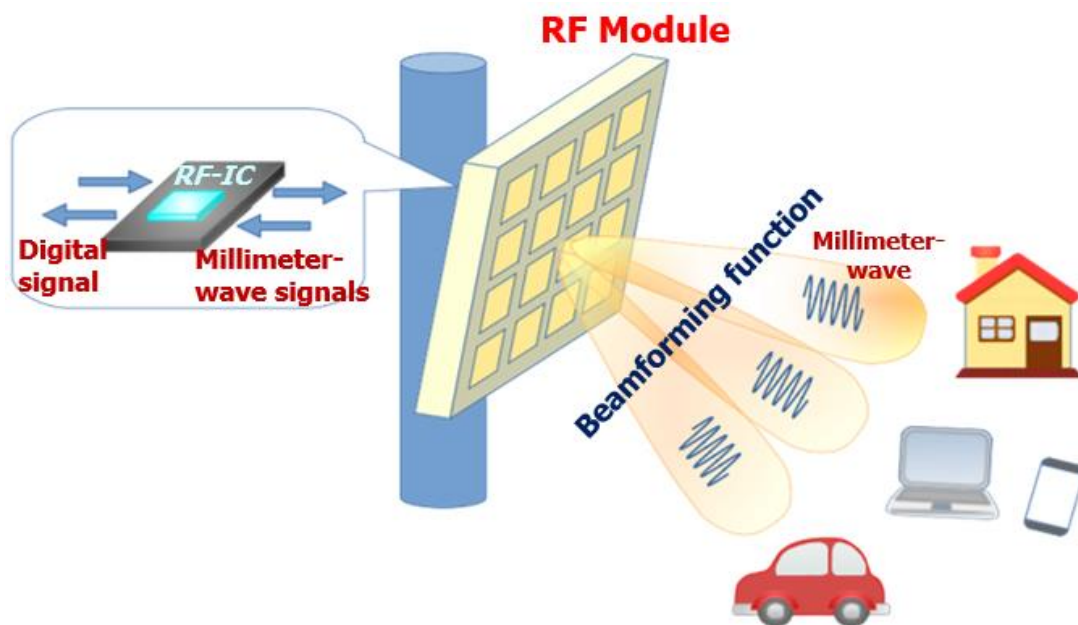




5G ミリ波 フェーズドアレイアンテナ

5G mmWave
Phased Array Antenna



目次

1. はじめに
2. フェーズドアレイアンテナの原理
3. ビームフォーミング
4. ビームサーチ
5. フジクラの技術
6. まとめ

1. はじめに

第5世代移動通信システム(5G)では、無線通信の高度化が必要になり、電波の送受信に「フェーズドアレイアンテナ」の技術が重要になります。このアンテナは、強い指向性を有し、遠くまで電波を飛ばせる上、動く相手に向け電氣的に電波の飛ぶ向きを変えることができます。

5G では主に Sub6 GHz 帯(6GHz 未満の周波数帯)およびミリ波帯(概ね 30GHz 以上の周波数帯)の周波数を用いますが、FWA(Fixed Wireless Access: 固定無線アクセス)の CPE(Customer Premises Equipment: 顧客宅内機器)や携帯端末等と基地局の間の大容量伝送の実現には、ミリ波帯による通信は必要不可欠となります。

これはすなわち、電波は周波数が高くなるほど、より広い帯域幅が確保できることから、通信データレート(通信容量)を上げることができるという特長によります(「ミリ波通信の回線設計」[1]参照)。

一方で、ミリ波は空間損失が大きいため、電波が遠くまで届きにくくなります。より遠くまで電波を届けるには、鋭い指向性を持つ高利得アンテナにより、等価的に送信出力と受信感度を高める必要がありますが、結果として電波の届く範囲(角度範囲)が、利得の低い無指向性アンテナと比較して狭くなります。周波数の高いミリ波の特長を生かしながら、弱点を克服し、より遠く、広い範囲の相手と通信を行うには、フェーズドアレイアンテナにより電波を鋭く絞りつつ、自在に特定の方向に向けて放射するビームフォーミング技術が重要になります。また、この技術により電波の空間多重も可能となります。スモールセル内における周波数の利用効率の観点から、5Gにおけるキー技術の一つとも言えます。

