



ビームフォーマーの解説

Dr.Mohamed Nadder Hamdy (モハメド・ナダール・ハムディー、PhD.)

目次

ビームフォーミングの始まり	2
第1章：ビームマネージメントの手順	3
アイドルモードビームマネージメント	3
同期信号	3
最初のアクセス	4
コネクテッドモードビームマネージメント	5
基準信号	5
コネクテッドモードの手順	6
第2章：ビームフォーマーの基本	8
フェーズアレイビームフォーミング	8
アンテナ素子	8
アンテナアレイのパターン	8
アナログとデジタルのビームフォーミング	11
アナログビームフォーミング	11
デジタルビームフォーミング	12
ハイブリッドビームフォーミング	12
第3章：パッシブビームフォーマーの構築	12
アダプティブアレイアンテナ (AAA)	12
プレーナーアレイ	12
カラムパターンと相互カップリング	13
スキャン角度限度	14
放射パターン	14
対応する無線機	16
アンテナパラメーターの設定	16
較正ポート	17
例：AAAの実際の実装	18
第4章：デジタルビームフォーマーの構築	19
マッシュMIMO	19
マッシュMIMOのディメンショニング	19
ビームフォーミングのタイプ	20
アンテナ素子数	20
トランシーバー数とマッピングオプション	22
64T64R AE マッピングシミュレーション	23
参考資料	26

概要

ビームフォーミングアンテナは、モバイル事業者が5G NRに使えるキャパシティを拡大するときになくしてはなりません。5Gとキャパシティ拡大を目指して無線ネットワーク構築を計画する際は、ビームフォーミングアンテナの機能を、その種類と、各種類の適切な使用場面も含めて熟知することが不可欠です。この知識無くしては、ネットワークのある部分は余分に、またある部分は不十分なものに計画してしまう危険があり、本来不要なコストや、不十分な性能、はたまたこの両方を抱え込んでしまう恐れがあります。

このホワイトペーパーではビームフォーミングの原理を、パッシブとアクティブビームフォーミング、様々な構成、それぞれの基盤となるテクノロジーについて紹介しています。これに続くホワイトペーパー、「ビームフォーマーの解説 (II)」では様々な実際のアプリケーションを取り上げ、各状況に適切なアンテナを選択するための方法を示します。

ビームフォーミングの始まり

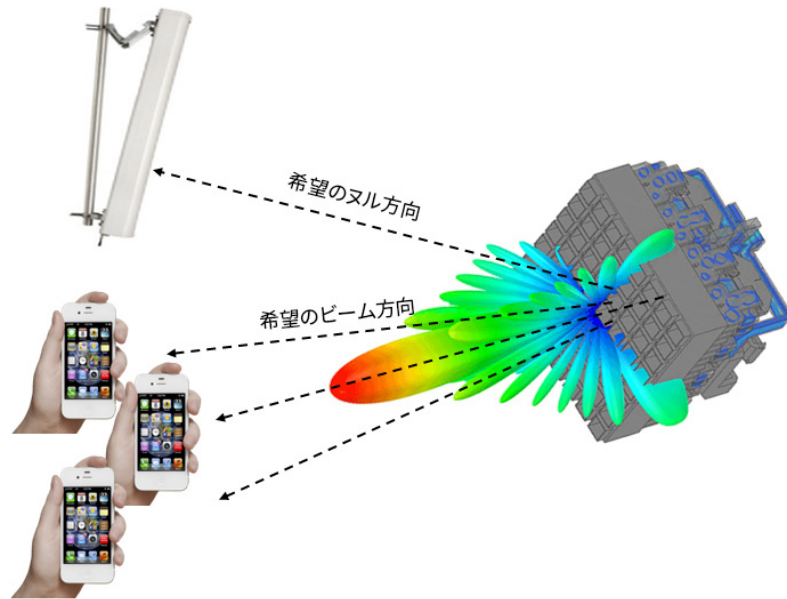
従来のアンテナでは固定された放射パターンで送受信しますが、ビームフォーミングアンテナは接続中のユーザーの場所に応じて動的に主ビームとマルチビームの方向を変化させます。そのため、この将来に備えたアンテナは「ビームフォーマー」と呼ばれることも良くあります。ビームフォーミングアンテナは効果的に干渉を減らし、信号対ノイズ比 (SINR) を改善することで、エンドユーザーの使用感をはるかに良くできる点で独自のものです。ITU-WRC*が新たにサブ6GHz帯域とミリ波帯域を承認し、また5G NR†で使われる極めて高いスペクトル効率へのトレンドのために、ビームフォーマーはモバイル事業者にとってなくてはならないものとなりました。

ビームフォーマーには様々な構成と機能があり、環境によって最適なものは異なります。これらのアンテナは物理的な外見は大変異なっていますが、ビームフォーマーはすべて共通して次の3つの設計理念を備えています。

- ・ アクティブとパッシブなアレイ構造がある。
- ・ デジタル、アナログ、またはハイブリッドビームフォーミングを使う。
- ・ 8T8R以上の複数の無線トランシーバーを備えている。

*World Radio Conference (世界無線通信会議)

†5G new radio (5G用に3GPPによって仕様策定された新しい無線アクセス技術)



第1章：ビームマネージメントの手順

ビームフォーマーの動作面を理解するため、まず機能から見て行きましょう。5G NR仕様では、新規物理 (PHY) と媒体アクセスコントロール (MAC) レイヤー手順で指向性通信を可能にしています。3GPPの用語ではこれらの手順は**ビームマネージメント**と呼ばれ、次の4つの動作を含みます [1]。

1. **ビームスイーピング:** 放射パターンは空間パターンをカバーし、これには複数方向のビームスイープと規定の時間間隔を用います。
2. **ビーム測定:** 5G NodeB (gNB) またはユーザー機器 (UE) での受信信号の質の評価
3. **ビームの決定:** 適切なビーム (単数、複数) の選択 (gNBまたはUEで)
4. **ビームレポーティング:** ビームの質と決定情報についてのUEフィードバックを無線アクセスネットワーク (RAN) に

アイドルモードビームマネージメント

UEは、ネットワークへの最初のアクセス (IA) で指向性物理リンク接続を確立することが重要です。ここでは、ダウンリンク (DL) 同期信号が重要な役割を果たします。

同期信号 (SS)

LTEとは異なり、3GPPは5G NRに対して同期信号の指向性バージョンを定義します。これはビームマネージメントで重要な役割を果たします。

同期信号PSS、SSS、PBCHはSSブロックを経由して送信され、これはより大きい**SSバースト**内に組み込まれます (図1)。バーストでの各**SSブロック**は特定の角度方向にマッピングされます。別の角度方向を順次スイープすることによって、gNB[†]はセルセクター全体をカバーします。

[†] gNB (gNodeB) は5G NR基地トランシーバー局です

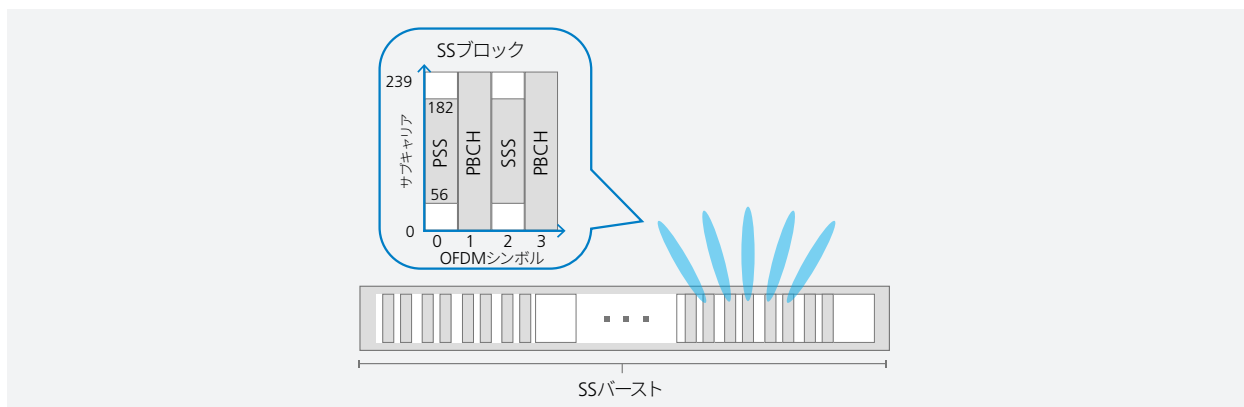


図1: 指向性SSブロック送信

最初のアクセス

図2に示すように、gNBはいくつかのSSブロックを異なるビーム方向にスイープします。UEデバイスはビーム測定とビーム決定を用いて、まずビームを評価し、次いで最大の信号対ノイズ比 (SNR) の得られるビームを選択します。

ビームレポーティングは第4の手順で、次の2つの何れかの方法で行われます。

- ・ **非スタンドアロンモード (NSA)**

UEはアンカリングLTE接続を用いて最適な方向群をgNBにレポートします。するとgNBでは決定した方向にフルビームフォーミングゲインで直ちにランダムアクセスの機会をスケジュールします (他のデバイスとの衝突なくUEによる送信に使える最初のリソースを決めるため) [2]。

- ・ **スタンドアロンモード (SA)**

ここでは、UEはアンカリングLTE接続なしでそのgNBを待って、ランダムアクセスチャネル (RACH) の機会をスケジュールします。すると各SSブロックのgNBは、ある特定の時間と周波数オフセットと方向で1つ以上のRACH機会を指定します。こうすると、UEはそのRACHプリアンプを、gNBの決めた方向に向けていつ送信するかが分かります。

スタンドアロンビームレポーティングプロセスでは、SSブロック送信のためにgNBの完全な方向スキャンがさらに必要になることがあります。このためネットワークにアクセスするための時間がさらに増加します。

