

# 5G を実現する MIMO 技術

Fundamentals of MIMO Technologies for 5G

大鐘武雄 西村寿彦 小川恭孝



大規模 (Massive) MIMO は 5G 要素技術の一つである。これまでの常識とも言えるアンテナ数を大きく超える 100 から 1,000 程度の素子を用意し、数十程度の信号を同時に送受信しようというものである。大規模 MIMO の利点は、そのような多数の信号送受信を比較的簡易な信号処理で実現できるだけでなく、ミリ波など高周波数帯で深刻となる伝搬損を補償したり、垂直方向のビーム操作も可能となる。本稿では、大規模 MIMO の仕組みと期待される効果などについて簡単に紹介する。

キーワード：MIMO, 大規模 MIMO, ビームフォーミング, ミリ波, FD-MIMO

## 1. はじめに

無線通信における MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) システムは、送受信機に複数のアンテナを設置し、複数の信号を同時に送受信する手法である<sup>(1)</sup>。これにより、ほぼ送受信アンテナ数倍のチャネル容量<sup>(用語)</sup>を得ることができるようになった<sup>(2)</sup>。LTE-Advanced<sup>(用語)</sup>では 16 アンテナを使用し、最大 8 個の信号を同時に送受信できる仕様になっている<sup>(3)</sup>。

大規模 (Massive) MIMO とは、その名のとおり、送受信側にこれまで以上の多数のアンテナ素子を設置した MIMO システムである。その有効性について Marzetta が提案し<sup>(4)</sup>、急速に議論が発展してきた。現在では、5G の要求チャネル容量を達成するための要素技術として欠くべからざるものとなっている。ただ、設置スペースにある程度の余裕がある基地局は 100~1,000 素子規模が可能であるのに対し、端末側は数十素子のアンテナ

でさえ設置が困難である。そのため、比較的少数のアンテナを有する多数の端末と同時に通信することで、送受信共に大規模な MIMO 構成とするのが一般的なターゲットである (図 1)。

大規模 MIMO を支える理論は、これまで一般的に考えられてきた MIMO システムと何ら変わるものではない。しかし、いろいろな場面でスケールメリットが生じるように、大規模 MIMO でもその恩恵がある。その代表的なものが、過剰とも思えるほどのアンテナ素子を用意することで、信号処理を容易にできることにある<sup>(5)</sup>。

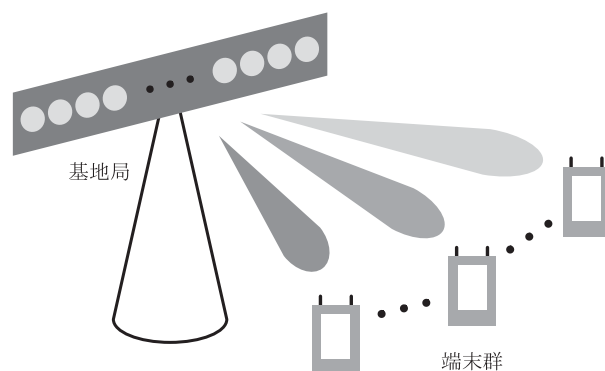


図 1 大規模マルチユーザ MIMO 基地局のアンテナ数は面積に余裕があり多数のアンテナを設置できる。少数のアンテナを有する端末多数と同時に通信することで、大規模 MIMO システムが実現できる。

大鐘武雄 正員：フェロー 北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻  
E-mail ohgane@ist.hokudai.ac.jp  
西村寿彦 正員 北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻  
E-mail nishim@ist.hokudai.ac.jp  
小川恭孝 正員：フェロー 北海道大学大学院情報科学研究科メディアネットワーク専攻  
E-mail ogawa@ist.hokudai.ac.jp  
Takeo OHGANE, Yasutaka OGAWA, Fellows, and Toshihiko NISHIMURA, Member (Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Sapporo-shi, 060-0814 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.101 No.11 pp.1117-1122 2018 年 11 月  
©電子情報通信学会 2018

