

無線通信の数学的モデル化と アレーアンテナ制御

東京理科大学 工学部 電気工学科 准教授 まるた かずき
丸田 一輝

■ はじめに

携帯電話（今ではスマートフォンと呼ぶべきでしょうか）は、今や生活には欠かせないデバイスとなっています。1990年代ごろ、当初は固定電話を持ち運ぶような形でどこでも電話ができるという新たなコミュニケーション形態を提供して注目されました。それ以降、電子メールや写真・動画の送信など、デジタルデータの送信を可能とし、今ではインターネット・SNSなどパソコンで行っていたものが手元でできるようになりました。最近では、腕時計といったウェアラブルデバイス、エアコンなどの家電にも通信機能が搭載され、モノのインターネット（Internet of Things, IoT）という概念が登場し、通信の利用形態はさらに拡大しています。2020年には第5世代移動通信（5G）のサービス導入が開始され、Gbpsクラスを超える伝送速度（理論上）が達成されましたが、研究開発の世界ではその次の世代である6Gに向けた議論が始まっています。無線通信は様々な技術に支えられ実現されており、その基本は数学です。本稿では、数学に基づく無線通信システムのモデル化の一例を紹介し、その中でも電波の到来方向を自在に制御できるアレーアンテナ信号処理技術について基本的な概念を中心に解説したいと思います。アレーアンテナ技術は4G以降、システムとしての通信容量を飛躍的に改善可能な技術として着目され、6G以降も引き続き重要な技術として高度化が期待されています¹⁾。このアレーアンテナ技術が最新

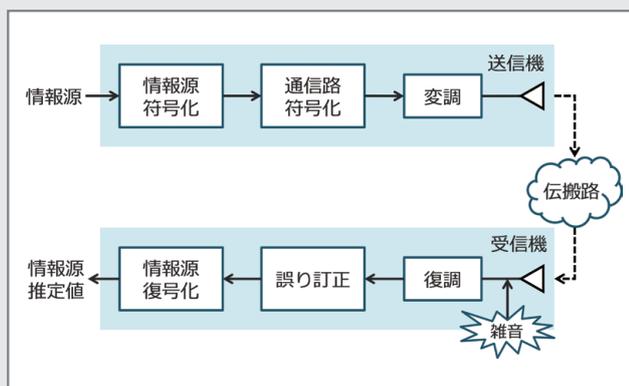
の技術にどのように繋がっていくのか、自身の研究の事例紹介も交えて触れてみたいと思います。

■ 無線通信システム・電波のモデル化

【図1】に、無線通信システムにおける情報伝送の一連の手順を示します。「情報源」は、画像などのコンテンツ・データであり、0と1の符号（ビット）で表現されます。「情報源符号化」は、その情報データを効率的なサイズに変換する処理です。データの圧縮もここに含まれます。「通信路符号化」は、後の伝搬路などで生じるビット誤りを補償するための前処理のようなものです。前方誤り訂正（Forward Error Correction, FEC）とも呼ばれます。「変調」は、0と1のデジタルデータを無線回線上へ放射するための電気信号に変換する処理です。変調信号はアンテナを介して無線伝搬路を経由し、受信アンテナへと到達します。受信側では、アンプなどのアナログ素子による雑音が付加され、以降の受信処理は基本的に送信側と逆の順番で、逆の処理が行われます。「復調」部では、無線信号を0と1のデジタルデータに復元する処理を行います。ここで伝搬路での変動の影響や、受信機雑音の影響によって信号には歪みが生じており、復元されたデータは一部のビットが反転してしまっていることがほとんどです。これを「誤り訂正」の処理によって、もとの正しいビットに戻すことができます。そして最後に、「情報源復号化」部において、もとの正しいコンテンツ・データを得ることができます。