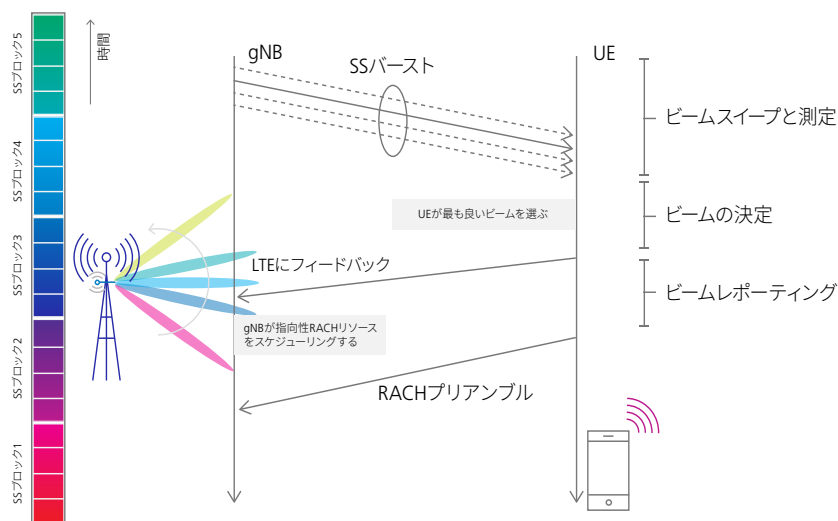


図2: NSAモードでの最初のアクセス [3]

コネクテッドモードビームマネージメント

コネクテッドモードでは、UEの動きに従って送信ビームと受信ビームのアライメントを維持するためにビームマネージメントが必要です。これは**トラッキング**と呼ばれます [2]。コネクテッドモードでのビームマネージメントにはDL **CSI-RS**とアップリンク (UL) **SRS**を用います。これについては後述します。

基準信号

DLチャンネルステート情報基準信号

チャンネルステート情報 (**CSI**) は、UEが一組の**基準信号**を用いてチャンネルの状態について測定、報告するための方法です。3GPP Rel8とRel9はセル固有の基準信号 (**C-RS**)にしか対応しておらず、これはチャンネル測定とデータ復調の両方に使われていました。しかし、C-RSはセルベースであり、ビームまたはUE特定のものではないので、高いMIMOレイヤーとビームフォーミングモードで動作するには過度の信号オーバーヘッドが生じます。

3GPP Rel10でTM9が導入されたことにより、複数の基準信号が分離され、具体的にはチャンネルステート情報の基準信号 (**CSI-RS**)と復調基準信号 (**DMRS**) が分離されました。この分離によって、チャンネル測定プロセスとデータ復調プロセスを切り離すことが可能になりました。

図3に、基準信号の取り扱いについて2つのシナリオを示します。左側にはセル固有の例を挙げ、ここではCSI信号の異なる組が組み合わされてUEに送信されており、3GPP Rel8とRel9に従ってビーム方向を共有しています。右側にはユーザー固有のシナリオを挙げ、ここでは3GPP Rel10のTM9を活用しています。ここでは、復調信号とユーザーデータの両方が送信され、ユーザーデータはオンデマンドで利用できます [4]。

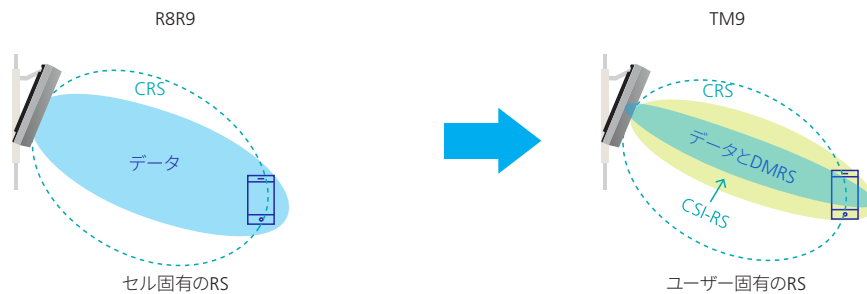


図3：セル固有、ユーザー固有のRS [4]

CSI-RS割り当てを決定するため、UEはまず**SSバースト**を用いて所定のセルと同期し、指定の周波数オフセットと時間オフセットで**CSI-RS**リソースを探します (図4)。

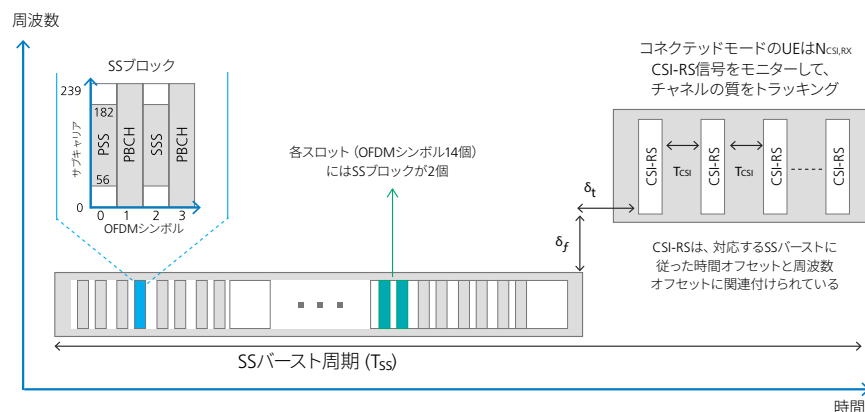


図4:CSI-RS割り当て [2]

UL探索基準信号

UEはUL探索基準信号 (SRS) を送信し、これはアップリンクチャネルの質のモニターに使われます。SRSの送信はgNBがスケジューリングし、gNBはまたUEにそのSRS送信のためのリソースと方向を知らせます。UEはビームマネジメントのために複数のSRSで構成できます。

最初のアクセス (アイドルUE)		トラッキング (既接続UE)
ダウンリンク	SSブロック (PSS、SSS、PBCHを搬送)	CSI-RSs、SSブロック
アップリンク	3GPPは最初のアクセスにはアップリンク信号をしません	SRSs

表1: ビームマネジメント動作のための基準信号 [5]

コネクテッドモードの手順

これで測定の仕組みが決まりましたので、3GPPはさらに3つのDL L1/L2ビームマネジメント手順を提示し、これらは通常P-1、P-2、P-3として知られています [1]。これらはUEがコネクテッド状態のときにダウンリンクビーム (データ) をより良く受信できるようにするためのビームマネジメントプロセスです。これらの手順は選択と微調整のためにUEに指示して、特定のTRP[§]ビームマネジメントを可能にします。概念はUE測定がイベントをトリガーして、これがハンドオーバーとセル再選択に必要な点で似ています。しかし、ここではUEがRANにわたってローミングする際に最適なビーム選択を維持するようになっています。

P-1 (DL TxビームとDL Rxビーム選択):

機能:

次のためにTRP TxビームのUE測定をトリガーします

- TRP Txビームの選択 (TRPビームフォーミングの場合)
- UE Rxビームの選択 (単数、複数) (UEビームフォーミングの場合)

測定の範囲

- 大きく、幅広い可能性のあるビーム群
- 異なるビーム群からのTRP Txビーム内、ビーム間のスイープ

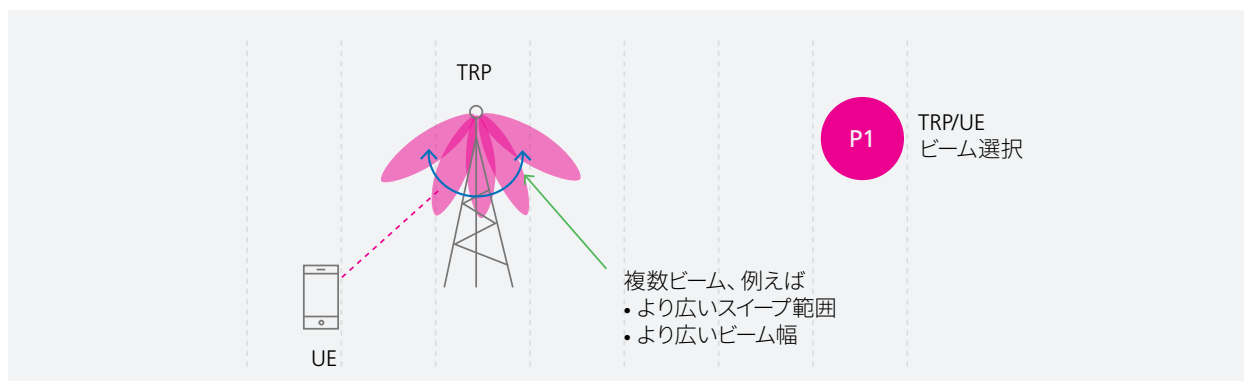


図5: DL Txビームの選択 [6]

[§] 送信信号受信点 (TRxP) は、特定のエリアで特定の地理的場所にあるネットワークが使用できる、一つ以上のアンテナ素子のあるアンテナアレイとして定義されています。

P-2 (DL Txビーム微調整):

機能

- TRP Txビームの微調整のためにUE測定をトリガー
- TRP Txビーム内、ビーム間を必要に応じて変更

測定範囲

- P-1よりも小さく、狭い可能性のあるTRP Txビーム群

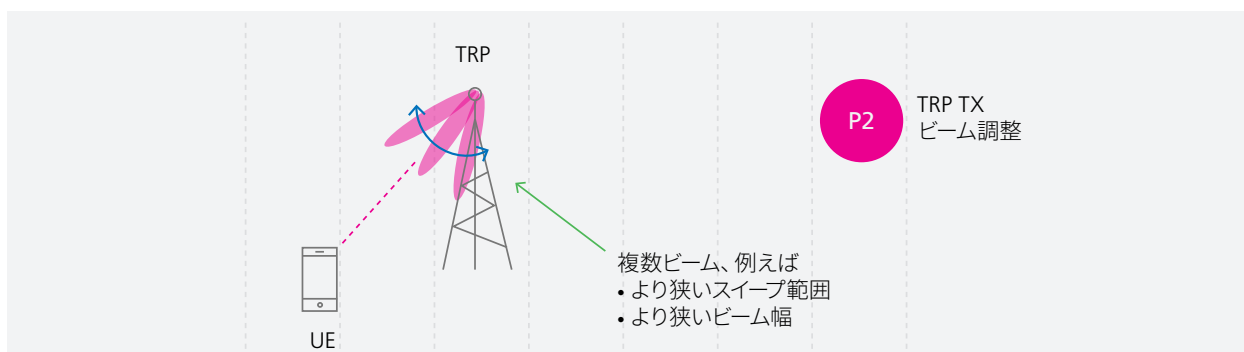


図6: DL Txビーム微調整 [6]