本稿では、MIMO システムの基礎理論から大規模 MIMO の興味深い性質をひも解く。更に、ミリ波等の高周波数帯を使用する際に生じる伝搬損の問題が大規模 MIMO によって解決されることや、水平方向のみならず垂直方向のユーザ分離まで可能とするアンテナ配置等について、その概要を述べる。

## 2. 大規模 MIMO の基礎

### 2.1 MIMO システムとチャネル行列

前に述べたように、大規模 MIMO システムであっても、それを支える理論はこれまでの MIMO システムと変わらない。また、マルチユーザ MIMO システムの特性は、端末間の情報交換がないことからシングルユーザ MIMO システムとは異なるものの、合計チャネル容量の上限は総アンテナ数が等しいシングルユーザ MIMO 環境で規定できる<sup>(6)</sup>。そこで、ここではシングルユーザ MIMO システムのチャネル容量特性から、大規模化の利点を明らかにする。

MIMO システムの特性は、送信アンテナと受信アンテナ間のチャネル<sup>(用語)</sup>で一意に決定される。送信アンテナ数を  $N$ 、受信アンテナ数を  $M$  としたとき、第  $n$  送信アンテナから第  $m$  受信アンテナまでのチャネル  $h_{m,n}$  を二次元に並べた  $M \times N$  行列

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,N} \\ \vdots & h_{m,n} & \vdots \\ h_{M,1} & \cdots & h_{M,N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 用語解説

**チャネル容量** 物理的な伝搬路を表すチャネルにおいて誤りなく伝送可能な情報量の理論的上限値。シャノンによって導出された。

**LTE-Advanced** 2018 年現在使用されている携帯電話通信方式の最新規格のこと。

**チャネル** 二つの意味がある。一つは、送信アンテナと受信アンテナとの物理的な伝搬路を表す。もう一つは、送信信号を送信するために割り当てられた周波数や時間を表す。

**レイリーフェージング環境** フェージングによる変化の大きさが、レイリー分布という確率分布に従う環境を指す。反射や回折等によって多数の信号が種々の方向から到来する場合、この環境となることが多い。

**フェージング** 通信品質が時間や周波数によって変化することを表す。

**ユーザスケジューリング** 時間や周波数のリソースを、ユーザごとの状態の良し悪しや公平性によって割り当てること。

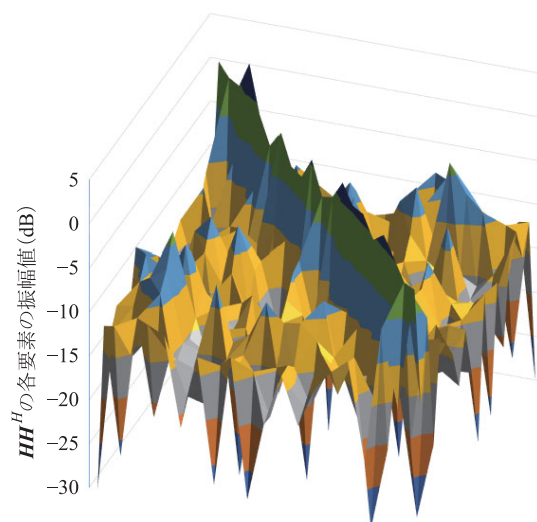
**プリコーディング** 複数のアンテナから信号を送信する際、各アンテナに位相と振幅の重みを付けて信号入力することを表す。