世界中の多くの通信事業者がミリ波を用いた基地局の設置をすでに始めており、これからの数年の間にさらに膨大な基地局の運用を始める計画を立てています。例えば、日本の NTTドコモ社はすでに500の基地局を設置し、2022年度中に2万局の設置を計画しています。

以下のような利点があることから、多くの基地局で通信事業者はフェーズドアレイアンテナを採用しています。

- ・低消費電力で長距離の通信が可能
- ・瞬時にビームステアリングを行うことで、高速でのユーザー切り替えが可能
- ・Gb/s オーダーの高速通信が可能

図1にフェーズドアレイアンテナを用いた RF モジュールの機能ブロック図を示します。このモジュールでは、中間周波数信号をミリ波信号に変換し、変換された信号を各アンテナエレメントに接続された移相器へ分配します。

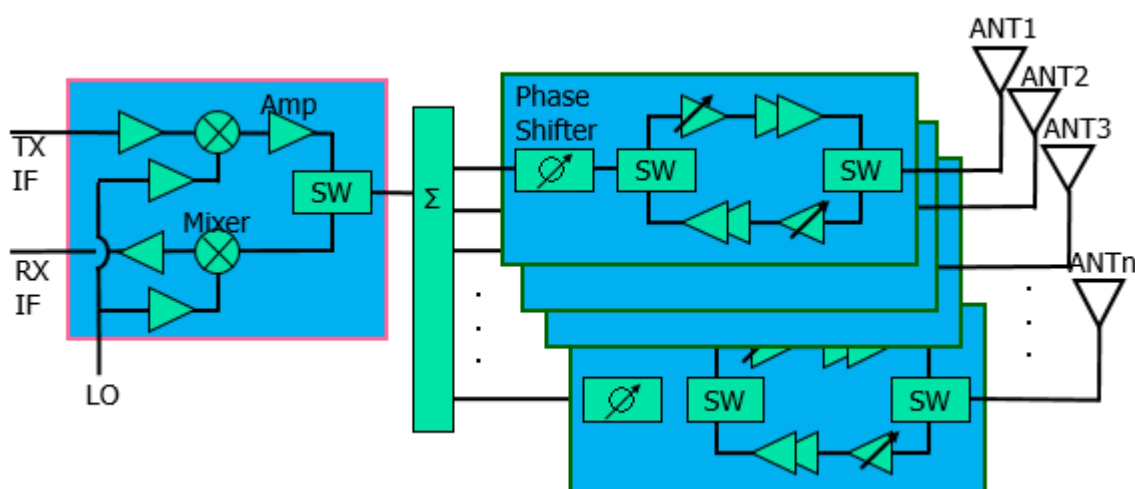


図1 フェーズドアレイアンテナを持つ RF モジュールの機能ブロック図

2. フェーズドアレイアンテナの原理

図2にフェーズドアレイアンテナの構成を示します。単にフェーズドアレイアンテナという場合、用途や周波数に応じていろいろなタイプが存在しますが、ここでは主にミリ波通信に使用されるものを考えます。図2に示されているように、基板の上に多数の四角いパターン(この例では16個)が、整然と並んでいます。この四角いパターンの一つ一つが「アンテナ素子」を示し、これらの素子を多数整列させ、かつ各素子に適切に位相制御された信号を同時に供給するアンテナを「フェーズドアレイアンテナ」と呼び、これはより大きなアンテナと等価的に同等な利得や指向性を持つアンテナとして動作します。位相制御の一例として、すべての素子に同じ位相の信号を送り込むと、正面に強い指向性を持ったアンテナとして動作します。各アンテナ素子の3次元的な構造や配置はフェーズドアレイアンテナの性能を決める主要な要素であり、実際には、非常に複雑な構造をしています。

