

---

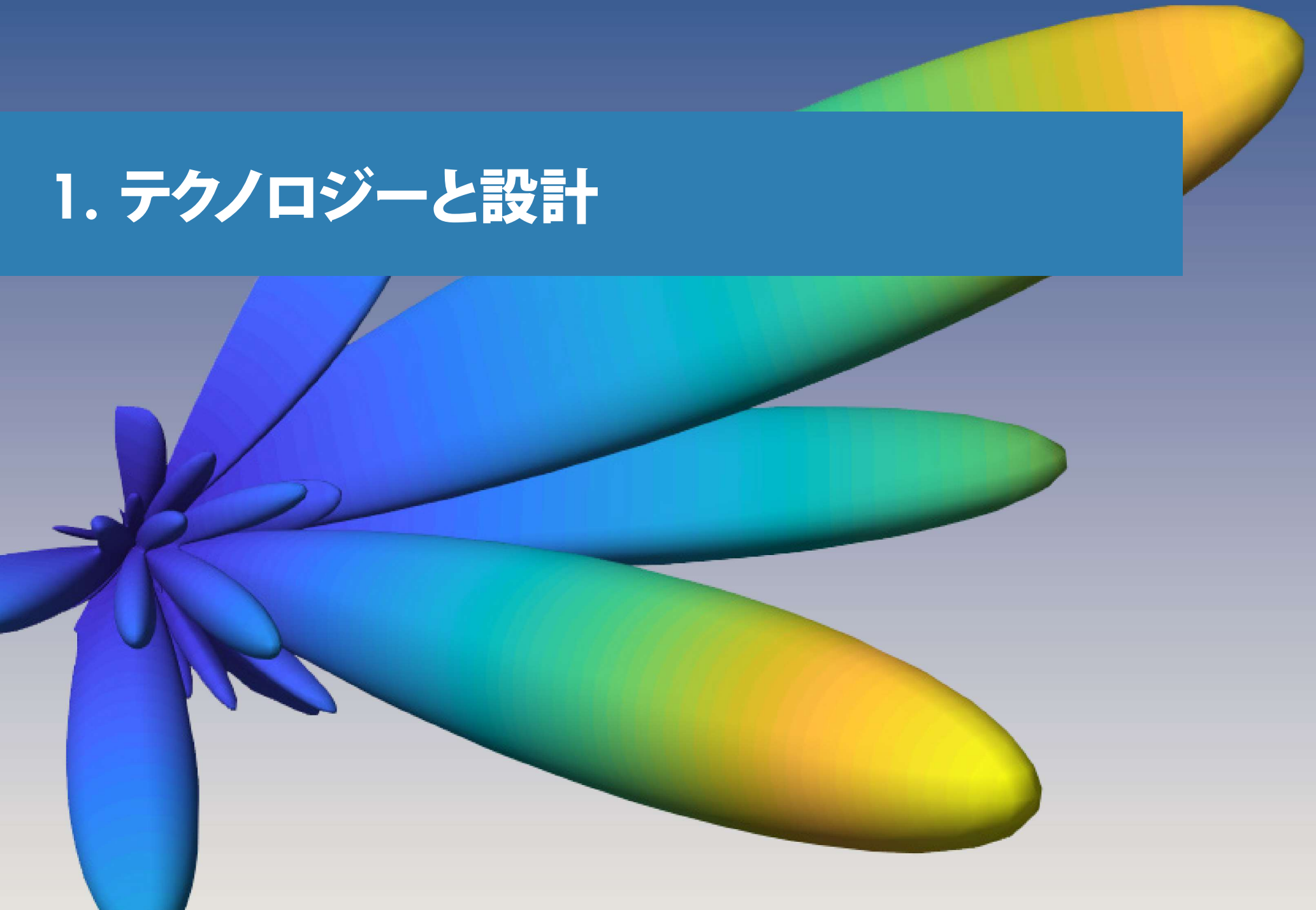
# MATLABによる 5G開発

# MATLABによる5G開発

1. テクノロジーと設計
2. 新しいアーキテクチャとアルゴリズム
3. プロトタイプとフィールド試験の高速化
4. システムの検証とテスト



# 1. テクノロジーと設計



# 5Gとは?

**5G** (第5世代移動通信システム) は、移動通信において現在の4G LTE (Long-Term Evolution) 標準規格に続く次世代の主要通信規格です。5G テクノロジーは、ネットワーク機器ベンダー、ネットワーク事業者、半導体ベンダー、デバイスメーカーといった各種の業界関係者がその仕様を定め、開発、導入を進めていく必要があります。5Gの適用分野は広く、携帯電話から次世代自動車にまで及びます。

5Gに関する基本的な知識をすでにお持ちの場合は、セクション2~4にスキップしてください。これらのセクションでは、**MATLAB®** を使用して5Gの設計と開発を行うための戦略を、新しいアルゴリズムの設計 (セクション2)、プロトタイプとフィールド試験の高速化 (セクション3)、システムの検証とテスト (セクション4)に分けて説明しています。



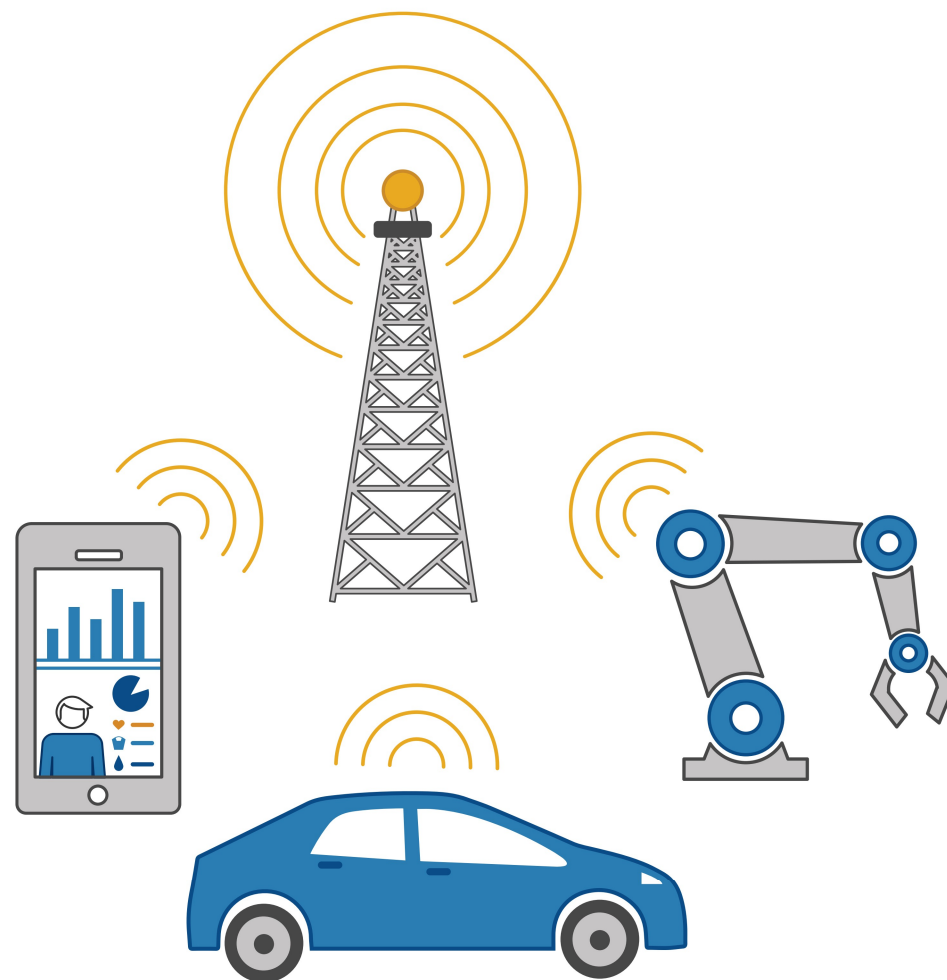


# 5Gを推進するもの

5Gの開発を後押しする背景として、まず第一に動画をはじめとしたコンテンツリッチなサービス配信を可能にする無線帯域幅需要の急成長、そして第二に、大量のスマートデバイスがインターネット通信を行うIoTの急速な普及という、2つの大きなトレンドがあります。これらの需要を満たすため、5Gは超高速ブロードバンド、超低遅延、そして超高信頼Web接続の実現を目指しています。

5Gネットワークとデバイスでは、必要とされるアーキテクチャ、無線アクセステクノロジー、そして物理層アルゴリズムが従来とは大幅に異なります。ミリ波テクノロジーで動作しMassive MIMOアンテナアレイを使用する小型セルの高密度ネットワークがマクロ基地局を補助し、ネットワーク機器やユーザーデバイスに搭載された処理コンポーネントはさらに高度な統合性と適応性を提供します。

また、ハイブリッドビームフォーミングなどのイノベーションが、旧式の無線システム開発の限界を押し広げます。これらの高度に統合されたテクノロジーを実現するには、エンジニアリングの分野において相応の専門知識とツールの統合が必要となります。



# 5Gの専門用語と期待されるアプリケーション

現在の 4G 対応ブロードバンドを超えるさらに高速な帯域幅通信能力を備えた 5G 標準によって、より多くのモバイル ブロードバンド ユーザーのサポートや、超高信頼のデバイス間通信および大規模マシン型通信が可能となります。

| 5Gの主要パラメーター              |                            |
|--------------------------|----------------------------|
| 無線リンク遅延                  | 1 ms 未満                    |
| エンドツーエンド遅延<br>(デバイスからコア) | 10 ms 未満                   |
| 接続密度                     | 現 4G LTE の 100 倍           |
| 単位面積あたり容量密度              | 1 (Tbit/s)/km <sup>2</sup> |
| システム周波数利用効率              | 10 (bit/s)/Hz/cell         |
| 接続あたりピークスループット (ダウンリンク)  | 10 Gbit/s                  |
| エネルギー効率                  | LTE 比 90% 以上アップ            |

## eMBB—Enhanced Mobile Broadband (高度モバイルブロードバンド)

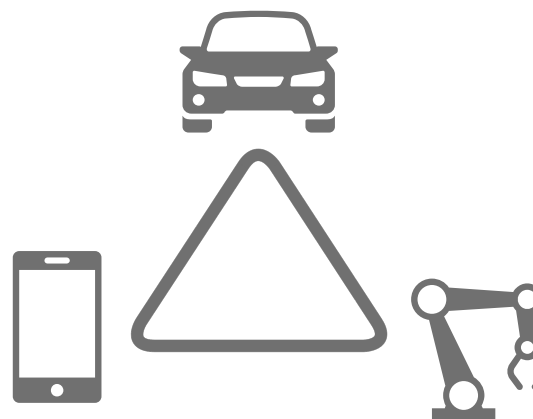
- 電話やインフラストラクチャ向けの大容量超高速移動通信、仮想現実と拡張現実、3DおよびUHDビデオ、触覚フィードバック

## URLLC—Ultrareliable and Low Latency (超高信頼・低遅延)

- 自動車と自動車 (V2V) および自動車とインフラストラクチャ (V2I) 間の通信、自動運転

## mMTC—Massive Machine-Type Communications (超大量接続)

- 消費者および業界向けIoT、インダストリー 4.0のミッションクリティカルなマシン間 (MC-M2M) 通信

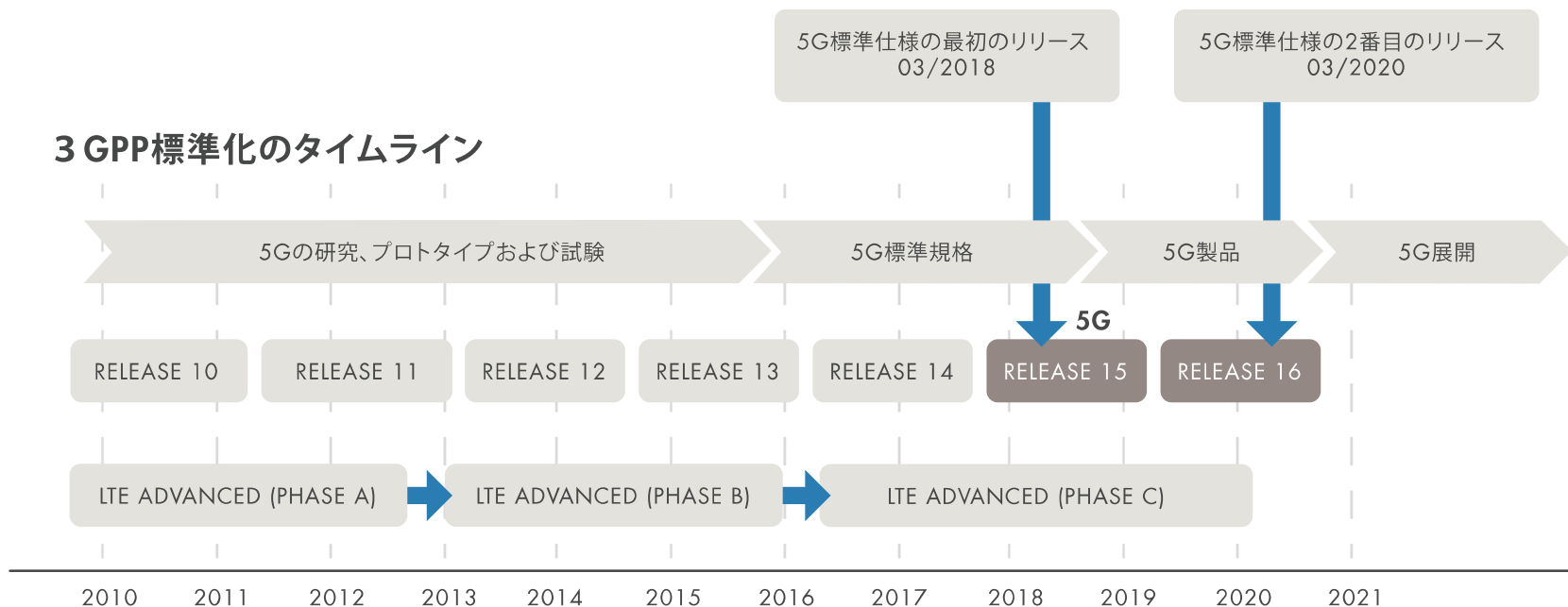


# 5G標準化: タイムライン

5Gの無線規格は、標準化団体である3GPPが世界各国の参加者およびコントリビューターによる助力を得て定義しています。5Gの規格は、2018年3月までに発表予定の3GPP標準仕様リリース15で導入されます。変調方式、ビームフォーミング手法、ミリ波テクノロジー、Massive MIMOアーキテクチャは、現在の4Gテクノロジーから大幅に変わることが予想されています。

現在のところハイブリッドビームフォーミング、ミリ波、Massive MIMOシステム、5Gチャンネルモデリングおよび波形、そして5Gの設計概念の迅速なフィールド試験にフォーカスを当てた研究開発が進められています。

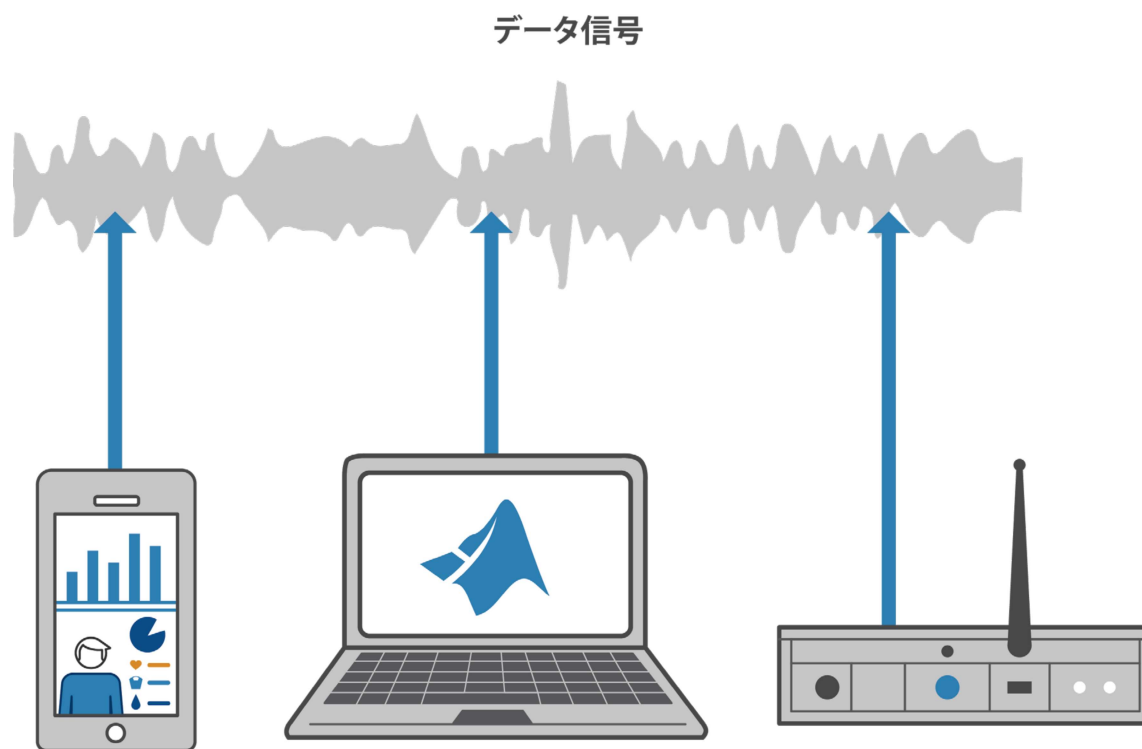
## 3 GPP標準化のタイムライン



# 5Gの新しい物理層

周波数利用効率とデータ転送速度を向上させるため、5Gの物理層はさまざまな点で4G LTEとは異なります。その顕著な特徴の1つとして、アクティブアンテナとアンテナアレイの数が大幅に増えることと、それに関連するビームフォーミングおよびミリ波RF信号処理の問題が挙げられます。変調と符号化スキーム、パワーアンプと低ノイズアンプの設計、そしてチャネルモデルのすべてを新たに開発する必要があります。