をチャネル行列と呼び、このシステムのチャネル容量はチャネル行列を用いて

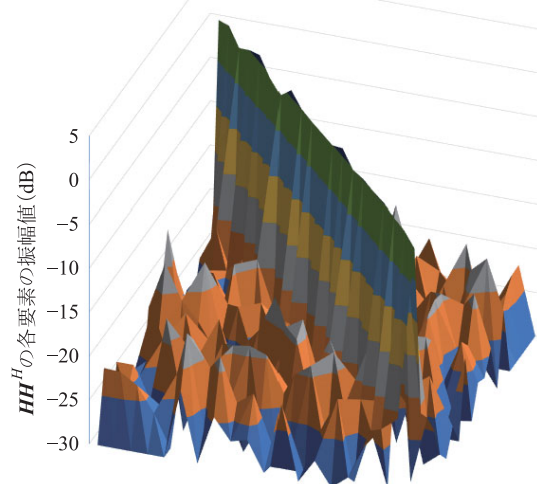
$$C = \log_2 \det \left( \mathbf{H} \mathbf{H}^H \frac{\gamma}{N} + \mathbf{I}_M \right) \quad (\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})) \quad (2)$$

と表せる<sup>(1),(2)</sup>。ここで  $\gamma$  は総送信電力を 1 素子のみに割り当てたときの受信 SN 比、 $\mathbf{I}_M$  は  $M$  次単位行列である。

式(2)中に現れる  $M$  次正方行列  $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$  はどんな行列だろうか。各チャネルが無相関なレイリーフェージング環境<sup>(用語)</sup>と考えられるとき、 $h_{m,n}$  は独立な平均 0 の複素ガウス分布に従う<sup>(7)</sup>。そこで、平均 0、分散 1 の独立同



(a)  $N=M=20$



(b)  $N=200, M=20$

図2  $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$  の各要素の大きさ (a)  $N=M=20$ , (b)  $N=200, M=20$ . 平均 0、分散 1 の独立同一な複素ガウス乱数でチャネル行列  $\mathbf{H}$  を生成し、20 次元正方行列  $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$  の各要素を送信素子数で規格化した。送信素子数が受信素子数の 10 倍になると、規格化した  $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$  は単位行列に近づくことが分かる。

一な複素ガウス乱数でチャネル行列  $\mathbf{H}$  を 1 個生成し、 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  の各要素を  $N$  で規格化したものを図 2 に示す。ただし、図 2(a) は  $N=M=20$  (一般の MIMO)、図 2(b) は  $N=200$ ,  $M=20$  (大規模 MIMO) の場合である。

$\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  の対角項は  $N$  個の非負値実数の和となるため、一般に、無相関な複素数の和となる非対角項よりも大きくなる。この傾向は  $N$  が大きくなると顕著になり、図 2(b) では、25 dB 程度の差が生じている。大規模化により  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H/N$  が単位行列に近づくことこそ、大規模 MIMO システムの大きな特長である。以下では、この性質から得られる幾つかの利点について述べる。

## 2.2 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ の固有値

大規模 MIMO の一般的な条件 (基地局アンテナ数  $>$  総端末アンテナ数) から  $N \geq M$  とすると、式 (2) は  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  の固有値  $\lambda_m$  ( $m=1, \dots, M$ ) を用いて

$$C = \sum_{m=1}^M \log_2 \left( \lambda_m \frac{\gamma}{N} + 1 \right) \quad (3)$$

と書き換えられる。この式は、チャネル容量が各固有値の大きさに依存していることを表している。固有値が 0 であれば、 $\log_2 1 = 0$  となってチャネル容量に寄与しない。非ゼロの固有値数は  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  のランク、すなわち、 $\mathbf{H}$  のランクに一致する。更に、与えられた MIMO チャネルにおける等価並列チャネル数でもあり<sup>(1)</sup>、送信できる異なる信号数 (ストリーム数) を表す。

