

ホワイトペーパー

5G システムのための ハイブリッド ビームフォーミング アーキテクチャ

このホワイトペーパーでは、MATLAB® および Simulink® を使用して以下を行う方法について説明します。

1. 複雑なサブアレイ構造を含む MIMO フェーズドアレイの設計
2. ハイブリッド ビームフォーミング システムの RF 領域およびベースバンド領域間でのインテリジェントな分割
3. 多入力多出力 (MIMO) 無線通信システムのモデル化
4. アーキテクチャの選択とトレードオフの検討
5. 分割の設計選択肢の品質評価

背景

5G New Radio (NR) 無線通信システムは、S/N 比 (SNR) の改善と空間多重化に MIMO ビームフォーミング技術を使用し、散乱体の多い環境におけるデータスループットを向上させています。散乱体が多い環境では、送受信アンテナ間に LOS (Line Of Sight) 経路が常に存在するとは限りません。

MIMO ビームフォーミングでは、必要なスループットを得るために、送信機側でプリコーディングを、受信機側で結合を実装して SNR を改善し、空間チャネルを分離します。フルデジタルのビームフォーミング構造は、各アンテナに専用の RF-ベースバンドチェーンを必要とするため、全体的なハードウェアコストが増大し、消費電力を増加させる可能性があります。

その解決策として、RF-ベースバンドチェーンの削減にハイブリッド ビームフォーミングが利用されています。プリコーディングと結合の重み付けを意図的に選択することで、ハイブリッド ビームフォーミングはフル (完全デジタル) ビームフォーミングと同等の性能を達成できます。

システムのモデル化は、まずベースバンド等価モデルを使用して実現できます。この種のモデルは短時間で開発でき、最速のシミュレーション速度を実現するオプションを提供します。無線サブシステムの設計には、基本ブロックが利用できます。これらのサブシステムを統合して、物理層シミュレーションを形成できます。結果として得られるモデルを使用して、RF 領域とデジタル領域の間のビームフォーミングの分割に関する意思決定を推進できます。

マルチドメイン (RF およびベースバンド) モデリングを行うには、ハイブリッド MIMO ビームフォーミングによるベースバンド Simulink モデルを使用して、システムレベル設計を開始できます。このホワイトペーパーでは、量子化スパス ハイブリッド ビームフォーミング (QSHB) とピーク検索を伴うハイブリッド ビームフォーミング (HBPS) という 2 種類のハイブリッド ビームフォーミング アルゴリズムの例を含むフレームワークについて説明します。モデルの API はオープンであるため、ハイブリッド ビームフォーミング用に独自のカスタムアルゴリズムを統合することもできます。

Simulink ベースバンドモデルは、RF Blockset を使用した RF コンポーネントを含むマルチドメインモデルに移行する出発点にもなります。

このホワイトペーパーでは、関連するワークフローで、Phased Array System Toolbox™、RF Blockset™、Communications Toolbox™、5G Toolbox™ を使用しています。

ハイブリッド ビームフォーミングのアーキテクチャ

図 1 は、送信機、チャンネル、受信機を備えたハイブリッド ビームフォーミング システムのブロック線図です。

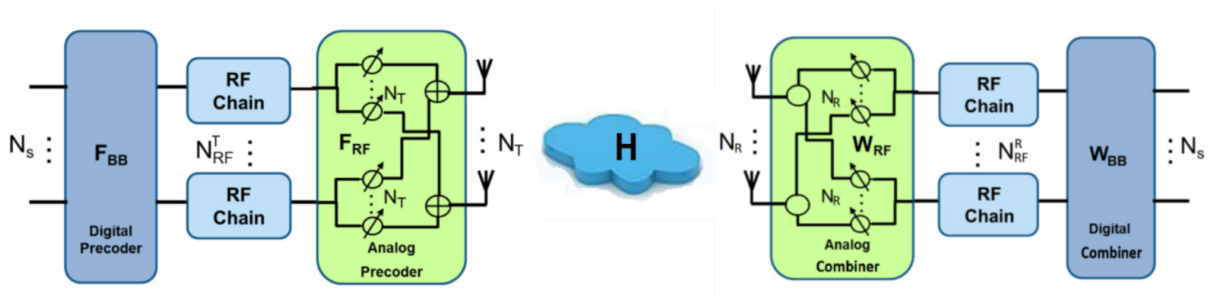


図 1. ハイブリッド ビームフォーミング システムの構造: 送信機、チャンネル、受信機。

図 1 に示すパラメーターは次のように定義されています。

F_{RF}	サイズ $N_T \times N_{RF}^T$ のアナログプリコーダー	N_T Tx アンテナの数
F_{BB}	サイズ $N_{RF}^T \times N_s$ のデジタルプリコーダー	N_r Rx アンテナの数
W_{RF}	サイズ $N_r \times N_{RF}^R$ のアナログ結合器	N_s 信号ストリームの数
W_{BB}	サイズ $N_{RF}^R \times N_s$ のデジタル結合器	N_{RF}^T Tx RF チェーンの数
H	サイズ $N_r \times N_T$ の MIMO チャンネル行列	N_{RF}^R Rx RF チェーンの数