このebookのセクション2~4では、5Gの設計と開発のための戦略を具体的に示し、新しいアルゴリズムの設計 (セクション2)、プロトタイプとフィールド試験の高速化 (セクション3)、そしてシステムの検証とテスト (セクション4) について述べていきます。

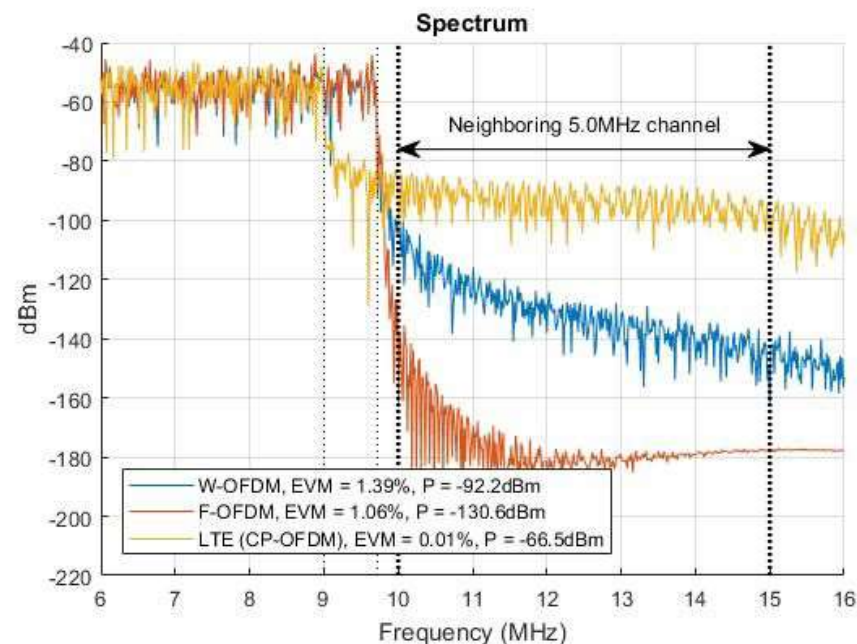


# MATLABによる5Gの研究

MathWorksでは、5G標準化の研究開発に携わる研究者やエンジニアを支援するため、2017年9月に *5G library* をリリースしました。 *LTE System Toolbox™* 向けに開発された *5G library* には、次の機能が実装されています。

- **チャンネルモデル** - 3GPP TR 38.901で規定されているTapped Delay Line (TDL) およびClustered Delay Line (CDL) チャンネルモデルを含む
- **帯域外放射を制限して周波数利用効率を向上させる新しい無線波形** - Filtered OFDM (F-OFDM)、Windowed OFDM (W-OFDM)、および Cyclic Prefix OFDM (CP-OFDM) を含む
- **新しい符号化スキーム** - データ信号向けのLDPC符号、制御信号のエラー訂正、データ レートの改善用のPolar符号
- **リンクレベルシミュレーションのリファレンスデザイン** - ライブラリで提供される波形やチャンネルモデルを使用して5Gリンクのスループットを測定可能

*5G library*およびアプリケーションノートはダウンロード可能です。

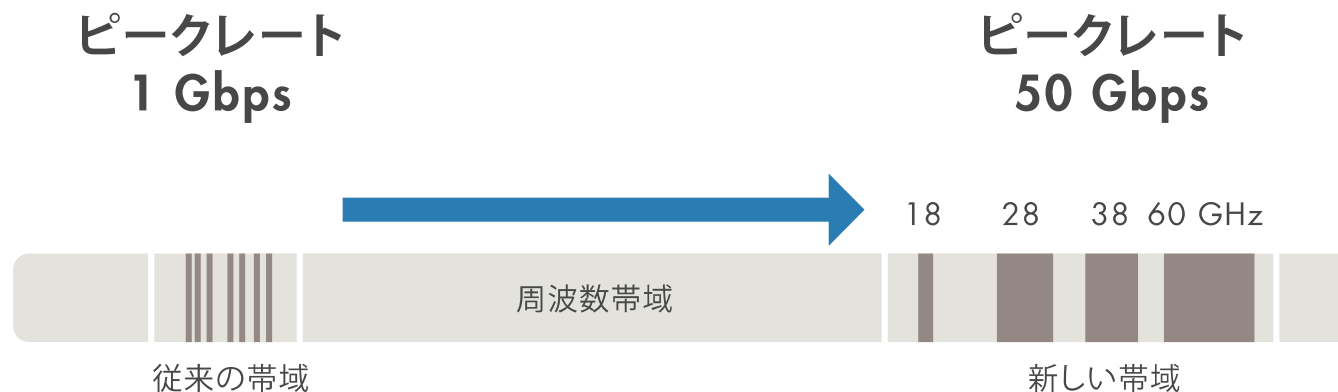


5Gの新しい無線波形の解析

# ミリ波の高周波数動作

高速なデータ転送 (数Gbpsのレベル) では広帯域幅のシステムを必要とします。周波数の最大帯域幅が6GHz以下では、これらの要件を満たすことができません (たとえば、現在の移動体通信の運用では3GHz未満です)。これにより、次世代の無線通信システムが目標とする動作周波数は、ミリ波の帯域に及んでいます。たとえば、HuaweiやNokiaなどの5G機器開発業者は、AT&T、Verizon、China Mobile、NTTドコモ、その他の企業と共同で5G NR (New Radio) フィールド試験を行うことを発表しています。こうしたフィールド試験は3.3~5.0GHzのミッドバンド、および28GHzと39GHzのミリ波 (mmWave) 帯で動作し、多様な周波数帯域にまたがり統合された3GPPベースの5G NR設計の利点を示すものです。

高い周波数によって使用可能な帯域が広がるため、同じゲインならばアンテナサイズが小さくなり、同じアンテナサイズならばゲインがより大きくなります。ただし、これによってベースバンドとRF設計におけるモデムの複雑さは増します。また、性能を評価するために5Gの新しい周波数の正確なチャンネルモデルも必要となります。



# Massive MIMO: アンテナ数の増加

周波数利用効率を高めるためのもう1つの主要なテクノロジーは、**Massive MIMO**です。Massive MIMOは大規模MIMOとも呼ばれるマルチユーザーMIMOで、基地局におけるアンテナ数が信号リソースあたりのデバイス数を大幅に上回ります。ユーザーデバイス数と比較して基地局アンテナの数を増やすことにより、チャンネル応答が準直交となり周波数利用効率を大幅に改善できる可能性があります。

何百というアンテナ数の増大に対応する際に設計者は、次のような課題に直面します。

- 従来のアンテナ設計ツールの**シミュレーション速度**では処理が遅くなり、大規模なアンテナアレイに対応できない。
- アンテナのカップリングを**シミュレーションするのが難しい**。
- RFチェーンの数を最適化するには**ハイブリッドビームフォーミング**が必要。

設計アーキテクチャとアルゴリズムの詳細については、**セクション2**を参照してください。



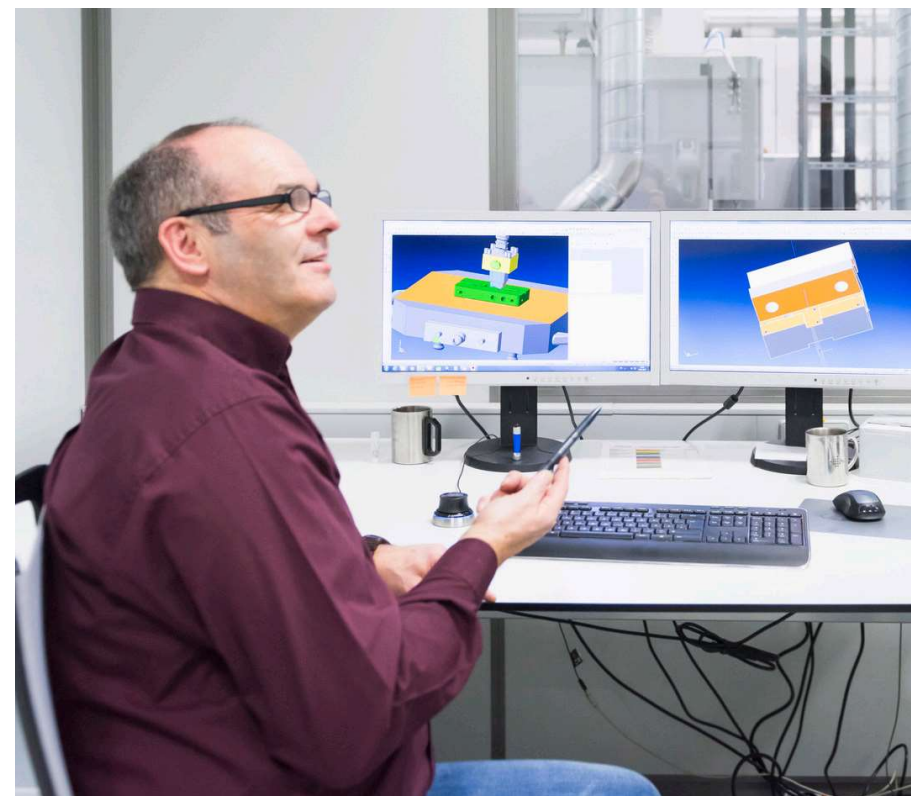
Huawei 5G 実施試験のための Massive MIMO  
アンテナ アレイ。



# ハードウェアテストベッドを使用した 5Gシステムの高速プロトタイピング

5Gの設計に携わるエンジニアは、設計の繰り返しを高速化し、概念を実証するためのプロトタイプを迅速にフィールド試験に持ち込むことの価値を理解しています。柔軟で再構成可能な設計プラットフォームとして導入されたハードウェアテストベッドは、新しい概念を迅速に設計、検証し、製品化前のフィールド試験に展開するうえで、高い信頼性と効率性を実証しました。テストベッドと連携するツールとワークフローは、迅速な設計の繰り返し作業と新しいアルゴリズムや設計変更の迅速な展開に対応する必要があります。

高速なプロトタイピングのワークフローについては、[セクション3](#)で説明します。



## 関連情報

**5Gテクノロジーの開発と設計に関するさらに詳しい情報については以下をご覧ください。**

### ビデオを見る

[5G への道: 無線システムのシミュレーションとプロトタイピング \(26:07\)](#)

### コードをダウンロードする

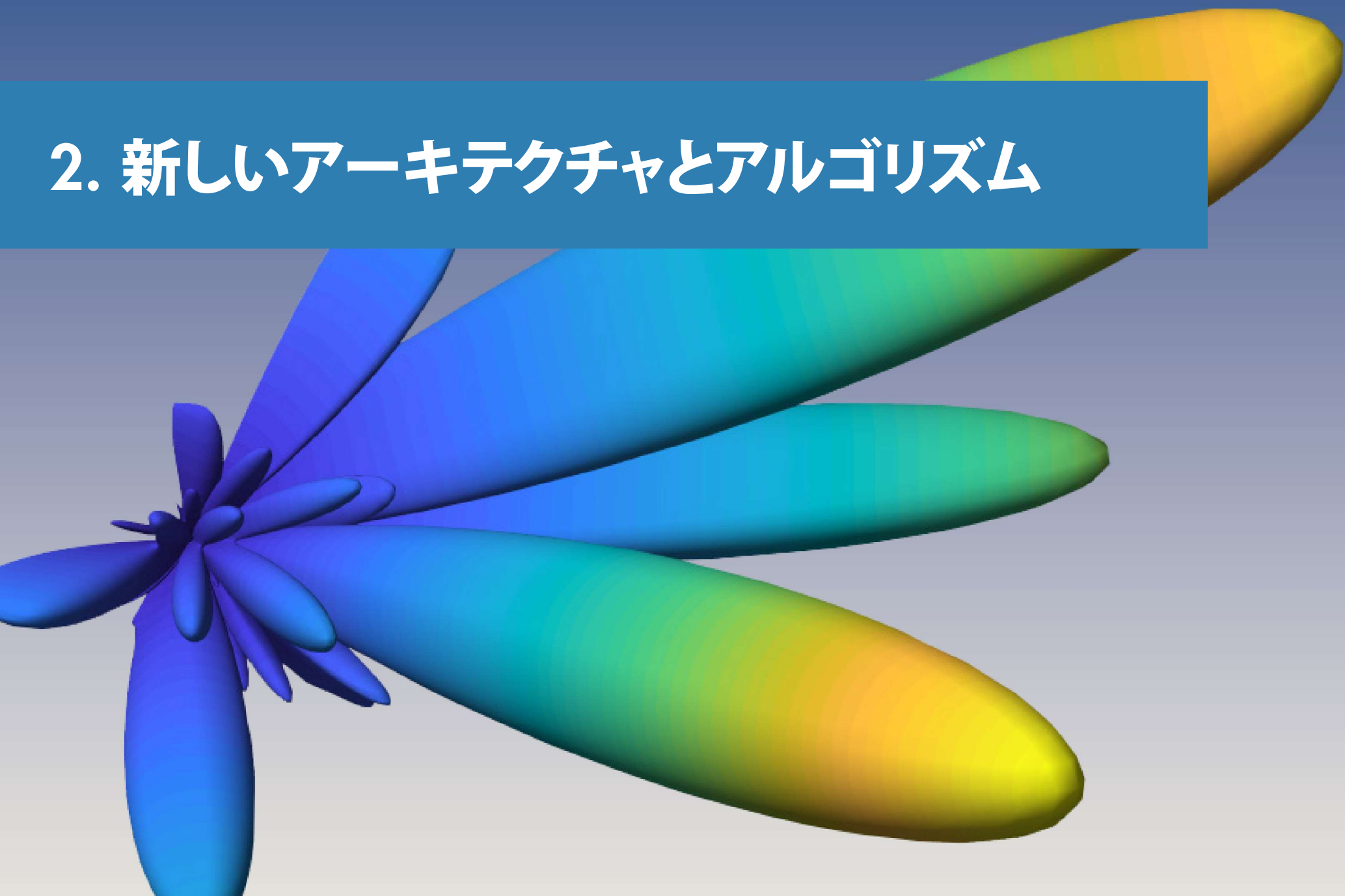
[5G library](#)

### 探索する

[5G 無線テクノロジーの開発](#)