一般に、固有値は大きさに差異がある。しかし、

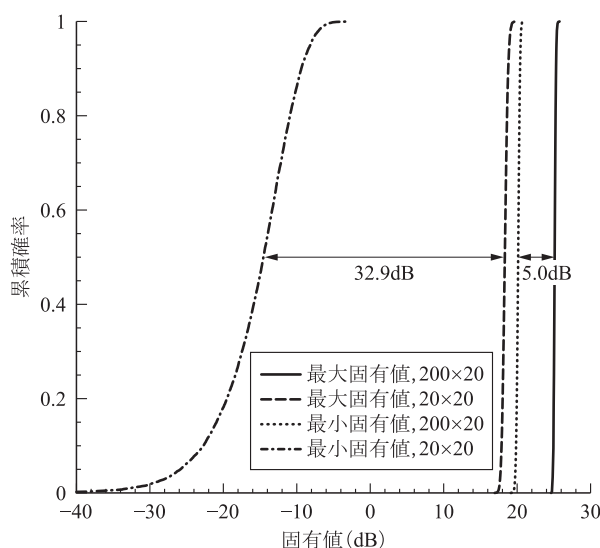


図 3  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$  の固有値分布 平均 0、分散 1 の独立同一な複素ガウス乱数でチャネル行列  $\mathbf{H}$  を 1 万回生成し、最大固有値と最小固有値の累積分布を求めた。中央値で評価すると、 $M=N=20$  のときは最大固有値と最小固有値に約 33 dB の開きがあるのに対し、 $N=200$  と大規模になると約 5 dB に減少する。

$\mathbf{H}\mathbf{H}^H/N$  が単位行列であれば、全ての固有値が等しい大きさを持ち、 $M$  ストリームの信号が等品質に伝送可能となる。平均 0、分散 1 の独立同一な複素ガウス乱数でチャネル行列  $\mathbf{H}$  を 1 万回生成し、最大固有値と最小固有値の累積分布を評価したのが図 3 である。最大固有値と最小固有値の中央値を比較すると、 $M=N=20$  では約 33 dB の違いがあるのに対し、 $N=200$  と大規模になると約 5 dB まで減少する。すなわち、20 個のストリームを伝送した際、 $N=200$  では品質の差が 5 dB 程度であるのに対し、 $N=20$  では 20 番目のストリームの品質が悪い。マルチユーザ MIMO システムで考えると、大規模 MIMO では基地局からほとんど同じ距離にいるユーザにはほぼ等しい通信品質を提供できると言える。このことは、公平性の観点から非常に好ましい。

次に、信号品質が変化するフェージング<sup>(用語)</sup>という観点で図 3 を見てみよう。 $M=N=20$  のときの最小固有値は、1 万回の最大値と最小値では約 50 dB の差があった。これは、フェージングにより大きく品質が変化することを意味する。一方、大規模 MIMO では、最もフェージングの影響を受ける最小固有値であっても、その最大値と最小値の差は僅か約 1.6 dB である。各アンテナ間の品質が大きく変化する環境下でも、多数のアンテナがあることで良い品質のチャネルが存在する確率が高くなり、ユーザ間の品質差が少なくなると言える。このため、ユーザスケジューリング<sup>(用語)</sup>を容易にできる利点がある。

## 2.3 送信素子数と MIMO チャネル容量

式 (3) は  $N$  本の送信アンテナから等電力で独立な信号を送信した場合のチャネル容量式である。そのため、各送信アンテナの電力は 1 素子のみの場合と比較して  $1/N$  になり非効率である。実際は、送信信号数は高々全受信アンテナ数 ( $M$ ) 分あればよい。このため、通常プリコーディング<sup>(用語)</sup>と呼ばれる送信ビーム生成が行われる。このとき、 $N \times M$  プリコーディング行列を  $\mathbf{W}$  とすると、送信信号は  $\mathbf{W}\mathbf{s}$  として生成される。ただし、 $\mathbf{s}$  は  $M$  次元信号ベクトルである。

プリコーディング行列  $\mathbf{W}$  には幾つかの生成手法がある。代表的なものとして<sup>(6)</sup>、最大比合成送信ダイバーシチ (MRC)、ZF (Zero Forcing) 並びに MMSE (Minimum Mean Square Error) アルゴリズムに基づくプリコーダ

$$\mathbf{W}_{\text{MRC}} = \mathbf{H}^H \quad (4)$$

$$\mathbf{W}_{\text{ZF}} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = \mathbf{H}^H (\mathbf{H}\mathbf{H}^H + \alpha \mathbf{I}_M)^{-1} \quad (6)$$