以下で説明するフレームワークでは、図 1 に示すパラメーターの値のさまざまな組み合わせを検討できます。具体的には、アンテナの数と RF チェーンの数进行评估できます。RF チェーンの数が増える理由は、その設定によりハードウェアのコストを削減できるためです。複数の RF チェーンでデジタル重み付けを "共有" することで、必要なハードウェアの数は少なくなります。課題は、システム性能に影響を与えずにハードウェアの数を削減することです。

モデルの構築

Massive MIMO システムの Simulink モデルを使用して、ハイブリッド ビームフォーミング アルゴリズムを開発し、システム実装前にテストできます。また、RF 位相シフトとデジタル重み付けの両方を、各構成に対して直接生成することもできます。ここで説明するシステムは QSHB と HBPS に基づいていますが、独自開発のカスタムアルゴリズムにこのモデルを拡張することもできます。

システムのモデルは、図 2 に示すように、以下の 4 つの主要コンポーネントで構成されています。

- MIMO 送信機
- MIMO チャンネル
- MIMO 受信機
- ハイブリッド重み計算

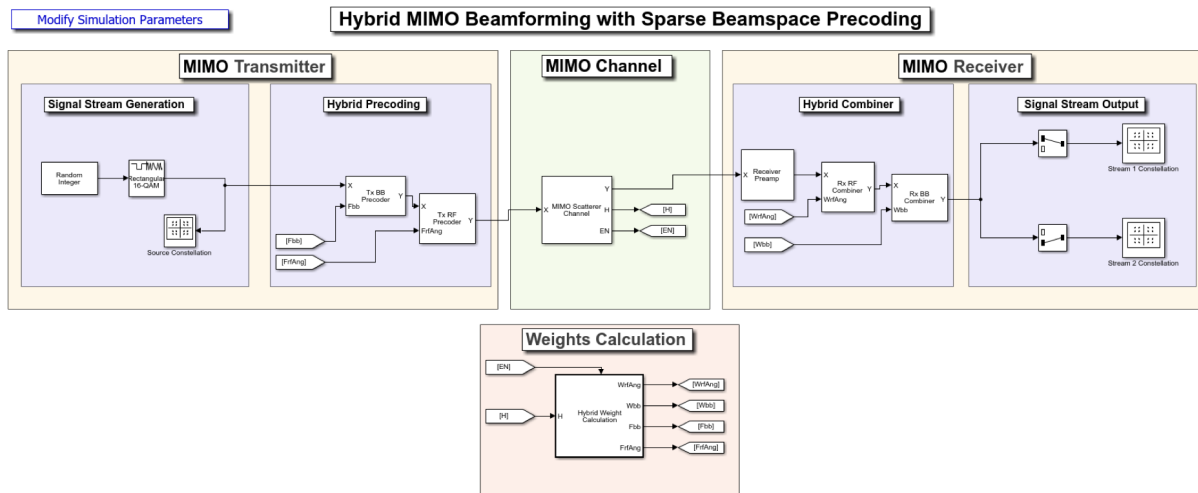


図 2. ハイブリッド ビームフォーミング システムの Simulink モデル。

このワークフローでは、特定の MIMO チャンネル行列 H を統合できます。行列 H は、使用する時分割復信または周波数分割復信 (TDD または FDD) モードに応じて、送信機または受信機で推定できます。

送信機、受信機、MIMO チャンネルブロックの構造は、プリコーディングと重み付け行列の生成から独立しています。QSHB と HBPS のアルゴリズムは、モデルの Weight Calculation ブロックに実装されており、システムに合わせて表示またはカスタマイズできます。

生成された MIMO チャンネル行列 H は送信シンボル数に対して不変であるため、プリコーディング行列と結合器行列はすべてのシンボルに対して同一となります。

MIMO 送信機は信号ストリームを生成し、空間多重化を活用するためにプリコーディングを適用します。変調された信号は MIMO チャンネルで定義された散乱チャンネルを伝播し、受信側で復号化および復調されます。

空間多重化を行う理由

5G システムにおける課題は、SNR だけではなくありません。チャンネル容量を拡張するには、システムは単純な LOS (見通し) 経路以外のマルチパス フェージング環境でも動作する必要があります。

空間多重化の概念は、マルチパスチャンネルと散乱体が多い環境の中で、MIMO システムが複数のデータストリームをチャンネル全体に同時に送信できることです。空間多重化の目的は、SNR の改善というよりも、情報スループットの向上です。

空間多重化を行うと、チャンネル行列が複数のモードに分離されるため、送信アレイの異なる素子から送信されたデータストリームを、受信信号から独立して復元できます。この結果を達成するには、各データストリームを送信前にプリコーディングし、受信後に結合して復元します。各受信素子で収集される情報は、各送信アレイ素子での信号を単純に拡張したものです。つまり、元のチャンネル内の複数の直交サブチャンネルのように動作します。1 つ目のサブチャンネルは、優位の送受信方向に対応しますが、信号処理手法を使用してサブチャンネルを均等化できます。さらに、他のサブチャンネルを使用して情報を伝達することも可能です。インテリジェンスは、素子ごとに割り当てられた電力に適用できます。この分野では業界研究が現在も活発に行われています。

このような背景を踏まえると、次の疑問は、アレイ設計の選択がシステムレベルの性能にどのように影響するのか、という点です。その答えは、チャンネルの性質に大きく依存します。つまり、アレイは、アレイゲインやダイバーシティゲインによって SNR を改善するか、空間多重化によって容量を向上させることを目的として使用できます。