この通信のモデルにおいて、通信を妨げる要因となっているのが「伝搬路」と「雑音」であることがわかるといえます。無線通信の世界では、これらの劣化要因をいかに克服して高品質かつ高速な通信を実現するのか、という観点で誤り訂正符号や変調・復調、そしてアンテナ制御技術が進展してきました。本稿では、主に送信アンテナ～伝搬路～受信アンテナの区間に着目し、仕組みや技術について説明をしたいと思います。

まず、無線通信は電波（電磁波）を介して情報をやりとりすることにより実現されます。この電波に信号



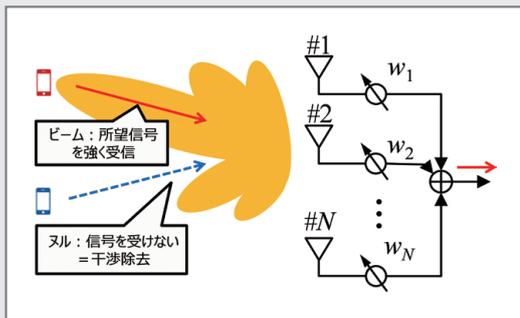
【図1】無線通信システムのモデル

を乗せることを「変調」と言います。電波は「周波数」という成分を持っており、どの周波数を用いるかで電波としての性質も変わってきます。これらは電磁気学や数学（三角関数や複素数）に基づき基本的な理論が確立されていますが、ここでは簡略化されたモデルとして電波を以下の式で表します。

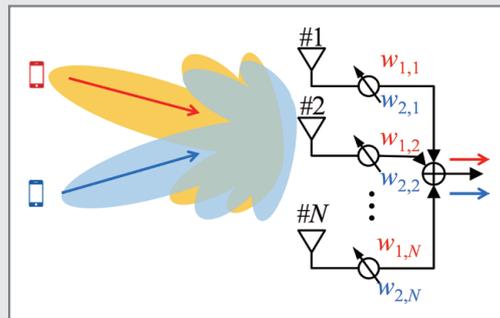
$$h = \frac{\lambda}{4\pi d} e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}} \quad (1)$$

これは波源をある点としたとき、球面上に電波が伝搬する様子をモデル化したものです。\$d\$[m] は送信アンテナ・受信アンテナ間の距離、\$\lambda\$[m] は波長であり、光の速さを \$c=3\times 10^8\$[m/s]、周波数を \$f\$[Hz] とすると、\$\lambda=c/f\$ の関係にあります。式 (1) に示すように、電波は振幅・周波数・位相の成分を持つことがわかります。特に、電波の振幅は距離に、電力は距離の 2 乗に反比例して小さくなります。これは、送信アンテナと受信アンテナの間に全く障害物が無い場合に成立します。実際の環境では、電波は地面や建物などにぶつかり、反射を繰り返しながら受信アンテナへ到達します。その過程で電力が低下してしまうため、一般には電波の電力は距離の 3.5 乗程度に反比例する形で減衰していきます。この値は伝搬係数と呼ばれ、建物の多い都市部、屋外・屋内といった環境によって異なります。この値は測定に基づく経験的なモデルとして定められています。

さらに、係数に含まれている波長 \$\lambda\$ は周波数が高くなるほど小さくなります。つまり、周波数が高くなるほど電波の減衰は大きくなってしまいます。これまで、携帯電話システム（セルラシステムとも言います）には、電波が反射や回折により遠くまで届きやすい 1~2 GHz 周辺のマイクロ波帯が用いられていました。その扱いやすさからマイクロ波帯は様々なシステムに割り当てられ、もう空きが無い状況となっています。そのためより高い周波数帯を新規に開拓する必要に迫られており、5G では 4 GHz 帯や 28 GHz 帯周辺の帯域が採用されています。とくに 28 GHz 帯はこれまでのマイクロ波帯と比べて非常に高く、距離に対する減衰が著しいことから通信可能範囲が狭くなるのが課題の一つとされています。