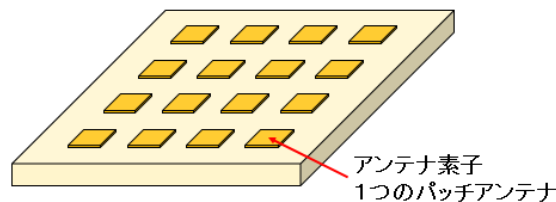


図2 フェーズドアレイアンテナの構造

図3に、このフェーズドアレイアンテナの基板内部や反対面に形成される駆動回路の模式図を示します。中心付近に送信機(発振器)本体があり、そこから16個のアンテナ素子に向かって信号が分岐していきます。最後の分岐とアンテナ素子の間にあるのが「移相器」で、フェーズドアレイアンテナの動作、すなわちビームの向きを自在に制御するための重要な機能を持ちます。

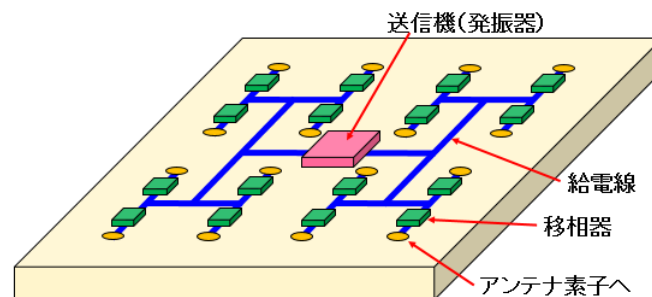


図3 フェーズドアレイアンテナの駆動回路の模式図

ここでは、送信側を例にしていますが、受信機でもほぼ同じ構造をしています。また、同じ形態で送信と受信の両方の動作を行う場合もあります。

フェーズドアレイアンテナでは、図3のように、アンテナ素子を「2次元」に配置することで、縦横両方にビームを振ることができます。ここでは説明を簡易にするため、1列分を取り出し、「1次元」アレイアンテナとして、より詳細な動作を示していきます。

図4に、4素子の1次元フェーズドアレイアンテナの模式図を示します。発振器から4分岐された給電線が移相器を通してアンテナ素子に接続されています。ここで、給電線の長さが等長、つまり、発振器からそれぞれのアンテナ素子までの長さがすべて等しい場合、各素子から放射される電波は同じ位相を持ちます。

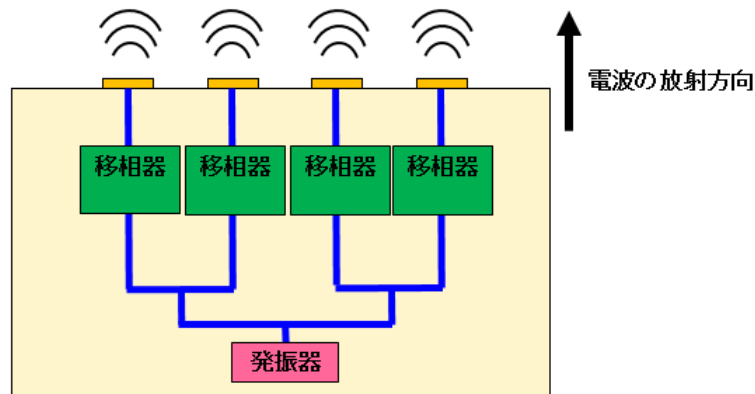


図4 4素子フェーズドアレイアンテナの模式図

フェーズドアレイアンテナは、この位相の重ね合わせの制御により放射方向の制御を実現するアンテナです。フェーズドアレイの動作については、電波の「波」としての性質がその理解に役立ちます。図5に位相のイメージを示します。左から来た2つの波が図の中心で重畳されて右側に進んでいく際に、波の頂点の位置が同じ、すなわち同じ「位相」の波が重なると、図5aに示すように強められた波となって進みます。一方で、逆の「位相」の波が重なると、打ち消し合い、図5bに示すようにほとんど波がなくなる結果となります。