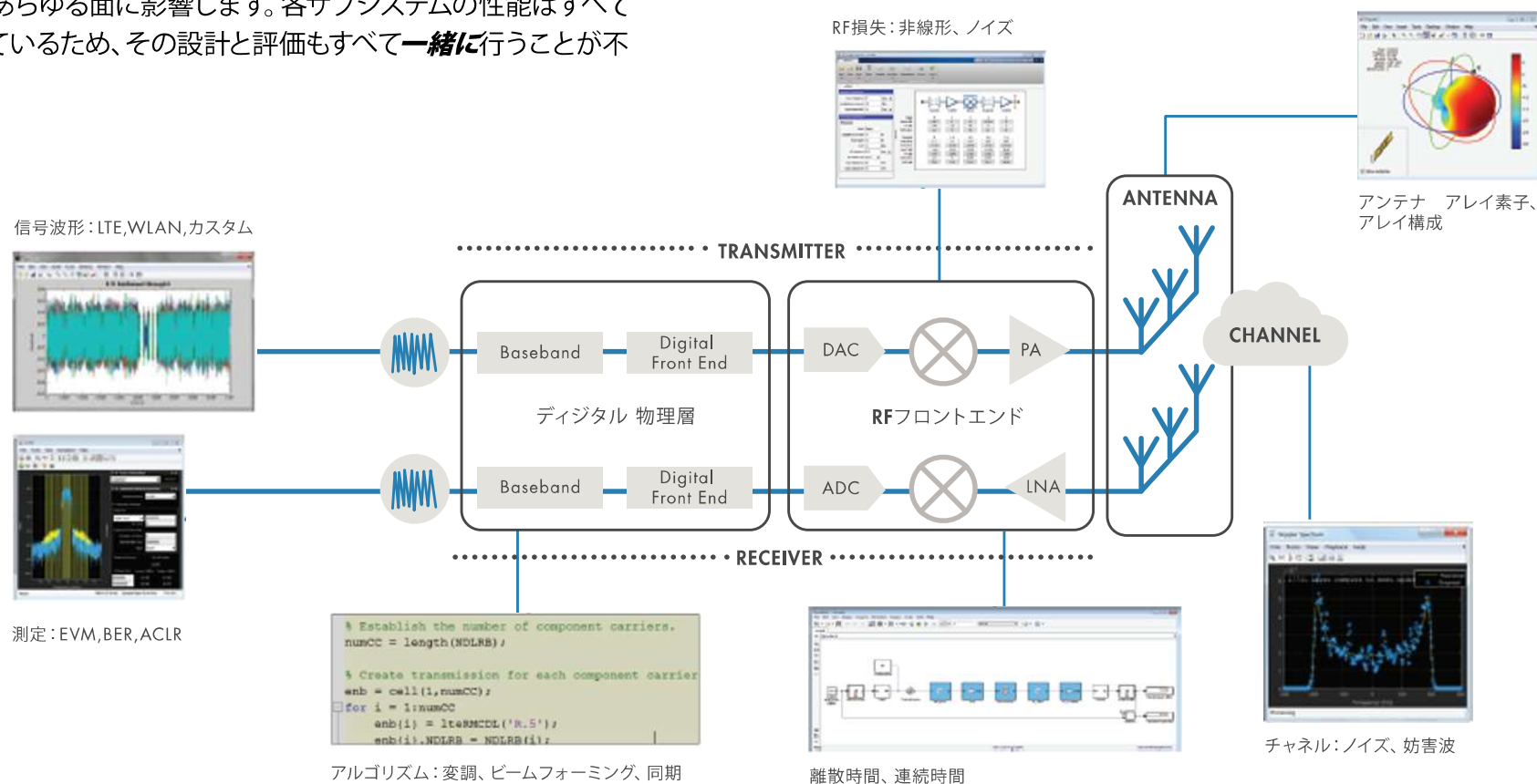


## 2. 新しいアーキテクチャとアルゴリズム



# 5Gの新しい設計アーキテクチャとアルゴリズム

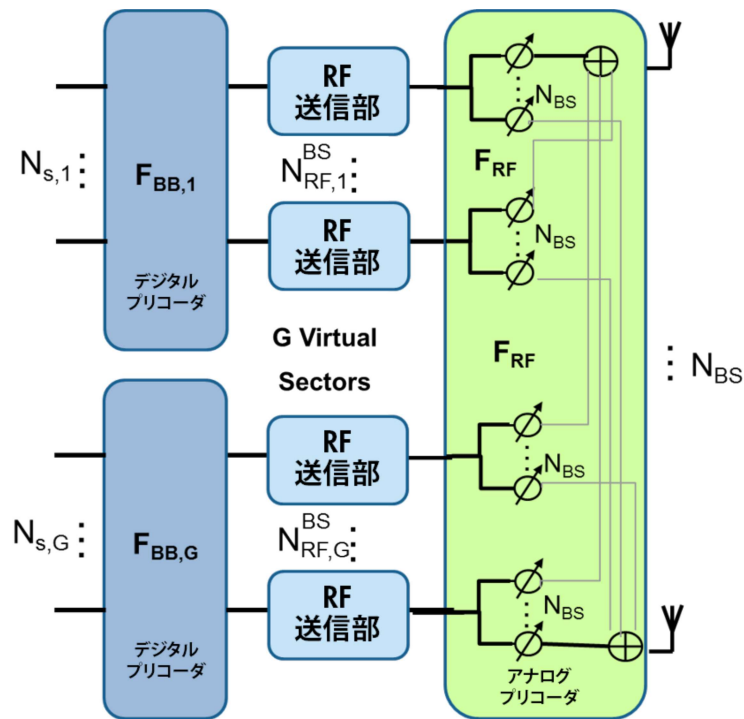
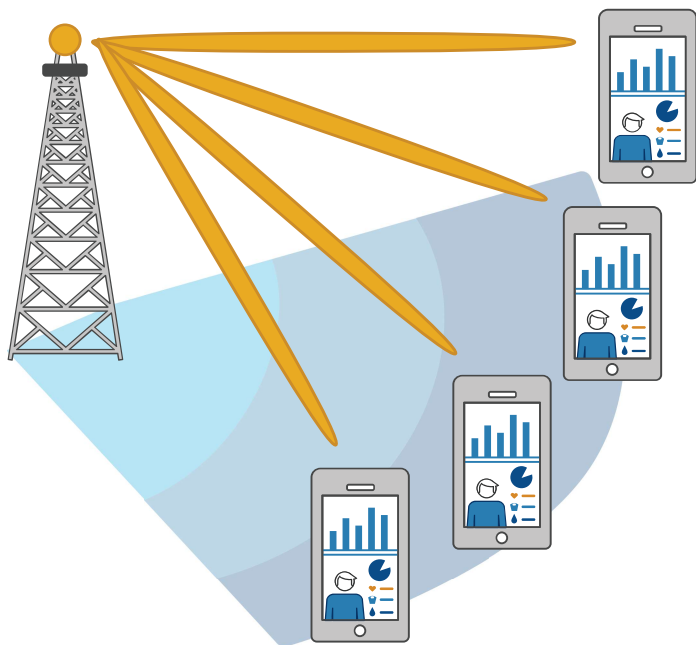
5Gのブロードバンド速度の飛躍的向上は、ミリ波 (mmWave) の周波数帯域におけるMassive MIMO通信と、周波数利用効率を高める新しい無線アルゴリズムによって可能となります。新しい設計アーキテクチャとアルゴリズムは、RFエレクトロニクスからベースバンドアルゴリズムまで5Gシステムのあらゆる面に影響します。各サブシステムの性能はすべて密接に連動しているため、その設計と評価もすべて**一緒**に行うことが不可欠です。



# Massive MIMOアレイによる高ゲインビームフォーミング

5Gのミリ波設計には、基地局に数百のアンテナ素子をもつMassive MIMOアンテナアレイが必要です (eNodeB)。アンテナアレイの面積は波長に応じて小さくなるので、ミリ波周波数のアレイは、マイクロ波周波数のアレイに比べて最高100分の1に縮小されます。

小さな領域に多数のアンテナ素子を配置できるため、ビームフォーミングゲインを高めるのに適しています。指向性の高いビームはパワーを特定の方向に誘導するため、高い動作周波数におけるパス損失の増加を相殺することができます。



同じ仰角をもつビームを使用するグループのUE (左) と、ハイブリッドビームフォーミングのアーキテクチャ (右) の比較

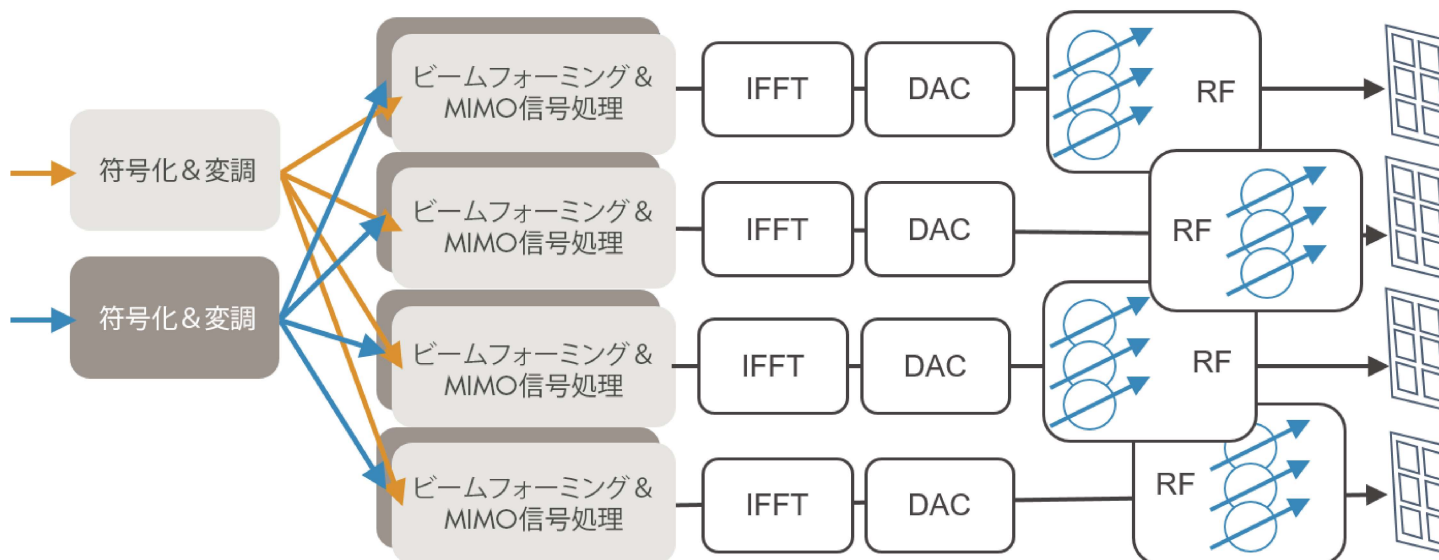
# Massive MIMOのビヘイビアシミュレーション

アレイの設計に含まれる一般的なパラメータとして、アレイ形状、素子の間隔、素子の格子構造、素子のテーピング、相互結合の影響などがあります。設計パラメータを調整することで、アレイの行と列にテーピングを適用してサイドローブレベルを低減できます。

したがって、最適な設計を実現させるには、アンテナアレイのモデルとビームフォーミングのアルゴリズムを組み合わせ、その相互作用とシステム性能への影響をシミュレーションする必要があります。この方法は、アンテナ設計をシステムアーキテクチャと処理アルゴリズムから切り離して扱う現在の3Gおよび4G設計ツールにとって負担となります。

また、MIMOのシミュレーションには、一般に3Gや4Gのシミュレーションに比べて10倍の時間がかかります。

アンテナアレイシステムのビヘイビアレベルのシミュレーションを行うことで、こうした課題に対処できます。ビヘイビアレベルのシミュレーションはシミュレーション時間の短縮につながります。これにより、エンジニアはさまざまなアレイアーキテクチャやアルゴリズムを使った実験を行い、アレイと関連アルゴリズムの性能をシミュレーションして、対話形式でパラメータを調整してアンテナ結合の影響を緩和することが可能になります。



アンテナ、RF、デジタルサブシステムの相互作用をシミュレーションする必要があるMassive MIMOアンテナのアレイ設計



# アンテナゲインとチャネル容量のトレードオフの最適化

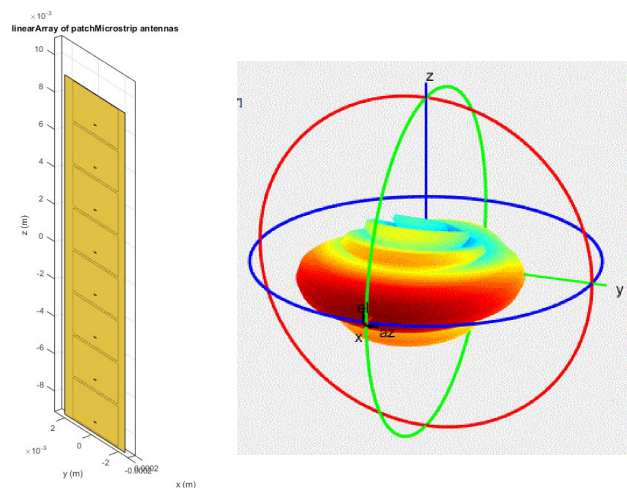
設計プロセスの一環として、ビーム幅を縮小してアンテナゲインを高める場合は、MIMOシステムは散乱環境においてチャネル容量を最大化するためビームパターンを拡大する必要があるということも同時に考慮しなければなりません。

これは評価しておくべき主なトレードオフの1つであり、ビヘイビアシミュレーションによって繰り返し行うことができます。

下の図は、MIMOアレイ設計のタスクのために *Phased Array System Toolbox™* および *Antenna Toolbox™* を使用してビヘイビアシミュレーションの開発と可視化を行う方法を示しています。

## 初期アレイの構成

無指向性コサイン素子などのアンテナ素子モデルを使用し、電磁界 (EM) 解析ツールで計算された、あるいはラボで測定されたパターンを利用して、さらに正確な解析が短時間で可能になります。以下の放射パターンなどのように、アレイ性能の特性を可視化します。

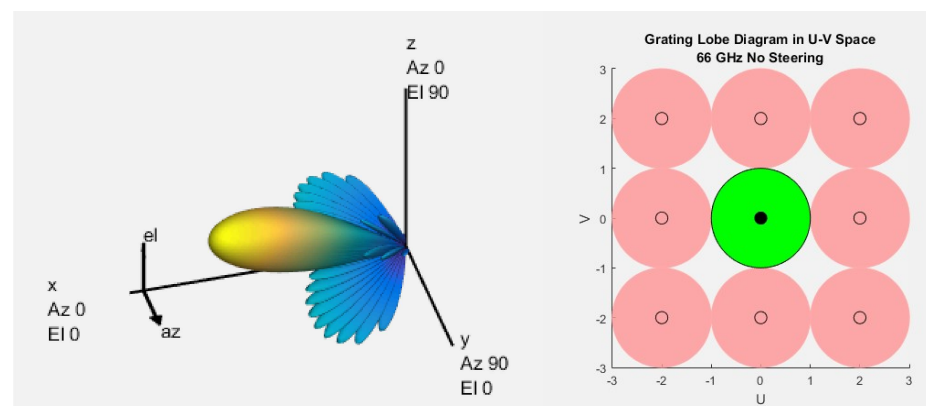


8行列ULAサブアレイおよび対応する放射パターン

## 設計パラメーターを使用した対話型実験

アレイサイズ、アレイ形状、素子の間隔およびテーパなどを変化させます。生成される形状、2D/3D指向性、グレーティングローブ ダイアグラムを可視化します。

この例では Antenna Toolbox で設計された66GHz、64行64列素子設計のビームパターンおよびグレーティングローブ ダイアグラムを示します。



66GHz、64行64列素子設計のビームパターンおよびグレーティングローブ ダイアグラム

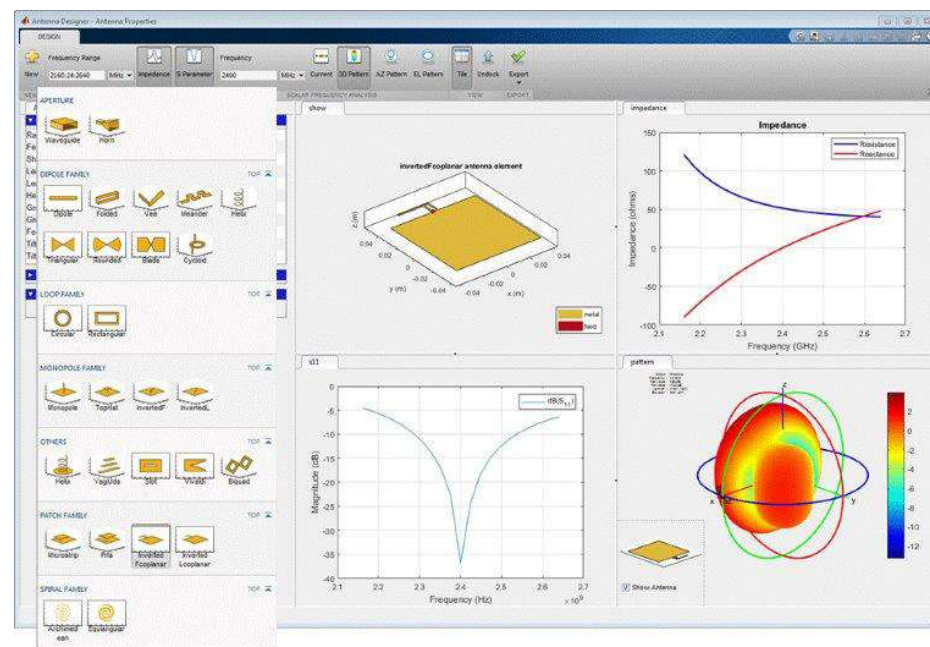


# アンテナアレイ素子の設計

ここで、アンテナ素子の詳細な設計と適切な自由空間パターンを追加して、アンテナアレイモデルの忠実度を改善することができます。

右の図は、Antenna Toolbox の全波EMソルバーを使用して生成された素子のパターンを示します。このツールボックスは、MoM (モーメント法) アルゴリズムを使用して、インピーダンス、電流および電荷分布などの表面特性、近傍界や遠方界の放射パターンなどの電界特性といったポート特性を計算します。

Antenna Toolbox を使用すると、アンテナの形状と解析結果を2Dおよび3Dで可視化できます。また、アンテナとアレイモデルを無線通信システムに組み込み、インピーダンス解析を用いてマッチングネットワークを設計することもできます。ツールボックスにはビームフォーミングのアルゴリズムをシミュレーションする放射パターンも用意されています。