(注 1) ただし、各ユーザの送信電力を同一にする際は、各列ベクトルのノルムが 1 になるように正規化する必要がある<sup>(6)</sup>。

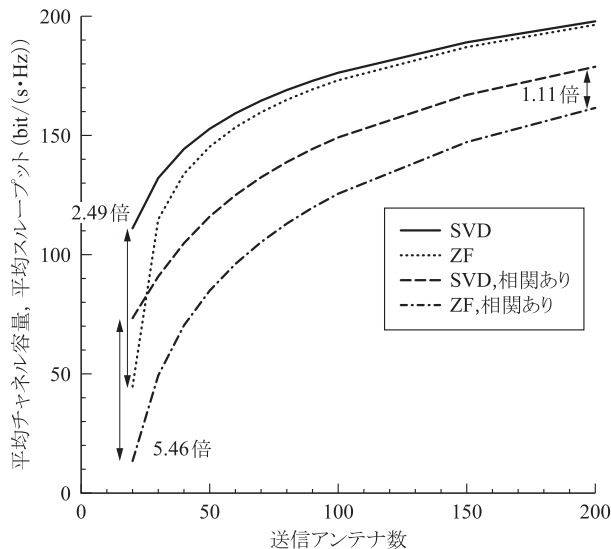


図4 素子数に対するチャネル容量の変化  $\gamma=20$  dB のときのチャネル容量. SVD は固有モード伝送, すなわち, 最適条件である. 「相関あり」は送信側相関係数 0.9, 受信側相関係数 0.5 の指数相関行列を考慮した場合. 素子数の増加に伴う改善量は減少するものの, 現実的な送信方法である ZF プリコードを用いたときの劣化量が小さくなる.

がある<sup>(注1)</sup>. なかでも, チャネル容量を最大化する最適なプリコーディング行列は,  $\mathbf{H}$  を特異値分解 (SVD: Singular Value Decomposition) し右特異ベクトルを  $M$  個並べたものであり<sup>(1), (6)</sup>, この手法を固有モード伝送と呼ぶ.

これらの中で, ZF プリコードと固有モード伝送に着目し, 総送信電力を 1 素子だけに割り当てたときに受信 SN 比が 20 dB となる条件と同一の総送信電力において, チャネル容量 (固有モード伝送) 及び達成可能なスループット<sup>(注2)</sup> (ZF) を評価した結果を図 4 に示す. このとき, チャネル行列は, 独立同一分布する複素ガウス乱数で生成したものと, 隣接送信素子間で 0.9, 隣接受信素子間で 0.5 の相関の指数相関行列<sup>(1)</sup>を想定した相関ありの 2 通りを示す. また, マルチユーザ環境としては公平性に欠けるものの, 最大チャネル容量あるいは最大スループットを達成するよう注水定理による電力制御<sup>(1)</sup>も行った.

理論的な上限値である無相関時の固有モード伝送の特性を見ると, 送信素子数の増加とともにチャネル容量が増加することが分かる. ただし, その増加は徐々に緩やかとなり, 100 素子から 200 素子へと増加させる恩恵はそれほど大きくないように見える. しかし, ZF プリコードを用いた場合と比較すると, 20 素子では約 2.5

倍の差があったのに対し, 200 素子ではほとんど同一のスループットが達成できており, 最適なプリコーディングに漸近することが分かる.

実際, 2.1 で述べたように  $\mathbf{H}\mathbf{H}^H/N$  が単位行列に近づくとき, 式(4)~(6)は全て等価となり<sup>(5)</sup>, 更に固有モード伝送のプリコーディングとも等価となる. 簡易なプリコードを用いても特性の劣化が少ないことは, 大規模 MIMO の大きな利点である.

相関がある場合の送信素子数の増加による改善量は, 固有モード伝送, 及び, ZF プリコード共に大きくなる. また, 両者の比は 20 素子で 5.5 倍程度あるものの, 200 素子で 1.1 倍程度まで低減できる. このように, 送信素子数の増加が劣悪な環境や最適でないプリコードを用いたときに極めて効果的であることも大きな利点であると言えよう.