P-3 (DL Rxビーム微調整):

機能

- UE Rxビーム変更 (UEビームフォーミングの場合) **のためにUE測定をトリガー**

測定範囲

- 同じTRP Txビーム、UE Rxビームをスイープ

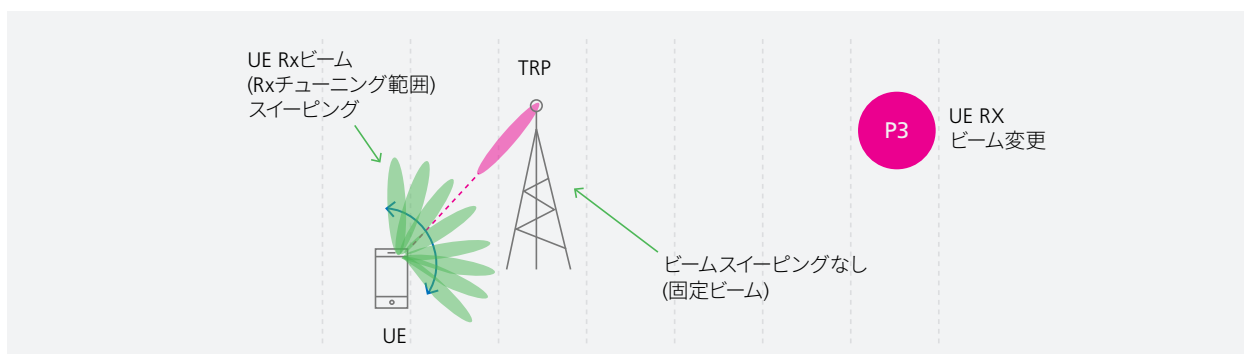


図7: DL Rxビーム微調整 [6]

ビームトラッキング

3GPPは、ネットワークでトリガーされた非周期的ビームレポーターは、最低限P-1、P-2、P-3動作でサポートされている必要があると規定しています。

UEはまたビーム障害から回復するための仕組みをトリガーできます。ネットワークは、回復目的でUL信号送信のためのリソースを持つUEを明示的に設定します。ビーム障害をレポートするために必要とするUL送信/リソースはPRACHと同じ時間インスタンス、またはUEが設定できる時間インスタンスに置けます。DL信号の送信はサポートされており、UEはビームをモニターして新しく使える可能性のあるビームを特定できます。

第2章：ビームフォーマーの基本

高度なアンテナは、ビームフォーミングの機能を可能にする原動力です。これらの動作をより良く理解するため、その基盤をなすテクノロジーを確認しましょう。

フェーズアレイビームフォーミング

複数のアンテナ素子が一列に並んでリフレクターを共有している場合、リニアアレイを備えたパネルアンテナとなります（図8）。フェーズアレイアンテナはフェーズコントロール（時間遅延）を各放射素子に加えて、そのビームを空間の異なる方向に向けて形成、スキャンします。



図8：パネルアンテナリニアアレイ

アンテナ素子

アンテナ素子には色々なタイプがありますが、ワイヤーとアパーチャー素子が最も良くあります。ワイヤーアンテナ素子の例としてはダイポール素子とモノポール素子があり、アパーチャーアンテナ素子にはスロット素子などがあります。設計によっては両方のタイプを組み合わせただけのものもあり、またプリント基板上やマイクロストリップパッチとしても構築できます。図9にいくつかの例を示します。

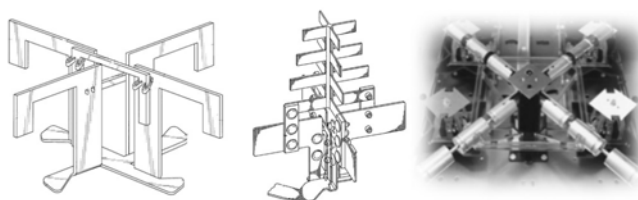


図9：CommScopeはアンテナ素子の特許を取得しています

各アンテナ素子には放射パターンがあり、これは通常**素子パターン**と呼ばれています。ゲインなどの具体的な素子パターン特性は素子の設計で決定されます。

アンテナアレイのパターン

各アンテナ素子はリニアアレイで、それ自身の放射パターンがありますが、アレイ全体のRF効果は次に依存します。

- ・ アレイのサイズと素子の間隔
- ・ 素子のフェーズ(位相)シフトと振幅のばらつき

フェーズシフトと振幅を変えることによってアレイファクターのパターンを決定します。アレイファクターのパターンと素子パターンを組み合わせると、パネルアンテナの全体的なファーマフィールド放射パターンとなります。

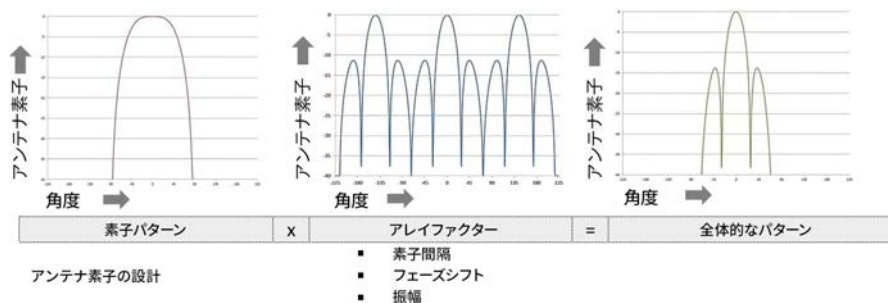


図10：アレイファクター

アレイサイズの効果

半波長素子間隔の均一なアレイは指向性が最大になり、これはアレイ素子の数 (N) と等しくなります [7]。損失のないアレイではアンテナのゲインはその指向性と等しくなります。これは次のように表せます。

$$\begin{aligned} \text{アンテナのゲイン (dB)} &= \text{素子のゲイン} + 10 \log_{10} (N) \\ \text{または} &= \text{素子のゲイン} + 3 \log_2 (N) \end{aligned}$$

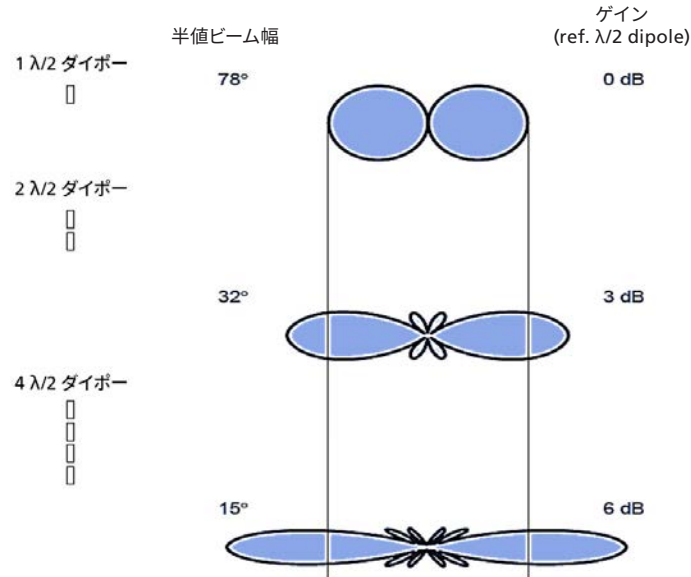


図11:アンテナ素子数とゲイン間の関係

言葉を換えれば、Nを2倍にするとゲインは3dB増加します。この概念を図11に図示します。ここではパターンのゲインとV-HPBW(垂直半値ビーム幅)に与える影響を示しています**。

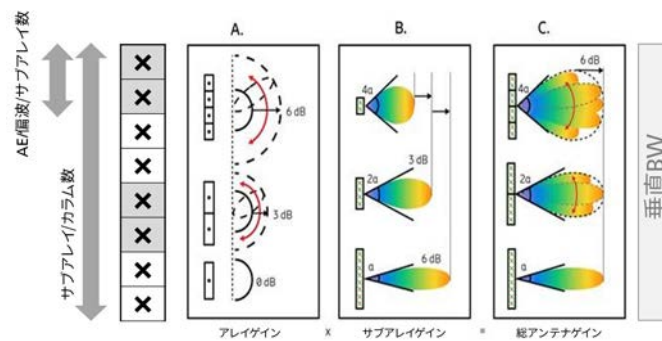


図12:サブアレイのゲイン、[8]から変更を加えて転載

図12に示すようなある種の設計では、リニアフェーズドアレイはより小さなサブアレイで構成されています。各サブアレイは異なる無線送信機に接続されています。サブアレイのゲインと素子のゲインの関係は次のように表せます。

$$\text{ゲイン (サブアレイ)} = \text{ゲイン素子} + 3 \log_2 (N_{AE} / \text{Pol.} / \text{サブアレイ})$$

$$\text{ゲイン (アレイ)} = \text{ゲインサブアレイ} + 3 \log_2 (N_{\text{サブアレイ}})$$

** 垂直半値ビーム幅

素子間隔の効果

アンテナ素子の間隔も、パターンの形状とゲインの決定に大きな役割を果たします。例えば、4素子アレイの間隔を 0.5λ から 2λ に増やすと、垂直半値ビーム幅 (V-HPBW) が減り、メインローブのゲインが増加します (図13)。しかし、これは同時にグレーティングローブ (サイドローブ) を増やす結果となり、メインローブから放射される電波強度を分散させてしまいます。