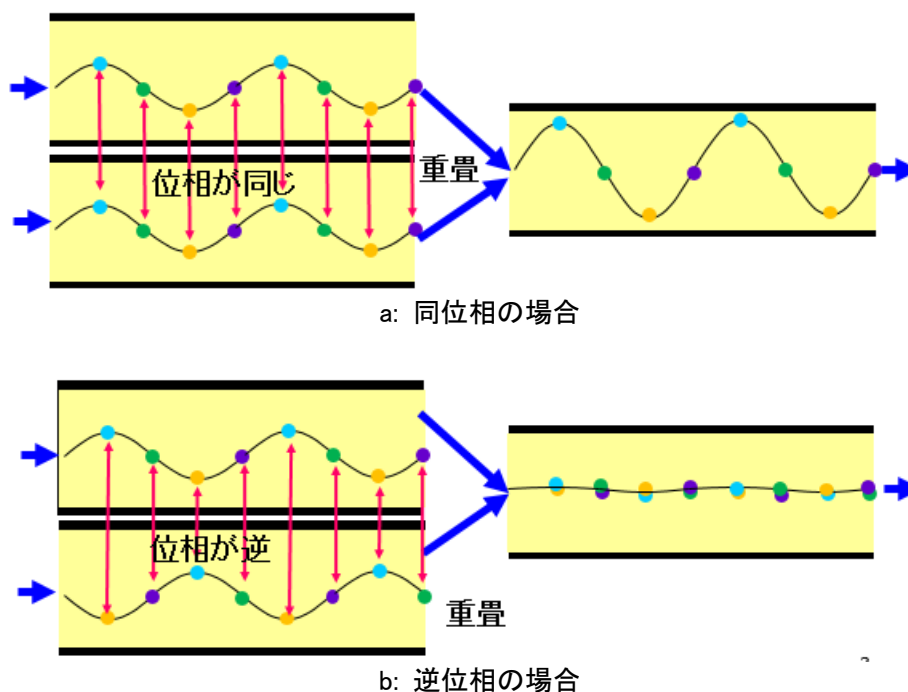


図5 位相と位相の重ね合わせのイメージ

フェーズドアレイアンテナのそれぞれのアンテナ素子から放射された電波は、図6aに示すように、各素子から同心円状に広がっていきます。図6の波のイメージは、各アンテナ素子から「同位相」の波が出ている場合に、波の頂点が進んでいく様子を、時間順に紫→橙→緑→青の各同心円で表しています。このとき、同じ色の線(波の頂点)が重なったところ、つまり「位相がそろった位置」で波が重なって強め合うことになります(図6a中、丸印で表現)。これらの「強め合う位置」は、紫から始まり、橙→緑→青の順に進行していくので、図6では、正面に向かう波が強くなり、正面に「指向性が強まる」こととなります。

