

5Gシステムのシミュレーションとテスト

MathWorks Japan アプリケーションエンジニアリング部
初井 良治

内容

- ・ はじめに
- ・ 5G シミュレーション環境
- ・ 5G信号生成/解析(シミュレーション/測定)
- ・ 各種SDR機器を使用したプロトタイピング
- ・ まとめ



5G Toolbox™ は、5G New Radio (NR) 通信システムのモデリング、シミュレーション、検証を目的とした、規格に準拠した関数や参照例を提供します。このツールボックスでは、リンクレベルシミュレーション、ゴールデン リファレンスによる検証およびコンフォーマンステスト、テスト波形生成をサポートしています。

また、エンドツーエンド 5G NR 通信リンクの構成、シミュレーション、測定、解析が可能です。ツールボックスの関数を変更またはカスタマイズして、5G システムや 5G デバイスに参照モデルとして実装する際にも使用できます。

このツールボックスには関数と参照例が用意されており、アップリ

内容

- はじめに
- 5G シミュレーション環境
- 5G信号生成/解析(シミュレーション/測定)
- 各種SDR機器を使用したプロトタイピング
- まとめ



5G Toolbox™ は、5G New Radio (NR) 通信システムのモデリング、シミュレーション、検証を目的とした、規格に準拠した関数や参照例を提供します。このツールボックスでは、リンクレベルシミュレーション、ゴールデン リファレンスによる検証およびコンフォーマンステスト、テスト波形生成をサポートしています。

また、エンドツーエンド 5G NR 通信リンクの構成、シミュレーション、測定、解析が可能です。ツールボックスの関数を変更またはカスタマイズして、5G システムや 5G デバイスに参照モデルとして実装する際にも使用できます。

