



ホワイトペーパー

# 屋内ネットワーク の進化： 4G から 5G へ

Vladan Jevremovic, PhD  
(ブラダン・イエブレモビッチ博士)

## 1 はじめに

3GPP リリース 16 (フェーズ1) およびリリース 17 (フェーズ2) としても知られる 5G ネットワークはセルラー技術の分野に多くの技術革新をもたらすことになるでしょう。この新しいネットワークは、広範囲のさまざまなアプリケーションに対応していきます。コンピュータ同士のマシン・トゥ・マシン (M2M)、またはテレビなどのモノをつなぐモノのインターネットを対象にした非同期、低データレートのものから、ビデオゲームのような低遅延・高データレートアプリケーションまで、そしてその間のすべてが対象です。5G ネットワークは、それ以前のネットワークとは異なり、幅広い周波数帯に展開されることとなります。ミリ波周波数 (24 GHz 以上) は住宅地を対象とした定点及び複数点高帯域幅カバレッジに適する一方で、サブ 6 GHz は携帯電話のカバレッジに適したブランク型都市全域カバレッジに使用されます。この資料では 5G の主要な機能に焦点を当て、5G への移行に伴いどの種類の 4G ネットワークが最も影響を受ける可能性があるのかについてお話しします。

## 2 屋内ネットワークにおける主要 5G 機能

### 2.1 ビームフォーミング

ビームフォーミングはアンテナアレイのアンテナパターンを特定の方向に形成する技術です。これはビームステアリングとも呼ばれる、対象となる顧客の方向にアンテナパターンを向けることを指します。さらに加えて、ヌルプレースメントとも呼ばれる、信号の妨げになる可能性のあるパターンを顧客に向けて最小限に抑えたりすることでもあります。つまりビームステアリングは信号のカバレッジを改善し、ヌルプレースメントは妨害を削減します。結果として信号対干渉雑音比が改善し、信号のスループットおよびシステムのキャパシティが高まります。

アンテナアレイは等間隔で配置された複数  $N$  のアンテナから構成されます。アナログビームフォーミングでは、一定の信号が各アンテナに送信され、伝送前にアンテナ固有の位相シフトが適用されます。この場合、増幅器はアレイ全体に 1つ必要ですが、 $N$  数の位相シフターをアンテナ毎に配置する必要があります。これは図 1<sup>[1]</sup> に提示の通りです：

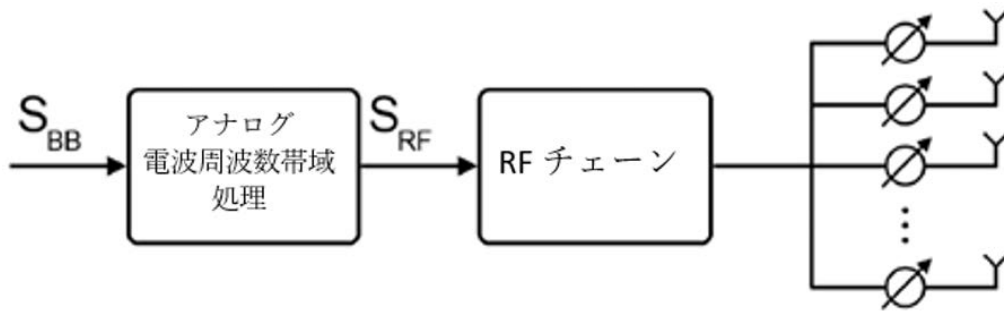


図 1：アナログビームフォーミングアーキテクチャ

ビームフォーミングの別の方法は、デジタルビームフォーミングです。このアーキテクチャはより複雑です。その理由は各アンテナが独自の RF チェーン（アップコンバータと増幅器）が必要となることであり、位相シフトはベースバンド変調中に適用されます。このアーキテクチャは図 2<sup>[1]</sup> に表示の通りです：