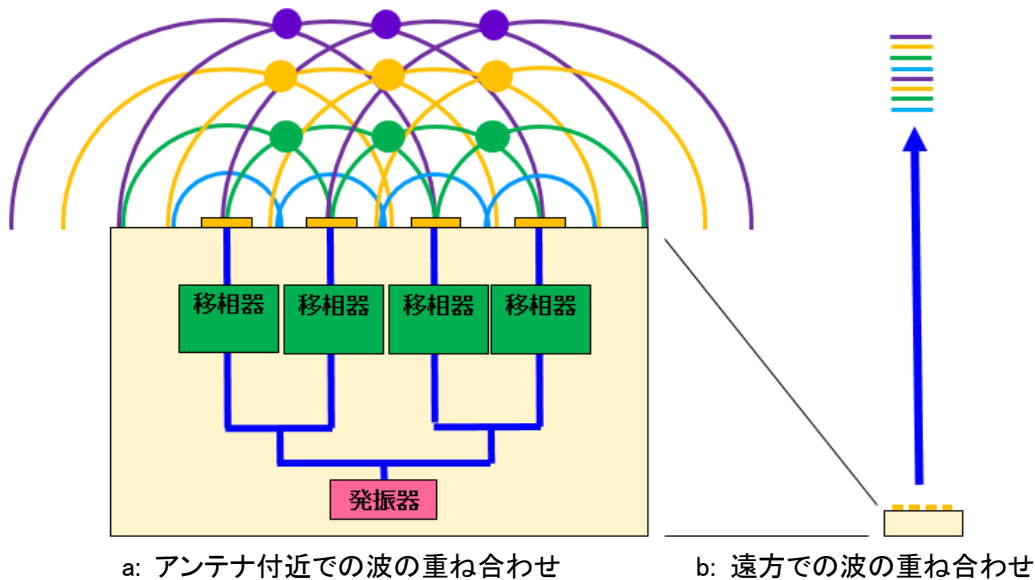


図6 アンテナ素子からの波の広がりとの重ね合わせ

図6aのように、アンテナ付近では、アンテナ素子間の距離に対して、電波の進行距離(=同心円の半径)が小さいため、4つの素子から出た波は十分に重なっていませんが、ある程度遠方まで伝搬すると、この円の半径が大きくなり、図6bのように、ひとつに重なった波とみなせるようになります。

このようにして、アンテナ素子をより多く並べることで、より正面方向での重ね合わせが強くなり、指向性の鋭いアンテナとすることができます。2次元に並べると、縦横とも指向性の鋭いアンテナとなります。

3. ビームフォーミング

ここまでは、複数のアンテナ素子から同じ位相の電波が出てくる場合でしたが、各素子から出てくる電波の位相を「適度に」ずらすことによって、全体として電波が強くなる向きを正面以外に向けることが可能となります。これが、ビームフォーミング、あるいはビームステアリングと呼ばれる技術です。

図7に、発振器から放射される電波を横波の絵で示します。図6では、各アンテナ素子から放射された電波を同心円で表しましたが、ここでは発振器から出力され、4つに分岐された信号が移相器を通してアンテナ素子に至り、そこから放射される様子を示します。先端の紫色の丸印から次の紫色の丸印までが1波長、位相にして360度となります。紫→橙→緑→水色と丸印の色が変わるごとに、4分の1波長分、つまり90度位相がずれていることとなります。同じ色の印をつないだ線が波面で、この波面が進行していきます。

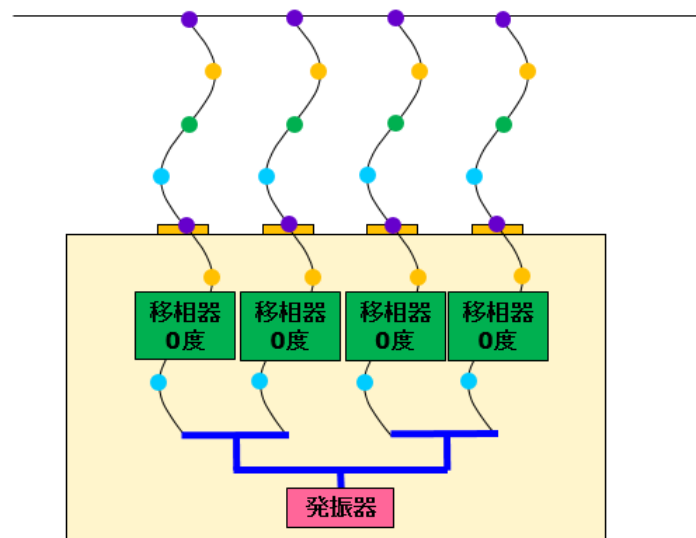
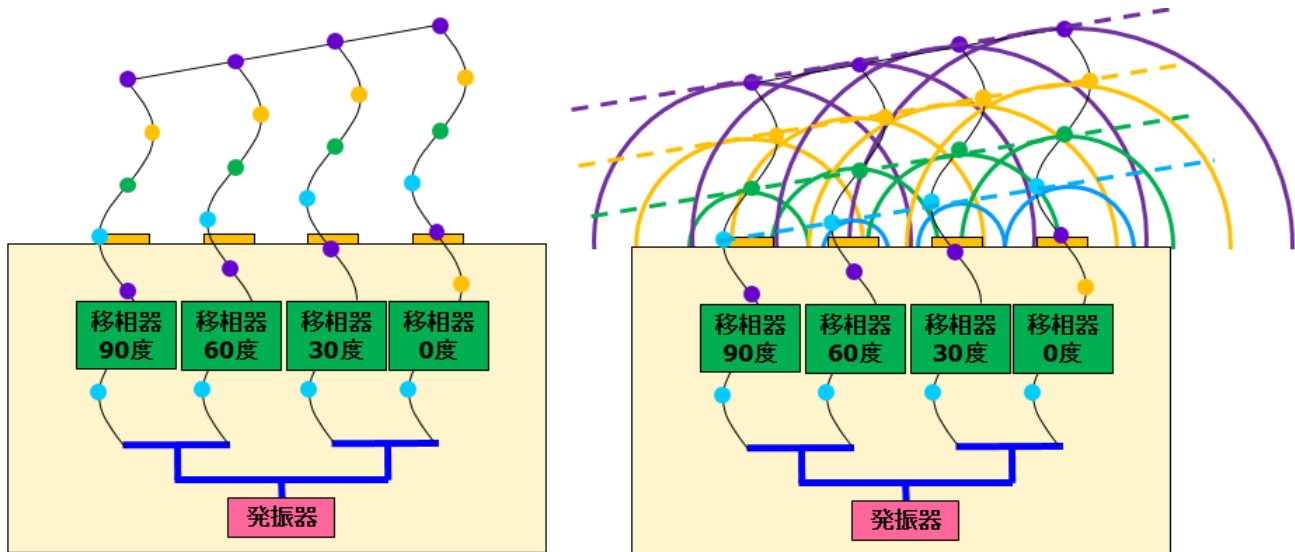