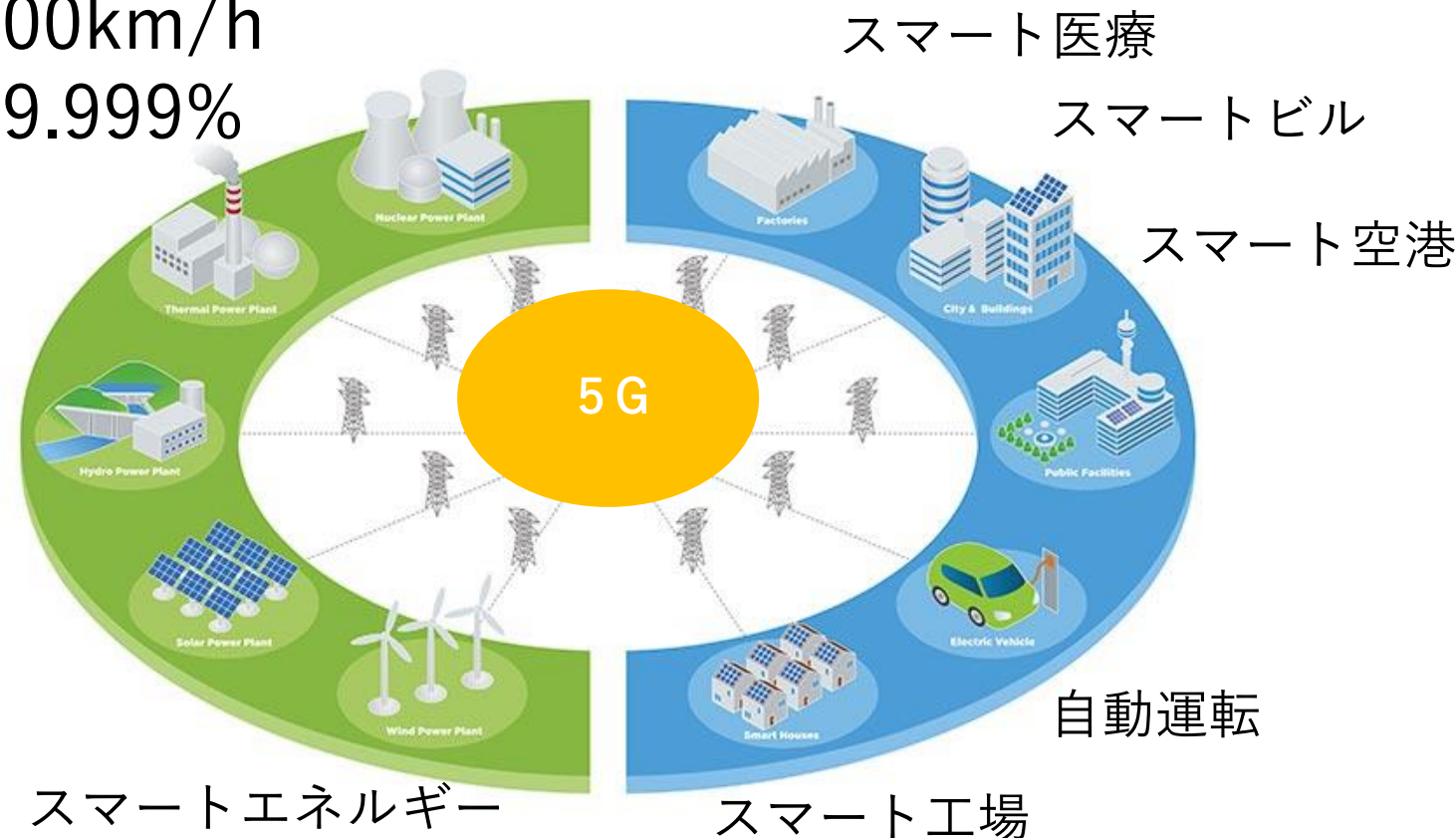
このツールボックスには関数と参照例が用意されており、アップリ

5Gにより実現される世界

5Gのパフォーマンス

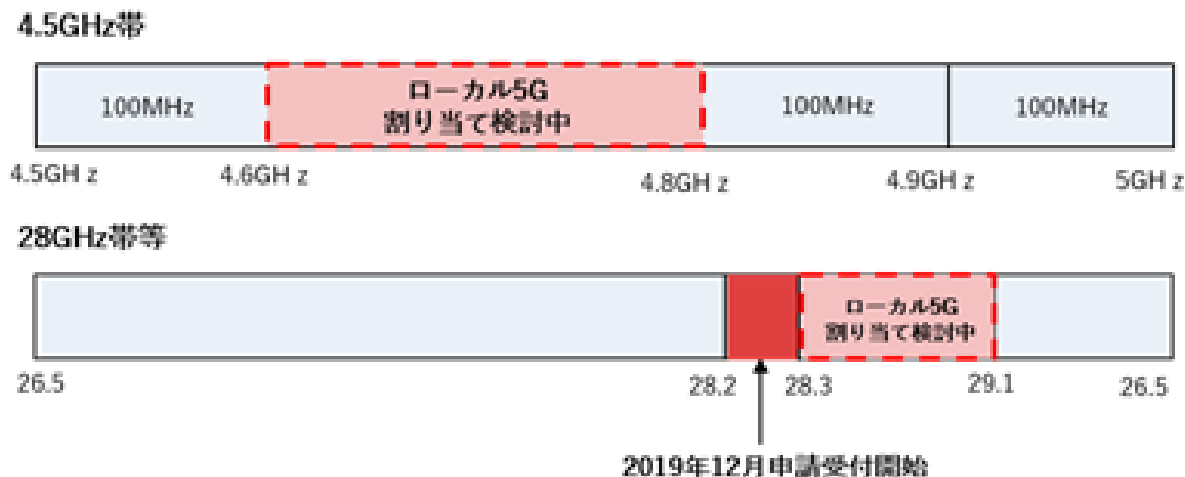
- 超高速化
- 超低遅延
- 収容デバイス数
- モビリティ性
- 超信頼性

- データ速度 10Gbps(LTEの10倍)
- 1ms(LTEの1/10倍)
- 100万デバイス/km²
- 500km/h
- 99.999%



ローカル 5 Gの活用

- プライベートな敷地内での自営無線
- 通信キャリア以外の人がライセンスを取得
- 2019年12月よりライセンス申請を受け付け
- 28.2GHz – 28.3GHz
- 使用できる周波数が増加予定



ローカル5Gとは

1

■ 「ローカル5G」は通信事業者以外の様々な主体(地域の企業や自治体等)が、自ら5Gシステムを構築可能とするもの。

(以下は、いずれも導入が想定される事例)



ローカル5Gのメリット

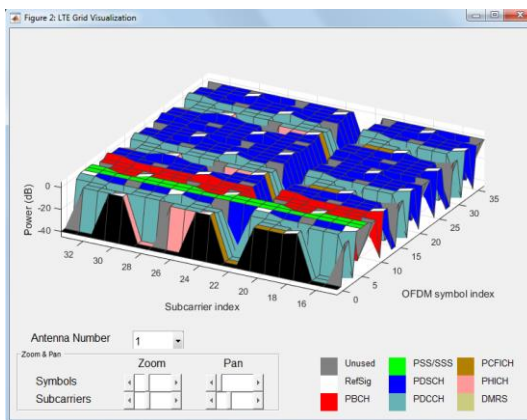
- 地域や産業の個別のニーズに応じて柔軟に5Gシステムを構築できる
- 通信事業者ではカバーしづらい地域で独自に基地局を設けられる
- 他の場所の通信障害や災害などの影響も受けにくく、電波が混み合っつながりにくくなることもほとんどない