図 3 は、多重散乱体チャンネルを抽象化した図です。また、図 3 では、単一の LOS データストリームのスループットと、マルチパス環境における複数のデータストリーム (この場合は 2 つ) のスループットを比較しています。2 つ目のストリームは、(優位性の低いサブチャンネルを使用することから) 1 つ目のストリームほど高いゲインは得られませんが、全体的な情報スループットは向上していることに注目してください。この場合も、等化手法を適用することで、最優位チャンネル以外のチャンネルを改善できます。さらに、この概念は他の多くのチャンネルに簡単に拡張できます。

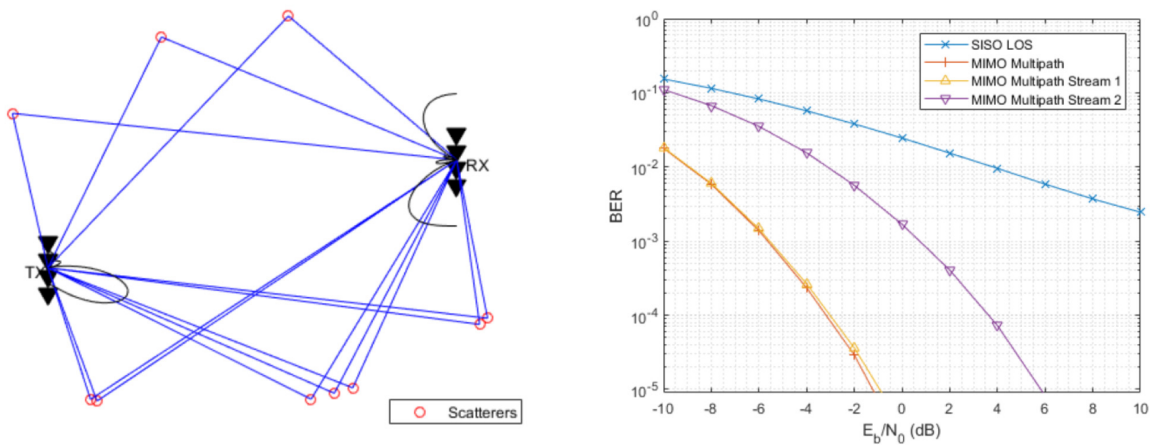


図 3: 多重散乱体シナリオ (左) およびマルチパスシナリオと LOS における BER の改善の比較 (右)。

MIMO 送信機および受信機

送信機サブシステムと受信機サブシステムでは、エンジニアリングのトレードオフの焦点はコスト対性能です。これにより、RF 領域とベースバンド領域の間でビームフォーミング アーキテクチャの分割が促進されます。分割は、複数のアンテナ素子を特定の RF チェーンにマッピングするサブアレイのトピックにつながります。サブアレイを統合することで、フルアンテナアレイを構築します。時には、素子フィードをサブアレイ間で共有し、バーチャルアレイを構築する場合があります。このシナリオでは、送受信モジュールの総数は、各サブアレイのアンテナ素子数よりも少なくなります。このため、大規模システムではハードウェアを削減できるようになります。

ハードウェアが少ないことは、コストや消費電力の点では有利ですが、完全デジタルのビームフォーミング設計でなければ、ビームステアリングの RF 部分で柔軟性が損なわれることとなります。この現象は、サブアレイの各チャンネルに同じ RF 位相シフト値を適用した場合に発生します。これは、位相と振幅の重み付けが各チャンネルで一意的な値となる完全デジタルの場合とは対照的です。

本書の例では、2 つの信号ストリームが生成されます。送信機システムは、4 つの送信 RF チェーンをもつ 64 本の送信アンテナで構成されています。受信アンテナは 16 本あり、4 つの受信 RF チェーンに給電しています。両方のアレイを図 4 に示します。

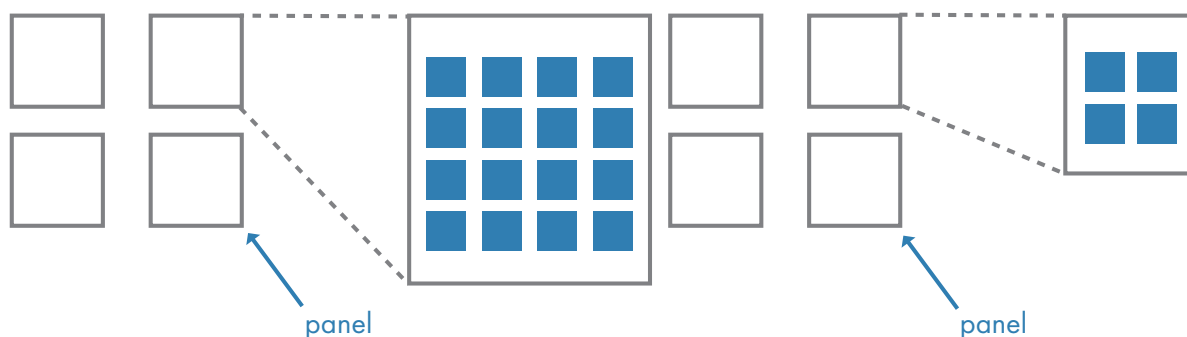


図 4. 4 つの RF チェーンをもつ 64 素子の送信アレイ (左) と、4 つの RF チェーンをもつ 16 素子の受信アレイ (右)。

分割と同時に、スペクトル効率を最大化してチャンネル容量を向上させることが推奨されます。これを実現する方法の一つは、各 RF チェーンを使用して独立したデータストリームを送信するよう要求することです。チャンネルが既知であると仮定すると、チャンネル行列を対角化し、優位モードを抽出することで、制約なしの最適なプリコーディング重み付けを得ることができます。