図7 同位相で放射した場合の電波の進行

図8では、右端の移相器はそのまま(=0度)とし、左隣の移相器は30度、その左は60度、左端は90度と、左にある移相器ほど位相を遅らせるように制御を行っています。移相器に入力する時には同じ位相だった波を移相器の中で「遅延させる」ことで、波の頂点にあたる部分が遅れてアンテナ素子から出力されます。4つの素子に少しずつ「等間隔で」差をつけることで、複数の波が強め合う位置の並びが傾いています。これにより、ビームの向きを傾けることができます。図8aに、正弦波としてのイメージをします。さらに、図8bに、改めて、アンテナ素子からの電波の同心円状の波の広がりを重ねたものを示します。



a: 位相差をつけた電波

b: 電波の広がり

図8 位相差をつけて放射した場合の電波の進行

図8では、アンテナ素子は2分の1波長間隔で並べてあります。このとき、この絵のように隣のアンテナ素子との位相差を30度ずつつけていくと、約9度ビームが傾きます。

実際には図2で示したように、平面上に2次元配置で多数のアンテナ素子を並べたフェーズドアレイアンテナが使われ、上下左右自在にビームを振り、カバー範囲内の相手に鋭いビームを向けることが可能となります。これにより、単一のアンテナを使う場合に比べて、相手に届く電力を強めることができ、結果としてより高速な通信や、空間を有効活用した通信が可能となります。

図9に、フジクラで設計製作したフェーズドアレイアンテナにより実現したビームパターンの例を示します。優れたビームフォーミング性能が実現され、鋭い指向性をもつビームを±45度の範囲内に自在に向けることができます。

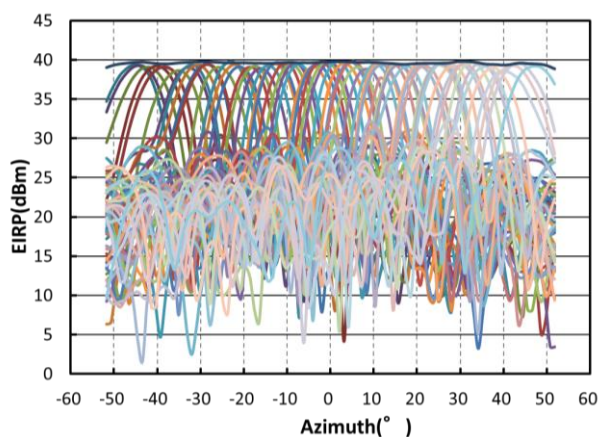


図9 ビームフォーミング特性の例(ビームプロファイル)

