1 + P_S / KWP_{N0}\right)\right\} = 1.44 P_S / P_{N0} [\text{bps}] \quad (2)$$

となり、容量が信号電力の対数で抑えられると言う不都合な真実が解消されたことになる。これは、ひとつの帯域（W）で情報伝送するよりも十分多い K 個の帯域（KW）で情報伝送するほうが、一帯域あたりの電力を $1/K$ にしても容量は上がると言うことを示している。

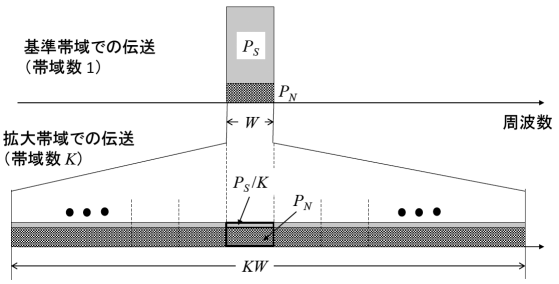

図２　帯域を広げて低電力密度で伝送すると
（帯域 K 倍、電力密度 1/K 倍）

図 2 の意味は、周波数領域上ではあるが、たくさんの道が利用できれば、通信路容量の電力に対する頭打ちを逃げることができるということである。これを図 3 のように自動車による荷物の運搬に見立て、電力をガソリンに置き換えて説明する。道が一本の場合（すなわち、K=1 の場合）を基準にする。ガソリン満タンにして（すなわち電力 P_T で）単位周波数あたり 10 ビットが運搬できたとする。もし、もう一本道があったら（すなわち K=2)、ガソリンを半分ずつにしても、それぞれ 9 ビット、あわせて 18 ビット運ぶことができる。道が 4 本になれば 32 ビットになる。このように、道の数と共に、ガソリン（＝信号電力）一定の下、運ぶことができる荷物の量（＝情報量）がどんどん増えてくる *1。

このようにして、何らかの手段で複数の道が使えるのなら、(1)式に見られる不都合な真実から逃れることができるのである。

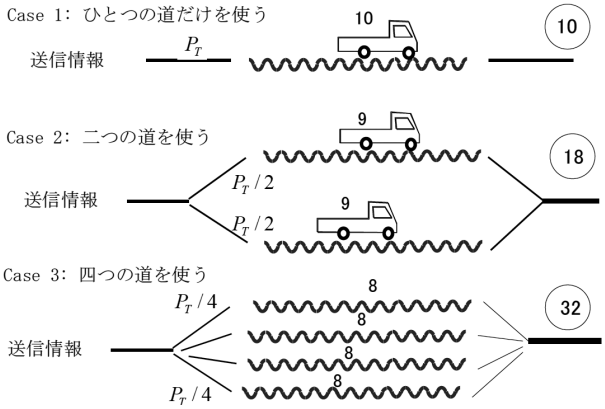

図３　複数の道があれば

*1 道の数を増やせば増やすほど容量が増えてゆくと言うわけではない。SN 比が低くなると式 (1) の対数の中の 1 の項の寄与が支配的になって (2) 式に落ち着くわけで、その場合は道の数によらなくなる。道を増やせばよいと言う戦略が通じるのは、ある程度 SN 比が確保できている場合である。

MIMO の原理：空間領域に複数の道を作る

上記説明によって、シャノンの不都合な真実から逃れるためには複数の道を持てばよいことがわかった。ここでは、アレーアンテナの力を使って、空間領域に複数の道を作ることを考える。そのためには

① 複数の道の出発点と到着点を用意する→送受信にアレーアンテナを用いる

② 複数の道をマルチパスに担ってもらう→嫌われ者だったマルチパス伝搬環境を積極的に利用する

のである。

実際のマルチパス伝搬路は綾取りの糸のように複雑に絡み合っていて、送信アンテナ素子のそれぞれから出た信号を分離して運んでくれるような器用なことはしてくれない。この綾を解くのが数学（連立方程式を解く線形代数学）である。詳しいことは述べられないが、通信路を表すランダム行列を特異値分解と呼ばれる直交成分分解を行って、仮想的な並列伝送路（固有パス）を作るのである。

図 4 を用いて、送信側素子数 M=4、受信側素子数 N=3 の例で、上記原理を簡単に説明する。固有パスの数は M と N の少ない方の数、すなわち、3 である。実際の伝送路は同図上のように素子ごとに結ばれる行列（マトリクス）で表されるが、素子と素子を結ぶ一本の線それ自体も多数の伝搬路（マルチパス）で構成されている。この行列から 3 つの固有値 λ_1 ～ λ_3 が求められる（詳しくは［2］などで）。固有値の大きさは大小不ぞろいであるので、最大固有値を λ_1 として、以下この順番とする。この固有値解析の結果に基づき、送受信のウェイト行列を定めると、同図下のように完全に分離された 3 本の固有パスができる。それぞれのパスに信号を乗せれば混信なく送ることができる。各パスの利得は固有値の平方根に比例する大きさになる。この伝送方法は、通信路の特性を生かした理想的な方法で、固有モード伝送と呼ばれる。