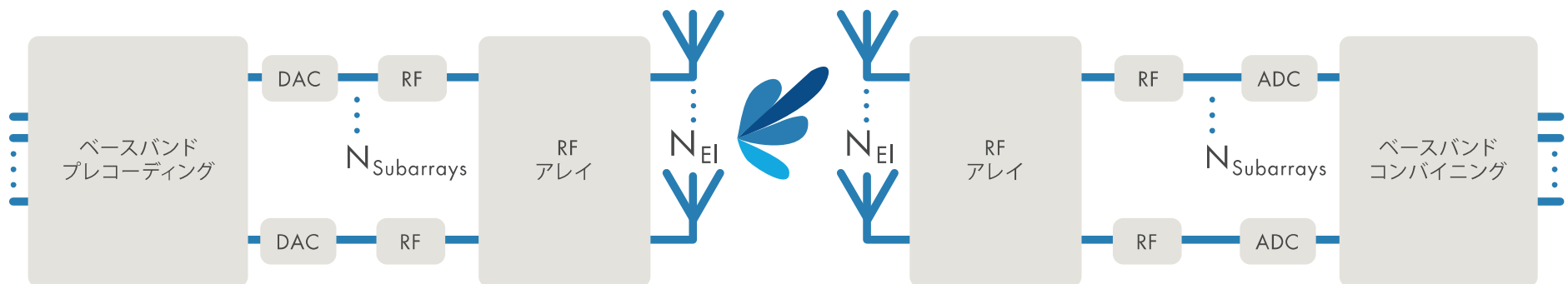


アンテナの選択、設計、解析を対話的に行える Antenna Designer アプリ

# ハイブリッドビームフォーミング

波長が短いほど小型のフォームファクターでのMassive MIMOの実装が可能になりますが、同時にミリ波の周波数に関連する信号パスと伝播における課題も増大します。ビームフォーミングの制御能力と柔軟性をさらに高めるには、各素子に専用の送受信 (T/R) モジュールを用意して、アンテナアレイ素子ごとに個別の重み付け制御を行うことが望まれます。しかし、通常この方法は費用、スペース、電力の制限から実用的ではありません。

ハイブリッドビームフォーミングとは、ビームフォーミングをデジタル領域とRF領域に分割し、RF信号チェーンの数に起因する費用を削減するための手法です。ハイブリッドビームフォーミングでは複数のアレイ素子をサブアレイモジュールとして組み合わせ、アレイ内の各サブアレイに専用のT/Rモジュールを1つ用意します。



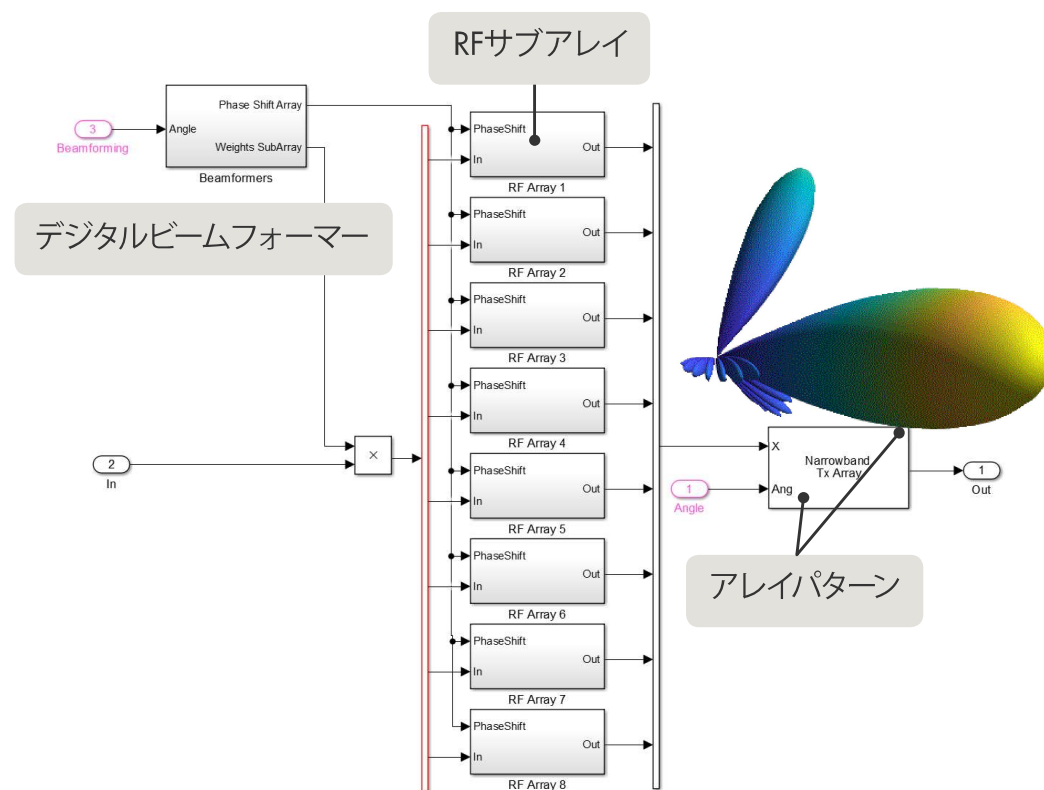
ハイブリッドビームフォーミングのアーキテクチャ

# ハイブリッドビームフォーミング (続き)

ハイブリッドビームフォーミングを設計する難しさは、実装費用の制約を守りながら、必要な性能パラメータを満たさなければならないところにあります。Simulink®を使用することで、RF領域とデジタル領域コンポーネントのモデル化とシミュレーションをマルチドメインで統合的に行えるようになります。また、RF Blockset™の回路エンベロープシミュレーションでは、ハイブリッドシステムのシミュレーションを確実に高速実行できます。

Simulink では、さまざまなステアリング角の範囲でシステムレベルの性能が確実に満たされるよう、素子の数やプレコーディングパラメータの値を評価できます。また、デジタルとRFビームフォーミングの重みをMATLAB®で計算し、Simulink モデルに組み込むことができます。

右図は、位相シフトが適用される部分でRFサブアレイに接続する信号の成形に使われるデジタルビームフォーミングの重みを含み、マルチドメインモデルの一部を示しています。結果として得られるハイブリッドの重みによって望ましいアレイパターンを得ることができます。



MATLABでのハイブリッドビームフォーミング設計

詳しい説明は、ホワイトペーパー「Massive MIMOフェーズドアレイシステムのハイブリッドビームフォーミング」を参照してください。このホワイトペーパーでは、64行64列の素子と66GHz ミリ波の例を用いて、アンテナアレイのモデル化およびデジタル領域とRF領域間のビームフォーミングの分割について説明しています。

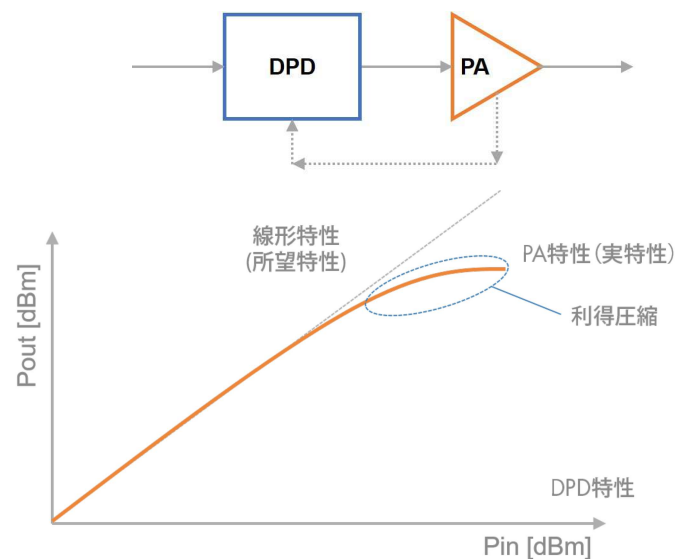
# パワーアンプのモデル化と線形化

パワーアンプ (PA) の線形性はすべての送信機にとって重要な仕様です。線形性の高い領域でパワーアンプを使用せずに動作する製品は現実的とは言えません。高い周波数帯域や広い帯域幅で動作する場合は特にそうです。そのため、デジタルプリディストーション (DPD) 技術を適用し、送信機の効率を高めると同時にスペクトルリグロースとチャンネル間干渉を制限します。

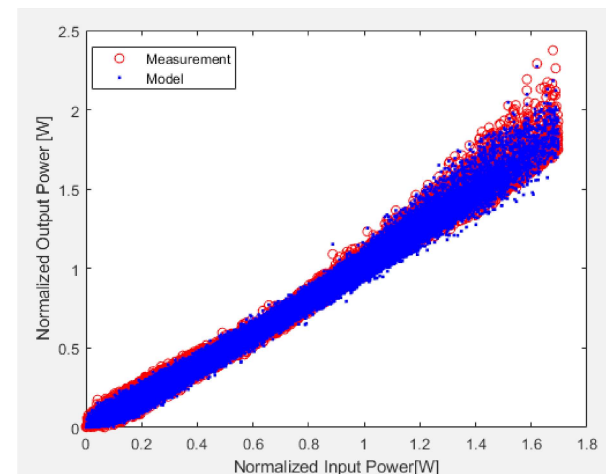
優れたDPDアルゴリズムの開発には、パワーアンプとアンテナなどの隣接サブシステムによる影響を詳しく理解する必要があるため、困難が伴います。パワーアンプは非線形であり、有限メモリの影響を受けるため、

その特性はパワーアンプを駆動する信号のタイプによって大きく左右されます。たとえば、PAの動作は、駆動信号の帯域幅、そのスペクトル占有率、および PAPR (ピーク対平均電力比) に依存します。

このような複雑性から、DPDアルゴリズムは通常、実際のPAを使ってアルゴリズムをテストできるラピッドプロトタイピングプラットフォームを使用してラボで開発されます。この手法はアルゴリズムの検証と微調整に役立ちますが、実際のPAがまだ利用できない場合には適用が難しく、アルゴリズムによるDPD設計スペースを調査するのも容易ではありません。



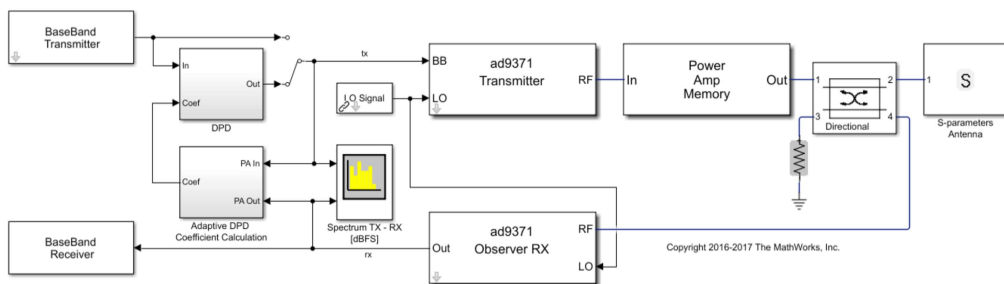
デジタルプリディストーションを使用したアンプ線形化の概念表現



測定データを使ってMATLABで特定され、回路エンベロップによってRF Blocksetでシミュレートされたパワーアンプの記憶多項式モデルの例

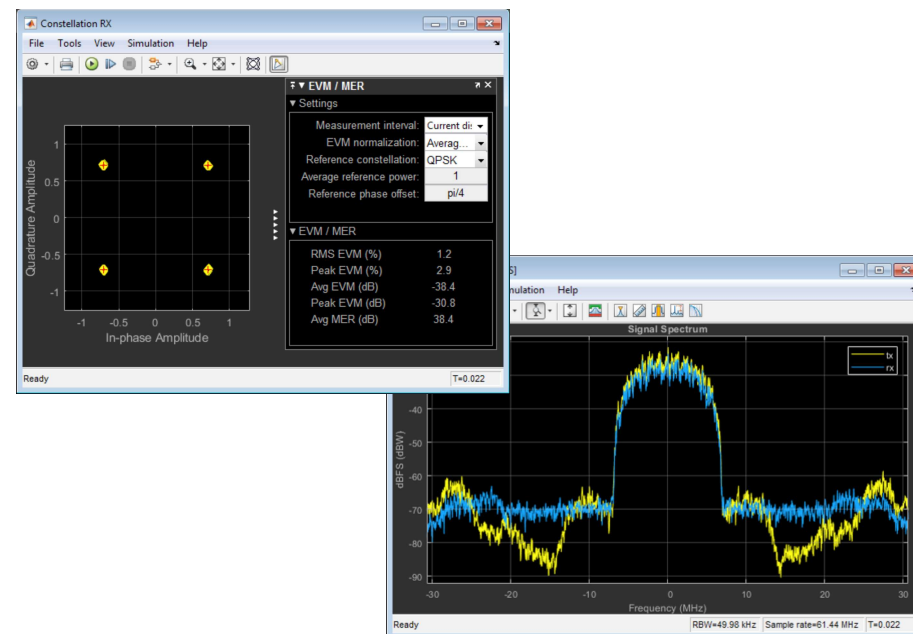
# パワーアンプのモデル化と線形化 (続き)

上記の理由から、ラボでのプロトタイプ作成とテストの前にDPDアルゴリズムを調査し開発する場合、モデルベースのアプローチが推奨されます。この方法を使用するにはパワーアンプの適切なモデルが必要となりますが、RF Blockset はさまざまな抽象度のパワーアンプモデルを提供します。これにはVolterra級数の便利な派生である一般化されたメモリ多項式モデルも含まれます。ビヘイビアモデルの特定には、IC設計ツールを使った回路レベルのシミュレーション、または実際の測定値から得られたパワーアンプの入出力特性が使用されます。設計者は提供されている特定のルーティングを利用するか、独自のプロシージャを使って級数の係数を計算することができます。さまざまな多項式の次数とメモリの深さを使った実験がわずか数秒で行えます。



パワーアンプと適応DPDアルゴリズムを用いた閉ループトランシーバーモデル。ラボ検証済みのAD9371モデルには実際の影響が含まれます。パワーアンプのVolterra級数モデルには非線形性と記憶の影響が含まれます。ループシミュレーションには低電力および高電力の効果、タイミング、および信号帯域幅での周波数選択性が含まれます。適応DPDアルゴリズムは、信号帯域幅内でデバイスの線形性を改善します。

特定されたモデルは、システムのシミュレーション環境内で、現実的な(かつ規格準拠の) ベースバンド信号、低電力RF送信機とオブザーバー受信機のモデル、Sパラメーターで表現されるアンテナ終端、および異なるタイプの適応DPDアルゴリズムとともに使用できます。この手法により設計者は、通常はラボでの再現や理解が難しい分散した非線形の効果を検討したうえで、より迅速にイノベーションを進め、新しいアイデアを検証することが可能です。



スペクトル解析 (右下) と受信コンスタレーション (左上) を示すプロット

# 新しい5G無線アルゴリズムによる周波数利用効率の向上

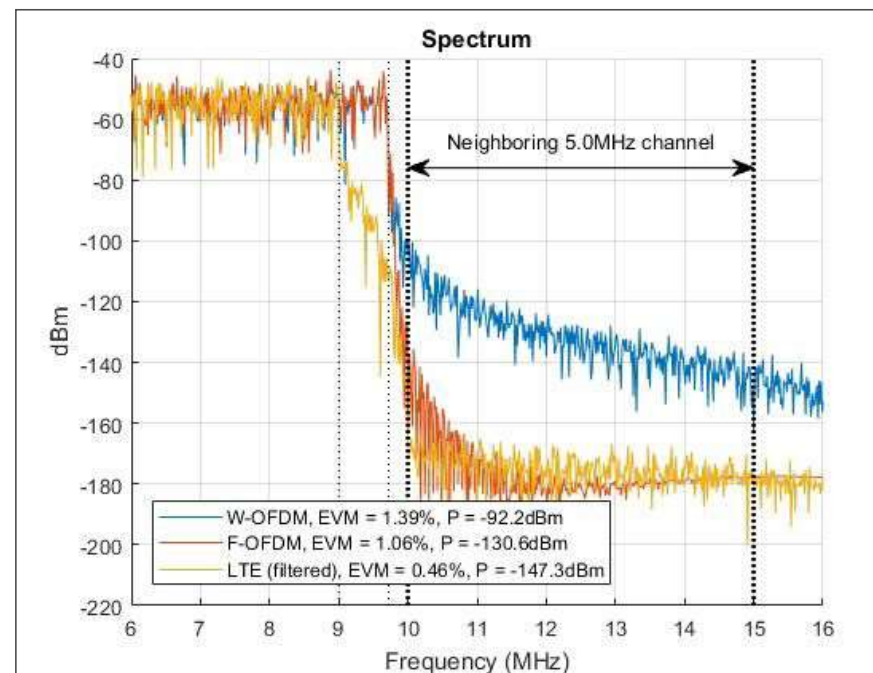
5G無線通信規格では、eMBB (高度モバイルブロードバンド) によってモバイルブロードバンドのスループットが増大します。最終的な規格の詳細は未定ですが、5G規格の最初のバージョンである 3GPP LTE リリース 15 の候補として、既にいくつかの技術と機能が挙げられています。