各種IoT機器への対応

- MATLABでは、5Gはもとより、その他各種IoTを担う規格に対応

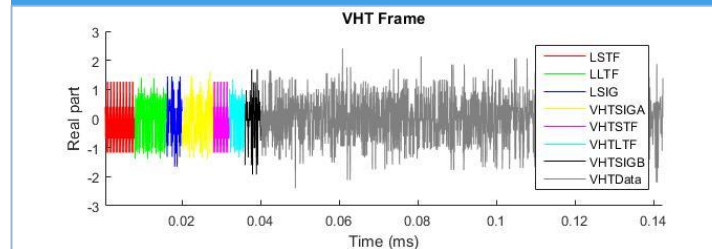
LTE
LTE Toolbox
NB-IoTのサポート

LTE Toolbox : NB-IoT



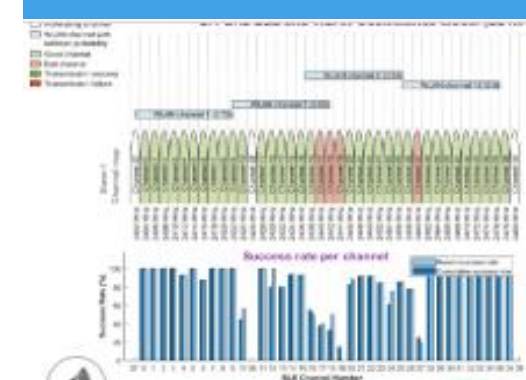
Wi-Fi
WLAN Toolbox
IEEE802.11axのサポート

WLAN Toolbox: IEEE802.11x



Bluetooth
Communication Toolbox
プロトコル層のサポート

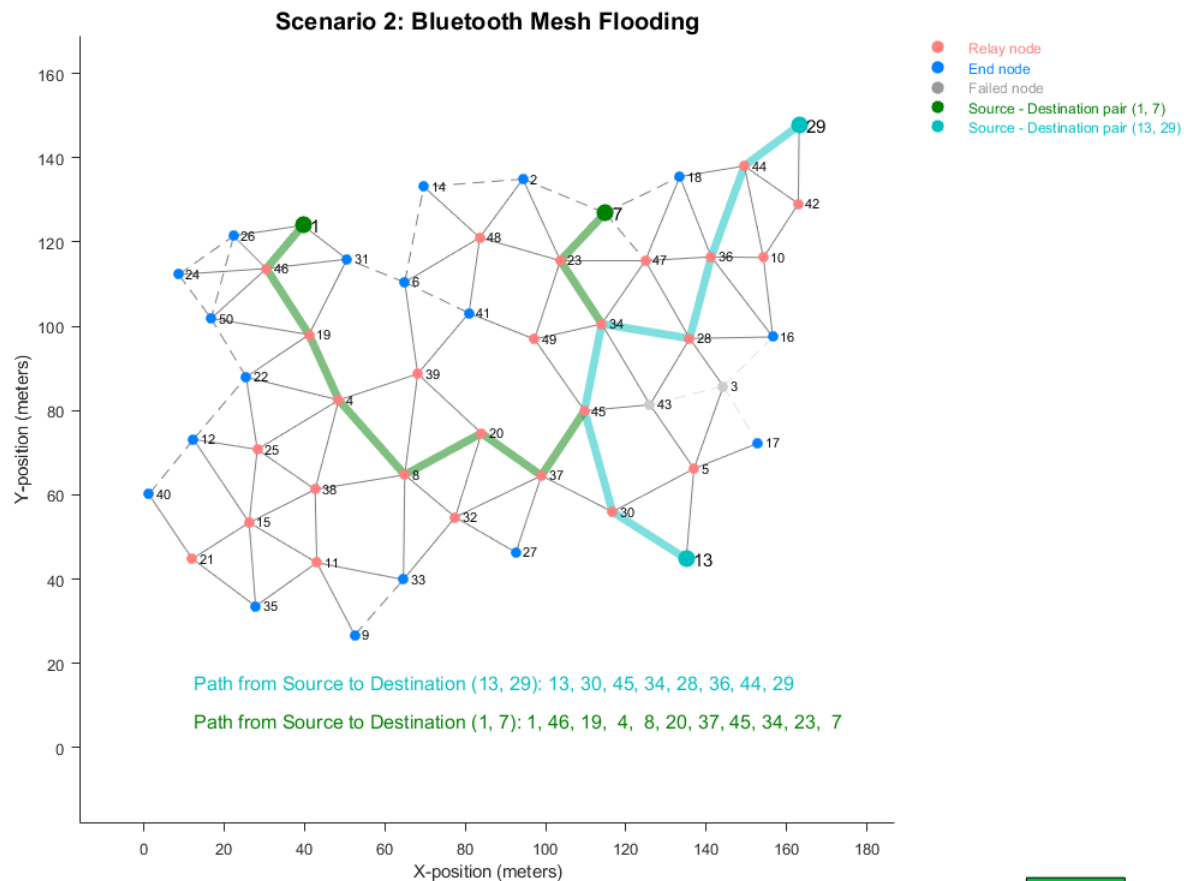
Bluetooth Protocol



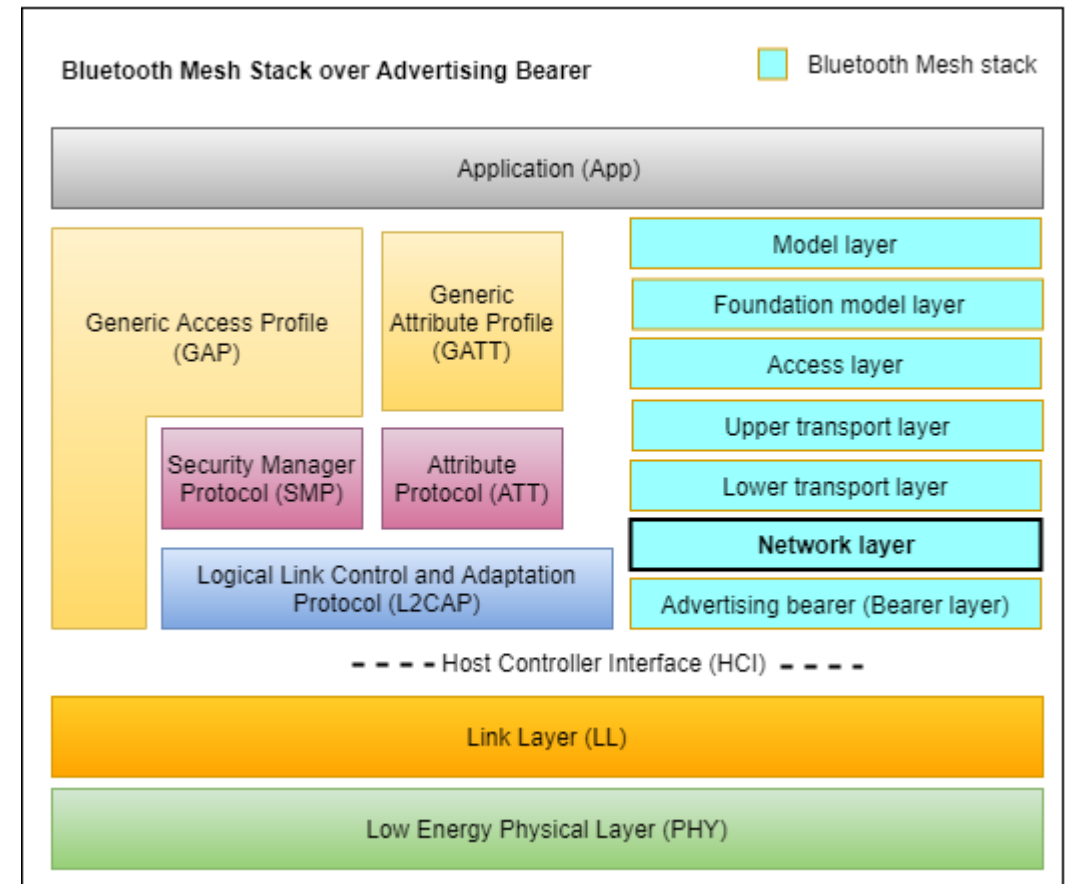
BLE と WLAN 信号干渉の共存モデル

IoT向け例題：Bluetooth Meshネットワーク シミュレーション

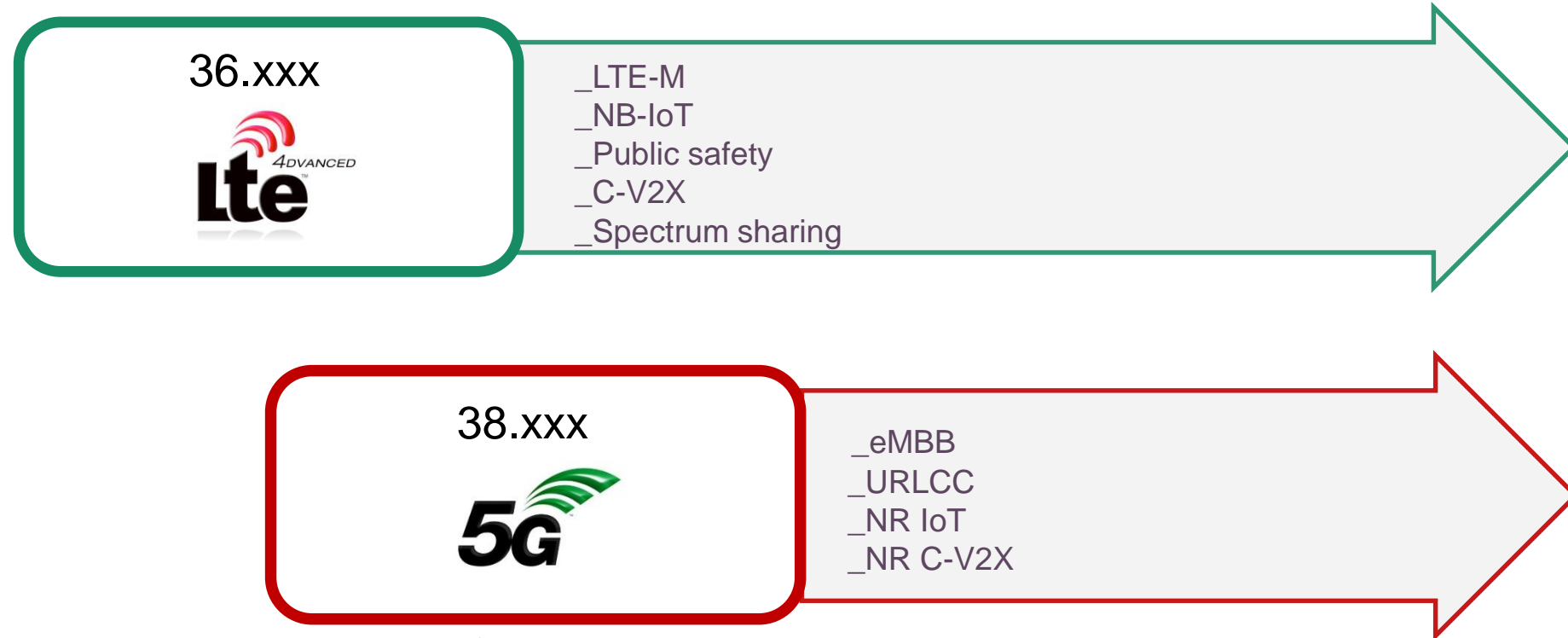
- メッシュネットワークシミュレーション



100%



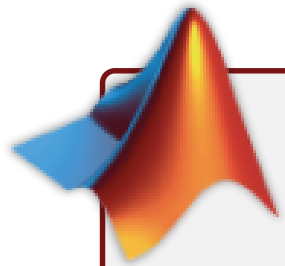
5G および LTE



MATLABサポート 3GPP Rel. 15, December 2019

~~Challenges~~

5G Toolbox



仕様を読んで理論
を理解



アルゴリズム開発

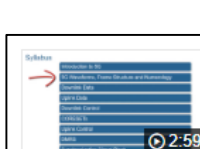


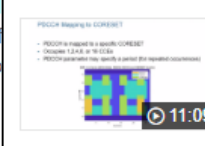
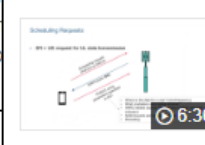


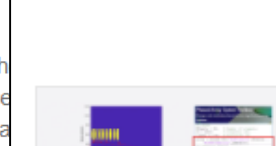



テストおよび検証

5G Toolbox で自身の担当にフォーカス可能

5G について

5G New Radio (NR) の規格の概念について参照可能なビデオ

 <p>About the Series The video outlines the main goals of the series and introduces the basic configuration of 5G NR.</p> <p>Introduction to 5G NR PHY Learn about use cases, requirements, and the differences between 5G New Radio (NR) and LTE, as well as the frequency ranges for 5G NR. You'll also learn about frequency ranges FR1 and FR2.</p> <p>5G Waveforms, Frame Structure, and Numerology Explore the basics behind 5G NR waveforms and numerology. This video also explains how flexible numerology helps reduce power consumption.</p> <p>Downlink Data in 5G NR Learn about downlink data transmission, including the downlink shared channel chain, which includes channel coding, modulation, and PDSCH mapping, and precoding.