波形生成

5G のアップリンクおよびダウンリンク波形を含む、さまざまな変調スキームを使用できます。波形の基本ブロックについて説明するために、5G Toolbox の一部である 5G New Radio (NR) ダウンリンク波形を例に考えてみましょう。定義できるパラメーターの数は膨大です。同期信号の定義、搬送波構成、制御リソースセットなど、多岐にわたります。

まず、複数の帯域幅パート (BWP) のパラメーター化と生成が必要です。BWP は、所定の搬送波上でニューメロロジを共有する一連の連続したリソースによって形成されます。各 BWP には、異なるサブキャリア間隔 (SCS) があり、異なるサイクリック プレフィックス (CP) 長を使用し、異なる帯域幅にまたがることができます。また、異なる BWP は互いにオーバーラップできます。

搬送波構成ですべてのパラメーターを設定すると、波形が直接生成されます。

図 5 に、サブキャリアとシンボルの関数としての波形の例を示します。

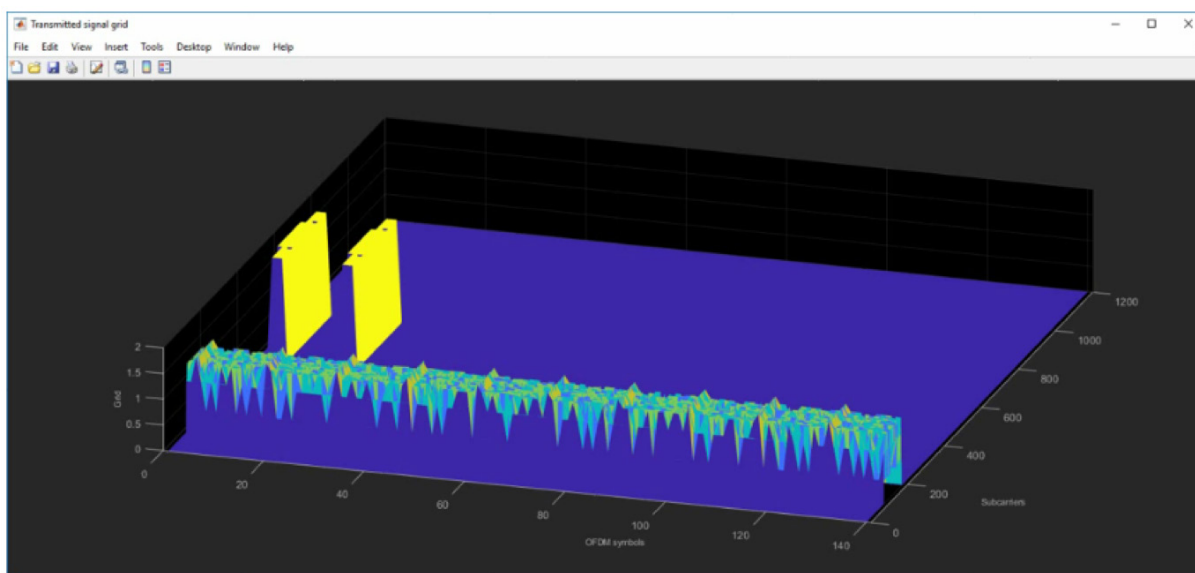


図 5. 5G New Radio (NR) ダウンリンク波形。

BWP の一例に対応する情報を使用した、MATLAB での構造を以下に示します。

Information associated to BWP 1:

```
SamplingRate: 61440000
Nfft: 4096
Windowing: 10
CyclicPrefixLengths: [1x14 double]
SymbolLengths: [1x14 double]
NSubcarriers: 2400
SubcarrierSpacing: 15
SymbolsPerSlot: 14
SlotsPerSubframe: 1
SymbolsPerSubframe: 14
SamplesPerSubframe: 61440
SubframePeriod: 1.0000e-03
Midpoints: [1x141 double]
WindowOverlap: [10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10]
```

モデルを単純化するため、このホワイトペーパーの例では基本的な 16 QAM 変調スキームを使用しています。この変調スキームのコンスタレーション ダイアグラムを図 6 に示します。

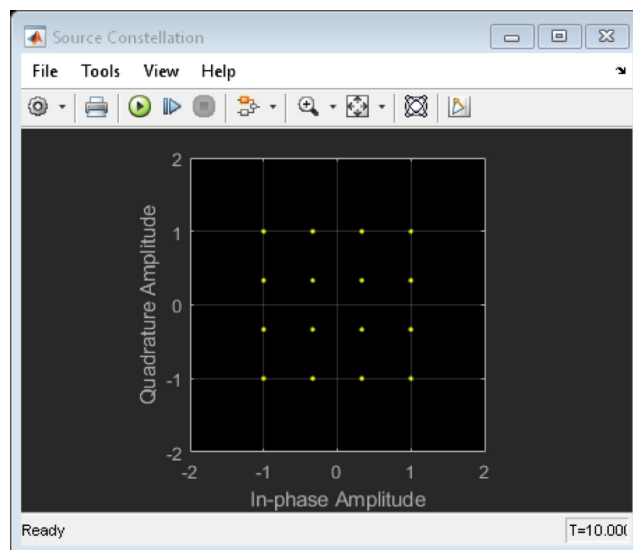


図 6. QAM16 変調のコンスタレーション ダイアグラム。

ハイブリッド ビームフォーミングの重み計算

ハイブリッド ビームフォーミング システムでは、プリコーディングとそれに対応する結合処理の両方が、ベースバンドと RF にまたがって実行されます。一般に、RF で達成されるビームフォーミングは、位相シフトを伴います。したがって、ワークフローの重要な構成要素は、チャンネルに基づいてベースバンドと RF 帯域の間で重みをどのように配分するかを決定することです。