【図2】アレーアンテナ



【図3】空間多重伝送のイメージ

■ アレーアンテナ

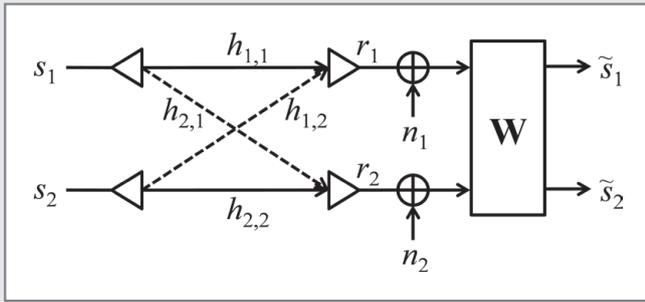
上述したように、電波は等方性を持っており、全方位へと伝搬していきますが、複数のアンテナを並べて適切な制御を行うことで、その方向を自在に操ることができるようになります。これがアレーアンテナという技術です【図2】。\$N\$本のアンテナに入力または出力される電波に対して位相を調整し、波が揃うようにして合成することで振幅を \$N\$ 倍、電力を \$N^2\$ 倍にすることができます。反対に、位相が互いに反転した状態で合成すれば両者はキャンセルされ、振幅は 0 となります。前者をビーム、後者をヌルと呼びます。この性質を利用して、信号をより強く、遠くへ届けたい／受信したい通信相手に対してはビームを向けたり、電波を届けたくない／受けたくない相手（干渉源）に対してはヌルを向けるなどすることができ、空間的に電波を操ることができるようになります。

■ 空間多重伝送

上記の原理を応用し、同じ時間、同じ周波数上において複数の信号を同時に送ることができます。これが空間多重伝送と呼ばれる技術です。複数の送信アンテナと受信アンテナを使って信号の入出力を行うことから、この技術は Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) と呼ばれます。直感的には、【図3】のように、通信相手の複数のアンテナに対して、それぞれ異なるパターンのビーム／ヌルを向け、重ね合わせるイメージです。この通信のモデルは、線形代数を用いて表すことができます。送信信号を \$s = [s_1, s_2]^T\$、受信信号を \$r = [r_1, r_2]^T\$ とします。伝搬路は \$2 \times 2\$ の行列

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{2,1} & h_{2,2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

として表すことができます。ここで、\$\mathbf{H}\$ の各要素は、伝搬環境にもよりますが式 (1) で示したような値を



【図4】 MIMO 伝送システム

とります。送信・受信アンテナの位置関係によって、振幅や位相が定まる係数です。送信信号が伝搬路を通過した後の受信信号は以下のように表されます。

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (3)$$

通信のモデルは一般的に、左から新たな要素を乗算することで説明されます。送信信号ベクトル \mathbf{s} に左から伝搬路行列 \mathbf{H} を乗算することは、送信信号が伝搬路を通過し、受信機に到達したことを示します。受信ベクトルのサイズは $[2 \times 1]$ なので、2本の受信アンテナで受信したことを意味します。また、 $\mathbf{n} = [n_1, n_2]^T$ は雑音であり、受信機のアンプなどで発生する通信品質の劣化要因です。受信アンテナ1の信号のみを表してみると、

$$r_1 = h_{1,1}s_1 + h_{1,2}s_2 + n_1 \quad (4)$$

となっています。アンテナ1に欲しいのは s_1 に関する信号のみであり、 $h_{1,2}s_2$ は不要な干渉信号です。ここで、通信における品質の指標として信号対干渉雑音電力比 (Signal-to-Interference-plus-Noise power Ratio, SINR) と呼ばれるものがあります。その名の通り、次の数式で定義されるように、信号電力と干渉+雑音電力の比をとったものです。一般的には、それぞれの要素は期待値 (多数のサンプルにおける平均値) として表されます。