</p>	 <p>Uplink Data in 5G NR Learn about uplink data transmission, including elements already found in the downlink chain including LDPC coding, modulation, and the two types of PUSCH mapping, and precoding.</p>  <p>Downlink Control Information in 5G NR Learn about downlink control information, including its content, encoding, modulation, and transmission via the PDCCH or physical downlink control channel.</p>  <p>CORESET and PDCCH in 5G NR Learn about CORESETs, to which the PDCCH gets mapped. The video shows how CORESET and PDCCH using an interactive example to simplify control information design.</p>  <p>Uplink Control Information in 5G NR Learn about uplink control information, including its content, encoding, modulation, and transmission via the PUCCH or physical uplink control channel.</p>	 <p>Demodulation Reference Signals in 5G NR Learn about demodulation reference signals (DMRS) in 5G New Radio, including their use in channel estimation and the different configurations for signal and multi-user MIMO.</p>  <p>Synchronization Signal Blocks in 5G NR Learn about the synchronization signal block (SSB) in 5G New Radio (NR), which is comprised of the primary and secondary synchronization signals and the broadcast channel. You'll also learn about its role in synchronization.</p>  <p>Initial Acquisition Procedures in 5G NR Learn about initial acquisition procedures, including cell search based on the synchronization signal block (SSB), extraction of the master information block (MIB), and the random access procedure.</p>  <p>Signals for Channel Sounding in 5G NR Learn about the signals in 5G New Radio (NR) that enable channel sounding. Those signals include the channel state information reference signals (CSI-RS) on the downlink and sounding reference signals (SRS) on the uplink.</p>
---	---	---