これは Weight Calculation ブロック (図 2 を参照) で行われ、プリコーディング重み付けである F_{bb} と F_{rf} 、結合重み付けである W_{bb} と W_{rf} が、チャンネル行列 H に基づいて計算されます。図 7 に、MIMO チャンネルのプリコーディング重み付けと結合重み付けの両方を計算するために使用される、ブロックパラメータのビューを示します。これらは、他のシステムの組み合わせを検討するために直接構成できます。

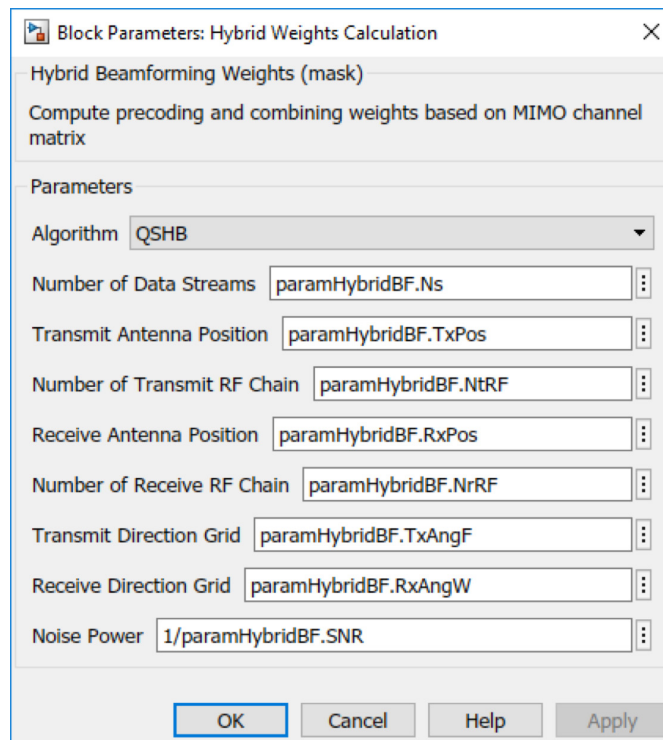


図 7. MIMO チャンネル行列に基づいてプリコーディング重み付けと結合重み付けを計算するハイブリッド重みマスク。

量子化スパース ハイブリッド ビームフォーミング

MIMO 散乱チャンネルのチャンネル行列 H が指定されれば、ハイブリッド ビームフォーミングの重みを計算できます。直交マッチング追跡アルゴリズムを使用すると、結果として得られるアナログのプリコーディング重み付けと結合重み付けは、チャンネル行列の優位モードに対応するステアリングベクトルのみとなります。

QSHB アルゴリズムは、以下の情報を生成します。

1. プリコーディング行列 F_{RF} および F_{BB}
2. 結合行列 W_{RF} および W_{BB}

解決されたハイブリッド ビームフォーミング行列があれば、 N_s の信号ストリームの推定値 $\hat{\mathbf{s}}$ は次のように表現できます。

$$\hat{\mathbf{s}} = \sqrt{\rho} W_{BB}^* W_{RF}^* H F_{RF} F_{BB} \mathbf{s} + W_{BB}^* W_{RF}^* \mathbf{n}$$

ここで、 \mathbf{s} は次元 N_s の信号ストリームであり、 \mathbf{n} は次元 N_R のチャンネル ノイズ ベクトルです。

ピーク検索を伴う量子化スパース ハイブリッド ビームフォーミング

HBPS は、QSHB を簡略化したものです。HBPS は、チャンネル行列の優位モードを反復的に検索する代わりに、すべてのデジタル重み付けをグリッド方向に投影し、 N_{RF}^T と N_{RF}^R のピークを識別して、対応するアナログ ビームフォーミング重み付けを形成します。これは、特に Massive MIMO システムで使用される大規模アレイには有効です。大規模アレイの場合は、方向が直交する可能性が高いためです。

チャンネル行列は経時的に変化する可能性があるため、重みの計算もチャンネルの変化に対応するよう定期的に実行する必要があります。

QSHB

QSHB アルゴリズムを使用すると、受信機で 16 QAM シンボルストリームを復元できます。結果として得られるコンスタレーション ダイアグラム (図 8) は、ソース コンスタレーションと比較して、復元されたシンボルが両方のストリームに適切に配置されていることを示しています。これは、ハイブリッド ビームフォーミング手法を使用することで、2 つのストリームの同時送信によりシステム容量の向上が可能であることを示しています。また、コンスタレーション ダイアグラムからは、点の散らばりが少ないため、復元されたストリーム 1 の分散が、復元されたストリーム 2 の分散よりも良好であることがわかります。これは、ストリーム 1 が MIMO チャンネルの最優位のモードを使用することで、SNR が最高値を得るためです。