新しい5G規格の主な要素には以下が含まれます。

- 帯域外放射 (OOBE) が改善された新規波形による帯域幅リソースの使用効率アップ
- スロット期間の短縮 (サブキャリア間隔の増加) による信号帯域幅の拡張と遅延の短縮
- LDPC (データ向け)、Polar符号 (制御情報向け) などの新しい符号化スキーム (エラー訂正、およびデータ レートの改善)
- 従来周波数 (<6 GHz) および mmWave 周波数 (>28 GHz) で動作する空間チャンネルモデル

こうした要素によってシステム効率が改善される可能性がある一方で、設計に複雑化や遅延を生じる可能性もあります。そこで、5G向けに提唱されている技術が現在お使いの設計に適しているかどうか、すべてを実装するか、一部のみを実装するかを判断することが必要です。

RF Blockset、Antenna Toolbox、および Phased Array System Toolbox と合わせて 5G library を使用すれば、このような設計のトレードオフに関する疑問を初期の段階で明らかにできます。



LTEおよび候補の5G変調方式によるスペクトル測定値の比較: ACLR フィルタリング付き CP-OFDM (100 RB, LTE で使用)、W-OFDM (108 RB)、F-OFDM (108 RB)

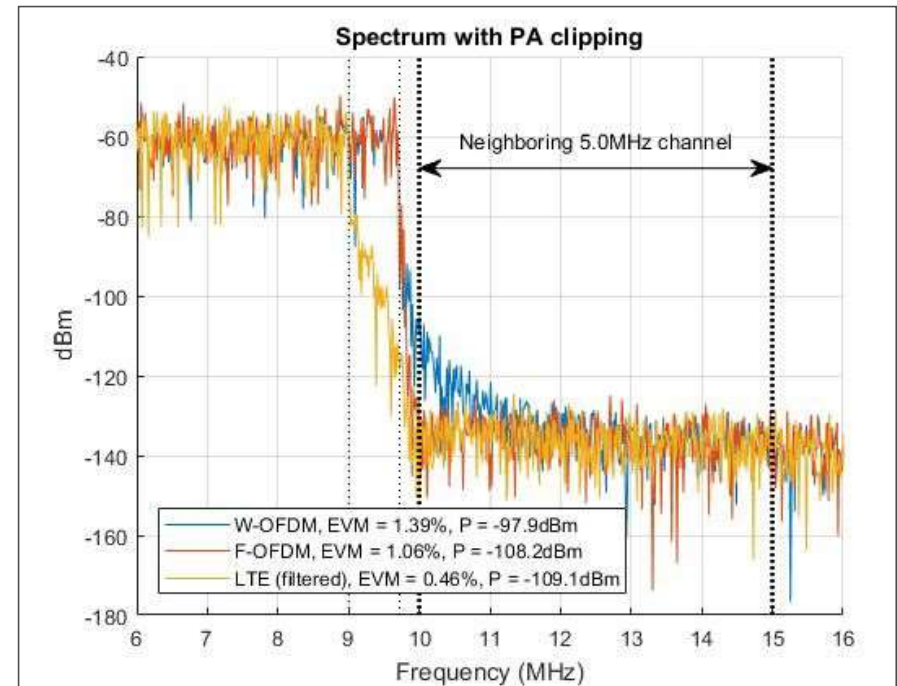


# 新しい5G無線アルゴリズムによる 周波数利用効率の向上 (続き)

## 5G library による物理層の設計とシミュレーション

5G library は *LTE System Toolbox™* のアドオンとしてダウンロードが可能で、新しい5G規格に定義されている次の機能の実行可能なバージョンが含まれています。

- 周波数利用効率を改善する新規波形
- 0.5 ~ 100 GHz の周波数帯域に対応する伝播チャネルモデル
- LDPC (データチャネル向け) およびPolar符号 (コントロールチャネル向け) などの新しい符号化スキーム
- サブキャリア間隔を構成できるカスタマイズ可能なエンドツーエンド リンクシミュレーションの例



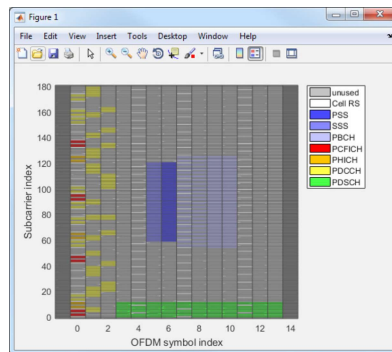
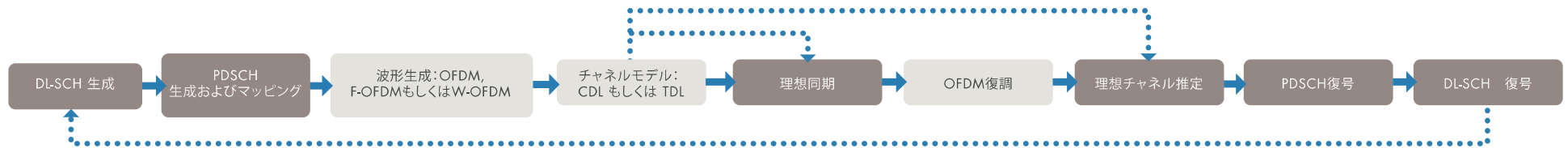
非線形パワーアンプ (PA) を使用した CP-OFDM、W-OFDM (108RB)、  
およびF-OFDM (108RB) スペクトル



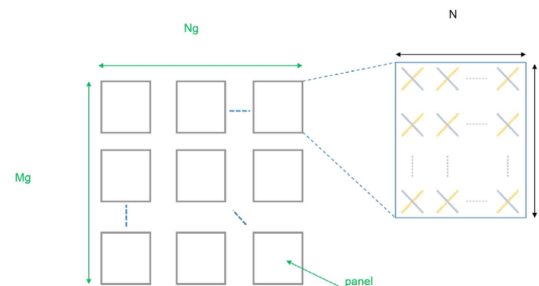
# 新しい5G無線アルゴリズムによる 周波数利用効率の向上 (続き)

5G library を使用して、現実的な5G伝播チャネルに沿ってエンドツーエンドのシステム性能をシミュレーションすることで、各種アルゴリズムや設計選択がシステム性能に及ぼす影響を測定できます。

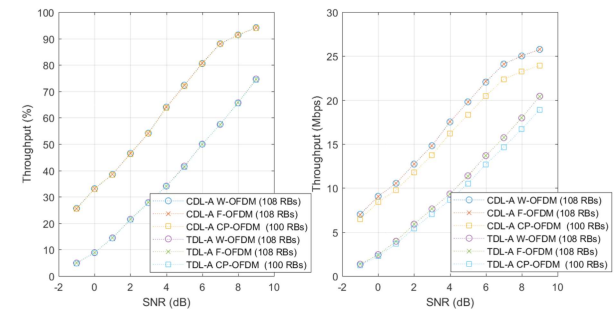
## 5G WAVEFORM



LTEのリソース グリッド



3GPP 38.901 チャンネルモデル



スループット測定値

5G ダウンリンク参照モデルとシミュレーション。LTE参照およびリソースグリッドを開始点として使用し、3GPP 5Gアルゴリズムとチャネルモデルを挿入してエンドツーエンドのリンク性能をシミュレーション可能

## 関連情報

**5Gシステムの新しいアーキテクチャとアルゴリズムに関するさらに詳しい情報は、以下をご覧ください。**

### ビデオを見る

[Winner II チャンネル モデル \(5:01\)](#)

[5G library \(4:54\)](#)

### コードをダウンロードする

[5G library](#)

[Winner II チャンネルモデル](#)

### 探索する

[5G \(第5世代移動通信\)](#)

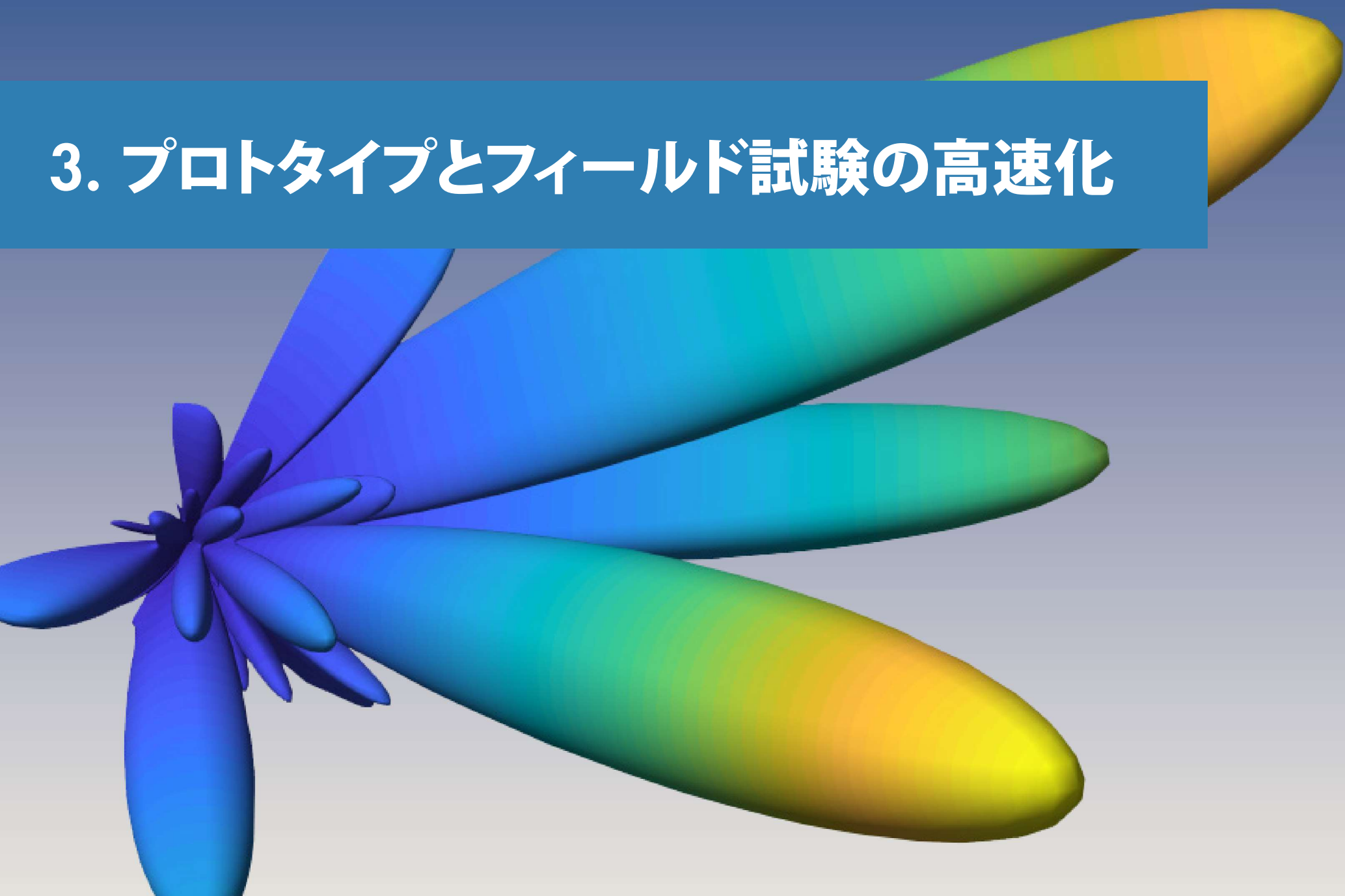
[ビームフォーミング](#)

[RFシステム](#)

[チャンネルモデリング](#)



### 3. プロトタイプとフィールド試験の高速化



# プロトタイプと5Gフィールド試験の高速化

エンジニアは新しい5Gアルゴリズムとアーキテクチャの性能を評価するために、概念実証プロトタイプを開発し、フィールド試験に向けて新設計を準備する必要があります。通常の場合、設計の一部については組み込みプロセッサをもつFPGAハードウェアを使用してプロトタイプが構築されます。通称「ハードウェアテストベッド」と呼ばれるこれらのプラットフォームによって、現場における新技術と設計変更のラピッドプロトタイプングおよびテストが可能になります。

通常の研究開発チームが、外部からの支援なしにFPGAベースの無線プロトタイプとテストベッドを実装するのは容易ではありません。研究開発に携わるエンジニアは、信号処理と通信アルゴリズムの開発に関するノウハウはもっていても、ハードウェアの実装についての経験はそれほどありません。この経験値のギャップの上に、さらにツールとワークフローに関する経験値のギャップが加わります。研究開発担当のエンジニアが *MATLAB* などの高水準言語を使用するのに対し、ハードウェアのエンジニアは独自のツールとハードウェア記述言語 (HDL) を使用します。

そこでリーディングカンパニーでは、こうしたギャップを埋めて研究開発部エンジニアが新しい5Gアルゴリズムと設計変更をすばやくFPGAベースのテストプラットフォームに反映できるよう、*MATLAB* と *Simulink* によるモデルベースデザインを採用しています。

アルゴリズムと  
モデル

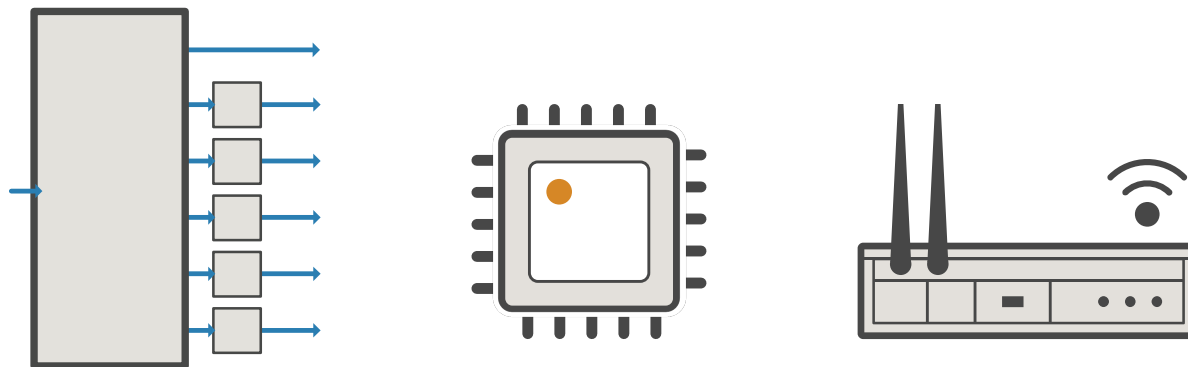


5Gフィールド試験用FPGAベースハードウェアにおける新規アルゴリズムのラピッドプロトタイプング

# モデルベースデザインによるラピッドプロトタイピング

多くの無線通信エンジニアが MATLAB を活用して物理層通信アルゴリズムの開発とシミュレーションを行っています。MATLAB と Simulink を使用したモデルベースデザインにより、無線通信エンジニアはFPGAまたはSoC (システムオンチップ) プロトタイピングプラットフォームでのシミュレーションと実装の両方を、同じモデルを使用してできるようになります。同じ設計について複数の表現を維持する必要がなくなり、MATLAB コードをリファレンスおよびテストベンチとして使用して、ハードウェア設計を検証することが可能になるのです。

モデルベースデザインの導入により、ハードウェアの専門家がいなくても、研究開発部門とシステムエンジニアがアルゴリズムのハードウェアプロトタイプを開発してデバッグを行うことができます。また、要件が変更された場合はそれに応じてプロトタイプを迅速に更新できます。実装向けに修正が必要な高抽象度表現のアルゴリズムをハードウェアチームに渡す代わりに、効率的な検証済みのVHDL®またはVerilog®実装を提供できるようになります。