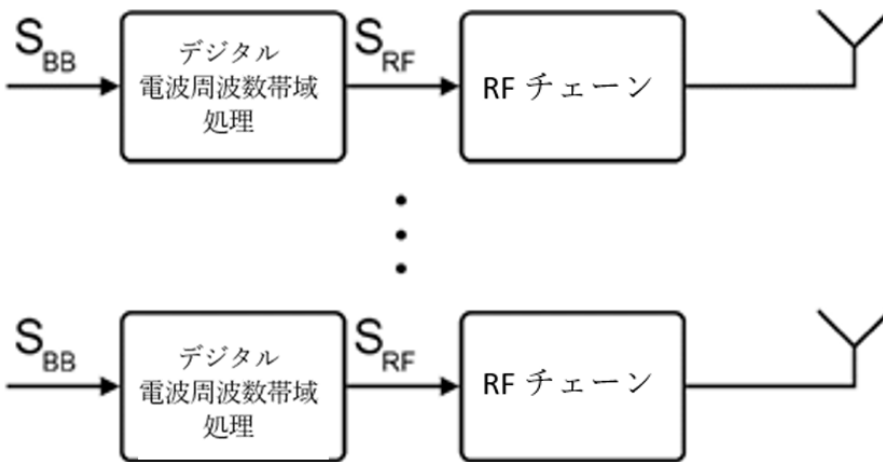


図 2：デジタルビームフォーミングアーキテクチャ

特定のN 直線アンテナアレイは指向性アンテナが一方向に最大限の利得をもたらすようにし、N 以外のパターンは、ヌル(無効にする)または違う方向に「かがめ」させます。<sup>[2]</sup> それぞれのアンテナが信号の振幅が同じで位相シフトのみが異なる場合、最大利得の方向あるいはヌルパターンの方向を指定できますが、両方を指定することはできません。一方、振幅と位相の両方をそれぞれのアンテナ毎に指定する場合には、最大利得方向とパターンヌル方向の両方を指定できます。適応アンテナアレイと呼ばれる技法は振幅と位相（アンテナアレイ係数と呼ばれる）を、サービングユーザーの目標の信号レベルとこれらの場所で測定された N 以外の干渉信号レベルとの平均二乗誤差を最小化することにより、リアルタイムで計算します。平均二乗誤差を最小化するプロセスが新しい係数をもたらし、この係数が基地局信号

に適用されます。結果としてもたらされた信号は再度対象の場所で携帯などの端末 (UE ユーザー・エクイップメント) により計測され、基地局に返送されます。その後、平均二乗誤差を最小化するプロセスが繰り返し行われます。このプロセスの反復性は頻繁な信号測定を必要とし、モバイル環境では不可欠です。

ただし、ユーザーと干渉の間にかかなりの空間的分離があるということが基本的な前提になっている点に留意すべきでしょう。パターンヌルと最大利得との間に十分な角度の広がりが必要とされないため、これは不可欠の要件です。干渉方向にはヌル、サービングユーザーの方向に最大利得とするビームフォーミングの例は図3に提示の通りです。