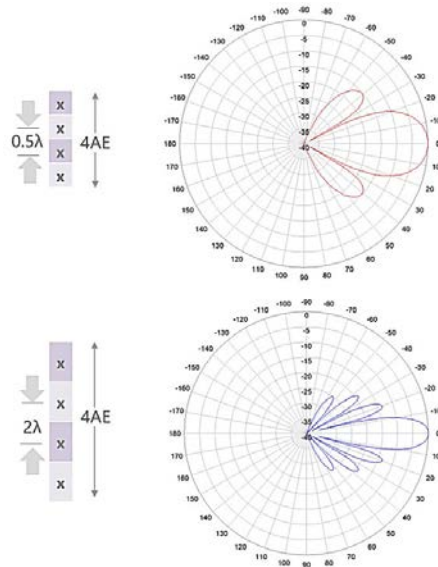


図13:アンテナ素子間隔の効果

フェーズシフト効果

上記のフェーズアレイの例では、アンテナ素子の数とその間隔は各アンテナでは固定されていると仮定しています。しかし、これらのアンテナ素子に供給するRF信号のフェーズ(位相)と振幅を制御することで、アレイファクターと全体的な放射パターンをダイナミックに成形することが可能です。これがビームフォーマー構築の第一歩です。

同相の電波は「相乗効果」があり、フェーズ(位相)のずれた電波は「打ち消しあう」ことは良く知られています。RF信号にも同じ概念が当てはまります。図14にはいくつかの独立したアナログフェーズシフターを無線機とアンテナ素子の間に配置してあります。これらのシフターをチューニングすることで、パターンの形状と指向性を変化させることが可能です。

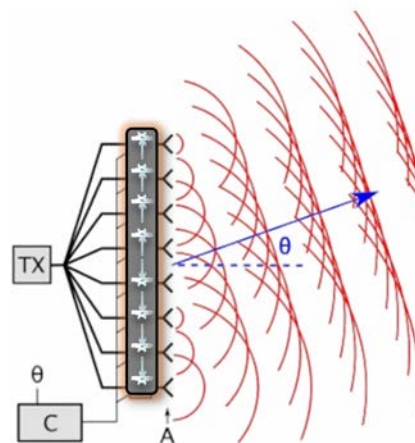


図14:フェーズシフターの効果

電気ダウンチルト

電気ダウンチルトは、垂直パターンの制御に使われた初期のビームフォーミングテクニックのひとつです。これはほとんどすべての基地局アンテナ (BSA) の標準機能となりました。

アンテナの「電気」ダウンチルトは実際は機械的に行われます。フェーズシフターはアンテナ自身の上で手で、またはステッピングモーターを用いた遠隔制御 (RET) で調節されるのです。図15には電気チルトと、フェーズシフターをアンテナ素子に接続する供給ネットワークを備えた双偏波アンテナを示します。

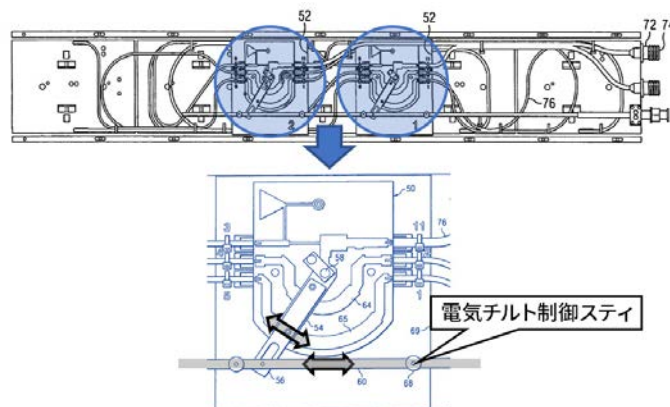


図15:CommScopeは電気チルトフェーズシフターの特許を取得しました

アナログとデジタルのビームフォーミング

ビームフォーミングテクニックは、**アナログ**、**デジタル**、**ハイブリッド**の3つのグループに分類できます。

アナログビームフォーミング

図16に示すようなアナログビームフォーミングは、単一のRF源を複数のアンテナ素子に分配しています。ビームはアナログのフェーズシフターをRF経路に沿って調節することで制御します。これは上記のフェーズドアレイ電気ダウンチルトと似ています。

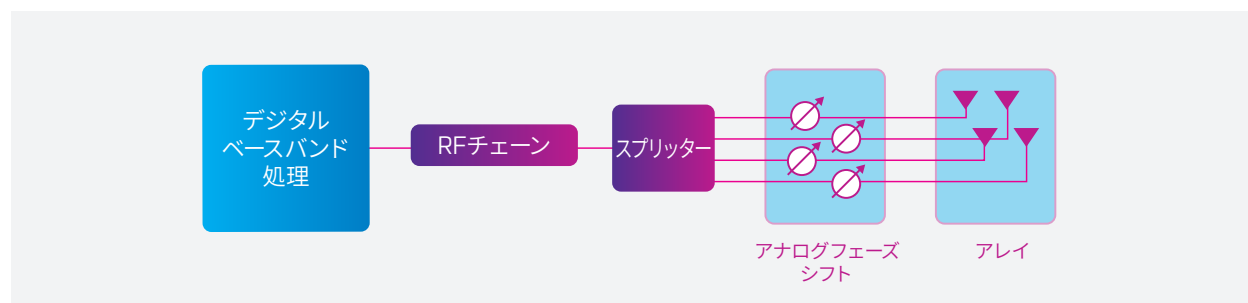


図16:アナログビームフォーミング

デジタルビームフォーミング

デジタルビームフォーミング (図17) では、各アンテナには専用のRF信号と経路があります。フェーズ(位相)と振幅はベースバンドプロセスによってデジタル制御されます。デジタルビームフォーミングは最高のビーム制御をもたらしてくれる反面、電力の消費は多く、信号のオーバーヘッドも大きくなります。

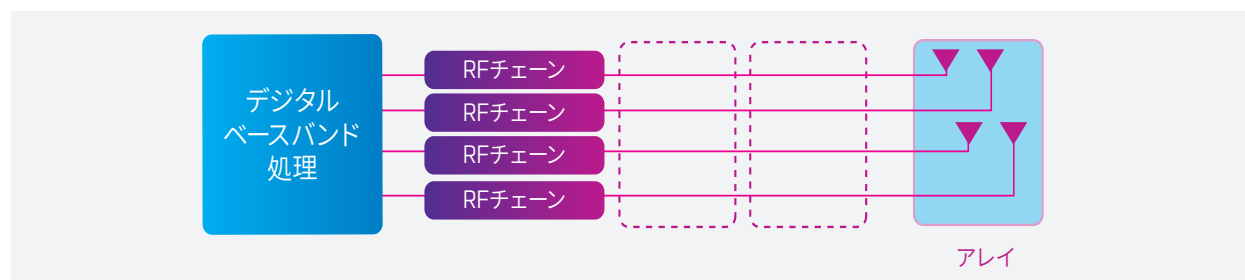


図17:デジタルビームフォーミング

ハイブリッドビームフォーミング

ハイブリッドビームフォーマー (図18) は、その名前が示すように、アナログとデジタルのビームフォーミングを組み合わせたものです。これにはデジタル制御されたRFチェーン、スプリッター、アナログフェーズシフターを備えています。

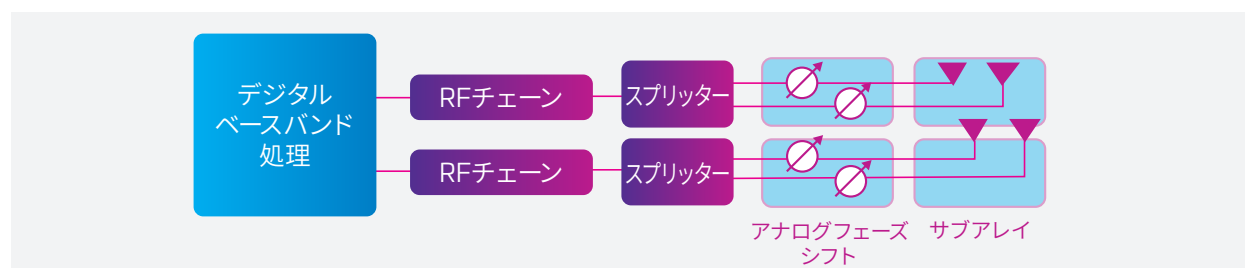


図18:ハイブリッドビームフォーミング

第3章：パッシブビームフォーマーの構築

ビームフォーマーにはアクティブなアンテナ、つまり無線機を備えたアンテナが無ければならないと良く思われています。これは必ずしも正しくはありません。パッシブアンテナを8T8R^{††}基地局無線機 [9] と共に使用すると、まずまずの電気ビームステアリングが得られます。結果として、トラフィックが少ない郊外でコスト効果の良いカバレッジのあるビームフォーマーとなります。次のセクションでは、パッシブビームの設計、性能、用途を、特にアダプティブアレイアンテナについて考察します。

アダプティブアレイアンテナ (AAA)

プレーナーアレイ

ここまで、ビームフォーミングテクニックが、内部アンテナの放射素子にわたって供給されるRF信号の位相と振幅を変化に依存しているのを見てきました。この概念を直接適用したものは、リニアアレイアンテナの1次元水平または垂直ビームステアリング (電気チルト) です。3Dの水平、垂直ビームステアリングを可能にするには、2次元の長方形アレイが必要です。これはプレーナーアレイと呼ばれ、今日のアダプティブアレイアンテナ (AAA) の主要な要素です。

^{††}8T8Rは8台のトランシーバーを備えた無線機です。

これは弊社が実用的なビームフォーマーを構築するための第2段階です。

アダプティブアレイアンテナはプレーナーアレイのカラム複数で構成されており、これらのカラムは互いに相まってサイドローブを改善するように成形された、指向性可変のビームを作り出します。アダプティブビームフォーミングはデジタル信号処理テクノロジーを用いてモバイル局 (MS) からのRF信号の到着方向 (DoA) を特定して、このMSに向けて指向性のあるビームを生成します [11]。

例: CommScopeのS4シリーズ

図19に示すアンテナには4つのX偏波アレイがあり、各アレイには2つの入力ポートがあります。このアンテナは2300~2690GHzのLTE-TDDと5G NR用に設計されています。