5Gの研究開発チームはモデルベースデザインの導入により、以下を行うことができます。

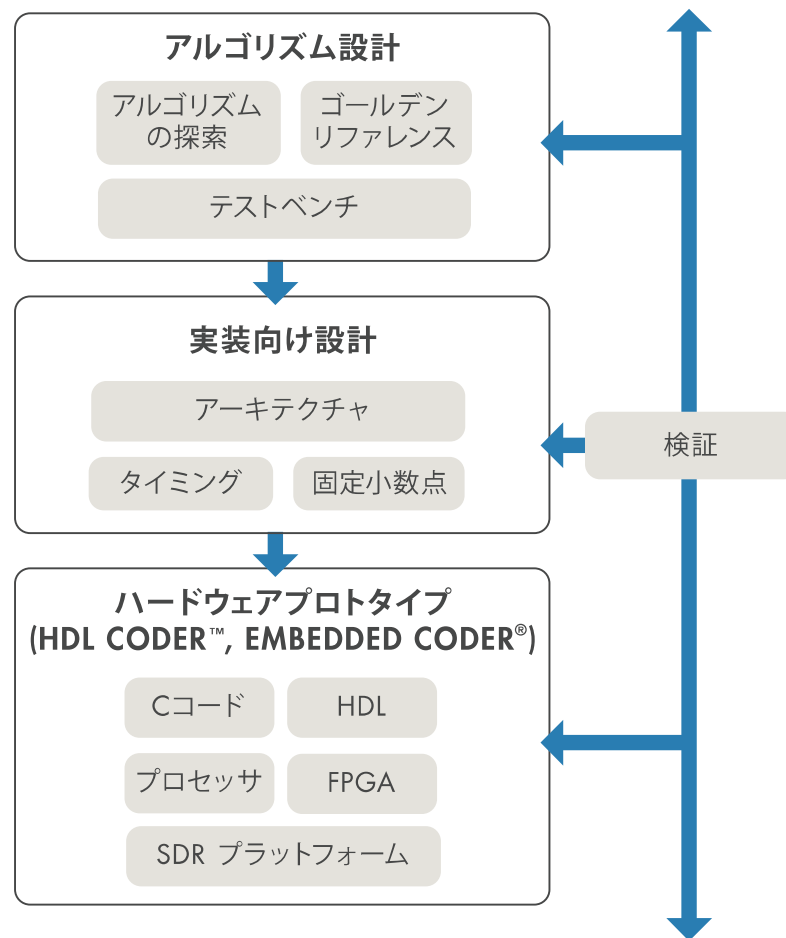
- MATLAB を使用してアルゴリズムを探索し、規格準拠のリファレンスおよびテストベンチを開発
- Simulink で固定小数点アルゴリズムブロックを使用してハードウェアに忠実なモデルを開発
- プロトタイプにおけるFPGAファブリックとプロセッサへの実装を考慮し、モデルをサブシステムに分割
- ターゲットに依存しない、もしくはターゲットに最適化したHDLコードとCコードの自動生成
- SDRおよびその他のFPGA、またはSoCハードウェア上でプロトタイピングを自動化
- 生成したコードを完全無線プラットフォーム設計に統合してテスト

# モデルベースデザインによる ラピッドプロトタイピング (続き)

このプロセスは、Simulink モデルから自動生成したCコードおよびHDLコードを実行する、十分に検証されたアルゴリズムの実装を提供します。市販のソフトウェア無線 (SDR) フレームワーク向けに用意されたサポートパッケージによって、信号を送受信するリアルタイム無線アプリケーションへの統合をさらに自動化できます。

検証済みのアルゴリズムをカスタムハードウェアテストベッドに展開するには、標準的なFPGA開発ツールを使用して、生成されたコードをその他のカスタムインターフェイスおよび外部IPコアに統合することができます。

変更が必要となった場合は、アルゴリズムモデルをすばやく変更してシミュレーションで検証し、コードを再生成 (通常は数分で完了) してから、そのコードをFPGA開発環境に統合し、FPGA実装用に合成します。生成されたコードは適切に構成され、読みやすく、正確に機能します。



5Gアルゴリズムのラピッドプロトタイピングにおける  
モデルベースデザインの使用

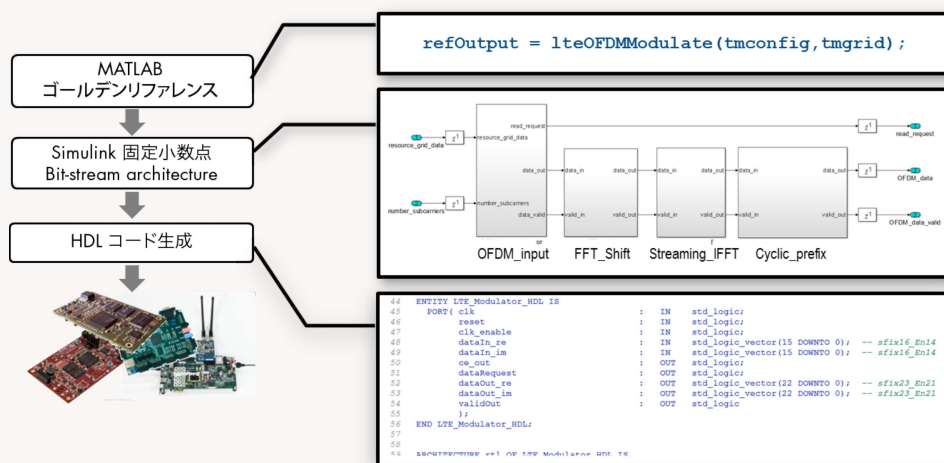






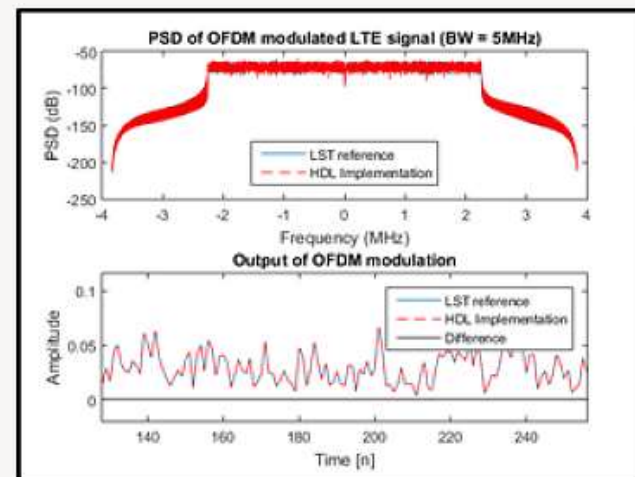
# ケーススタディ: LTE OFDM変調器および検出器の開発 (続き)

検出器は周波数の推定と修正、PSS検出、タイミングの調整、FFT、およびSSS検出を行って、検出されたセルグループのLTEセルIDを特定します。モデルはLTE対応波形を使って検証され、Xilinx® Zynq® SDRでのシミュレーションと実信号による実行の両方においてセルIDを正しく特定できています。



LTEセル検索用 MATLAB リファレンスコード (上) と、アルゴリズムのHDL実装を設計・生成するワークフロー (下)

シミュレーションとハードウェアテストの出力をリファレンスアルゴリズムと比較して、下図のように MATLAB で可視化することができます。



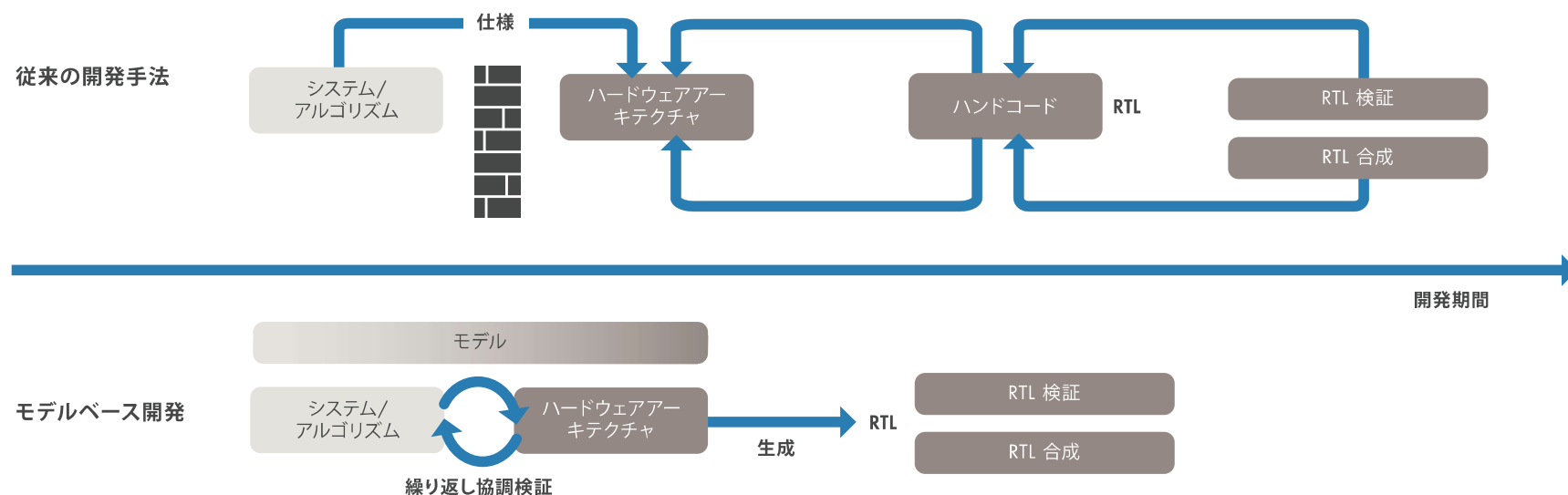
OFDM変調のHDL実装の検証

さらに詳しく学ぶには、[HDL Coder™](#) 実装用の [LTE対応OFDM変調器および検出器の構築](#) の例をダウンロードし、[LTE System Toolbox](#) を使ってHDL実装モデルを検証してください。

# FPGAおよびASIC上のHDL実装

モデルベースデザインの適用範囲はプロトタイピングに留まりません。無線通信エンジニアは MATLAB と Simulink でHDL自動生成を使用して、量産FPGAおよびASIC設計の性能、サイズ、電力要件を満たすようなアルゴリズム実装を生成することに成功しています。繰り返しのワークフローによって、マルチレートフィルタ、PAPR抑制、デジタルプリディストーション、ベースバンド処理のためのアルゴリズムの非常に効率的なハードウェア実装を迅速に開発して検証することが可能となります。

このモデルから生成されたHDLコードはハードウェアに依存せず、すべてのFPGAまたはASICで使用できます。モデルを変更してSimulinkで結果を表示し、HDLコードを再生成することにより、その他のアーキテクチャ向けに最適化できます。HDL CoderはSoCおよびFPGA設計に統合されることで、ターゲットに最適化された実装を生成できます。これによりSoCおよびFPGA設計の開発は加速し、チームの作業期間が数カ月から数日あるいは数週間に短縮されます。



モデルベースデザインを使ってFPGAおよびASIC上のアルゴリズム実装を高速化

# このワークフローを5Gプロトタイピングに採用している企業

## Huawei: 5Gプロトタイピングの高速化

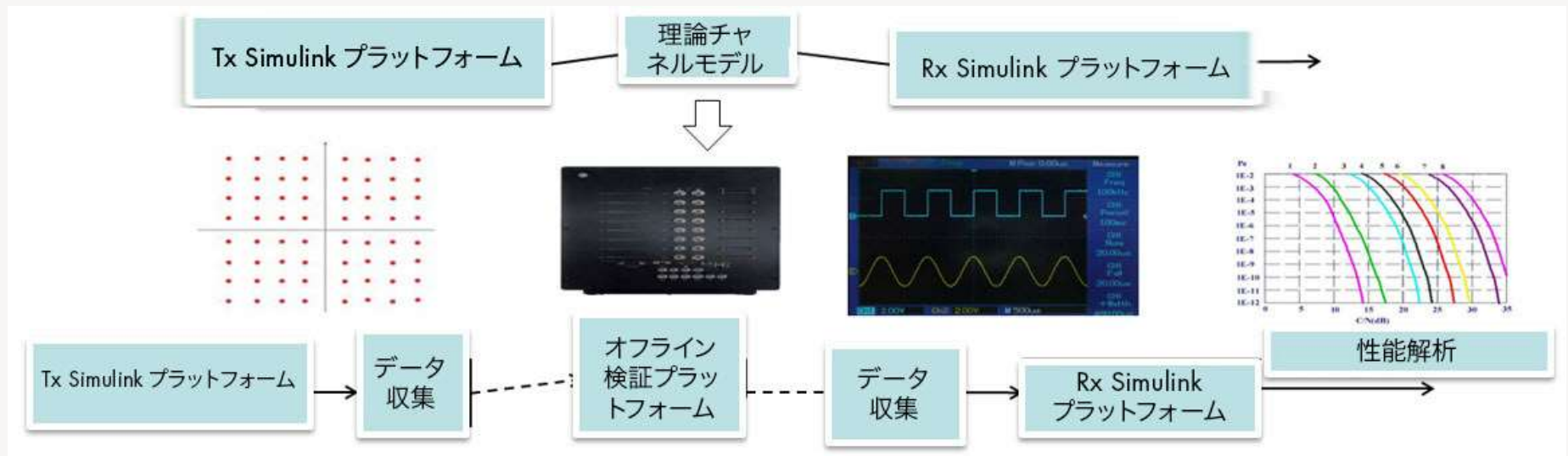
Huawei社でアーキテクチャ & デザイン担当ディレクターを務める Kevin Law 氏は、MATLAB と Simulink を使って、5Gプロトタイピングを高速化する開発ワークフローに実際に関わった経験から、その見解を述べています。

Huaweiのエンジニアが5Gの研究開発で MATLAB と Simulink をどのように活用しているかについては、次のユーザー事例をご覧ください。

Huawei社における5G研究開発: インサイダーの視点—MATLAB と Simulink により理論からエンジニアリング実践までのプロセスを高速化

「当社では5Gプロトタイピングの設計と開発を行う際、ハードウェア検証用のHDLコードを MATLAB から自動的に生成します。フィールド試験でアルゴリズムをテストする段階でシステム全体の性能とステータスが明確にわかり、潜在的な問題を簡単に特定できます」

— Huawei 社アルゴリズム アーキテクチャ & デザイン担当ディレクター、Kevin Law 氏



Simulink を使用したアルゴリズムの超高速シミュレーションとオフライン検証

# このワークフローを5Gプロトタイピングに採用している企業 (続き)

## Ericsson: 5Gハードウェアテストベッドの展開

Ericsson社の開発グループでは、ハードウェアテストベッド上に完全な概念実証を完成させ実装するために、MATLAB と Simulink によって開発したアルゴリズムを標準的なFPGA開発環境で、ほかのシステムコンポーネントに統合しています。具体的には、HDL Coder を使用して Simulink から自動生成されたHDLコードを、手動でコード化したカスタムインターフェイスおよびFPGAベンダー製IPコアと統合して、ソフトプロセッサ、DMA、物理インターフェイスなどのコンポーネントを作成します。エンジニアは必要な変更を Simulink で行い、コードを再生成 (通常、数分で完了) したら、そのコードをFPGA開発環境に統合し、FPGA実装用に合成します。Ericssonのエンジニアは、生成されたコードが適切に構造化され、読みやすく、正確に機能したことも報告しています。

Ericsson社が、MATLAB と Simulink による高速ハードウェアプロトタイピングおよびHDLコードの自動生成にハードウェアテストベッドをどのように使用しているかの詳細は、ビデオ「[HDL Coder を使用した無線テストベッド設計 \(22:44\)](#)」をご覧ください。



「新しい設計案が持ち上がると新しい設計が必要になります。HDL Coderのおかげで変更の妥当性を実証しデモを機能させるまでに1週間もかかりませんでした」

— Ericsson社 Tomas Andersson 氏

## 関連情報

**5Gプロトタイプングとフィールド試験の高速化に関する  
さらに詳しい情報は、以下をご覧ください。**

**Qualcomm:** [システムとHDL世界の結合 – 高速RTL生成 \(カンファレンス講演資料\)](#)

**Huawei:** [Simulink を使用したシステムレベルのASICアルゴリズムシミュレーション プラットフォーム \(カンファレンス講演資料\)](#)

### ビデオを見る

[LTE受信機設計のFPGA実装 \(27:01\)](#)