<https://jp.mathworks.com/videos/series/5g-explained.html>

5G Toolbox 特長

- 5G固有の関数と例
- 広範なドキュメント
- 外部ソースに対して検証済み
- 完全なMATLABソースコード
- Cコード生成サポート



内容

- はじめに
- 5G シミュレーション環境**
- 5G信号生成/解析(シミュレーション/測定)
- 各種SDR機器を使用したプロトタイピング
- まとめ

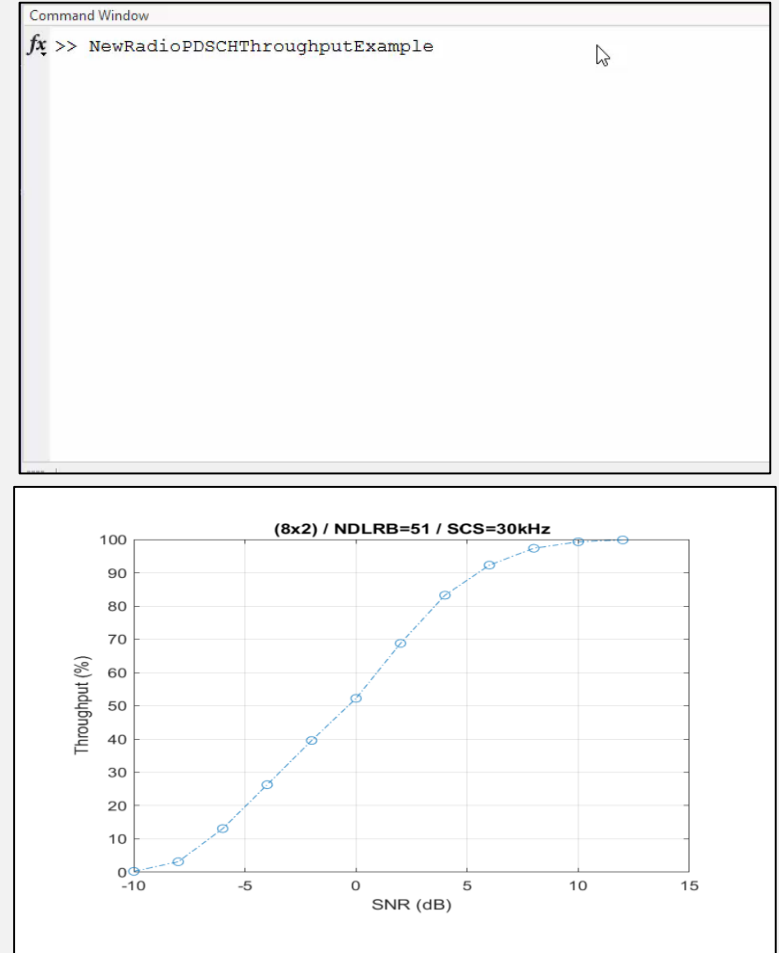
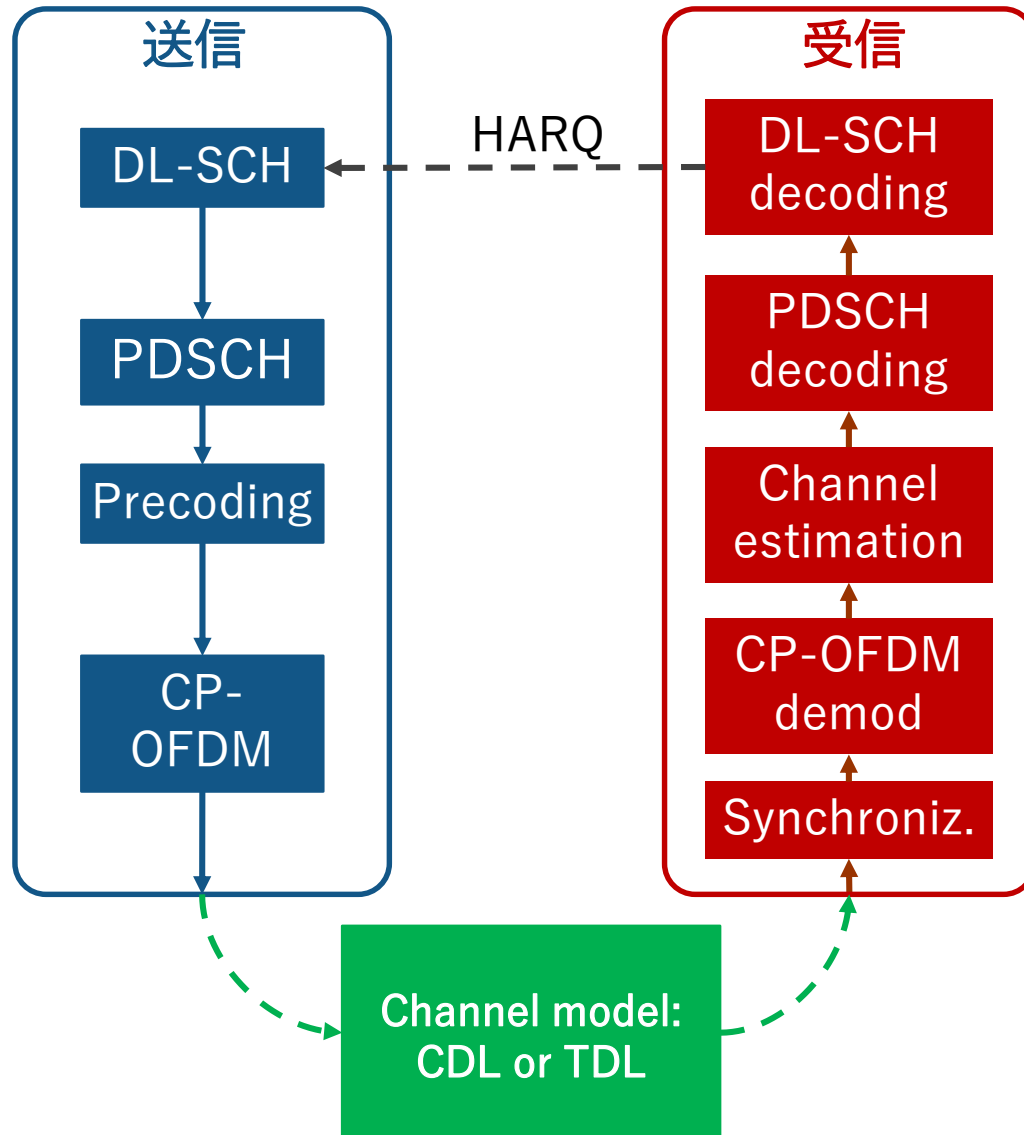


5G Toolbox™ は、5G New Radio (NR) 通信システムのモデリング、シミュレーション、検証を目的とした、規格に準拠した関数や参照例を提供します。このツールボックスでは、リンクレベルシミュレーション、ゴールデン リファレンスによる検証およびコンフォーマンステスト、テスト波形生成をサポートしています。

また、エンドツーエンド 5G NR 通信リンクの構成、シミュレーション、測定、解析が可能です。ツールボックスの関数を変更またはカスタマイズして、5G システムや 5G デバイスに参照モデルとして実装する際にも使用できます。