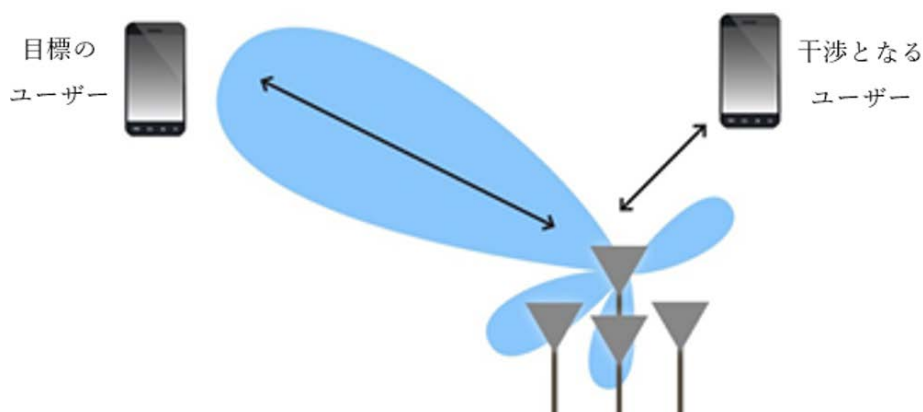


図 3：サービングユーザーの端末の方向に最大利得、干渉となる（または非サービングの）端末の方向に最小利得のビームフォーミングの例

## 2.2 MIMO、MU-MIMO (マルチユーザー MIMO)、Massive MIMO (マッシブ MIMO、大規模 MIMO)

本来の MIMO 技術は、アンテナアレイを利用し、元のデータを取り出し、等分割し、アレイ内のアンテナに配信することで、データレートを改善しています。このプロセスは元のデータの一部のみが各アンテナに伝送されることとなります。受信側アンテナアレイは分割されたデータを取得し、元の形式に組み立て直します。送信側/受信側両方に  $N$  数のアンテナがある場合、最終結果は、伝送/受信1つずつのみのアンテナを使って送信されたデータよりも  $N$  倍早く送受信できることとなります。この技法は空間多重送信モードという名前で知られています。これは、データスループットを  $N$  倍改善し、信号対干渉雑音比 (SINR) が良好で、送信および受信アレイに同じ数のアンテナがある場合に非常に高い性能を発揮

します。SINR が劣悪な場合には、オリジナルのデータがそのまま保たれすべてのアンテナが同じ信号を伝送することになります。受信先では全てのアンテナが同じ信号を受信するわけですが、それでも組み合わせた後では、受信された信号レベルは1つずつのみのアンテナの場合よりも高くなります。この技法はダイバーシティモードと呼ばれ、信号カバレッジを改善します。

マルチユーザー MIMO は同じ周波数を使用して複数の、同時に存在するユーザーに一度に MIMO 信号を配信する技法です。唯一の条件は十分な空間的分離があるということです。主な放射パターンビーム内で1つだけの端末が使われていることが求められます。しばしば聞かれる質問に、 $M \times M$  MIMO アンテナアレイが同時にサーブできる端末の数  $K$  はいくつか、というものがあります。アンテナ理論から、我々は  $K \leq M-1$  であることを知っていますが、4G および 5G 標準ではどうなるのでしょうか？ LTE-A では、同時に存在するユーザーの数は  $K=8$  に限定されているため、 $M$  は  $K$  より大きい数ですが、それほど大きい数ではありません。5G では、もっと面白いことになります。それは「Massive MIMO (マッシブマイモ)」と呼ばれるもので、アンテナの数  $M$  と同時ユーザーの数  $K$  の両方が大規模な数となります。元々の「マッシブ MIMO」の定義<sup>[3]</sup>では  $M \gg K$  ( $M$  が  $K$  よりかなり大きい数)と仮定されていましたが、より一般的な定義<sup>[4]</sup>ではどちらの数も大規模であることから  $M > K$  とのみ規定しています。別の論文は現実的なエネルギー効率の仮定の下、 $M$  と  $K$  の反復演算の例を提示しています。<sup>[5]</sup> 著者は、ユーザー間干渉が強くユーザーごとのデータレートが低い場合、基地局ごとの合計スループットを上げるために理論上可能なできるだけ多く ( $M \sim K$ ) の端末を割り当てることが妥当だと述べています。つまり 5G は  $M$  および  $K$  の両方が大規模数である必要があることから、実際の  $M/K$  比率は様々に異なり、一部のケースでは 1 に近くなることもあるというわけです。