図 5 は送受信アンテナ素子数が同数（M=N）のときの正規化通信路容量（1Hz 当たりの伝送可能ビット数の上限：C/W［bps/Hz］）を素子数に対して示している。図でマルチストリーム伝送(固有モード伝送)は、N 本の道に電力を最適配分し並列に情報を送った場合、シングルストリーム伝送（最大比合成伝送）はひとつの道（固有パス 1）に全電力を集中させて送った場合（いわゆるビームフォーミング伝送）である。図より、マルチストリーム伝送では、アンテナ数にほぼ比例して通信路容量が上がっており、MIMO の特徴、すなわち、たくさんの情報を送りたいという目的が実現されている。シングルストリーム伝送では、N が増えても情報量を上げるということへの寄与は小さいが、素子数 N^2 のスペースダイバーシチに対応する変動抑圧効果があり、高い信頼性を保った通信を行いたいというときにはこの方法が良い。要は、MIMO は大容量・高信頼な通信を実現する手段として力を発揮するが、その両方を同時に得たいというのは欲張りであり、過剰な期待は禁物である。

ここで紹介した固有モード伝送は MIMO の原理説明で必ず登場する理想的な伝送方式であるが、実際には、より簡易にした様々な伝送方式が実用に供されている。詳しくは MIMO の専門書（例えば［3］）で学んでほしい。

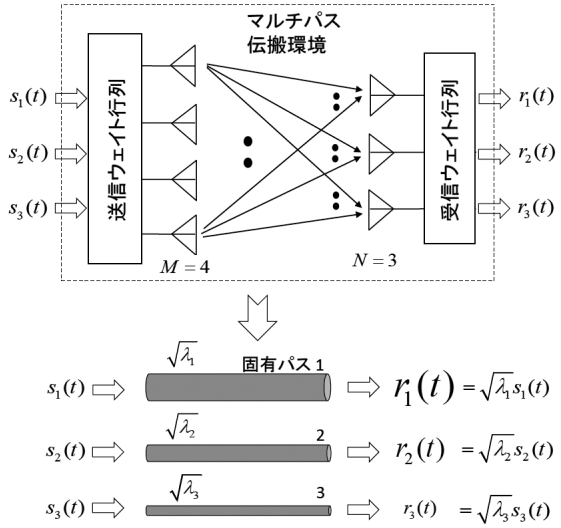

図４　固有モード伝送（上：実際の伝送系、下：等価回路）

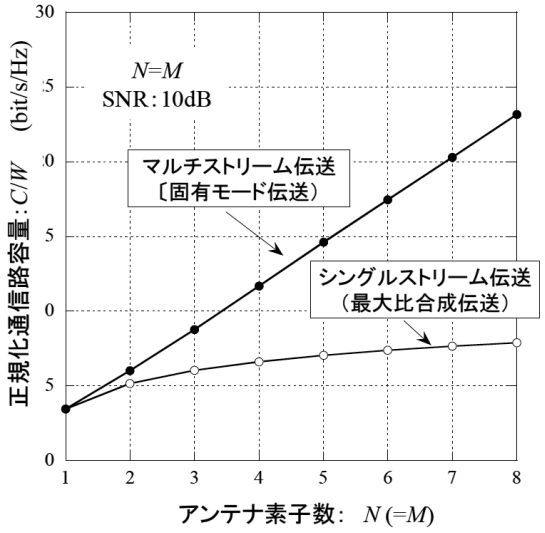

図５　MIMO 伝送の通信路容量

Massive MIMO

近年、特に、第5世代からそれ以降の移動通信への展開として、Massive（マッシブ）MIMOと呼ばれる大規模なアレーシステムに期待が高まっている。基地局側に100～1000素子のアレーを用意し、多数のユーザ局（ユーザ局は比較的小規模なアレー）との間で同時通信を行うシステムである。空間分離度が高くシャープなビームをユーザに向けることができ、かつ、素子数が多いことによってビーム制御の自由度が増し、多くのユーザとの同時通信ができる。図6はこのイメージである。そこまでやるかと受け止められる読者もあろうかと思うが、次世代移動通信では、ミリ波と呼ばれるより高い周波数が志向され、このような大規模アレーが比較的小型に実装できることが実用化への期待を押し上げている。