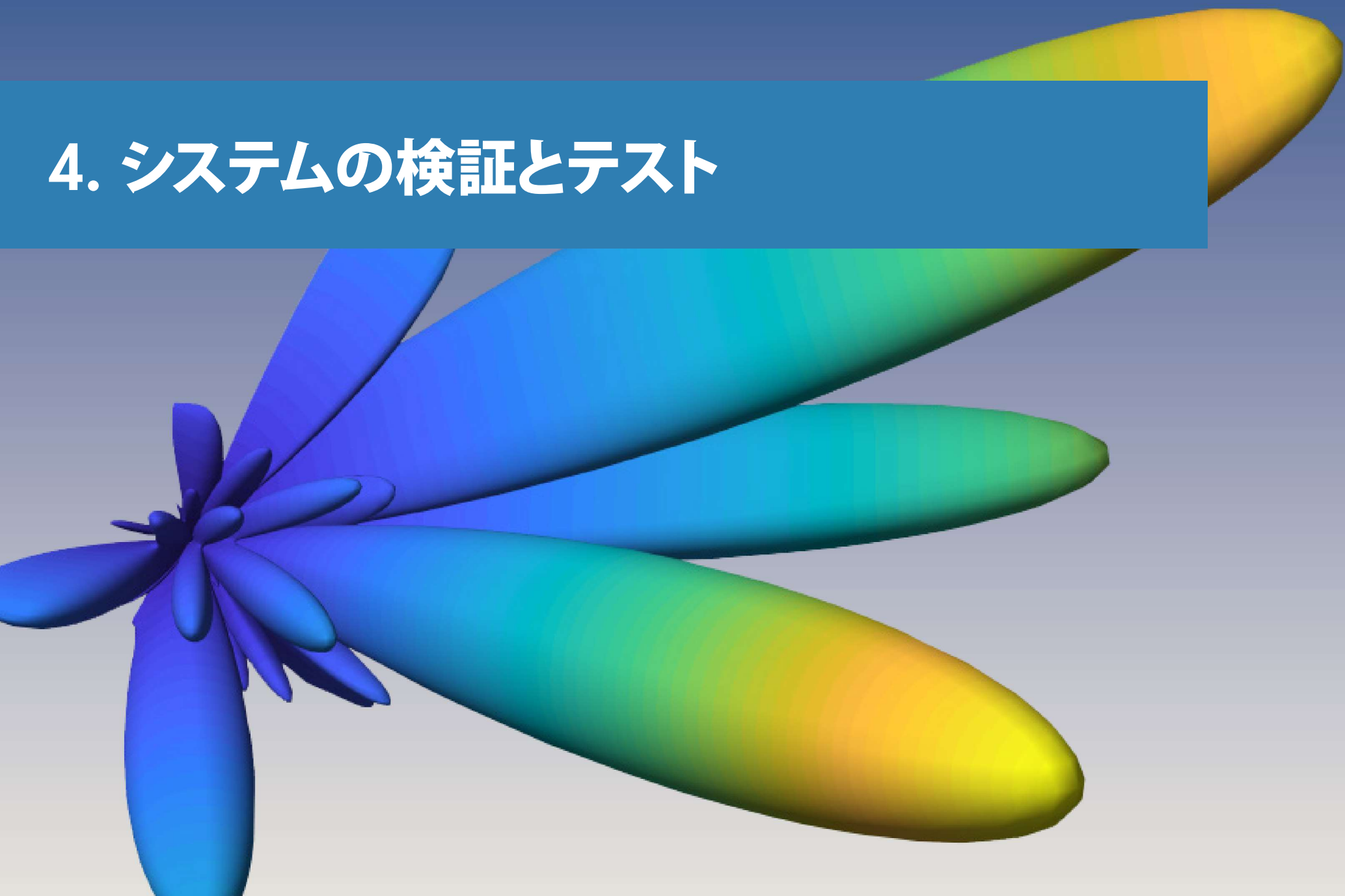
### コードをダウンロードする

[LTE OFDM変調器と検出器のHDL実装](#)

### 探索する

[MATLAB および Simulink を使用したモデルベースデザイン](#)

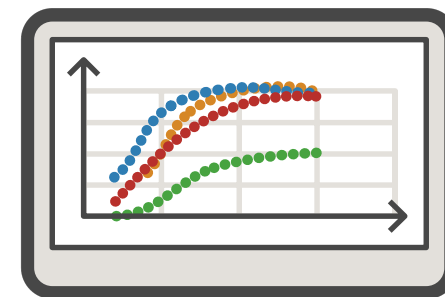
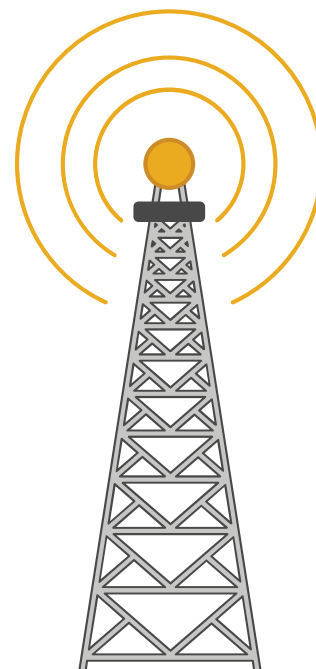
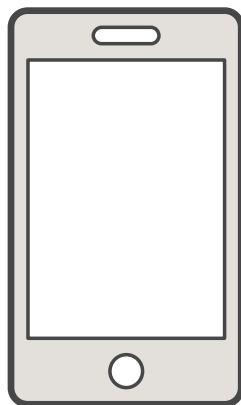
## 4. システムの検証とテスト





# 5Gシステムの検証とテスト

ベースバンド、RF、およびアンテナアレイの設計が完了したら、次にラボと現場の現実的な条件下で、システム設計から満足な結果が得られるかを確認する必要があります。エンジニアはそのために実験計測機器のインターフェイスを使用して、5Gの実信号と波形を処理する必要があります。



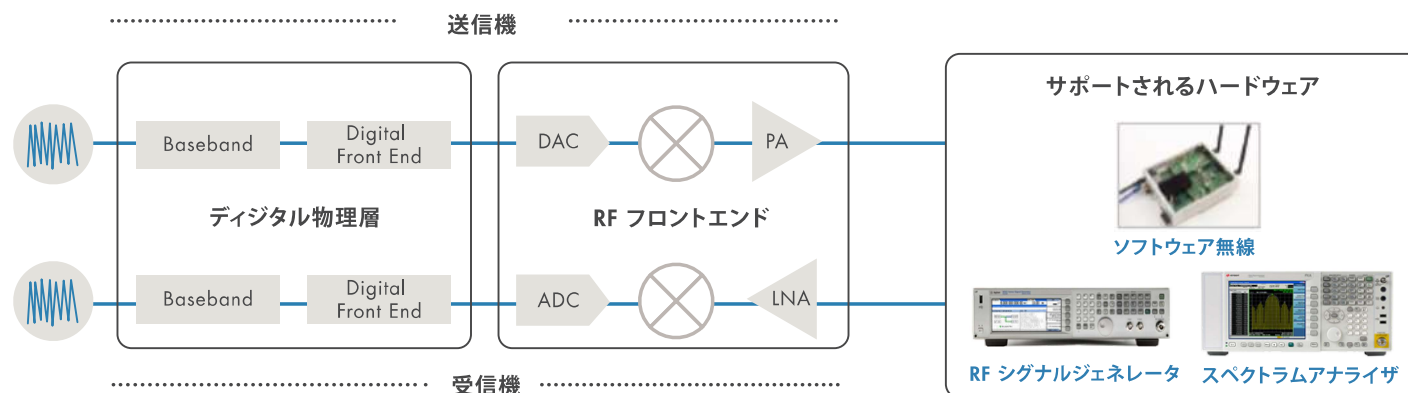
# 5G実信号の生成と受信

ソフトウェア無線 (SDR) とRF機器のハードウェアに接続することにより、**MATLAB®** と **Simulink®** を使って実信号テストを行い、5Gの設計を、シミュレーション、ラボ、または現場の現実的な条件下で検証できます。また、シミュレーションの段階で使用したテストベンチ、シグナルジェネレーター、スコープおよび測定値はハードウェアテストに再利用することができます。このアプローチでは、異なるソフトウェア環境でテストベンチを再作成する必要がないので、テストベンチの開発期間を短縮してエラーを減らすことができます。

5Gの実信号またはLTE実信号を取得して解析を行い、ベースバンドのシミュレーション結果と比較することが可能です。アルゴリズムの設計者は取得した信号を使ってアルゴリズムをテストし、RFチームはそのままの設定でRFの設計を検証できます。**実信号の生成と取得の機能を示す例はこちらからダウンロードできます。**

フィールド試験の間、さまざまなテストシナリオに対応するためにはテストパラメーターやテストスクリプトをすばやく変更できる必要があります。MATLAB を使用すると、テストベンチを柔軟な方法でカスタマイズできます。したがって、一般に実験計測機器に付属している制限の多いソフトウェア環境や暗号化された波形では対処の難しい、ごく微妙な問題を診断しデバッグすることが可能です。

MATLAB と Simulink では、さまざまな市販のSDRハードウェアに加え、Keysight、Rohde & Schwarz、National Instruments、アンリツなどのRF機器ベンダーが提供しているRFシグナルジェネレーターとスペクトルアナライザーがサポートされます。SDRサポートパッケージは、Xilinx Zynq および FPGA Radio、USRP® Radio N、X、および E シリーズ、PlutoSDR、RTL-SDR向けのものが用意されています。これらの選択肢の中から貴社の要件とご予算に最適なハードウェアをお選びいただけます。



MATLAB と Simulink は市販のさまざまなSDRとRF機器ハードウェアによる実信号 (OTA) テストをサポートしており、OTAテストとシミュレーション結果を簡単に比較できます。

# ソフトウェア無線を利用した5G実信号生成と取得

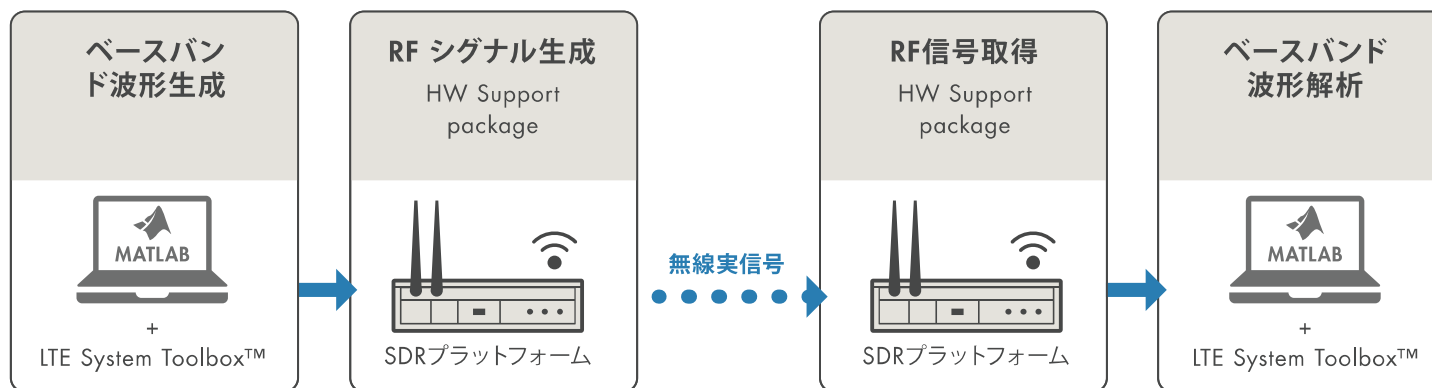
ソフトウェア無線 (SDR) は、構成可能なRFフロントエンドと、デジタル機能を実行するためのFPGAまたはSoCなどで構成される無線機器です。市販されているSDRハードウェアは複数の周波数での動作が可能で、規格準拠やカスタムの信号を送受信してベースバンドアルゴリズムおよびRFフロントエンド設計をテストすることができます。

MATLAB および Simulink をSDRハードウェアと併用することで、以下のように広範な無線通信のエンジニアリングタスクに適した、費用対効果が高い、リアルタイムプラットフォームとして利用できます。

- RF実信号を使用した実信号でのラボおよびフィールド試験
- 解析用の信号取得
- カスタム無線機能を使用した高速検証



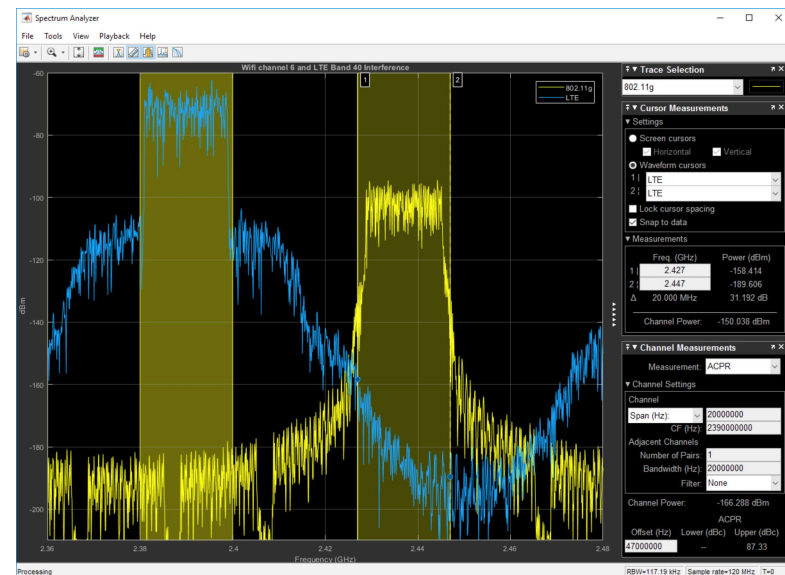
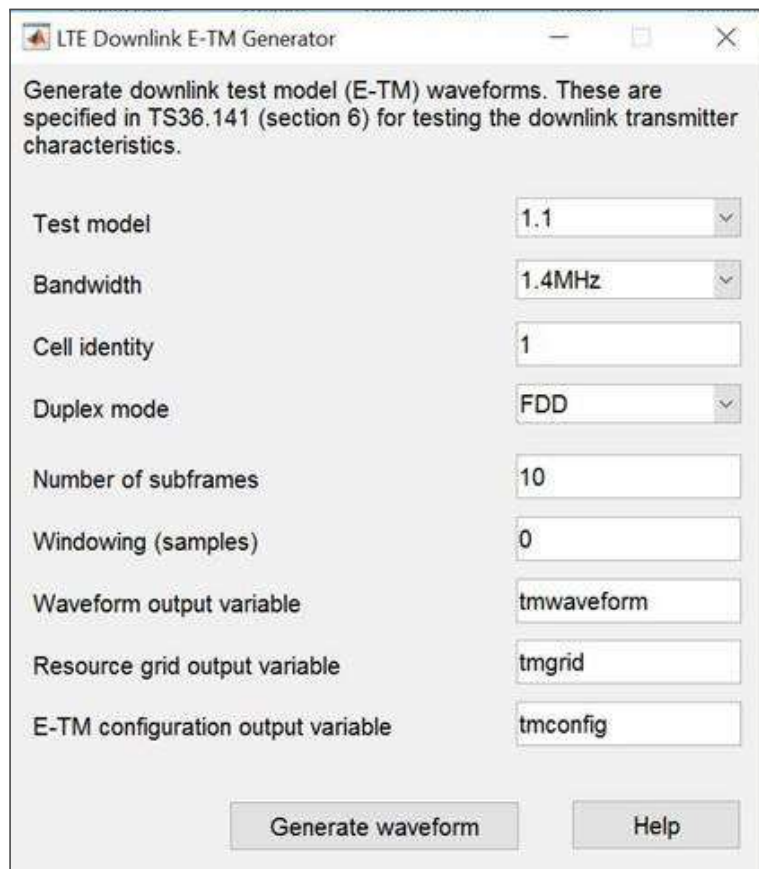
RFフロントエンドとFPGAボードのある一般的なSDRデバイス。



MATLAB と LTE System Toolbox がサポートされたSDRを利用。実信号の生成と取得用に柔軟で対費用効果の高い環境が提供されます。

# ソフトウェア無線を利用した5G実信号生成と取得 (続き)

対話型アプリあるいは数行の MATLAB コードを使用するだけで、5G規格信号の候補、4G LTE 規格準拠信号、または規格に関係なく完全にカスタマイズされた信号という広範囲な用途に適したベースバンド信号を生成するようSDRハードウェアを適応させることができます。

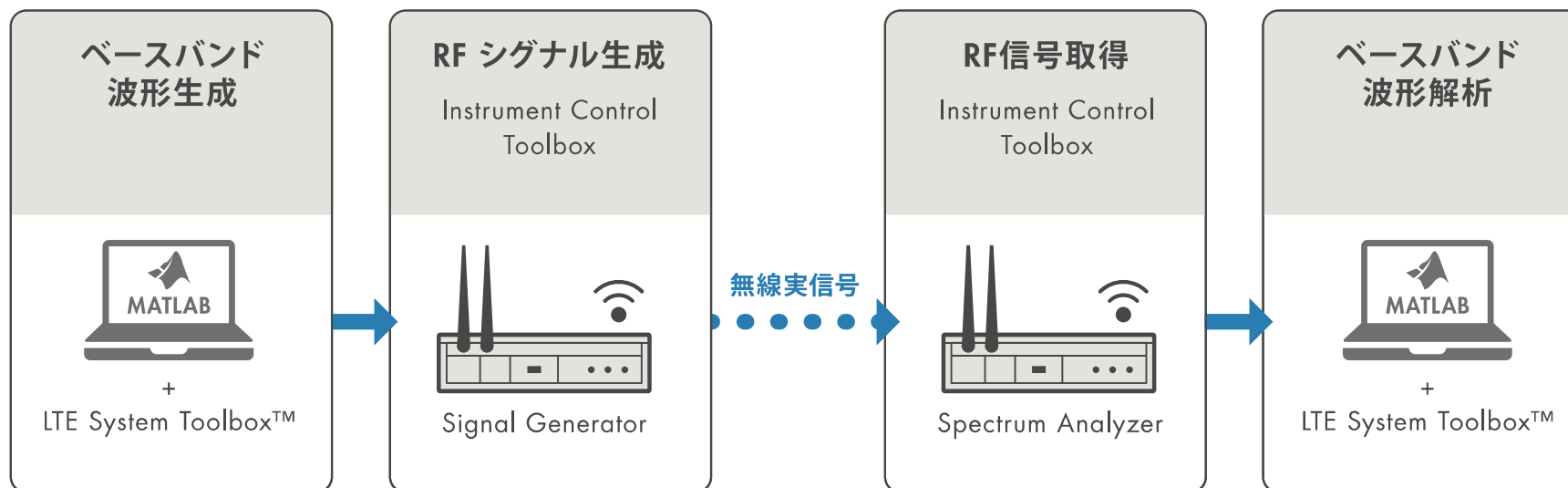


LTEダウンリンクテストモデル (E-TM) 波形生成GUI (左) と解析 (右)