マッシブ MIMO は多数のアンテナを備えた マルチユーザー MIMO というだけではなく、マルチユーザー MIMO に比べ大幅なアップグレードとなる新しい機能も備えます。そのうちの1つが TDD オンリーモードと呼ばれ、TDD または FDD の複信帯の1つだけに影響して周波数選択性フェージングを除去するものです。マッシブ MIMO を TDD オンリーに使用することでチャネル推定に使用されたパイロット信号がアップリンクにのみ搬送されるなど、チャネルの相互関係に有効となります。セルエッジ SINR はアレイ内のアンテナの数とともに増加するので、自然と、マッシブ MIMO はこの領域でマルチユーザー MIMO よりも優れた性能を発揮します。<sup>[6]</sup> 伝播チャネルの小規模変動は、アンテナ利得を減少させる可能性があります。しかし、この小規模の変動は独立変動であるため、マッシブ MIMO アレイのアンテナ数が増加するにつれて、すべてのアンテナが影響を受ける確率が急速に低下することになります。<sup>[7]</sup> これを言い換えれば、信号はアンテナ上で「平均化」されるということになるでしょう。これは「チャネルハードニング(強化)」<sup>[8]</sup>としても知られ、マッシブ MIMO では基地局に多くのアンテナが配置されると予想されているため、チャネルハードニングは無視できる程度のわずかな信号変動をもたらします。チャネルハードニングは、チャネルの反応自体が マルチユーザー MIMO よりも安定しているため、予測可能なリソース割当てを可能にします。5G マッシブ MIMO 基地局の例は図 4 に提示の通りです。



図 4：5G 対応の基地局（1パネルに44の交差偏波アンテナ）

### 2.3 C-RAN ネットワーク

C-RAN は、ベースバンド処理と RF ハードウェアを分離するネットワーク・トポロジー（接続形態）であり、技術的には 5G 標準というわけではありません。しかし、屋内ネットワークのキャパシティ計画に影響するため、ここに記述しておきます。C-RAN は Centralized RAN（集中型無線アクセスネットワーク）アーキテクチャの略でベースバンドユニット（BBU）を基地局のハウジングから、中央の場所に移動させます。普通はオペレータの「中央局(セントラル・オフィス)」に置かれます。これを行うことで、運営費が削減されます。基地局の回路冷却に要する電力が少なくてすむためです。また、BBUがないためセルサイトで必要なスペースも減るため、不動産リースに使用される資本も削減されます。ベースバンド信号は中央局から基地局にファイバーリンクで搬送され、そこで RF に変換、増幅されて伝送されます。通常、BBU のないこれらの基地局は RF 要素のみが含まれるため「リモートラジオヘッド (RRH)」と呼ばれます。

中央局では、BBU は複数のベースステーション設備と共に設置されます。そのトラフィックはリアルタイムでモニターされ、RRH トラフィックのニーズに応じて BBU が割り当て、再割り当てされます。このフレキシブルなリソース割り当ては、基地局にある BBU の数が固定ではなく、利用可能な一連の BBU の中から利用されるため、通信妨害が削減します。さらに、ネットワークは集中 RAN からクラウド RAN に進化するかもしれません。この場合、集中型 BBU のルーチン処理がクラウドに存在する既製の商用サーバーにより行われることとなります。このクラウド処理はネットワーク機能仮想化 (NFV) と呼ばれま

す。クラウド RAN ではベースバンド設備が別のサービスプロバイダーにより所有されているということをもあるかもしれません。C-RAN アーキテクチャはどちらも図 5 に表示の通りです。