このツールボックスには関数と参照例が用意されており、アップリ

エンドツーエンドシミュレーション: NR PDSCHスループット

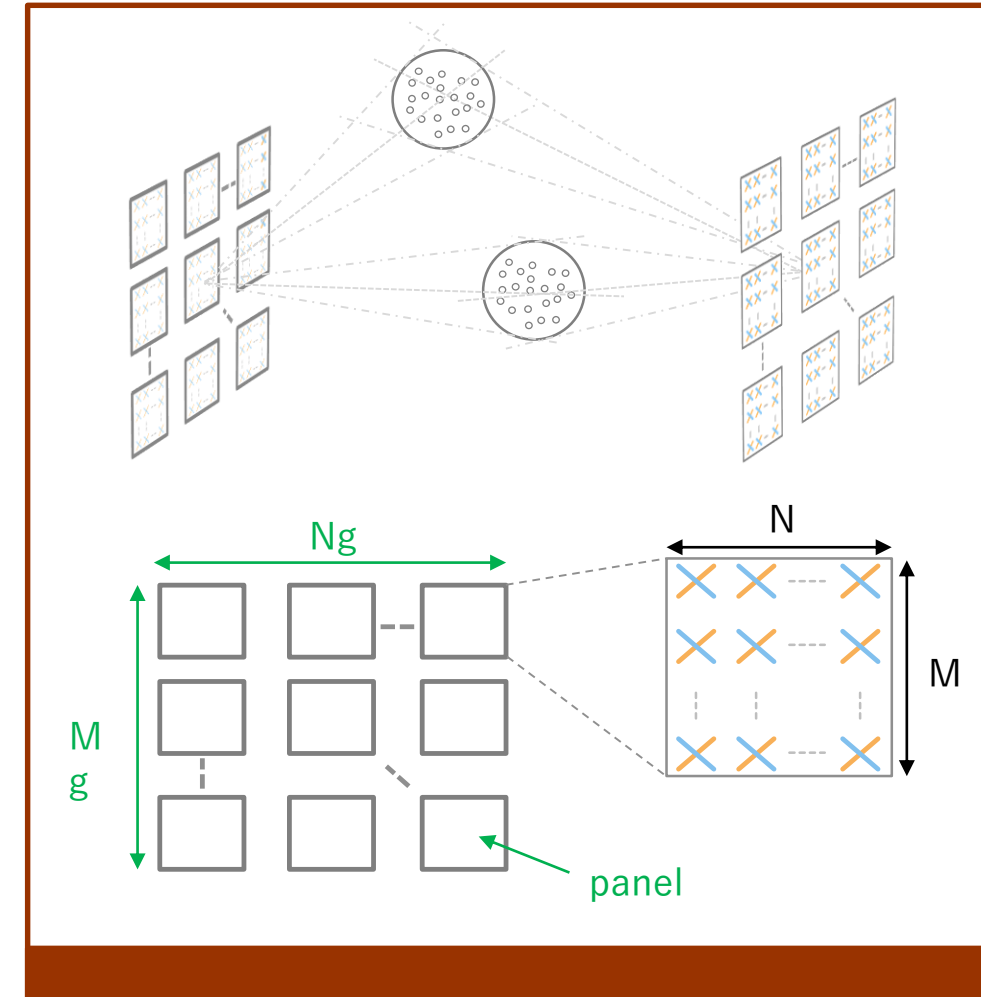


5G チャネルモデル

5GチャネルモデルTR 38.901の実装

5Gチャネルモデルの機能

- 遅延プロファイル：TDLおよびCDLプロファイル：A、B、C、D、Eまたはカスタム
- チャネル遅延スプレッド
- ドップラーシフト Doppler shift
- MIMO 相関
- CDL: 空間チャネルモデル, 以下もサポート:
 - アレイアンテナ 配列 $[M, N, P, M_g, N_g]$



その他伝搬チャネル

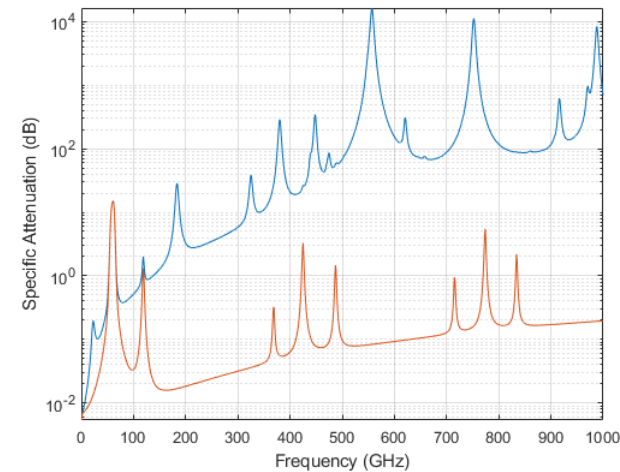
- フリースペース伝搬の損失
- 大気ガスによる減衰
- 霧と雲による減衰
- MIMOマルチパスフェージングチャネル
- Winner IIフェージングチャネル

Communications Toolbox

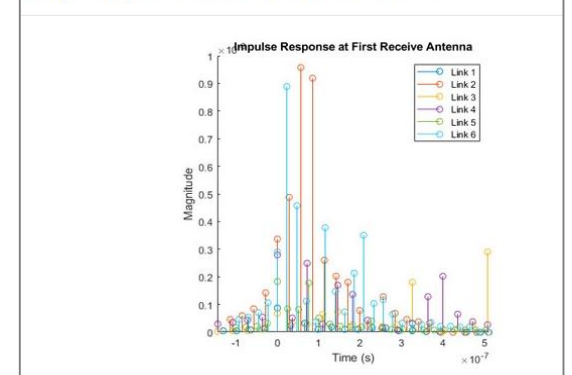
Design and simulate the physical layer of communications systems

Phased Array System Toolbox

Design and simulate phased array signal processing systems

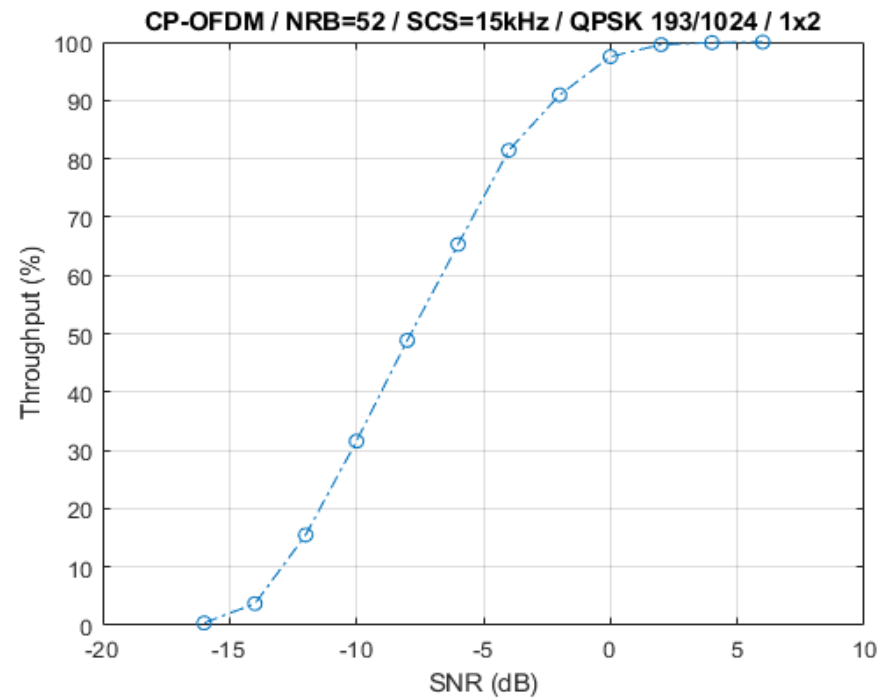


Multiple fading channels with WINNER II channel model.



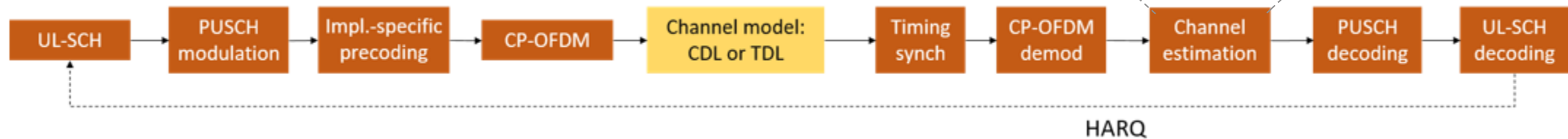
5G アップリンク例

スループット解析



コードはEdit可能

```
% Practical channel estimation between the received grid and  
% each transmission layer, using the PUSCH DM-RS for each layer  
[~,dmrsLayerIndices,dmrsLayerSymbols] = hPUSCHResources(ue,setfield(pusch,'  
[estChannelGrid,noiseEst] = nrChannelEstimate(rxGrid,dmrsLayerIndices,dmrsL
```