### 3. ビームフォーミング

式(4)~(6)のプリコーディングを行うことは, 各アンテナ素子に重みを付けて送信することに対応する. このとき, 電波が強い方向と弱い方向が生じる. この強い方向を中心とした電波の強い範囲をビームと呼ぶ. ビーム形状は, チャネル行列とプリコードによって様々に変化する. ミリ波のような高周波数帯では, 見通し環境で使用されることも十分に考えられるため, 反射波や回折波のない単純な伝搬路を考える. このとき, ビーム形状は視覚的に分かりやすく表現できる<sup>(注3)</sup>. 以下では, 送信アンテナ素子が半波長間隔で一直線に配置され, あるユーザが直線アレーの並びと垂直な方向に存在すると仮定する.

直線アレーの指向性利得 (ある角度にどの程度強く信号を放射できるか) は, アレーの構成と振幅・位相重みにより決定される送信方向と強さの関係をj用いて表せる. これをアレーファクタと呼ぶ. 当該ユーザに強い電波が届くよう送信するためには, 各アレー素子から同相・同振幅で送信すればよい. このとき, アレーファクタは

$$g(\theta) = \left| \frac{\sin(\pi Nd \sin \theta / \lambda)}{\sin(\pi d \sin \theta / \lambda)} \right| \quad (7)$$

で与えられる<sup>(8), (9)</sup>. ここで,  $d$  はアレーの素子間隔,  $\lambda$  は送信信号の中心周波数に対する波長である. 図 5 に送信素子数が 20 及び 200 のときのアレーファクタを示す. 素子間隔は半波長とした. 横軸はアレーと垂直な方向を

(注2) ZF プリコーディングを用いた際, 多重化された各信号の受信 SN 比を, シヤノンのチャネル容量式に代入して得られたものの合計である.

(注3) 反射・散乱が多い環境では, 明確なビームが見られないことも多い. しかし, 図 3 のように固有値が改善する結果からプリコードによるビームの効果が垣間見える.



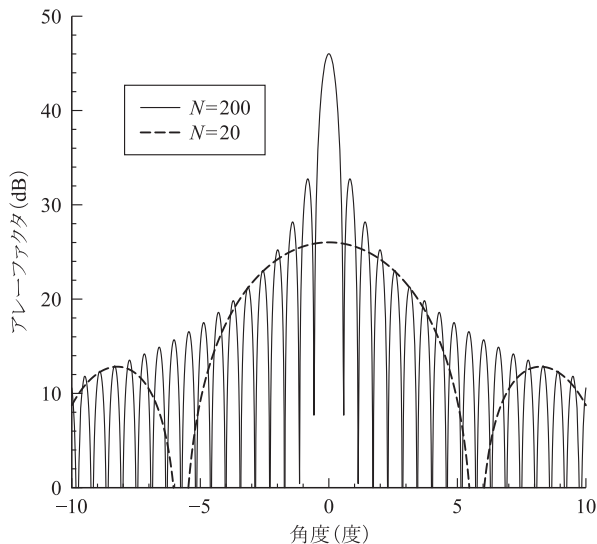


図5 等間隔直線アレーのアレーファクタ 素子間隔半波長の直線アレーのアレーファクタである。素子数20と比較すると、素子数200の場合は非常に鋭く20 dB（100倍）も強いビームが生成される。ただし、総送信電力を同一にすると1素子当りの電力は素子数に反比例するため、200素子の場合は20素子よりも10倍強い電波が届く。

0度としたときの送信方向である。図から、200素子の場合、鋭いビームが生成されていることが分かる。特に0度方向を見ると、20素子の場合にはアレーファクタが約26 dBであるのに対し、200素子の場合には約46 dBとなり、20 dB、すなわち、100倍も強い電波を照射している。