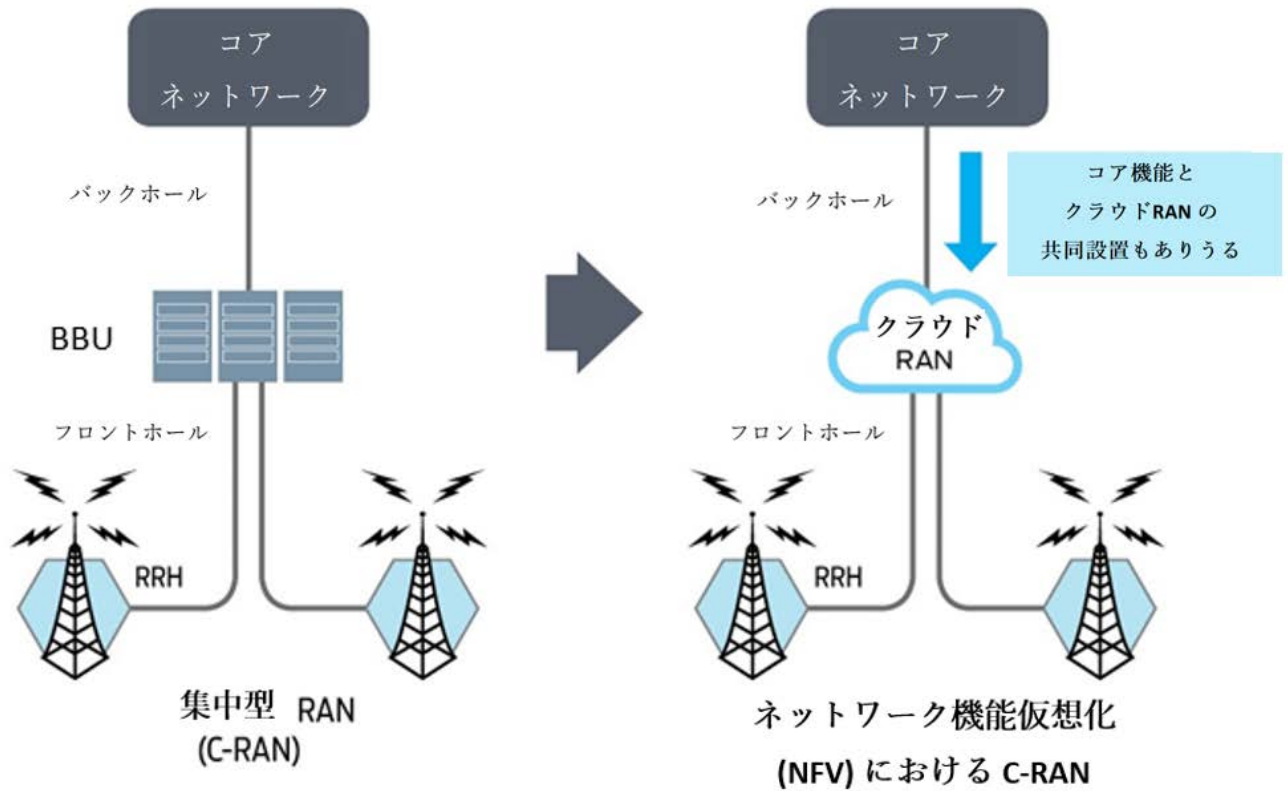


図 5：集中型 RAN とクラウド RAN

屋内の設計に対する影響としてはキャパシティ計画段階で、最繁時のキャパシティ要件の計算中に発生します。BBU が十分ストックされているため、屋内ネットワークは RRH の BBU 数が不十分であるために MAC レイヤーのブロックが起こるということはほとんどありません。しかし仮想 BBU ブロックはクラウドの処理限度のために発生する可能性があります。RRH でレイヤー 1 のブロックが発生する可能性はあり、RRH での推定キャパシティ要件に基づいて、エアタイム利用率が100%を超えると予測される場合に発生します。

### 3 5G 屋内ネットワークの課題

このセクションでは 4G から 5G への屋内のネットワーク移行が直面する2つの課題を特定します。それは、パッシブ分散アンテナシステム (DAS) を 5G 対応にすることと、サブ6GHz の帯域内で低い帯域から高い帯域に移行させることの2点です。

### 3.1 バックホール

より高い5Gピークデータレートは、より高いバックホールスループットデータを必要とします。エリクソンの最近の研究<sup>[9]</sup>によれば、バックホールのスループットの増加は、ほんの一部のサイトがバックホールの5Gの最大ピークレートが20 Gb/sになることを必要とするだけで、2025年まで年々緩やかに増加すると予想されます。

高度なモバイルブロードバンド	2016年	2021年	2025年に向けて
80%のサイト	90 Mbps	300Mbps	600 Mbps
20%のサイト	300 Mbps	1 Gbps	3-5 Gbps
ほんの一部のサイト	1 Gbps	3-10 Gbps	10-20 Gbps

出典：エリクソン (2016年)