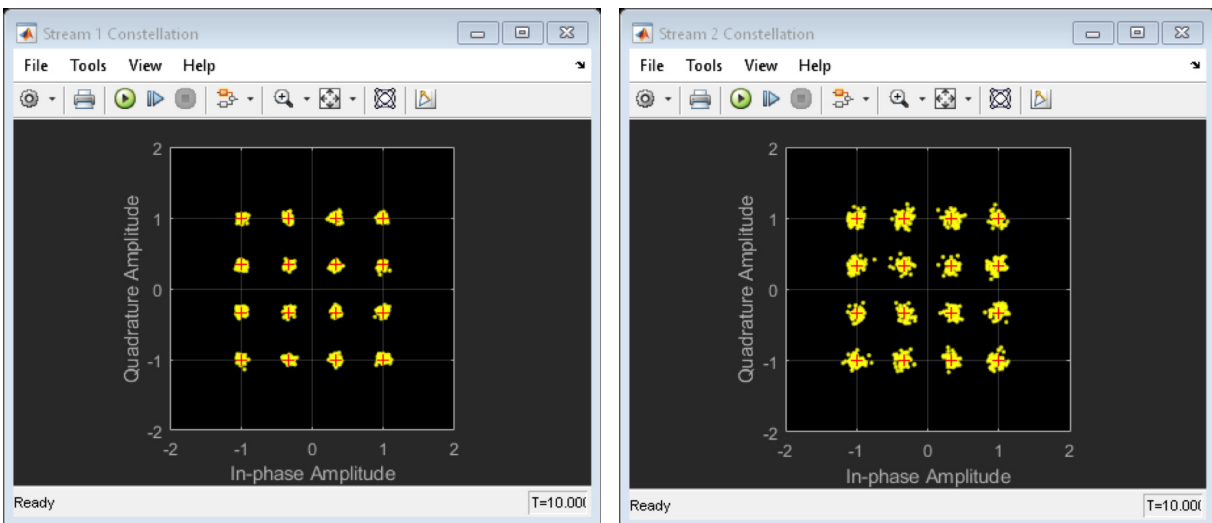


図 8. QSHB のストリーム 1 および 2 のコンスタレーション ダイアグラム。

HBPS

HBPS の結果を図 9 に示します。このコンスタレーション ダイアグラムからは、HBPS が QSHB と同等の性能を達成していることがわかります。これは、HBPS がシミュレーションした 64x16 MIMO システムに適したアルゴリズムであることを示しています。

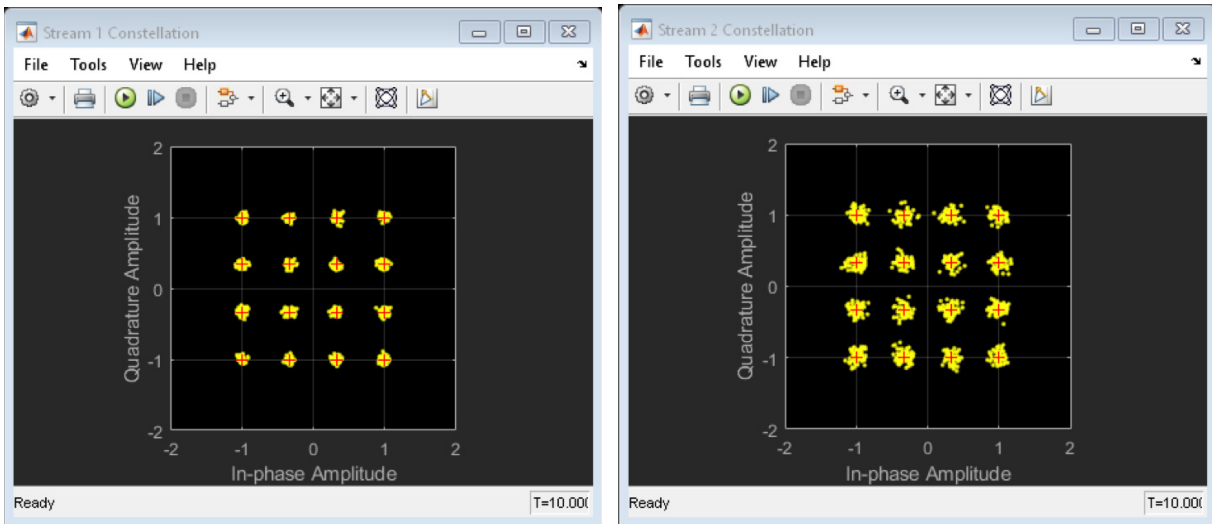


図 9. HBPS のストリーム 1 および 2 のコンスタレーション ダイアグラム。

アルゴリズムのスペクトル効率の比較

分割の効果は、複数の方法で測定できます。スペクトル効率は、MIMO システムの性能メトリクスとして一般的に使用されています。最適な重み付け (完全デジタル重み付け) を使用した場合のスペクトル効率と、推奨されるハイブリッド ビームフォーミング アルゴリズムである QSHB と PSHB を使用した場合のスペクトル効率を比較できます。