一般に、等間隔直線アレーにおいて等振幅励振を行えば、そのアレーファクタの最大値は  $20 \log_{10} N$  (dB) となる。ただし、総送信電力を同一とすると1素子当りの電力は素子数に反比例する。この劣化も考慮すれば、実効的なアレーファクタは  $20 \log_{10}(N/\sqrt{N}) = 10 \log_{10} N$  (dB) で表される。すなわち、素子数を2倍にすれば受信電力も2倍に増加できる。

この利点はミリ波などの高周波帯で重要となる。自由空間の電波伝搬を表すフリスの伝達公式<sup>(7)</sup>によれば、送信電力を  $P_t$ 、送受信アンテナの利得をそれぞれ  $G_t$ 、 $G_r$ 、伝搬距離を  $z$  とすると

$$P_r = \left( \frac{\lambda}{4\pi z} \right)^2 G_t G_r P_t \quad (8)$$

として受信電力が求められる。この式は、同じ利得を持つアンテナを利用した場合、受信電力は周波数の二乗に反比例することを示している。したがって、例えば中心周波数が5 GHzから50 GHzになったとすると、受信電力は1/100に低下してしまう。

この損失を補償できるのが、前述のアレーファクタで

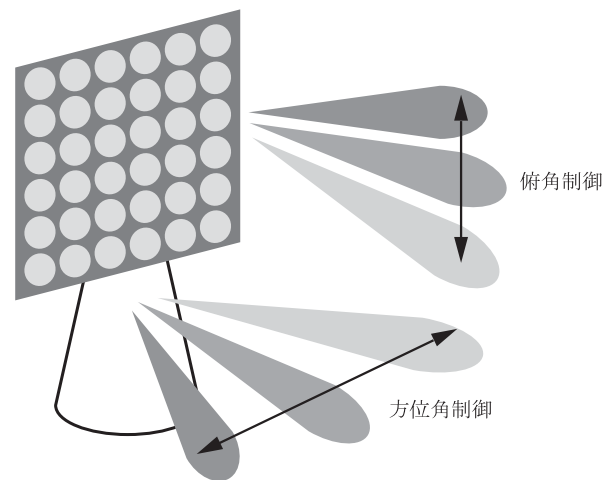


図6 FD-MIMO 基地局のアンテナを二次元に配置すれば、方位角方向だけでなく、俯角方向もビームの制御が可能となる。

ある。アレーの素子数を5 GHzのときの100倍にすれば、50 GHzでも等しい受信電力にできる<sup>(注4)</sup>。これが大規模MIMOの別の利点である。なお、100倍の素子を並べるのは一見すると容易でない。しかし、後述する二次元配置では、少なくとも設置スペースの問題は軽減できる。

#### 4. FD-MIMO

最後に、大規模MIMOで生まれた新しい概念<sup>(注5)</sup>であるFD-MIMO (Full-Dimension MIMO) について紹介する。FD-MIMOは、一般に図6のようにアンテナを二次元配置することで、方位角方向だけでなく、俯角方向のビーム制御も可能としたものを指す<sup>(10)</sup>。同一方向の近傍・遠方ユーザを分離したり、垂直方向において異なる位置にいるユーザを分離できるため、特性の改善が期待されている。

また、このような二次元配置を行えば、素子数を100倍にするためには、水平方向の素子数は10倍で済む。例えば、前述の中心周波数5 GHzを50 GHzにする場合、波長が1/10となるので、10倍の素子を設置する影響はほとんどなく、二次元配置全体でもほぼ同一の面積で素子数を100倍にできる。ミリ波などの高周波数帯では、大規模FD-MIMOが十分な通信範囲確保のための重要な技術となっている。

(注4) 自由空間の場合に限る。

(注5) あくまでも携帯電話の分野でこれまで余り議論されなかったという意味である。レーダなどでは当たり前の概念である。

## 5. ま と め

本稿では、大規模 MIMO の基礎を成す考え方と、素子数とチャネル容量の関係、アレーファクタによる受信電力増加効果等について簡単に述べた。日本の 5G 関連プロジェクトでは、既に大規模 MIMO の実装と伝送実験を行っている。プリコーディング・ビーム生成手法はそれぞれ異なり、各社の腕の見せ所となっている。詳細な内容は既に学会等で報告されているので、是非一読して頂きたい。数年前とは全く規模が違うシステムが、すぐ目の前に来ていることが実感できるはずである。