図19:CommScopeのプレーナーアレイアンテナ

カラムパターンと相互カップリング

プレーナーアンテナのデータに記載されている水平半値幅 (H-HPBW)**はパネル全体を表すものではないことに注意してください。これはアンテナに同じものが4つあるカラムのひとつのパターンの形状を示しています。カラムパターンの形状はいくつかの物理的特徴に依存します。これらの特徴には放射素子の設計、リフレクターの幅、そして最も重要な**カラムの間隔**です。

アレイの動作はその様々な素子間相互のカップリングでほぼ決まるため、素子の動作は一般的にアレイ中では個々の素子とは大変異なります。例えば、データシートに記載された水平半値幅 (HP-HBW) はカラム間隔の大小とは逆になります。例えば、65°のHBWは通常0.65λのカラム間隔を要しますが、90°のHBWには0.5λの間隔を用います。図20には7x9素子のダイポールアレイ (M/2 ダイポール、地上高M/4) を示します。素子間隔はD_x、D_yとして示しています。

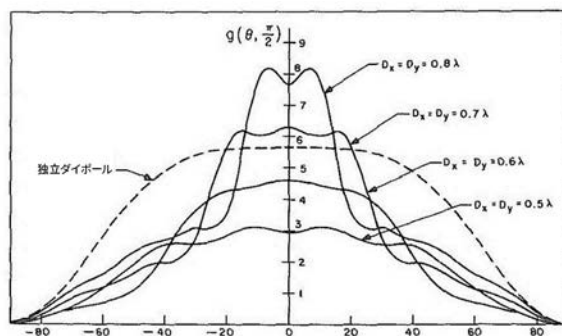


図20:素子間隔対HP-HBW [12]

** 水平半電波強度ビーム幅

スキャン角度限度

素子間隔 (dx) と指向性角度によって、 θ_0 にピークを持つ線形アレイは大きなサイドローブ (グレーティングローブ) を新たに形成してしまうことがあります。これらのローブの形成を避けるためには、カラムパターンH-HPBWと最大スキャン角度の関係を観察することが重要です。理論によれば、素子間隔 dx ($0.5\lambda < dx < \lambda$) では、アレイファクターはメインローブをひとつだけ持ち、グレーティングローブの最大値は、 $[13] |\sin\theta_0| > \frac{1}{S} - 1$ (ここに $S = dx/\lambda$) である限り $-90^\circ < \theta_0 < +90^\circ$ では起こりません。

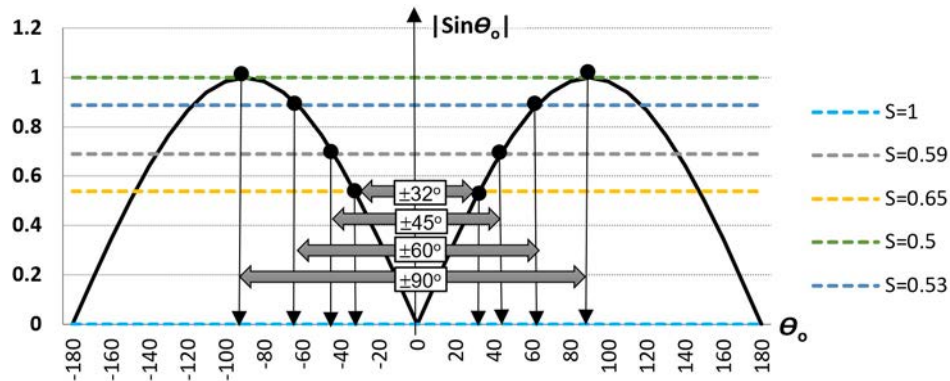


図21:カラム間隔対最大スキャン角度

図21のように様々なカラム間隔に対してこの関係をプロットすると、 $S=0.5$ ($dx = 0.5\lambda$) のカラム間隔に対してこの条件は常に真であることが明らかになります。このためスキャン角度範囲は最大 $\pm 90^\circ$ となります。最大スキャン角度 $\pm 32^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ では、間隔はそれぞれ 0.65λ 、 0.59λ 、 0.53λ になります。

従って、 0.5λ のカラム間隔は 90° のカラムH-HPBWで、アンテナスキャン角度範囲は $\pm 90^\circ$ となります。同様に、 0.65λ は 65° のカラムH-HPBWに対応し、そのときアンテナスキャン角度範囲は $\pm 32^\circ$ となります。

放射パターン

素子間隔 (dx) と指向性角度によって、 θ_0 にピークを持つ線形アレイは大きなサイドローブ (グレーティングローブ) を新たに形成してしまうことがあります。これらのローブの形成を避けるためには、カラムパターンH-HPBWと最大スキャン角度の関係を観察することが重要です。理論によれば、素子間隔 dx ($0.5\lambda < dx < \lambda$) では、アレイファクターはメインローブをひとつだけ持ち、グレーティングローブの最大値は、 $[13] |\sin\theta_0| > \frac{1}{S} - 1$ (ここに $S = dx/\lambda$) である限り、 $-90^\circ < \theta_0 < +90^\circ$ では起こりません。

アダプティブアレイビームフォーミングアンテナには、メイン放射パターンタイプに次の5つがあります。

1. シングルカラムパターン

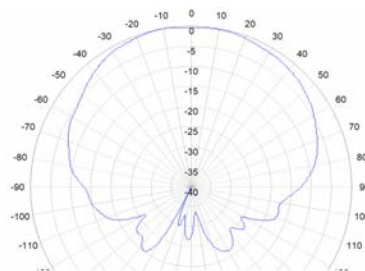


図22:シングルカラムパターン

このパターンのタイプは個々のアレイがビーム無指向性モードにあることを示します。非加重(unweighted)入力が使われており、ある種のシステムでアップリンクチャンネルに使われています。

2.LTE用のブロードキャストパターン

この**ビームは広く、無指向性**で、セルエリア全体をカバーするために用いられ、4つのカラムに予め定められた振幅と位相を供給して作られます。ビームフォーミングのために振幅の減らされた（**テーパのついた**）ポートもあるため、ブロードキャストパターンではゲインの減少（**加重損失**）があり得ます。このブロードキャストパターンは通常ダウンリンクコントロールチャンネルに用いられます。

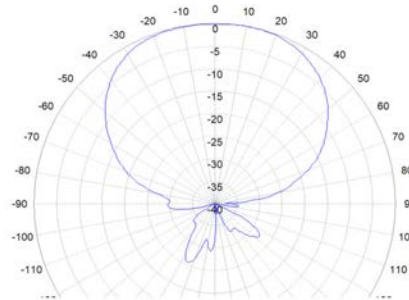


図23:LTE用のブロードキャストパターン

3.5G NR用のブロードキャストパターン

前述のように、LTEとは異なり、3GPPでは指向性同期信号（PSS/SSS/PBCH）を5G NRに定義しています。このため、gNBは狭く、ゲインの高いビームを用いてブロードキャスト信号を様々な方向にスイープできます。図24は具体的なアンテナの従来の放射パターンを表すものではありませんが、計画のためのツールとして使える5G NRスイープビームのエンベロップを捉えています。

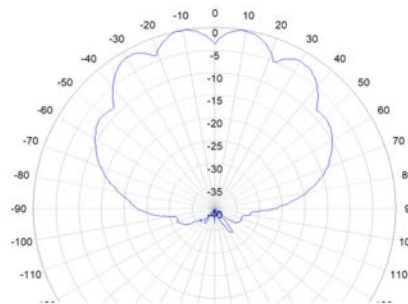


図24:5G NR用のブロードキャストパターン

4.サービスビームパターン

すべてのカラムを同じ位相進行で供給すると、**水平方向にステアリングできる狭いビームが得られます**。サービスビームパターンでは、振幅は変更が無いが、加重損失の追加によってサイドローブを抑制してテーパ付けされます。LTEでは、この放射パターンタイプは主にダウンリンクのデータトラフィックに使われます。

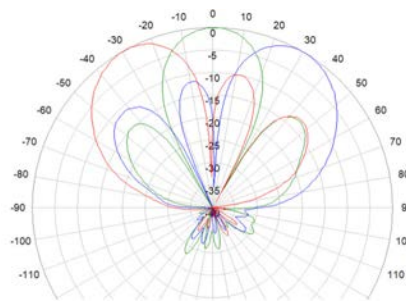


図25:サービスパターン

5.ソフトスプリットパターン

このモードでは、アンテナの位相と振幅パラメータはツインビームアンテナ（6つのセクターをカバーする3つのアンテナ）を模倣します。図26に示す結果では、方向の固定された2つのサービスビームが確認できます。

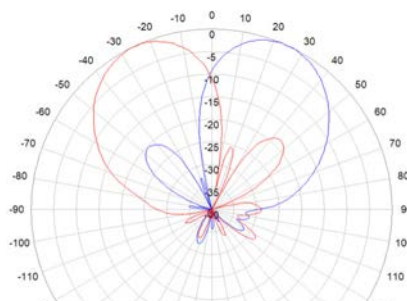


図26:ソフトスプリットパターン

対応する無線機

アンテナパラメータの設定

上記のパターンを生成するには、8T8R無線機はそのRFポートにわたって異なる振幅と位相シフトを適用できなければなりません。例えば、ブロードキャストモードまたはサービスステアリングモードでは、無線機は表2に示すビームステアリング設定を適用します。これらの設定はこのアンテナの4つのアレイ（カラム）にわたる各偏波に対して位相と振幅を決定します。

ビームモード		カラム1	カラム2	カラム3	カラム4
65°HBWブロードキャスト	位相 Φ	0	115	100	0
	振幅	0.81	1	0.73	0.6
90°HBWブロードキャスト	位相 Φ	0	130	110	0
	振幅	0.79	1	0.75	0.6
@0°ビームステアリング	位相 Φ	0	0	0	0
	振幅	1	1	1	1
@30°ビームステアリング	位相 Φ	0	100	200	300
	振幅	1	1	1	1