# RF機器による5G実信号の生成と取得

実信号を処理する2つ目の方法として、市販のテスト機器を使用することもできます。市販の機器は細かくキャリブレーションされたRF特性を使用しているため、ラボや現場、量産のための精密なテストに適しています。ただし、5Gの実験とフィールド試験には、通常の市販機器では提供されないようなさらに柔軟なソフトウェアと解析能力が必要とされます。MATLAB と *Instrument Control Toolbox™* を使用すれば、このような制限を克服できます。このツールボックスは、VISA、TCP/IP、SPI、USB、GPIB といったインターフェイスや規格、さまざまな機器メーカー、およびシグナルジェネレーターとベクトルシグナルアナライザーなど各種の機器タイプに対応しています。

信号を送信するには、5Gベースバンド信号を生成してこれをシグナルジェネレーターにダウンロードし、ベースバンド信号のパラメーター構成と制御を行ってからIQ波形をRFにアップコンバートして、無線で再生します。受信機側では解析用のIQデータをPCに取り込んで可視化と解析を行い、取得パラメーターをプログラムで設定してから、ハードウェアでRF信号をベースバンドにダウンコンバートします。



MATLAB と実験計測機器を使用した実信号テスト

# 大規模なフィールド試験データセットの解析

ネットワーク機器のベンダーや無線通信業者は、自社の5Gテクノロジーを実証し、現実的な環境でその運用特性を示すために公開フィールド試験を行っています。

5Gのフィールド試験では、RSRP (基準信号の受信電力) やRSRQ (基準信号の受信品質) といった多くのパラメータの測定と監視が動的に行われます。システムの性能は、広範なパラメータにわたり信号を取得することによって記録されます。

測定を行った後、設計者はデータから有用な調査結果を抽出できます。5Gのフィールド試験では高速のデータ転送に加えてMassive MIMO放射パターンの取得と解析が必要となるため、4Gシステムに比べて膨大な量のデータが取得されます。

フィールド試験用のシステムには、スケーラブルなデータ取得とデータ処理、および結果の共有に対応できる実験解析システムが必要です。



東京で行われたHuawei社フィールド試験



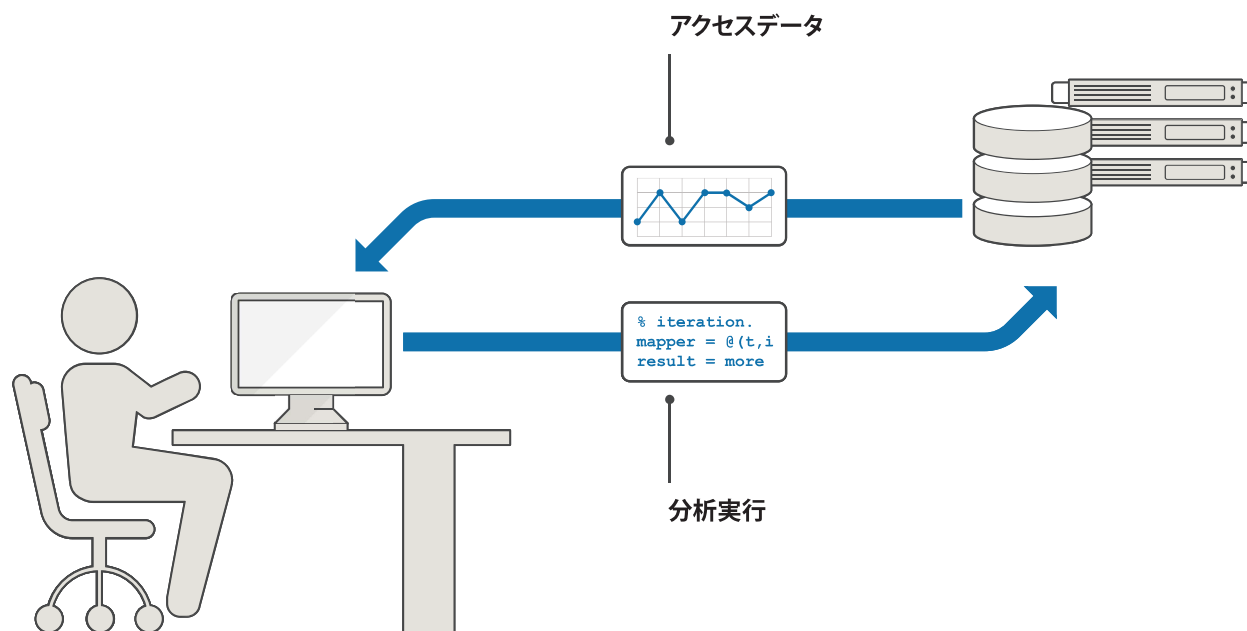
# テストデータの取得と解析

フィールド試験を行うテストエンジニアは市販のテスト機器を頻繁に利用します。ただし、5Gフィールド試験の解析処理は測定の経験を有していた人にとっても非常に複雑です。

フィールド試験の解析ソフトウェアは、データをテスト機器から直接インポートするか、さまざまなフォーマットで保存されたデータからインポートしなければなりません。これらのデータは、取得した信号、名前、タイムスタンプ、およびアンテナパターンファイルなどの構成情報です。そこで、

異なる機器ベンダーから提供される各種データにアクセスできる共通の環境やツールがあると役に立ちます。

非常に大規模なデータセットを扱う場合、コンピューティングクラスターや1台のワークステーションからスケーリング可能なクラウドストレージを使用して、クラスターコンピューティングや大容量データセットの処理を行うことができます。

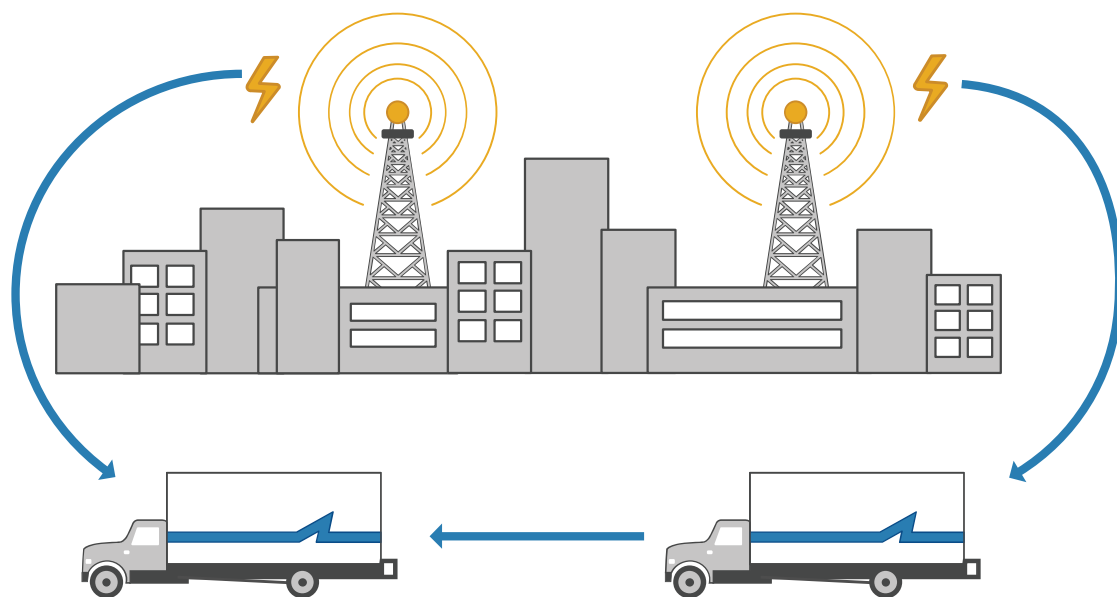


ローカルコンピューターやクラウドに保存されているフィールド試験データを MATLAB で取得、処理、解析

# データの処理と可視化

テストエンジニアは取得した実信号データを保存したり、結果を後で上司や同僚、顧客などに提示したりする必要があります。

たとえば、地図上にセルハンドオーバーポイントを示す場合、SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio) が満たされているかどうか、およびRSRPの変動を判断する必要があります。このタスクを実行するには、規格準拠の波形をすばやく生成してテストプロセスを何度も繰り返す必要があります。



セル ID 変更ポイント



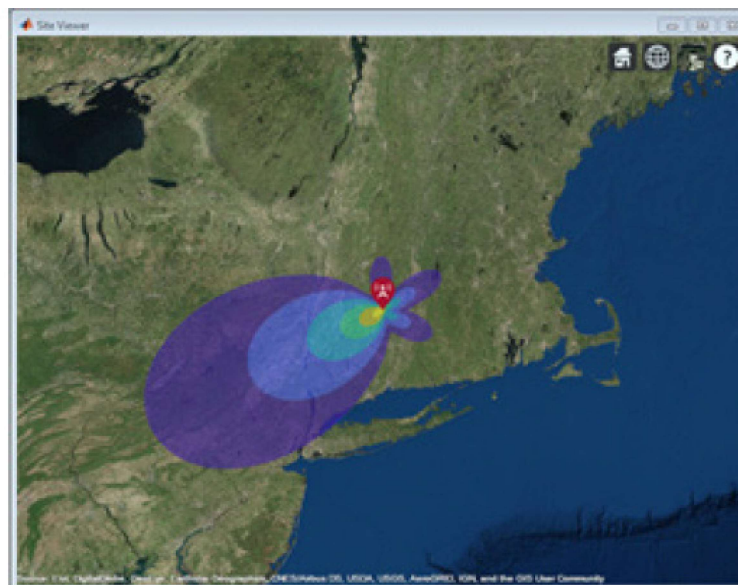
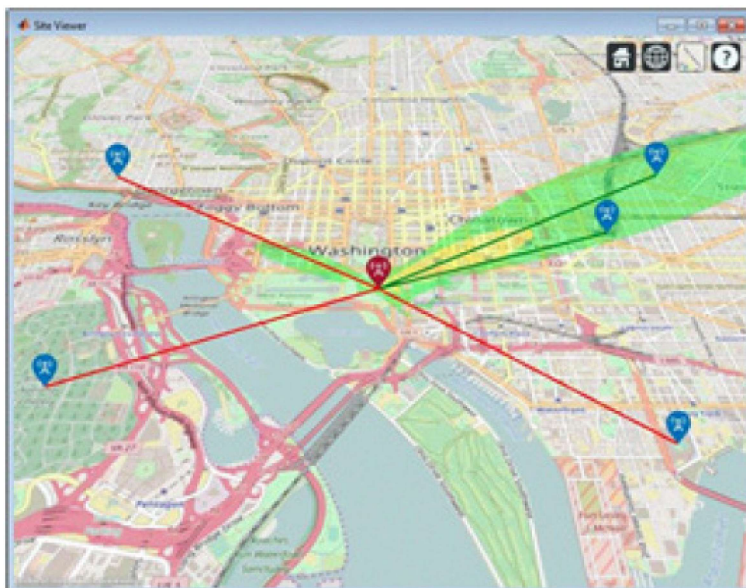
実運用中のシステムのハンドオーバーポイント、およびセルID番号に従った信号解析

# 地図上での5Gフィールド試験結果の可視化

フィールド試験にとって可視化は欠かすことができません。テストエンジニアは、取得した信号に加えて性能データとパラメーターデータを地図上に重ね合わせて表示しなければなりません。地図上に3Dおよび疑似3Dの表現を使用する場合は、経度と緯度情報が必要です。

車両間通信や基地局カバレッジ解析といった一部の5Gアプリケーションにおいては、エンジニアが経度、緯度、ビルの位置情報を使って地図データに直接アクセスする必要も出てきます。

可視化のアーキテクチャが適切に実装されていれば、エンジニアは現実のシナリオにおけるシステム性能を総合的に可視化して結果を表示し、ネットワーク計画の決定プロセスに貢献することができます。

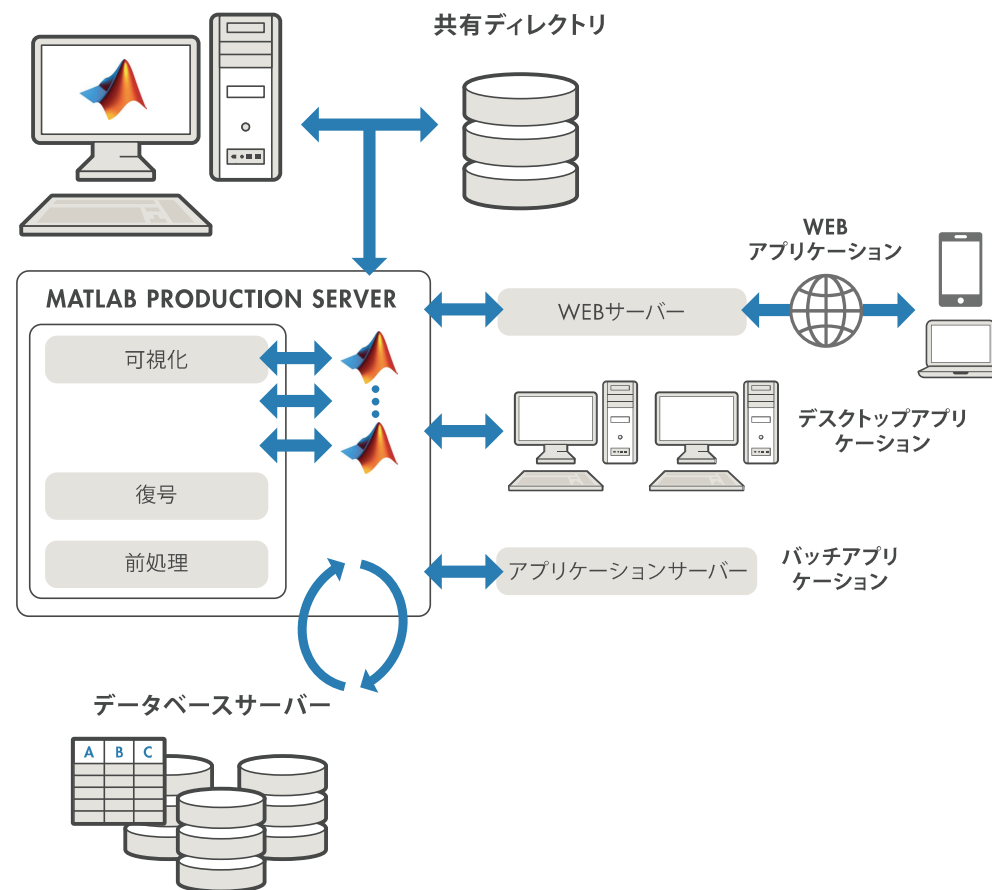


市街地図 (左) とエリア地図 (右) でのセルラー信号カバレッジの可視化

# 解析と結果の共有

データの大規模な後処理と集中管理する目的で、システム担当者は独自の5Gフィールド試験ソフトウェアをエンタープライズシステムにアプリケーションとして配布できます。これらのアプリケーションは専用のサーバーやクラウドでホストできるので、システム担当者はテストデータをリモートでチェックし、システムアップデートを集中管理することが可能です。MATLAB のアプリケーション配布ツールを使用すると、開発チームは以前の作業内容を活用することができ、またチーム全員(システム担当者と開発者、フィールドエンジニア、経営陣) が性能と解析結果をリモートで表示して確認できます。

エンタープライズアプリケーションの実装には *MATLAB Production Server™* を使用できます。これにより、カスタムのアルゴリズム、テスト、数値解析を、専用サーバーやクラウド上で実行するWebアプリケーション、データベースアプリケーションおよびエンタープライズアプリケーションに組み込むことができます。このような配布プロセスの事例をご覧ください。こうした5Gフィールド試験のワークフローは、5Gフィールド試験の要件を満たすための理想的な方法として携帯電話会社や大手のサプライヤー各社で採用されています。



5Gフィールド試験のITアーキテクチャ

## 関連情報

**5Gシステムの検証とテストに関するさらに詳しい情報は、  
以下をご覧ください。**

### ビデオを見る

[5G/LTE/WLAN: 波形の生成、シミュレーション、測定、実信号テスト \(46:18\)](#)

### 学習する

[実信号と実験計測機器を使用した LTE 設計の検証](#)

[アナログデバイス AD9361/AD9364 を使用した LTE 送信機](#)

### 探索する

[LTE システムの設計とテスト](#)

[ソフトウェア無線機 \(SDR\)](#)