図6：通信事業者の無線サイト毎のバックホールキャパシティ要件

マクロサイトは主に移動性の高いユーザーをサポートし、屋内サイトは固定ユーザーまたは歩行ユーザーをサポートします。固定ユーザーはモバイルユーザーより高いスループットを要求するため、屋内サイトのバックホールスループットはマクロサイトよりもはるかに高くなります。図6は屋外と屋内のバックホールの要件を合わせたもので、2021年までに3 - 10Gb / sのスループットと2025年までに10 - 20Gb / sのスループットの屋内サイトの割合がのびると予想しています。

設計が屋内のスマートセルネットワークである場合、スマートセルごとに必要なキャパシティスループットは、会場での推定トラフィック負荷に基づいて計算されます。ネットワーク全体に対するバックホール要件は、それぞれのセルの所要スループットの合計になります。この要件は、建物内の利用可能なダークファイバー容量と照合されます。利用可能なダークファイバーの容量が不足している場合、有線ネットワークプロバイダ（外部の施設）は、5Gネットワーク導入による追加の屋内キャパシティの需要に注意する必要があります。利用可能なダークファイバーの容量が十分である場合には、パッシブ光スプリッターと、メインターミナルルームとスマートセルの間のファイバーリンクを備えた建物内のファイバーオプティカルネットワークを設計し、スマートセルネットワーク設計パッケージの一部として含める必要があります。

バックホール（またはC-RAN、フロントホール）スループットをサポートするための追加のパッシブ光ネットワークを設計することは、屋内ネットワークの企画と設計に必須になります。スマートセルをどこに置くかについてだけではもはや十分でなく、メインターミナルルームから必要なキャパシティをどのように持って来るかについて考慮する必要があります。したがって、スマートセル屋内5G無線ネットワークを設計するためには、有線ネットワークを、スマートセルにその完全な5Gポテンシャルを実現するのに十分なキャパシティを与えられるように設計する必要があります。



## 3.2 ミリ波周波数

非常に高いスループットの必要性から、一部の事業者は、現在 4G ネットワークで使用されている周波数よりもはるかに高い周波数の 5G ネットワークを配備することを検討するようになりました。米国では、FCC は固定ブロードバンド通信に 24、28、31、39 GHz の周波数帯域の使用を許可しています。世界のその他の地域では、オペレータは最高で 90 GHz にもおよぶ周波数帯域で 5G ネットワークの試験を行っています。正式にはミリ波の周波数は 30~300 GHz ですが、これらの周波数も一般的にミリ波周波数と呼ばれます。これらの帯域を使用する利点はミリ波スペクトラムブロックがサブ 6 GHz 帯域ブロックよりも広範であるため、ビームフォーミングや マッシブ MIMO なしでも、より高いデータレートを実現できることです。しかしこれらの帯域は、以下に挙げる理由から、ブランケット型都市全域マクロネットワークには不適切です。：

- フリースペースでの高パスロス
- マクロネットワークカバレッジには厳密な見通し線 (LOS) が必要
- 端末モビリティサポートがない

これらの制限がありながらも、ミリ波ネットワークはほとんどの場合見通し線に障害物があまりない屋内に配備することが可能です。そうした場所の例として、座席エリアの上に設置された無線送信機と観客との見通し線を確保できるスタジアムなどが挙げられます。別の例としては、カフェテリアや会議室・宴会場などの屋内ホットスポットが該当するでしょう。屋内の使用事例は非常に限られていますが、最初のビル内 5G ネットワークはこれらの周波数で配置されると予測されます。

### 3.3 パッシブ分散アンテナシステム (DAS) を 5G 向けに準備する

パッシブ DAS はこれからも引き続き人気の屋内アーキテクチャです。10,000 平方メートルまでの小・中規模の会場の場合、配備コストが比較的廉価であるためです。これはほとんどのネットワークがいまだにパッシブ DAS を使用しているアジアでは特に人気があります。このアーキテクチャは図 7 に提示の通りです。：