表2:ビームステアリングの設定例

較正ポート

表2に示す設定は無線機によって正確に適用できますが、アンテナのポートでちょうどその値が受け取られるかどうかは保証がありません。このことは、接続ジャンパーの長さがミリレベルでばらつくことを考えるとうなづけます。図27に示すキャリブレーションポートはこのばらつきを補正するために設けられています。下の例では、サブシステムはすべて単一のキャリブレーションポートにカップリングされています。

例えば、図28に示すキャリブレーションボードはウィルキンソンパワーダイダーを使って、RF入力ポートとキャリブレーションポート間のカップリングレベルを-26dBに維持します。

8T8Rの無線機はまたキャリブレーション機能にも対応している必要があります。これを達成するには、リモート無線装置(RRU)に、アンテナ側の対応するポートに接続する専用のキャリブレーションポート(図29、30)を設けます。



図27:CommScopeアンテナのキャリブレーションポート

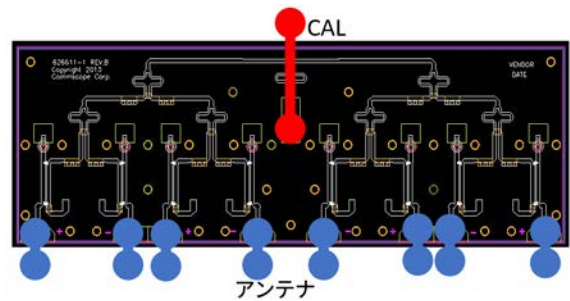


図28:キャリブレーションボード

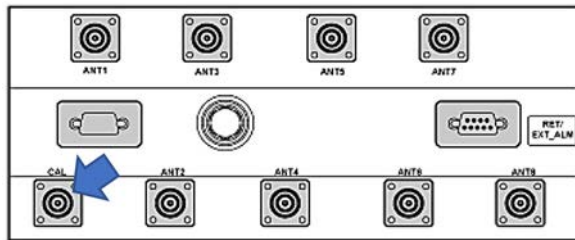


図29:ファイアウェイ TDD LTE RRU3252



図30:スプリント/サムスンによる8T8Rの実装(米国)

例：AAAの実際の実装

これまで見てきたように、RFポートが8つあるとアンテナを8T8R TDDモード（8ブランチ送信、8ブランチ受信）で動作させられます。ビームフォーミングは、相互カップリング相間と類似した偏波をもつカラムで成り立っています。図31のように、4つの交差偏波で構成されたカラムは、ポート2、4、6、8（赤）での4つのCo-Polカラムと、ポート1、3、5、7（青）での4つのCross-Polカラムと考えられます。別の言葉で言えば、2つのビームフォーミングアンテナ（BF1とBF2）が偏波ダイバーシティーで隔てられたものと考えられます。無線機によって、このAAA構成は、MIMOスキームが2x、8x、またはマルチユーザーでのモードがTM8、9、10（表3）をサポートできます。図31のような構成（各4つのカラムのある2つの交差偏波ビームフォーマー）にした場合、このアンテナはビームフォーミングで2つのMIMOをサポートできます。

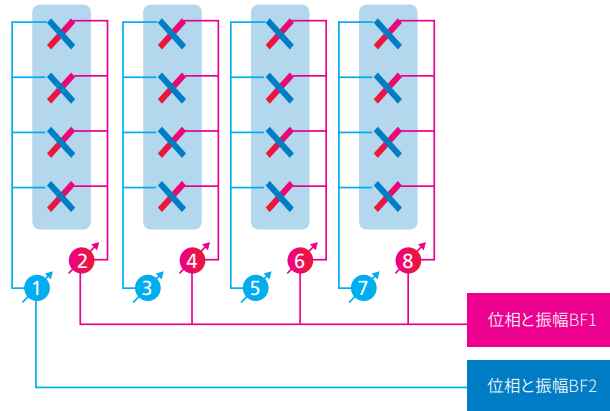


図31:カラム4つのアンテナでのビームフォーミング

送信モード	マッピング	PDCCHに対応するPDSCHの送信スキーム	3GPPリリース
TM1	SISO	単一アンテナポート、ポート0	リリース8
TM2	MISO	送信ダイバーシティー	リリース8
TM3	MIMO	ラージディレイサイクル遅延ダイバーシティー (CDD)	リリース8
TM4	MIMO	クローズドループの空間多重化	リリース8
TM5	MIMO	マルチユーザーMIMO	リリース8
TM6	MIMO	単一の送信レイヤーを用いた空間多重化	リリース8
TM7	MIMO	単一アンテナポート	ビームフォーミング、リリース8
TM8	MIMO	デュアルレイヤー送信	ビームフォーミング、リリース9
TM9	MIMO	最大8レイヤー	ビームフォーミング、リリース10
TM10	MIMO	最大8レイヤー	ビームフォーミング、リリース11

表3：C-RNTI (cell-radio network temporary identifierセル無線網臨時識別子) で構成したPDCCHとPDSCHに対するLTE送信モード

第4章：デジタルビームフォーマーの構築

最大8台のトランシーバーを備えたパッシブビームフォーマーでは、動的なデジタル水平ビームステアリング、垂直アナログ電気式チルト、2x2 MIMOストリームが可能です。しかし、無線トランシーバーの数を8台以上にするとどうなるでしょうか。

マッシュMIMOの概念

2010、ベル研究所のトーマス・マルゼッタ (Thomas Marzetta) は論文 [14] を発表し、**無限数**の基地局アンテナ ($M \rightarrow \infty$) が固定数の単一アンテナターミナル (K) をカバーする場合を考察しました。これはその後マッシュMIMO (mMIMO) として、5Gワイヤレス通信の主要な実現技術として知られるようになりました。

マルゼッタの論文では、無相間のノイズがと高速フェーディングが無くなる事他に、多数のmMIMOアンテナ素子を使うことでビームを狭く、集中され、指向性を高められることが示されました。これでスペクトル効率とエネルギー効率が向上し、キャパシティは大きく、セルエッジでのカバレッジも改善します。これらは新規5G周波数帯域を3.5GHzとミリ波の周波数帯で検討する際に決定的な利点です。



図32:ルンド大学のマッシュMIMOテスト設備 — (LuMaMi)

では、いくつかのアンテナ素子とトランシーバーがmMIMOを形成するのでしょうか?通常、これは16T16R以上と言われていいます。しかし、このホワイトペーパーを書いている時点では、ほとんどの商用mMIMOソリューションは32台または64台のトランシーバーを採用しています。RFチェーン (トランシーバーからアンテナ素子へ) の数が増えると、外部ジャンパーケーブルは実際的ではなくなってきました。そのため、無線機をアンテナパネルそのものの中に組み込むに至り、「アクティブビームフォーマー」と呼ばれる新種のビームフォーマーが生まれました。

マッシュMIMOのディメンショニング

mMIMOアクティブビームフォーマーを構成するには、次の3つの要素を検討する必要があります。

- ・ ビームフォーミングのタイプ
- ・ トランシーバーの数 (量)
- ・ アンテナ素子の数 (量)

各要素を詳細に見て行きましょう。

ビームフォーミングのタイプ

アンテナ素子数とRFチェーンの増加は、マッシュMIMOの登場と相まって、新たな課題を引き起こしました [15]:

- RFチェーン数の増大 (各アンテナ素子に一つずつ) のためのコストとエネルギー消費量が増大。
- 各送信アンテナと受信アンテナ間のチャンネル状態情報 (CSI) の決定に周波数帯域リソースをたくさん使用。

こうした問題の解決策となろうとしているのが、**ハイブリッドビームフォーミング**です。ハイブリッドビームフォーミングには、ベースバンドの**デジタルビームフォーミング**と、RFドメインの**アナログビームフォーミング**を組み合わせています [15]。

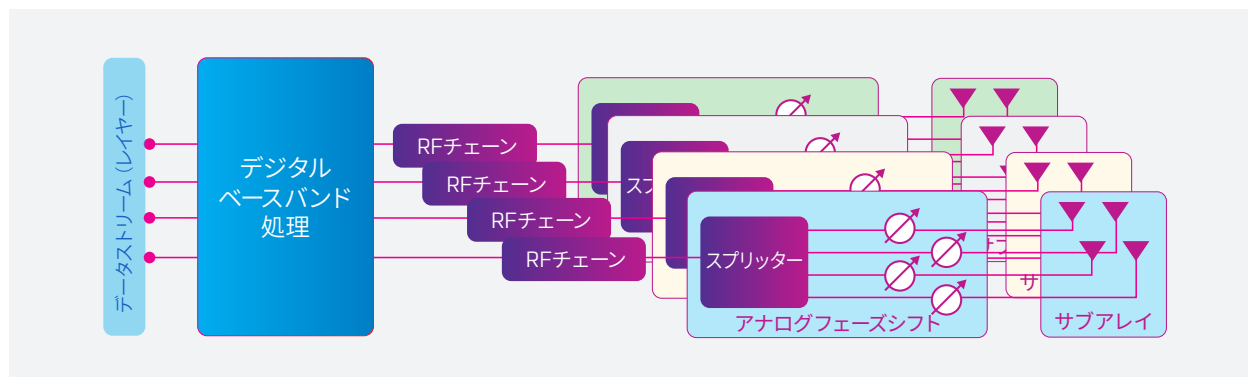


図33:DLハイブリッドビームフォーミングの例

図33には、ハイブリッドビームフォーミングの仮想的な例を示します。各RFチェーンはデジタル制御され、単一のサブアレイにマッピングされます。RFチェーンはそのサブアレイのアンテナ素子にわたって分割され、その間にはアナログフェーズシフターが置かれます。

この構成はアナログフェーズシフターを取り除き、サブアレイのRFスプリッターを保持することで簡略化できます。こうするとアンテナパネルのゲインは増加しますが、アナログビームフォーミング機能は何らありません。こうした実装は現在のサブ6GHz mMIMOシステムで見られ、デジタル (非ハイブリッド) ビームフォーミングと考えられています。