$$\begin{aligned} \text{SINR} &= \frac{E[|h_{1,1}s_1|^2]}{E[|h_{1,2}s_2|^2] + E[|n_1|^2]} \\ &= \frac{E[|h_{1,1}|^2]}{E[|h_{1,2}|^2] + \sigma^2} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、送信信号の電力は1と仮定し、 $E[|s_i|^2] = 1$ としています。また、雑音電力を σ^2 と表します。式(5)はつまり、必要なもの (所望信号) のレベルに対して不要なもの (干渉と雑音) がどれだけの割合で混ざっているのか、を示すものです。SINRは大きければ大きいほど良い、ということになります。いま、干渉が不要な成分として入り込んでしまっているので、これを何かしらの方法でキャンセルすることが必要になります。そのためには、伝搬路行列の各要素の値を

推定し、その逆行列を受信信号に乗算します。この逆行列のことをウェイトと呼びます。

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}^{-1} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{s}} &= \mathbf{W}\mathbf{r} \\ &= \mathbf{W}(\mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}) \\ &= \mathbf{s} + \mathbf{W}\mathbf{n} \end{aligned} \quad (7)$$

すると、送信信号とウェイト×雑音の成分のみが現れ、雑音はいくらか残るものの、もとの送信信号を推定することができる、ということがわかります。このような操作により、受信アンテナ1, 2に到来する相互の干渉を除去し、あたかもそれぞれのアンテナで1対1の伝搬路が形成されているかのような通信を実現することができます【図4】。これが MIMO 伝送の原理です。

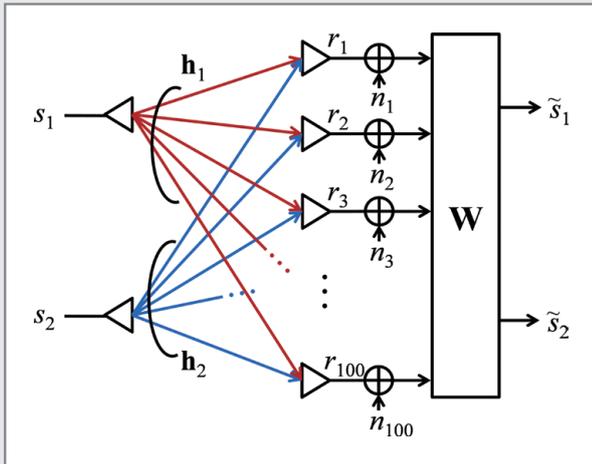
ここでは送信と受信のアンテナ数が2本ずつの場合を例に取り説明しましたが、アンテナ数を増やせば増やすほど、通信速度を高めることが可能です。

■ Massive MIMO

では、アンテナ数はどこまで増やすことができるのでしょうか？ またそのときにどのような効果が得られるのでしょうか。そのような大規模 (数十から数百素子) のアンテナ数を対象としたアレーアンテナ技術が Massive MIMO です。基地局に多数のアンテナを装備することで、多数の端末に対しての空間多重伝送が実現できます。これにより、システムとしての伝送速度を飛躍的に向上させることができます。通常、多数の端末に対して空間多重伝送を行うには前章で述べたような伝搬路行列の逆行列を求める処理が必要ですが、これには複雑な計算が必要になり、多重数が増えるほど計算量は増加してしまいます。しかし、Massive MIMO では多数のアンテナによる効果を利用してこれを簡易に実現することができます。簡単な例として、【図5】に示すような送信アンテナ数を2、受信アンテナ数を $N (=100)$ とした例を考えてみましょう。

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} g_1 e^{j\theta_{1,1}} & g_2 e^{j\theta_{2,1}} \\ g_1 e^{j\theta_{1,2}} & g_2 e^{j\theta_{2,2}} \\ \vdots & \vdots \\ g_1 e^{j\theta_{1,N}} & g_2 e^{j\theta_{2,N}} \end{bmatrix} \\ &= [\mathbf{g}_1 \mathbf{a}_1 \quad \mathbf{g}_2 \mathbf{a}_2] \end{aligned} \quad (8)$$