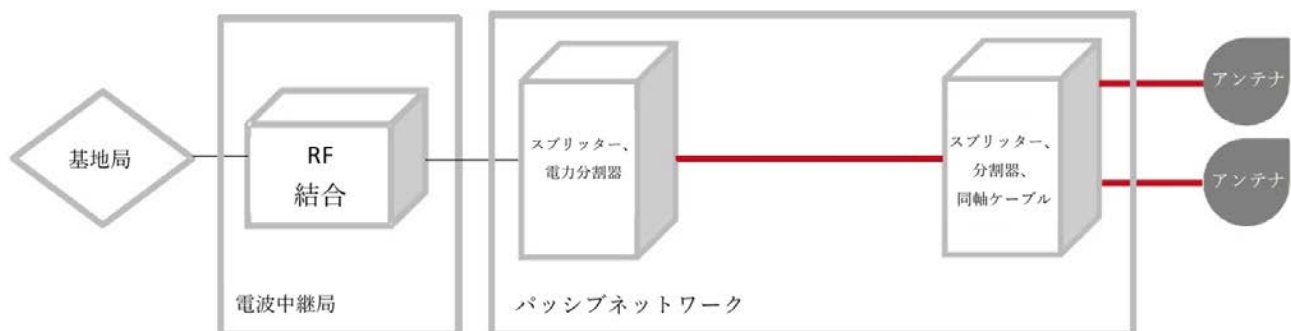


図 7：パッシブ DAS アーキテクチャ<sup>[9]</sup>

この図のパッシブ DAS は2つしかアンテナがなく非常に簡略化されたものですが、このネットワークは MIMO に対応していないことがわかります。MIMO をサポートするためには、各アンテナには BTS まで戻る別のケーブルが必要となります。しかし、ここではアンテナからの信号はアンテナの場所の近くで組み合わせられ、組み合わせられた信号が基地局への単一の RF ケーブルで搬送され、そこで様々な局からの信号が再度組み合わせられます。基地局は異なるアンテナからの信号を分別できないため、これは SISO ネットワークになります。3GPP では 2 x 2 MIMO を義務としていますが、MIMO アンテナから BTS まで伸びる 2 番目の同軸ケーブルの費用を削減するため、多くのパッシブ DAS 4G ネットワークはこの SISO 構成で配備されてきました。

これらのパッシブ SISO DAS ネットワークを 5G に変換するには、まず図 4（1パネルに44の交差偏波アンテナ）にあるような新しい マッシブ MIMO アンテナパネルの設置が必要となります。その後、パネルのそれぞれの交差偏波アンテナから基地局まで戻す同軸ケーブルを設置します。これは拡張性がない上、5G への移行を効率的に進めることができないため、4G パッシブ DAS ネットワークは 5G により適した、ファイバーDAS やスモールセルネットワークなどに置き換えられる可能性があります。

### 3.4 サブ 3 GHz からサブ 6 GHz 帯域への移行

モバイル 5G ネットワークはサブ 6 GHz 帯域で運営されることが予測されています。ミリ波帯域は、LOS 制限のため固定式ブロードバンド用に留保されています。4G の時と同じように、1つの世界共通の周波数帯域が 5G のために用意されることはないでしょう。一部の国では、オペレータが 5G を配備するために 4G 帯域を再構成する必要がないように、規制当局が 5G テクノロジーのためのだけに帯域を設計するかもしれません。別の国では、管理当局が 5G 専用帯域を指定せず、スペクトラムオークションの勝者にスペクトラムの完全な管理権を提供するかもしれません。

中国では、政府が 5G のために 3.5 および 4.9 GHz 帯域を割り当てたと発表しました。以前には、中国は 4G 帯域に 1、8、2.3、2.5、2.6 GHz を割り当てました。4.9 GHz への移行には 4G 帯域に関わらずすべてのアンテナの交換が必要になります。現在の 4G アンテナは 4.9 GHz に対応しないためです。さらに、2.6 から 4.9 GHz への移行は 4G のパスロスに  $20\log_{10}(4.9/2.6) = 5.5$  dB を追加し、1.8 GHz からの移行には 8.7 GHz のパスロスが追加されます。これでは、ロスがあまりにも大きいため、既存の 4G ネットワークにさらにアンテナを追加する必要があります。5G の実証テストはビームフォーミングによる利得などの技術的性能の詳細については踏み込んでいないため、ビームフォーミング利得がこの追加されたロスを補うかについては、まだわかりません。しかし、このパスロスのデルタは、政府指令による 5G のスペクトラムが既存の 4G スペクトラムネットワークの周波数の倍以上である中国などの国では留意すべきです。