アンテナ素子の数

先述のように、無損失線形アレイでアンテナ素子数を2倍にすると、垂直HPBW^{§5}が減り、全体的なゲインが増加します。

アンテナのゲイン (dB) = 素子のゲイン + $3\log_2(N)$

さらに、図34に示すモデルのような2Dプレーナーアレイは、「サブアレイのアレイ」と考えられます。このように、カラム数を2倍にすると、水平HPBWが減少し、全体的なゲインがさらに2倍になります。

§5 電波強度半値幅

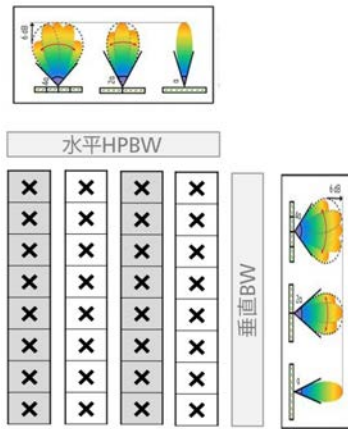


図34:アンテナパネルアレイ

異なるmMIMO構成に対してアンテナパネルのゲインを計算するには、上記のプレーナーアレイは各サブアレイに水平サブアレイ (H)、垂直サブアレイ (V)、アンテナ素子 (A) を備えていると仮定してください。アンテナ素子が交差偏波されている場合、(A) は単一偏波に対するものです。

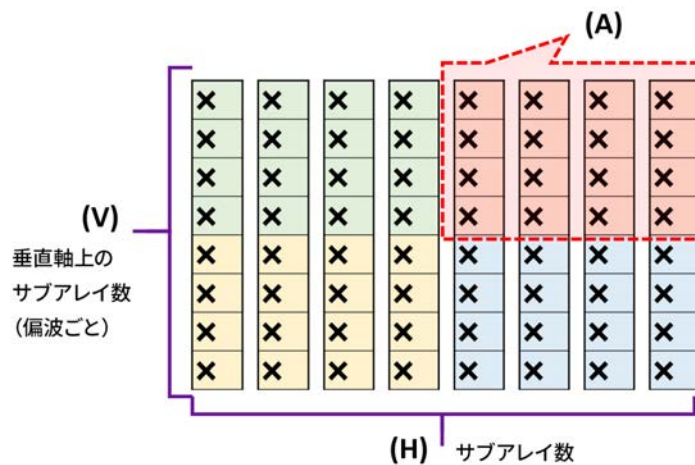


図35:アンテナパネルのディメンション

パネルゲインを一から計算するには、次を用います。

$$\text{ゲインサブアレイ} = \text{ゲイン素子} + 3\log_2(\mathbf{A})$$

$$\text{ゲイン} = \text{ゲインサブアレイ} + 3\log_2(\mathbf{H} \cdot \mathbf{V})$$

簡単化して、

$$\text{ゲインパネル} = \text{ゲイン素子} + 3\log_2(\mathbf{A}) + 3\log_2(\mathbf{H} \cdot \mathbf{V})$$

$$= \text{ゲイン素子} + 3\log_2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{V})$$

ゲイン素子は、バックパネルリフレクターの前にある単一のアンテナ素子のゲインです。

異なるmMIMO構成に対してアンテナパネルのゲインを計算するには、上記のプレーナーアレイは各サブアレイに水平サブアレイ (H)、垂直サブアレイ (V)、アンテナ素子 (A) を備えていると仮定してください。アンテナ素子が交差偏波されている場合、(A) は単一偏波に対するものです。

トランシーバー数とマッピングオプション

交差偏波パネルアンテナは、ひとつのレドーム下の2つの独立したアンテナで、その各々の偏波は互いに独立したものであると考えることができます。64T64Rの無線機はこのとき、2x 32T32Rの、ゲインが等しい同一偏波アンテナと交差偏波アンテナにマッピングできます。

表4には、デジタル (非ハイブリッド) ビームフォーミングに対するトランシーバー・サブアレイ間の様々なマッピング構成を示します。特記しない場合は、表の値は単一偏波のものであります。

下の表4と図36を見ると、各RFチェーンは常に単一のサブアレイにマッピングされていることがわかります。例えば、表4の最初の列では次が分かります。

- ・ チェックサムで: **8T8R**無線機は4つの同一偏波RFチェーンと4つの交差偏波RFチェーンで構成されており、これが88個の同一偏波、交差偏波アンテナ素子にマッピングされている。
- ・ パネルディメンションで: 4つの水平x1つの垂直サブアレイ。各サブアレイには11個のアンテナ素子がある。

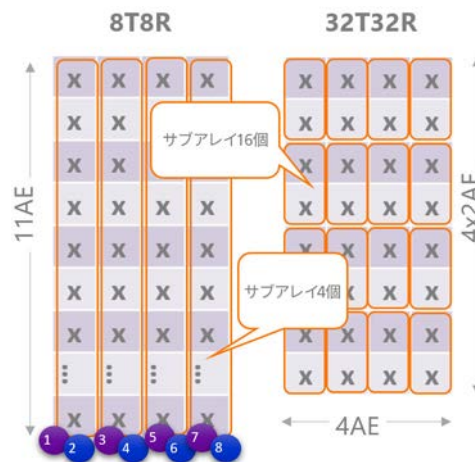


図36:8T8Rと32T32Rのマッピング

パネルディメンション			チェックサム		ゲインの計算		
(H) 水平	(V) 垂直	(A) 素子	xTxR 総数	AE総数 (デュアル偏波)	Aeゲイン (dBi)	サブアレイ ゲイン	パネルゲイン (単一偏波)
4	1	11	8	88	5.1	15.48	21.48
4	4	1	32	32	5.1	5.10	17.10
4	4	2	32	64	5.1	8.10	20.10
4	4	4	32	128	5.1	11.10	23.10
8	2	6	32	192	5.1	12.85	24.85
8	4	1	64	64	5.1	5.10	20.10
8	4	2	64	128	5.1	8.10	23.10
8	4	3	64	192	5.1	9.85	24.85
8	4	4	64	256	5.1	11.10	26.10

表4:パネルゲインの比較

この場合、カラムごとにひとつのサブアレイがあります (V=1)。各偏波に対して、4つのサブアレイ (H=4) となり、その各々はRFチェーンがカラム全体にマッピングされています。

RFチェーンはまた表4の第3列に示すようにカラムに部分的にマッピングできます。ここで、

- ・ 交差偏波の**32T32R**無線機には16の同一偏波と、16の交差偏波RFチェーンがある
- ・ サブアレイごとに**二つのアンテナ素子**、**4つの垂直**、**4つの水平サブアレイ**のあるアンテナ

これはサブアレイ16個で、各RFチェーンはカラムの4分の1にマッピングされたものとなります。

表の8番目の行はその結果できた各構成に対するパネルゲインを比較しており、8T8Rは32T32Rのゲインを上回っていることが分かります。しかし、第3、4、5列では、サブアレイごとのAEの数を増やす (RFチェーンの数を増やす) と、32T32Rパネルアンテナのゲインを増大できることが分かります。

64T64R AE マッピングシミュレーション

64T64R mMIMO構成で、交差偏波プレーナアレイの様々なオプションを検討してみましょう。2013年6月、IEEE Communications Magazineは、いくつかのアンテナパネルの構成のベンチマーキングを行うという、興味深い研究 [16] を引用しました。ここでは、六角形のグリッドでデプロイされた19の3セクターセルサイトで、各サイトが平均10のUEデバイスをカバーしているネットワークのシミュレーションが行われています。

図37はこのシミュレーションで使われた次の3つの主なパネル設計パラメータを示しています。

- ・ 共通の交差偏波**64T64R**無線機 (RFチェーンは同一偏波32個、交差偏波32個)
- ・ [1Vx32H]:サブアレイごとに**AE1**個、垂直サブアレイ (V) x **1**個、水平サブアレイ (H) x **32**個のアンテナ
- ・ [4Vx8H]:サブアレイごとに**AE1**個、垂直サブアレイ (V) x **4**個、水平サブアレイ (H) x **8**個のアンテナ
 - ・ 0.5λ水平方向間隔 (d_H)
 - ・ 0.5λと2λ垂直方向間隔 (d_V)

図38に示すもののような1次元構成 [1Vx32H] では、水平ステアリングのみ可能です。しかし、その結果としてH-HPBWが狭くなるにつれて、マルチユーザ干渉は実質的にゼロにまでなります。その結果、ユーザー数KのMU-MIMOのスケジューリングは、シングルユーザーMIMO (SU-MIMO) に比べてほとんどK倍のユーザースループットが得られます。ここで、Kは各セルでのユーザー数を表します [16]。

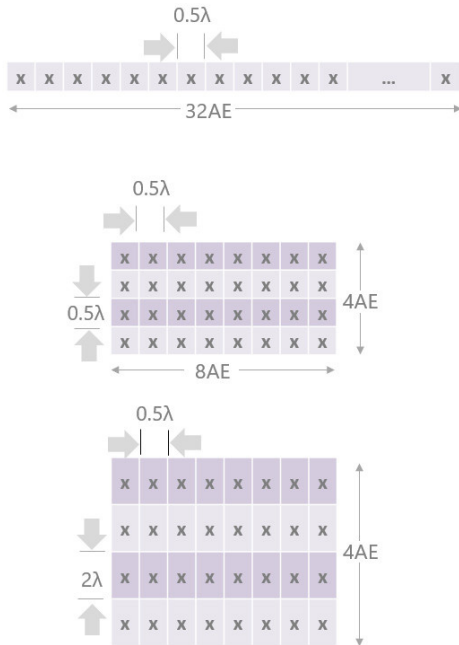


図37:64T64R mMIMOパネルの構成

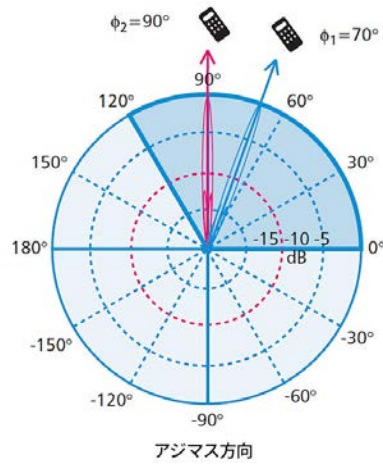


図38:1Vx32Hパターン

2次元 [4Vx8H] パネルで垂直、水平ビームステアリングモードを見てみると、水平、垂直両方のビームパターンがセルのパフォーマンスに影響していることが分かります。水平アジマス方向では、8H素子のH-HPBWは、その前の32H素子の1D構成よりも広くなりました。しかし、120°のセクターにわたって十分なユーザー分離があります。図39でアジマス方向90°と70°にいるユーザー2人を見てください。