簡単のため、振幅は送信アンテナごとに共通 (g) とし、位相 (θ) のみが送信-受信アンテナごとに異なるものとしています。また1本の送信アンテナと基地局 N アンテナ間のチャンネルをベクトル形式にまと



【図5】 Massive MIMO システム

めて表記します。最もシンプルなウェイトは等利得合成 (Equal Gain Combining, EGC) と呼ばれる方法で、数式としては伝搬路行列の位相部分のみを取り出し、逆位相とすることで得られます。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^H \\ \mathbf{a}_2^H \end{bmatrix} \quad (9)$$

これを伝搬路行列に左から乗算します。ここで、受信ウェイトと伝搬路行列の積 $\mathbf{W}\mathbf{H}$ のみに着目します。

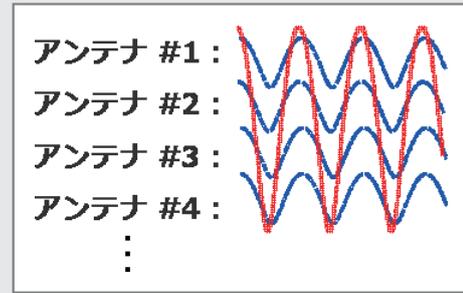
$$\mathbf{W}\mathbf{H} = \begin{bmatrix} g_1 \mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_1 & g_2 \mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_2 \\ g_1 \mathbf{a}_2^H \mathbf{a}_1 & g_2 \mathbf{a}_2^H \mathbf{a}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

この行列の対角要素は所望信号の大きさを表し、一方非対角要素は干渉信号の大きさを表します。SINR としては、以下のように表すことができます。

$$\text{SINR} = \frac{E[g_1^2 N^2]}{E[g_2^2 |\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_2|^2] + \sigma^2} \quad (11)$$

先に述べた逆行列によるウェイトは、 $\mathbf{W}\mathbf{H}$ を単位行列とし、干渉成分を 0 にする、つまり干渉を完全にキャンセルするものでしたが、EGC によるウェイトでは干渉信号は抑圧することなく残留します。一方、所望信号は、伝搬路係数の位相成分の複素共役の積から $\mathbf{a}_1^H \mathbf{a}_1 = N (=100)$ であり、受信電力が最大化され、かつアンテナ数に比例して増加することを意味します。

ここで、アンテナ数を増加させたときのイメージを、【図6】を用いて説明します。所望信号は位相を揃えた波を足し合わせるため、式(11)及び上記に述べたように振幅は N 倍、電力は N^2 に比例して増加します。他方、干渉成分はランダムな位相の波の合成となるため、その振幅は統計的にはアンテナ数の \sqrt{N} 倍、電力は N に比例して増加するに留まります。つまり、所望信号と干渉信号の増え方に差ができており、 N を大きくするほど所望信号と干渉信号の電力比に差がつくことになります。アンテナ数 10 本では 10 倍程