## 4 結論

この文書では屋内ネットワークに大きな影響をもたらす可能性のある3つの技術について取り上げました：ビームフォーミング、マッシブ MIMO、C-RANです。さらに、それぞれの技術の基本的背景と、ネットワークへの影響についてお話ししました。また、パッシブ・ファイバー・ネットワークにおけるメイン・ターミナルルームと屋内のスモールセルの間のバックホールの企画と設計が、5G 屋内ネットワークの設計の不可欠な部分となっていることについても明らかにしました。4G から 5G ネットワークへの

移行時に、ネットワークの全入れ替えが必要になる（パッシブ DAS）か、5G カバレッジのギャップ（4.9 GHz 帯域）を埋めるためのアンテナの追加が必要になる それぞれの事例についても説明しました。長期的には、5G 屋内ネットワークに実用可能な選択肢は、スモールセルおよびファイバー DAS ネットワークのみだと考えます。

5G ネットワークを設計する場合、ネットワーク密度とネットワークアーキテクチャを考慮することは、5G 屋内ネットワークの設計と導入のクリアな視野を広げます。5G への移行を効率的に行うためには、建物の調査、RF 企画、設計、およびメンテナンスのための共通のプラットフォームを使用する必要があります。iBwave は、無駄を省き、プロジェクト・ライフサイクル全体を通しての情報をすべてのプロジェクト関係者と容易に共有できるようにすることで、屋内のネットワークプロジェクトが最適化されるように、このプロセスを単純化しました。

## 5 参考文献

- [1] Rohde & Schwarz:1MA 276 Millimeter-Wave Beamforming:Antenna Array Design Choices & Characterization, October 28, 2016
- [2] Robert S Elliott, Antenna Theory and Design, Prentice-Hall, 1981
- [3] T. Marzetta, “Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, Nov. 2010.
- [4] J. Hoydis, S. ten Brink, and M. Debbah, “Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?” *IEEE J. Sel. Areas Communications.*, vol. 31, no. 2, pp. 160–171, Feb. 2013.
- [5] Emil Björnson, Luca Sanguinetti, Jakob Hoydis, Mérouane Debbah, “Optimal Design of Energy-Efficient Multi- User MIMO Systems: Is Massive MIMO the Answer?”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 14, No. 6, pp 3059 – 3070, JUNE 2015
- [6] Emil Björnson, Erik G. Larsson, and Thomas L. Marzetta, *Massive MIMO: “Ten Myths and One Critical Question”*, *IEEE Communications Magazine*, February 2016
- [7] HQ Ngo, EG Larsson, “No downlink pilots are needed in TDD massive MIMO”, *IEEE Transactions on Wireless Communications* vol. 16, no .9
- [8] M. Hochwald, T. L. Marzetta, and V. Tarokh, “Multiple-antenna channel hardening and its implications for rate feedback and scheduling,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 9
- [9] Ericsson Microwave Outlook, October 2016

## iBwaveについて

iBwave ソリューションは、密集した屋内ネットワーク設計の標準であり、優れた屋内ワイヤレス・エクスペリエンスを支える陰の力です。数十億のエンドユーザーとデバイスを多種多様な建物内につなげています。世界的な業界基準として、当社のソフトウェアソリューションは、規模、複雑さ、または技術に関わらず、どのようなプロジェクトでもよりスマートな企画、設計、導入を可能にします。

革新的ソフトウェアだけにとどまらず、当社は、100ヶ国で提供される国際的レベルのサポート、業界一の包括性を誇るコンポーネントデータベース、確立された証明書プログラムで広く認識されています。

詳細はこちらをご参照ください：[www.ibwave.com](http://www.ibwave.com)