理解しやすいように、このシミュレーションでは 1 信号と 2 信号のストリームを使用していますが、使用中のシステムに合わせて拡張することも可能です。また、送信機のアンテナアレイは、システム要件に合わせて定義することもできます。

このシステムでは、アレイパターンは方位角 80 度、仰角 40 度に対応し、受信アンテナは方位角 120 度、仰角 80 度に対応しています。結果として得られるスペクトル効率曲線は、各 SNR 値について 50 回のモンテカルロ試行から求めました。図 10 のプロットでは、QSHB のスペクトル効率は、最適なフル デジタル ビームフォーミングから約 1 dB ずれています。

PSHB アルゴリズムは、QSHB に比べて計算効率が向上する一方で、スペクトル効率には最大 1.5 dB の損失が発生しています。

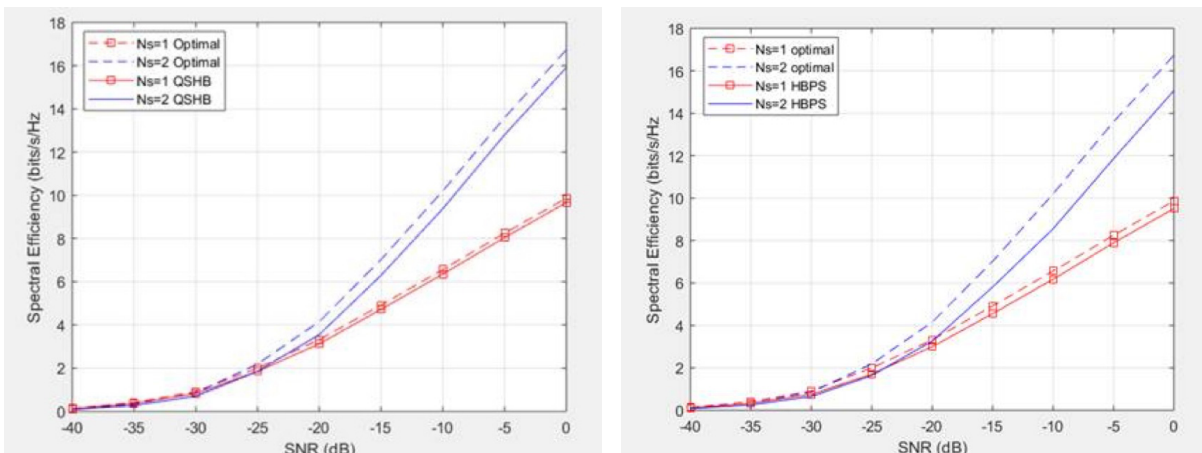


図 10. QSHB (左) と PSB (右) の効率の比較。

その他の分割方法との比較

システムパラメータは、図 2 に示す Simulink モデルのシステム設定セクションに指定されています。この例では、 N_t 、 N_{tRF} 、 N_r 、 N_{rRF} の値が分割を制御します。図 11 は、これらのシステムパラメータの組み合わせを変えた場合のコンスタレーション ダイアグラムです。

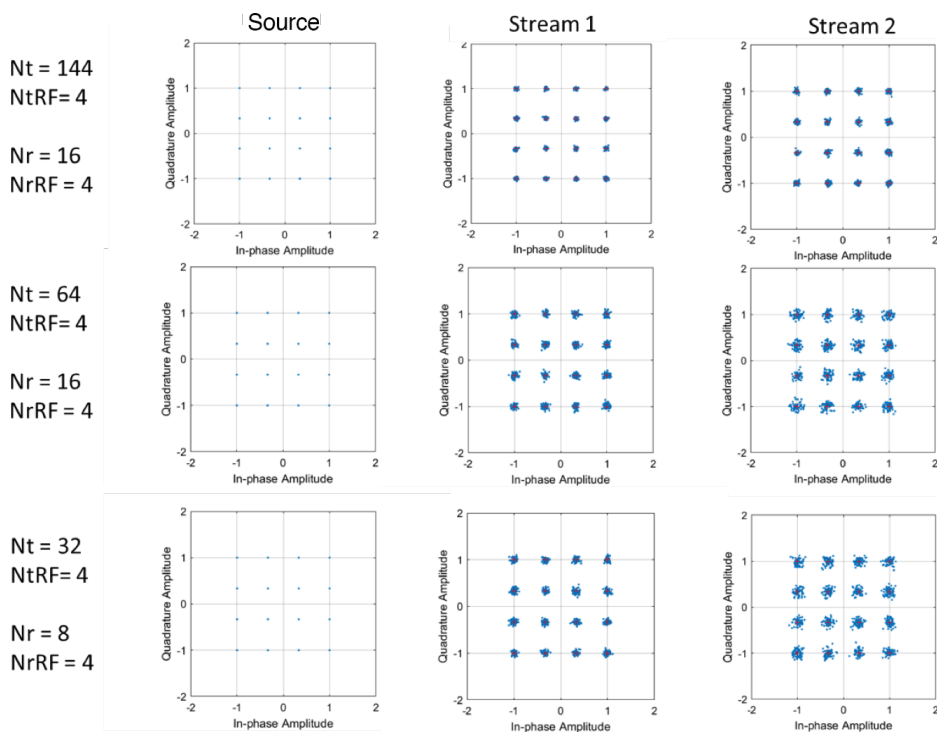


図 11. 各種の分割方法を使用した場合のシステム構成と対応するコンスタレーション ダイアグラム。

忠実度の向上: RF Blockset の統合

ハイブリッド ビームフォーミング システムの Simulink モデルを導入すると、忠実度を高めることができます。ここで、RF Blockset を直接使用して、システムのマルチドメイン シミュレーションを作成できます。非線形 RF アンプとモデル効果を使用して、ゲイン、ノイズ、偶数次元および奇数次元の相互変調歪みを見積ることができます。RF モデルは、データシート仕様または測定データを使用して特徴付けることで、自動ゲイン制御 (AGC) やデジタル プリディストーション (DPD) アルゴリズムなどの適応アーキテクチャを正確にシミュレーションすることもできます。