内容

- はじめに
- 5G シミュレーション環境
- 5G信号生成/解析(シミュレーション/測定)
- 各種SDR機器を使用したプロトタイピング
- まとめ



5G Toolbox™ は、5G New Radio (NR) 通信システムのモデリング、シミュレーション、検証を目的とした、規格に準拠した関数や参照例を提供します。このツールボックスでは、リンクレベルシミュレーション、ゴールデン リファレンスによる検証およびコンフォーマンステスト、テスト波形生成をサポートしています。

また、エンドツーエンド 5G NR 通信リンクの構成、シミュレーション、測定、解析が可能です。ツールボックスの関数を変更またはカスタマイズして、5G システムや 5G デバイスに参照モデルとして実装する際にも使用できます。

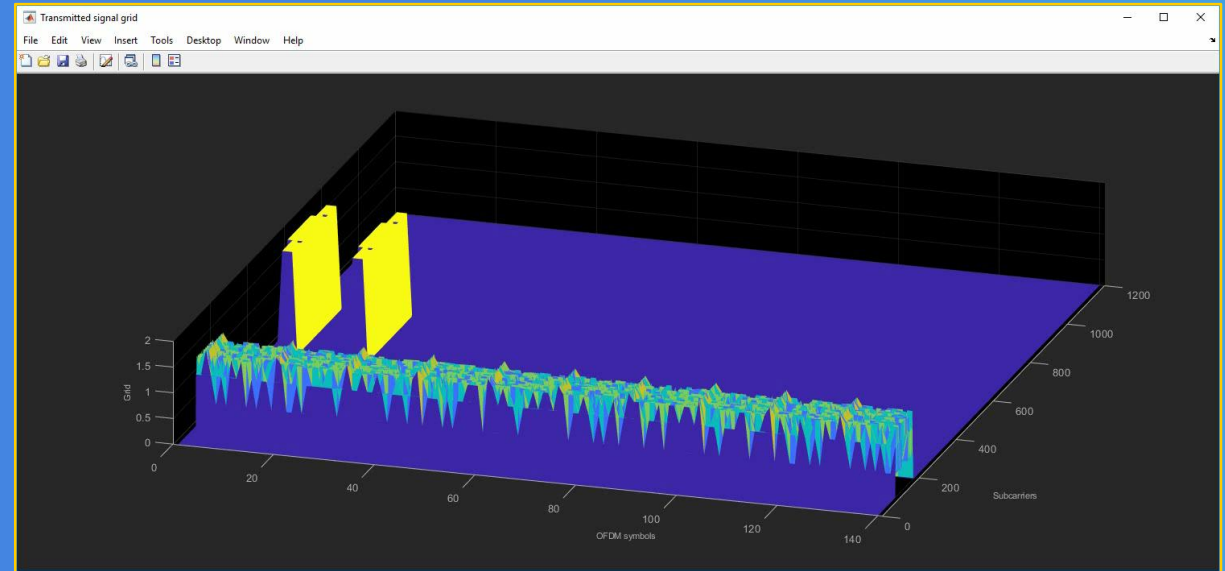
このツールボックスには関数と参照例が用意されており、アップリ

5G 信号生成

5G Toolbox ダウンリンクおよびアップリンクの波形生成をサポート

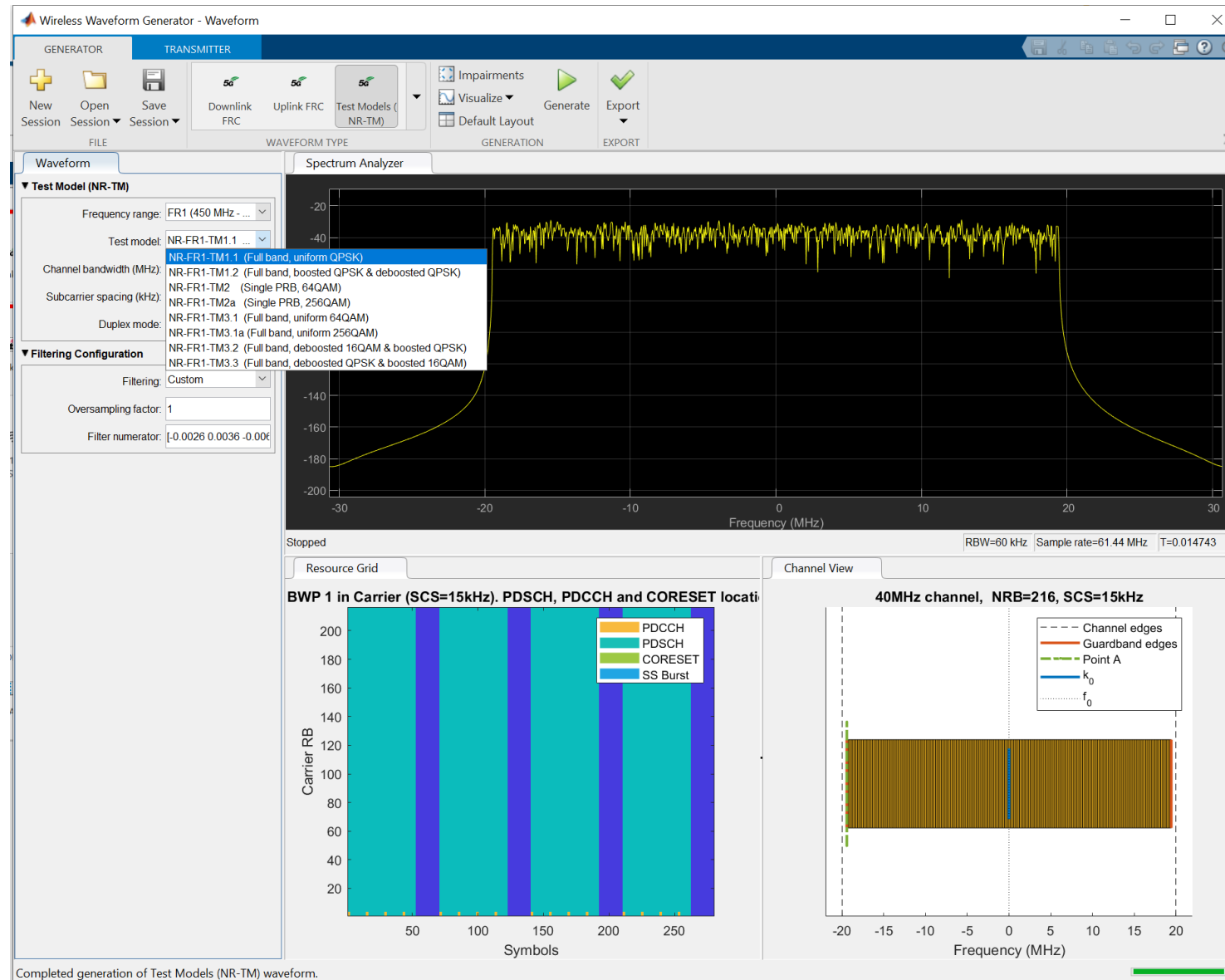
信号生成機能

- Numerologyの混在
- 複数のbandwidth parts
- 複数の PDSCH / PUSCH
- 完全にパラメーター化可能なSSバースト



Power levels have been modified to improve visualization

GUIから信号生成



GUI上からダイレクトに測定器をコントロール Instrument Control Toolbox : RF信号発生器から信号出力

- サポートされているRF信号発生器からGUI上から容易に信号生成が可能

```
rf = rfsiggen();
```

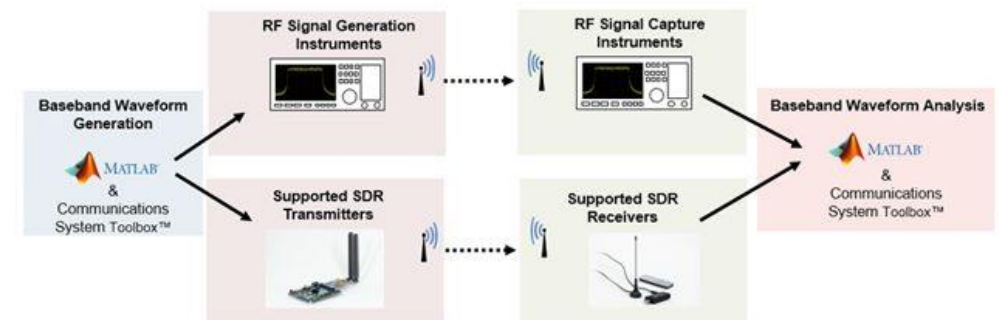
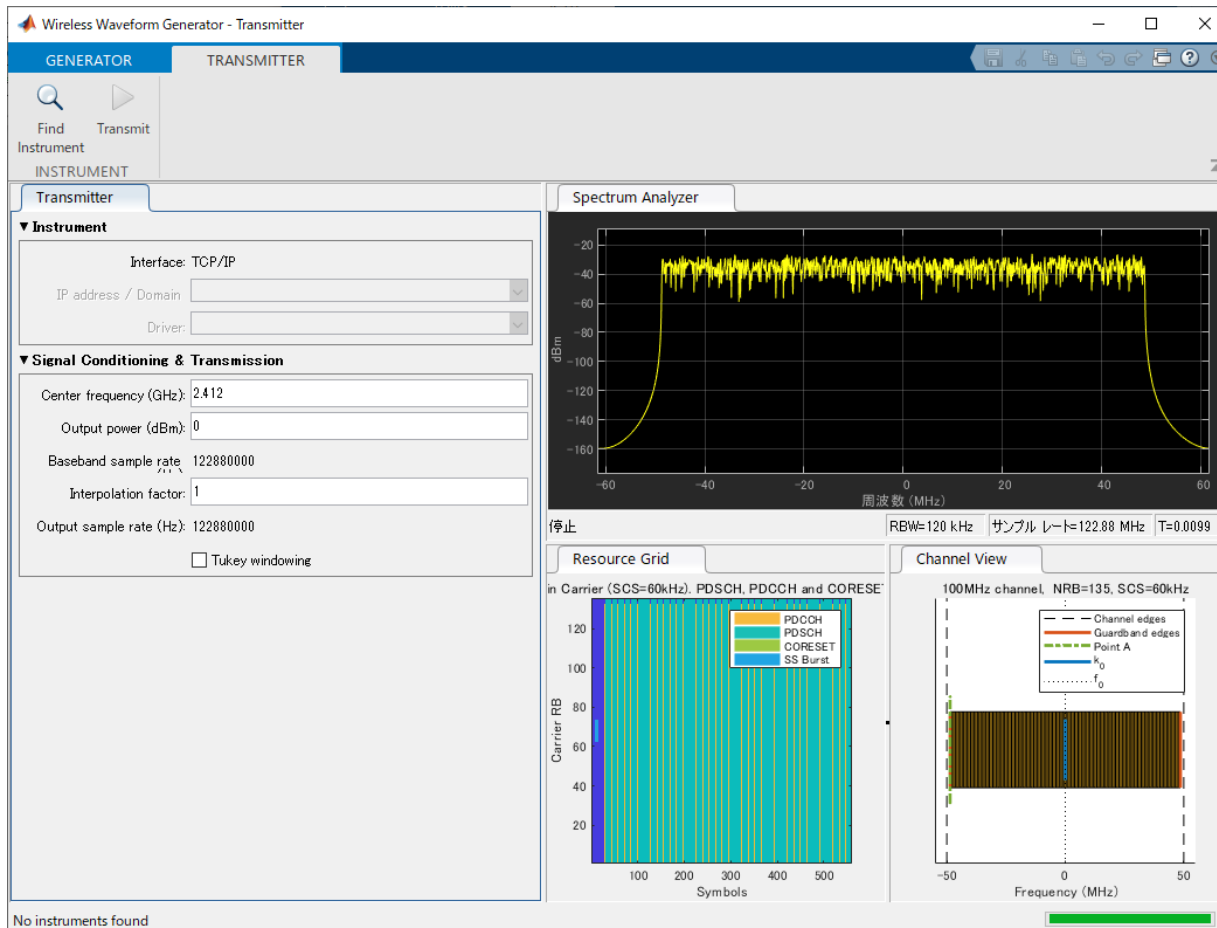
```
rf.drivers
```

```
ans =
```

```
'Driver: AgRfSigGen_SCPI  
Supported Models:  
E4428C, E4438C
```

```
Driver: RsRfSigGen_SCPI  
Supported Models:  