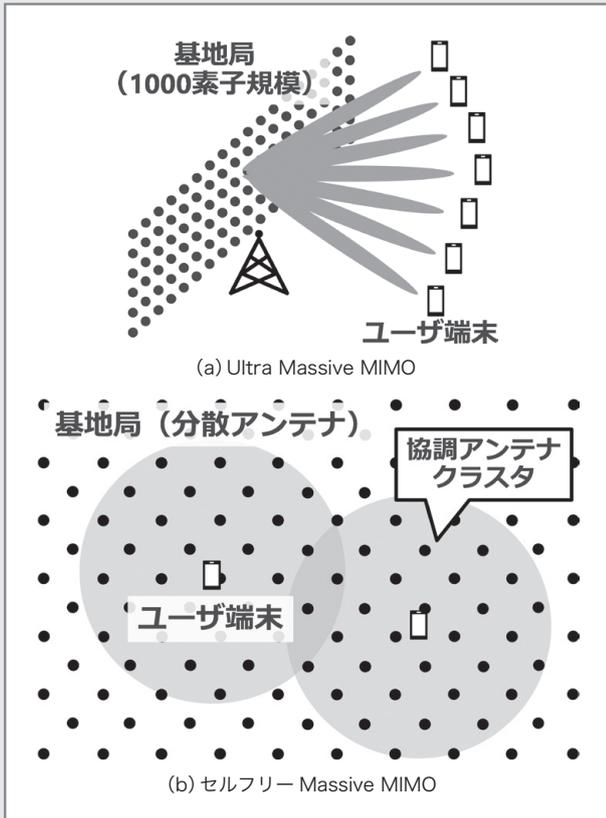
【図6】 システム内セル間干渉除去

度ですが、100 本ともなると 100 倍となり、通信品質としては十分なオーダーとなるのです。これが、複雑な行列演算を行うことなく高い通信品質での空間多重伝送を実現できるという Massive MIMO 最大の利点です。

また、5G では高周波数帯が新規に採用され、距離減衰が大きいことからカバレッジの狭小化が課題となっていることは前にも述べました。これに対し、多素子アンテナにより実現される高いアレー合成利得は激しい距離減衰が補償可能であり、この観点から Massive MIMO は高周波数帯と親和性が高いと考えられています。6G に向けては、100 GHz 以上の (サブ) テラヘルツ波の活用に向けた検討も進んでいます。距離減衰がさらに著しくなることから、多素子アンテナによるビームフォーミングの利用はますます不可欠なものとなります。そこで、アンテナ素子数の規模をさらにスケールアップさせた Ultra Massive MIMO や、Extra-Large MIMO (XL-MIMO) 等と呼ばれるアレーアンテナ技術の検討も始まっています【図7】。また、面的に分散配置されたアンテナ群を多素子アンテナと捉え、一括して信号処理・制御を行うことによりセルの概念を払拭するセルフフリー Massive MIMO も注目されています。いずれも高周波数帯へ移行しつつある無線通信システムの周波数資源を活用する有望な技術として発展が期待されます。

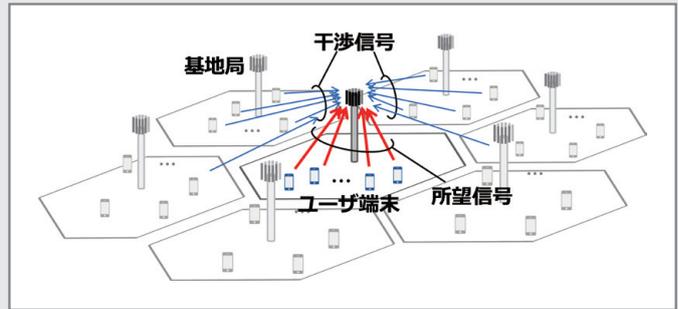
■ 研究事例の紹介 1 : 同一システム内干渉除去

電波は距離とともに減衰するため、無線通信システムでは一つの基地局がカバーする範囲があり、それを「セル」と呼びます。従来、セルラシステムは、セル間における電波干渉 (セル間干渉) の影響を受けないようにシステムに割り当てられた帯域を分割し、異なる周波数チャネルを割り当てて運用していました。しかし最近では、通信の高速化の需要から広帯域化が進み、かつ周波数資源の不足からすべて同じチャネルを