RF Blockset を使用すると、RF システムをさまざまなレベルの抽象度でモデル化することができます。回路エンベロープ シミュレーションでは、任意のトポロジのネットワークについて、忠実度の高いマルチキャリア シミュレーションを実行できます。Equivalent Baseband ライブラリにより、シングルキャリアのカスケードシステムの離散時間を迅速にシミュレーションすることができます。図 12 に、分割されたシステムを使用したハイブリッドシステムの例を示します。図中で、ベースバンド重み付けは、各送受信モジュールに供給されるデジタルストリームに適用されています。残りの重みは、アンテナ素子に給電する RF チャネルに位相シフトとして適用されています。

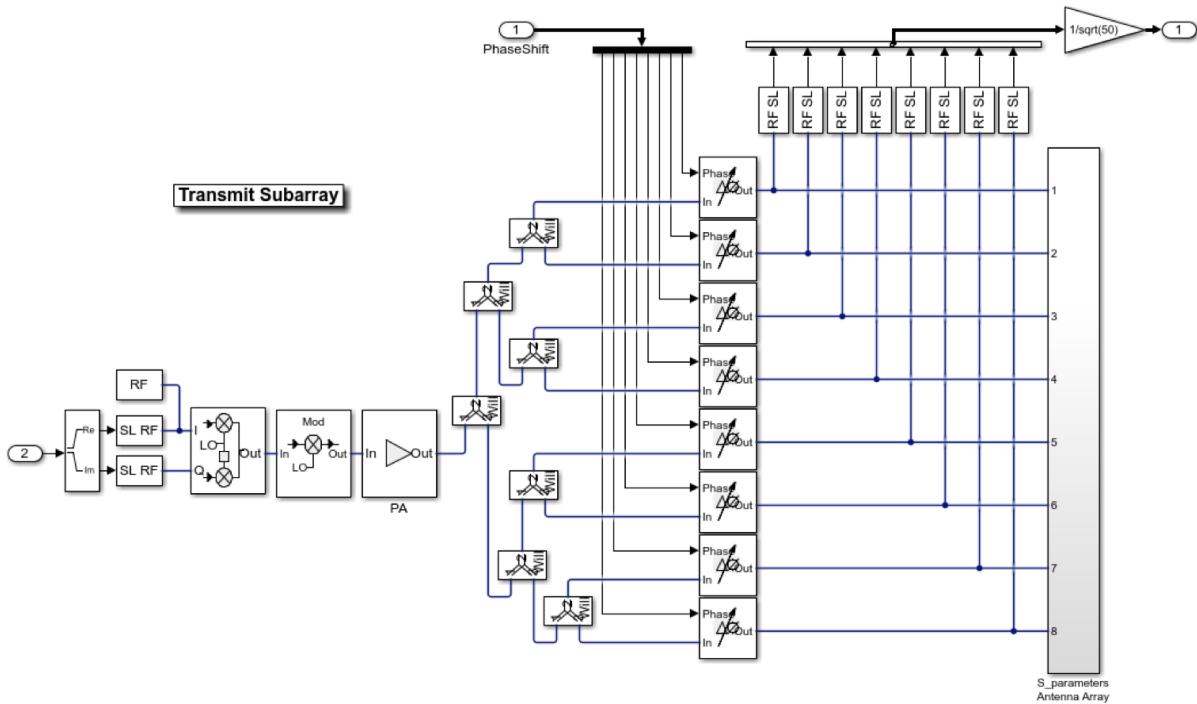


図 12. ベースバンド重み付けと RF 重み付けを使用した RF Blockset のハイブリッド構造の例。

まとめ

MATLAB と Simulink を使用すると、アンテナ、RF、信号処理システムを 1 つの環境で設計できます。モデル化は、ハイブリッド ビームフォーミングのアーキテクチャの定義に役立ちます。以下を行うことができます。

- 複雑なサブアレイ構造を含む MIMO フェーズドアレイの設計
- ハイブリッド ビームフォーミング システムの RF 領域およびベースバンド領域間でのインテリジェントな分割
- MIMO 無線通信システムのモデル化
- アーキテクチャの選択とトレードオフの検討
- 分割の設計選択肢の品質評価

今すぐ始める

次回のハイブリッド ビームフォーミング プロジェクトにこの手法を適用する際は、以下の例をご参照ください。

- [ハイブリッド ビームフォーミングの紹介](#)
- [QSHB および HBPS アルゴリズムによるハイブリッド MIMO ビームフォーミング](#)
- [Massive MIMO ハイブリッド ビームフォーミング](#)
- [ハイブリッド ビームフォーミングによる RF ミリ波送信機のモデル化](#)