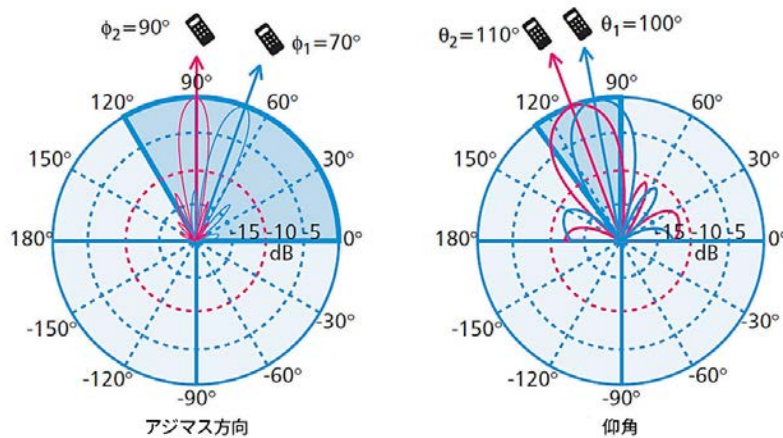


図39:4Vx8Hパターン (dv = 0.5λ)

しかし、垂直素子が4Vしかない仰角ドメインでは、V-HPBWはさらに幅広く、垂直方向のユーザー間の広がりアジマス方向に比べて通常狭くなります。このため、垂直仰角ドメインで十分に分離可能なビームを持つ2つのUEデバイスを見つけることはより困難になります。

垂直方向のビーム分離を改善するため、IEEE Communications Magazine所載の研究 [16] では、垂直分離 (dv) が 2λ の [4Vx8H] 構成のシミュレーションを行いました。図40に示すように、この構成ではV-HPBWが仰角角度範囲で狭くなりましたが、グレーティングローブもいくつか生じ、メインローブのエネルギーが削がれるために近隣セルとの干渉が起きてしまいます。これはカバーするセルでのシミュレーション結果を改善はしても、干渉する近隣セルにわたるパフォーマンスは落ちてしまいます。

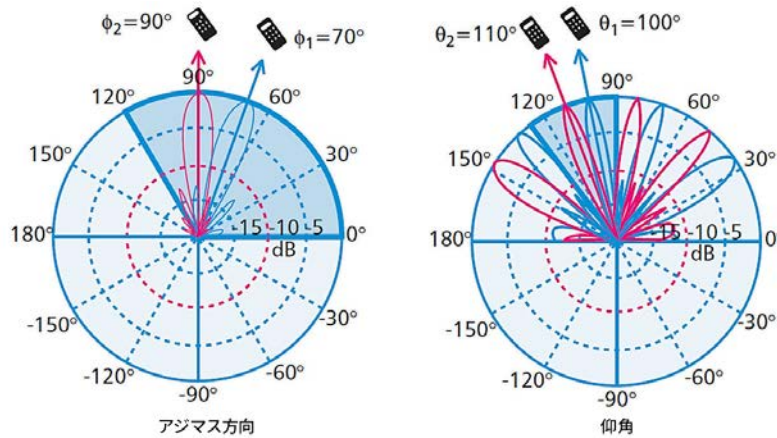


図40:4Vx8Hパターン (dv= 2λ)

図41に、シミュレーションしたセルに対するスペクトル効率 (キャパシティ) をまとめます。キャパシティは水平と垂直HPBWに大きく影響されます。ビームステアリングとUE分離を効率的に行うには、ビームを狭くすることが重要です。多くの実際のシナリオでは、ユーザーは垂直方向により狭い範囲の角度に分布しており、これが垂直ビームステアリングの利点と向上を限定的なものとしします。

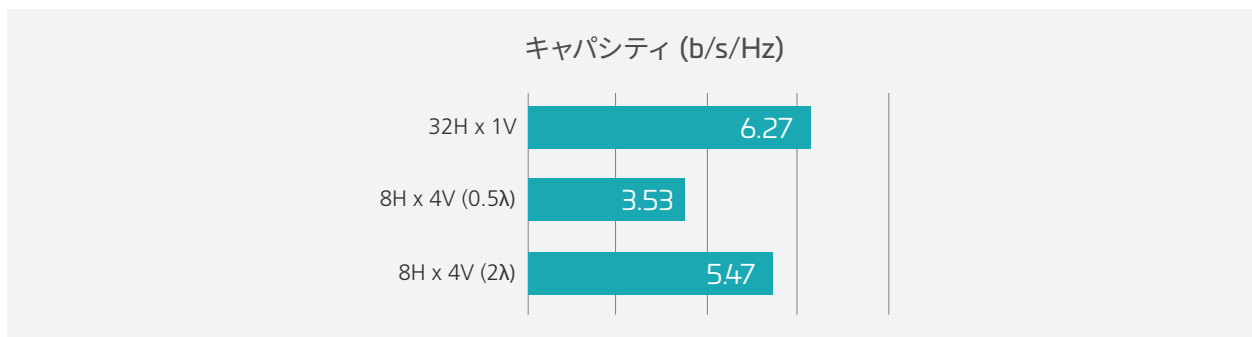


図41:64T64Rパフォーマンスの結果 [16]

まとめ

パッシブ、アクティブ両方のビームフォーマーについて考察しましたが、まだ一つの疑問が残っています。パッシブビームフォーマーは、フィールドでアクティブビームフォーマーよりも良い性能を発揮するでしょうか?この解説のパートIIでは、3つの異なるフィールド環境で、パッシブな8T8Rビームフォーマーを、32T32Rと64T64R構成の2つのビームフォーマーと比較します。どのような結果になるか、どうぞご期待ください。

参考資料

- [1] 3GPP, "Study on new radio access technology Physical layer aspects," 3GPP TR 38.802 V14.2.0, 2017.
- [2] M. P. A. R. D. C. a. M. Z. Marco Giordani, "Standalone and Non-Standalone Beam Management for 3GPP NR at mmWaves," IEEE Communications Magazine, April 2019.
- [3] J. Campos, "Understanding the 5G NR Physical Layer," Keysight Technologies 2017, 2017.
- [4] MWC, "White Paper, TM9: Higher Order MIMO Enabler—Maximize Capacity Potential," in MWC, 2018.
- [5] M. Giordani, M. Polese, A. Roy, D. Castor and M. Zorzi, "A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 1, Q1 2019.
- [6] ShareTechNote, "5G/NR—Beam Management," [Online]. Available: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phys_BeamManagement.html.
- [7] S. J. Orfanidis, Electromagnetic Waves and Antennas, <http://eceweb1.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>, pp. 1110-1111.
- [8] D. A. C. F. A. F. B. G. B. H. J. K. a. E. L. Peter von Butovitsch, "Advanced antenna systems for 5G networks," Ericsson, [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>.
- [9] M. N. Hamdy, "Antenna myths for base station antennas," 2016.
- [10] C. Powell, "Beamforming vs. MIMO antennas," RFS, Meriden, 2014.
- [11] S. S. Q. G. a. X. S. Shanzhi Chen, "Adaptive Beamforming in TDD-Based Mobile Communication Systems: State of the Art and 5G Research Directions," IEEE Wireless Communications, December 2016.
- [12] R. J. Mailloux, Phased Array Antenna Handbook, Artech House, Second Edition.
- [13] T. C. Cheston, Radar Handbook, McGraw Hill, 1990.
- [14] T. L. Marzetta, "Noncooperative Cellular Wireless with Unlimited Numbers of Base Station Antennas," IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, vol. VOL. 9, no. NO. 11, NOVEMBER 2010.
- [15] V. V. R. S. H. Z. L. S. L. H. N. L. L. a. K. H. Andreas F. Molisch, "Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey," IEEE Communications Magazine, pp. 134-141, 10 2017.
- [16] B. L. N. K. S. Y. L. a. J. (. Z. Y. K. a. J. L. Young-Han Nam, "Full-Dimension MIMO (FD-MIMO) for Next Generation Cellular Technology," IEEE Communications Magazine, pp. 172-179, June 2013.
- [17] K. Benson, "Phased Array Beamforming ICs Simplify," Analog Dialogue, p. 2, 1 1 2019.

CommScopeは人類の偉業へとつながる革新的なアイデアと画期的な発見を展開し、通信技術の限界を押し広げて行きます。お客様やパートナーとの協力により、世界最先端のネットワークを設計、創出、構築しています。次のチャンスを見出し、よりよい未来を実現することに情熱を傾けています。commscope.comでもっと詳しくご覧ください。

COMMSCOPE®

commscope.com

詳細はウェブサイトをご覧ください、お近くのCommScope担当者にお問い合わせください。

© 2020 CommScope, Inc. All rights reserved.

特に注記がない限り、*または™で特定されるすべての商標は、CommScope, Inc.の登録商標または商標です。本書は計画立案の参考としてのみ提供されており、CommScope製品やサービスの仕様や保証を変更または補完するものではありません。CommScopeは、最高水準の誠実な事業活動と環境の持続可能性に真摯に取り組んでおり、世界中のCommScopeの複数の施設がISO 9001、TL 9000、ISO 14001などの国際標準に準拠した認定を受けています。CommScopeのコミットメントに関する詳細は、<https://www.commscope.com/corporate-responsibility-and-sustainability>をご覧ください。

WP-114491-EN (06/00)