同図に、キーポイントとして書いているように、具体的なアンテナ構成や大規模ランダム行列で表現される伝搬チャネルの特徴を生かした伝送方式には簡易化が実用への鍵を握り、まだ解決すべき課題が多い。大規模になることによって浮かび上がる特徴としては、
① 通信路の特性が統計多重効果（たくさんのものが集まって平均化されることによる効果）によって、安定な特性が得られること
② 基地局機能を分散化させ（＝図の大規模アレーを複数の地点に分散して置き）、その全体でのアレー制御によって、より柔軟なシステム設計ができること
③ 素子間隔を狭くすることによって生じる空間相関を積極的に取り入れ、アレーサイズのコンパクト化が可能になること［4］
などである。Massive MIMOについては、実用化視点において、理想と現実との距離がまだまだ大きいが、時代と共に理想の姿に近づいてゆくであろう。

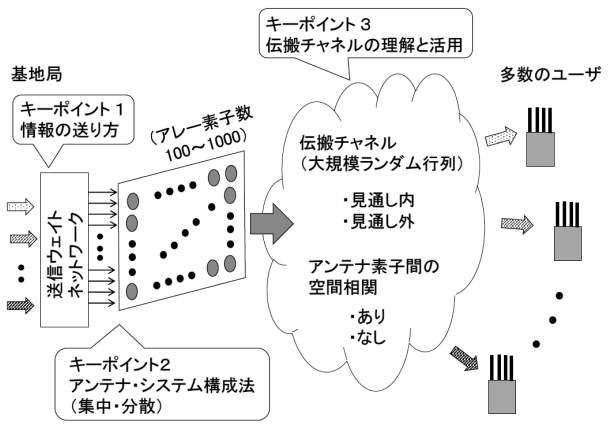

図6　Massive MIMOの利用イメージと技術課題

啐啄同時（むすびに代えて）

禅の世界に「啐啄（そったく）同時」という言葉がある。雛が卵から孵ろうとして中から殻をつつく音を「啐」、親鳥が外から殻をついばむことを「啄」と言う。この二つの行為が同じ時、新しい命が産まれる（図7）。タイミングが大事なのである。

技術の世界では、啐と啄はシーズとニーズに読み替えられるであろう。シーズが優れていてもニーズがなければ世に出てゆくことはない。ニーズがあってもシーズが熟していなければ、期待に応えることはできない。本講で取り上げたMIMOの登場には、まさに、啐啄同時の感があった。無線LANや移動通信の大容量化への強い期待に対して、MIMO独自の技術（マルチストリーム伝送、時空間符号化伝送など）が応え、一気に実用化に向かった時期である。アレー信号処理技術の先輩に当たるアダプティブアレーが、その構成の複雑さが嫌われて実用化に苦戦する中、複雑さ倍増のMIMOに脚光が当たったのには理由がある。アダプティブアレーが電波干渉と言うネガティブ要因に対する解決策であったのに対して、MIMOは伝送容量を数倍にも上げるというポジティブ志向の技術であったことによる。

一方、啐に至るまでには長い下積みの期間があることも事実である。MIMOの基礎を与える数学理論も1960年代には出来上がっている。あくまでランダム行列の純粋数学モデルとしてである。次世代を担う若い研究者・技術者の皆さんには、シーズの発掘にも目を向けてほしい。アイデアは面白いが、今の技術ではとても無理、絵に描いた餅といわれるくらいがちょうど良い。やがて、時代が進めば、周辺技術もニーズも熟成してくるであろう。そのときが啐啄同時。

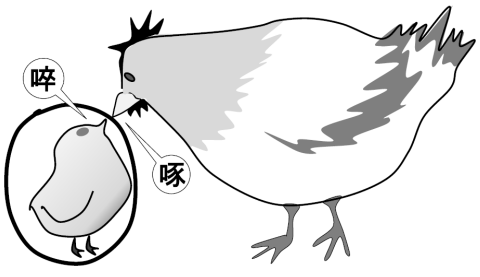

図7　啐啄同時

＜参考文献＞
[1]G.J. Foschini and M.J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," Wireless Pers. Commun., vol.6, pp.311-335, 1998.
[2]唐沢好男，藤井威生，電波システム工学（第5章），信学会レクチャーシリーズD-15，コロナ社，2020.
[3]大鐘武雄，小川恭孝，MIMOシステム技術，オーム社，2009.
[4]Y. Karasawa, "Channel capacity of massive MIMO with selected multi-stream transmission in spatially correlated fading environments, IEEE Trans. Vehicul. Technol., vol. 69, no. 5, pp. 5320-5330, 2020.