## 文 献

- (1) 大鐘武雄, 小川恭孝, わかりやすい MIMO システム技術, オーム社, 東京, 2009.
- (2) E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," Eur. Trans. Telecommun., vol. 10, no. 6, pp. 585-595, Nov./Dec. 1999.
- (3) 佐野洋介, 福田敦史, 奥山 卓, 柿島佑一, C. Na, "LTE-Advanced Release 13 におけるマルチアンテナ送受信および受信機能改善技術," NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, vol. 24, no. 2, pp. 59-68, July 2016.
- (4) T.L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," IEEE Trans. Wirel. Commun., vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.
- (5) F. Rusek, D. Persson, B.K. Lau, E.G. Larsson, T.L. Marzetta, O. Edfors, and F. Tufvesson, "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," IEEE Signal Proc. Mag., vol. 30, no. 1, pp. 40-60, Jan. 2013.
- (6) 西森健太郎, マルチユーザ MIMO の基礎, コロナ社, 東京, 2014.
- (7) 唐沢好男, デジタル移動通信の電波伝搬基礎, コロナ社, 東京, 2016.
- (8) 後藤尚久, 新井宏之, 電波工学, 朝倉書店, 東京, 2014.
- (9) "アレーアンテナ," 庄木裕樹(編), 信学知識ベース「知識の森」, 4 群 2 編 7 章, <http://www.ieice-hbkb.org/>
- (10) Y.H. Nam, B.L. Ng, K. Sayana, Y. Li, J. Zhang, Y. Kim, and J. Lee, "Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology," IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 6, pp. 172-179, June 2013.

(平成 30 年 5 月 31 日受付 平成 30 年 6 月 18 日最終受付)



大鐘 武雄 (正員:フェロー)

昭 61 北大大学院修士課程了。同年郵政省電波研究所(現, 情報通信研究機構)入所。平 4-07~平 7-03(株)ATR 光電波通信研究所に出向。平 7 北大大学院工学研究科助教授, 平 16 同大学院情報科学研究科助教授, 平 19 同准教授, 平 27 同教授。MIMO システム等に関する研究に従事。平 17~18 英国ブリストル大客員研究員, 博士(工学)。平元年度本会篠原記念学術奨励賞, 平 5 IEEE AP-S Tokyo Chapter Young Engineer Award, 平 18 年度本会論文賞, 平 19 年度電気通信普及財団賞(テレコムシステム技術賞), 平 29 年度本会通信ソサイエティ論文賞各受賞。IEEE 会員。



西村 寿彦 (正員)

平 10 北大大学院工学研究科博士後期課程了。同年同大学院工学研究科助手, 平 16 同大学院情報科学研究科助手, 平 19 同助教, 平 29 同准教授。MIMO システム等に関する研究に従事。博士(工学)。平 11 年度本会学術奨励賞, 平 18 年度本会論文賞, 平 19 年度電気通信普及財団賞(テレコムシステム技術賞), 平 29 年度本会通信ソサイエティ論文賞各受賞。IEEE 会員。



小川 恭孝 (正員:フェロー)

昭 53 北大大学院博士課程了。昭 54 同大学・工・講師, 昭 55 同助教, 平 7 同大学院工学研究科教授, 平 16 同大学院情報科学研究科教授, 平 25 同名誉教授。MIMO システム等に関する研究に従事。平 4~5 米国オハイオ州立大にて, 電磁波の高分解能測定に関する研究に従事。工博。昭 53 年度丹羽記念賞, 昭 56 年度本会学術奨励賞, 平 18 年度本会論文賞, 平 19 年度電気通信普及財団賞(テレコムシステム技術賞), 平 25 年度本会業績賞, 平 29 年度本会通信ソサイエティ論文賞各受賞。IEEE フェロー。