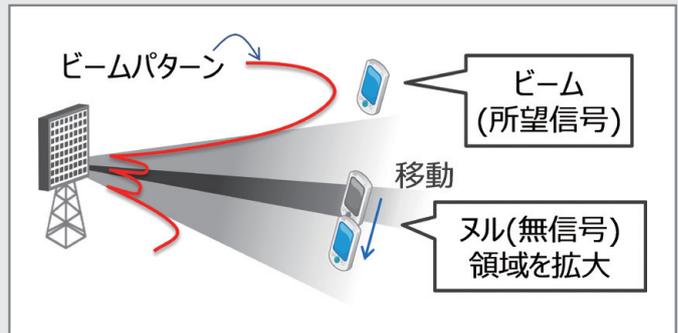


【図7】 Ultra Massive MIMO及びセルフフリー Massive MIMOのイメージ

割り当てる必要に迫られています。ここで上記のセル間干渉が問題となります。例えば、10台の端末が1台の基地局に対して信号伝送を行う場合、周辺に展開されるセル数を6とすると、自身のセル内における端末も含めて $10 \times 7 = 70$ もの信号が到来することになります。【図8】にそのイメージを示します。基地局が複数あり、その一つに携帯端末がつながります。赤い線が基地局内につながっている端末です。青い線は別の基地局から到来する干渉です。基地局が自身セルの一つの端末からの信号だけ受信したい場合、その他の69の干渉波を除去する必要があります。100素子のアンテナを備えていれば、それらの干渉を除去し、欲しい信号だけを適切に抽出することができます。このようにアンテナが持つ干渉除去/利得向上に関する能力を自由度と呼びます。この際に問題となるのが、干渉を含む多くの信号の中から所望信号だけを抽出する方法です。端末（送信）側のアンテナと基地局（受信）側のアンテナとの間の伝搬路の情報を把握することで、欲しい信号なのか、または干渉する信号なのかを見極め、干渉する信号を打ち消すのが従来の考え方です。しかし、自身セルの基地局と遠方に位置する他のセル内にある端末との伝搬路の情報を取得するには物理的かつシステム上の制約があり、簡単なことでは



【図8】 システム内セル間干渉除去

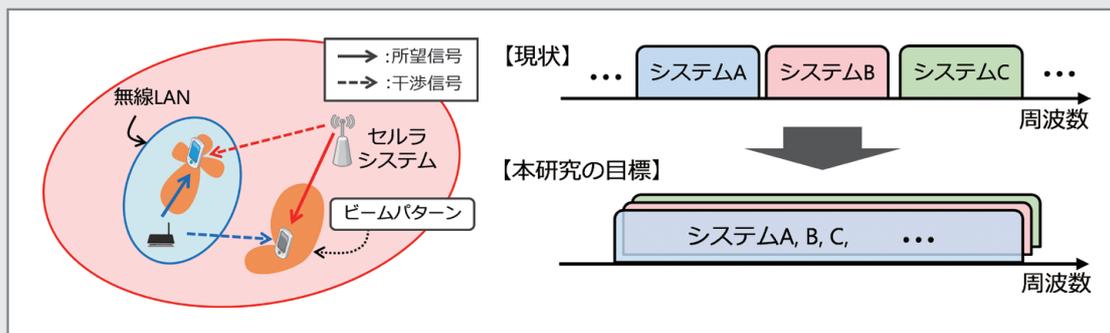


【図9】 移動環境におけるユーザ間干渉除去（ヌル空間拡張）

ありません。そこで、自セル内で得られる受信信号の情報を手掛かりに干渉信号を特定して除去するアルゴリズムを考案しました²⁾。これは Massive MIMO における基地局がもつ膨大なアンテナ自由度を、積極的に干渉除去に活用するアプローチの研究です。

■ 研究事例の紹介2：移動環境における干渉除去

超多素子アンテナによって解決する可能性がある電波干渉の問題の一つが、端末の移動により生じる干渉信号の抑制です。干渉除去のウェイトを算出するにはある時刻において推定・取得した伝搬路の情報が必要です。しかし端末が移動すると、基地局と端末との間の伝搬路の状況が変わってしまうため、せっかく推定し算出したウェイトがほとんど意味をなさなくなってしまいます。頻繁に伝搬路を推定する処理を行うのもひとつの手段ですが、それではデータ伝送に割けるリソースがなくなってしまい、これもかえって伝送効率の劣化につながります。これは空間多重伝送の実用化における大きな課題のひとつです。そこで、超多素子アンテナの膨大な自由度を活用し、端末の移動方向を予測するなどしてヌルを多数形成します。これにより、【図9】に示すように、ヌル領域が連続的に広がるため端末が移動したとしても干渉が低減された状況を維持し、安定した空間多重伝送を実現することができます³⁾。