4. ビームサーチ

このように、フェーズドアレイアンテナを使うと、電波のビームを特定の方角に向けることができ、効率よく通信を行うことができますが、ビームが向いていない相手とは全く通信を行うことができません。

フェーズドアレイアンテナを使った通信システムでは、特にどちらかが移動している場合など、常にビームの向きを振りながら、どの方角にビームを向けると通信が安定するかを探して自動的に調整を続ける機能が不可欠で、実際のシステムでもすでに活用されています。

相手を見失った時や、通信を始めようとするときには、相手がどこにいるのか、そもそも相手がいるのか全く見当が付きません。そのような場合、お互いに鋭い指向性のビームを振りながら相手を探すのは困難です。ある瞬間に通信できる角度範囲が全範囲の5%だとすると、お互いにランダムにビームを振って相手が見つかる確率は0.25%となります。よりビームを鋭くし、細かく振る場合、相手が見つかる確率はさらに下がっていきます。従って、極めて多くの異なる方向にビームを向けて相手を探さないといけなくなります。

このような場合は、あえて「指向性を下げて」相手を探すということも行われます。多数あるアンテナ素子の一つだけを使用する、あるいは複数のアンテナ素子を使ってビームが広がるようなパターンをあえて作ることが行われます。このようなビームパターンを、疑似オムと呼びます。この状態では、ミリ波本来の高速通信はできませんが、例えば Sector Level Search (SLS) といった、通信機器同士で相手の方向を確認し合うための簡単な通信であれば十分可能です。強い指向性を持つフェーズドアレイアンテナですが、電氣的に制御していることから、あえて指向性を下げて通信開始のためのネゴシエーションを行いやすくすることも特徴と言えます。なお、具体的な手順は、機器同士で共有する必要があるため、実際にはそれぞれの通信規格 (IEEE 802.11ad / WiGig 等) で詳細に定められています。

5. フジクラのフェーズドアレイアンテナ技術

フジクラは、長年にわたり通信インフラ機器を供給しており、電気通信ケーブルや光通信ケーブルのみならず、高速の通信機器もその製品群に含まれています。電磁界解析技術や、フレキシブルプリント配線板(FPC)の製造技術をもとに、フジクラはフェーズドアレイアンテナの設計技術開発に取り組んできました。材料、工程、測定、シミュレーションに対する深い知識に加えて、無線周波数用 IC (RF-IC) の技術をもとに、我々こそが最先端のミリ波用フェーズドアレイアンテナとモジュールを開発して行くことができるのです。

6. まとめ

ここまで、ミリ波を使った高速無線通信実現における重要な技術である、フェーズドアレイアンテナの特徴や原理を紹介しました。フェーズドアレイアンテナの原理は非常にシンプルなものです。しかしながら、特にミリ波用途に使用する、先進的なフェーズドアレイアンテナを設計し製造するためにはフジクラが持つ独自の能力が不可欠となります。フェーズドアレイアンテナの設計技術によるメリットを十分に享受するためには、システム構築にあたって、相当な注意を払いながら進めていかなくてはなりません。

フジクラのミリ波製品は、先進的なフェーズドアレイアンテナ設計に基づいた優れた特性を兼ね備えています。

より詳細な情報については、フジクラ “mmwavetech@jp.fujikura.com” までお問い合わせください。

参考文献

[1] 「ミリ波通信の回線設計」 弊社 WEB ページ <http://mmwavetech.fujikura.jp/ja/>



株式会社フジクラ

電子応用技術 R&D センター

ミリ波事業開発室

〒285-8550 千葉県佐倉市六崎 1440

E-mail : mmwavetech@jp.fujikura.com

Web site : <https://mmwavetech.fujikura.jp/ja/>