【図10】異システム間干渉除去による周波数共有の概念

■ 研究事例の紹介3：異なるシステム間の周波数共有に向けて

私の研究の到達点のひとつは、「あらゆる電波干渉の克服」です【図10】。現在は携帯電話や無線LANなどの無線通信システムは互いの電波干渉を避けるように、異なる周波数帯（チャンネル）を棲み分けて利用しています。電波（周波数）は限られた資源であるため、いくらでも使えるわけではなく、限られた周波数資源（帯域幅）を分割して割り当てているのです。もし電波干渉が無くなれば、これらの様々な無線通信システムは周波数資源を使いたいだけ使えるようになります。

アレーアンテナ技術は電波の形を自在に操ることができるため、これを実現できるポテンシャルを秘めています。前述した Massive MIMO もそのひとつです。多数のアンテナを利用し、特定の方向へビームを向ければ他方への干渉を自然と抑制できる、という原理は、応用次第で様々な効果をもたらし得ると考えています。例えば、異なるシステムが同じ周波数を共用したときであっても、互いに与える干渉を最小限に抑えることができるようになります。

またアレーアンテナ技術には、受信した信号から学習し、ビームやヌルの方向を適応的に制御することもできます。しかし、周波数共有を考えたとき、自身のシステムから他のシステムの状態を知ることができないため、電波干渉が「いつ」、「どこから」、「どれだけ」、到来するかわからない、ということが最大の難点です。このような未知の干渉をいかに把握し、抑圧/回避するのか、機械学習の応用なども考えながら様々なアプローチで研究を進めています⁴⁾。

■ おわりに

本稿では、電波のモデル化からアレーアンテナ、

MIMO 通信における干渉除去のしくみを解説しました。ポイントとして、

- (1) 無線通信は数学的なモデルに基づき送信から受信までの一連の動作を表現できること
 - (2) このモデルをベースとして様々な課題設定ができ、その解決法を模索することができること
- の2点が挙げられます。今回はその一例を解説しました。無線通信は長い歴史がありながらも常に進展を続けているため、要素技術は多岐にわたります。過去を振り返りつつ最新のものを生み出す作業は大変ではありますが、非常に面白い分野だと思います。もちろんその先には、生み出した新たな原理を実際の装置に実装し、動くモノとして作りあげ、最終的に世の中にサービスとして展開・普及させていく、というステップを踏むこととなります。本稿を通して、無線通信における研究のイメージを持ってもらえたら幸いです。

参考文献

- 1) Z. Xiao et al., "Antenna Array Enabled Space/Air/Ground Communications and Networking for 6G," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 10, pp. 2773–2804, Oct. 2022.
- 2) K. Maruta, C-J. Ahn, "Uplink Interference Suppression by Semi-Blind Adaptive Array with Decision Feedback Channel Estimation on Multi-cell Massive MIMO Systems," in *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 66, No. 12, pp. 6123–6134, December 2018.
- 3) K. Arai, K. Maruta, C-J. Ahn, "Uplink Null-Space Expansion for Multiuser Massive MIMO in Time-Varying Channels Under Unknown Interference," in *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 224292–224305, December 2020.
- 4) H. Kobayashi, S. Kojima, K. Maruta, T. Sugiyama, C-J. Ahn, "CNN-based Blind SIR Classification Framework for STPA-BAA Spectrum Superposing," in *ICT Express*, Vol. 9, Issue 1, pp. 57–62, February 2023.