SMW200A, SMBV100A, SMU200A, SMJ100A, AMU200A, SMATE200A
```

```
Driver: AgRfSigGen  
Supported Models:  
E4428C, E4438C, N5181A, N5182A, N5183A, N5171B, N5181B, N5172B  
N5182B, N5173B, N5183B, E8241A, E8244A, E8251A, E8254A, E8247C
```



5G 信号生成

5G NR-TM and FRC Waveform Generation

This example shows how to generate standard-compliant 5G NR test models (NR-TMs) and downlink fixed reference channels (FRCs) for frequency range 1 (FR1) and FR2. For the NR-TM and FRC waveform generation, you can specify the NR-TM or FRC name, the channel bandwidth, the subcarrier spacing, and the duplexing mode.

% Select the NR-TM or FRC waveform parameters

```
nrref = NR-FR1-TM3.2 (...); % Model name and properties
bw = 10MHz (FR1); % Channel bandwidth
scs = 15kHz (FR1); % Subcarrier spacing
dm = FDD; % Duplexing mode
ncellid = 1; % NCellID
sv = V15.2.0; % TS 38.141-x version (NR-TM only)
```

% Run this entire section to generate the required waveform

Generate

```
% Create generator object for the above reference model
refwavegen = hNRReferenceWaveformGenerator(nrref,bw,scs,dm,ncellid,sv)
```

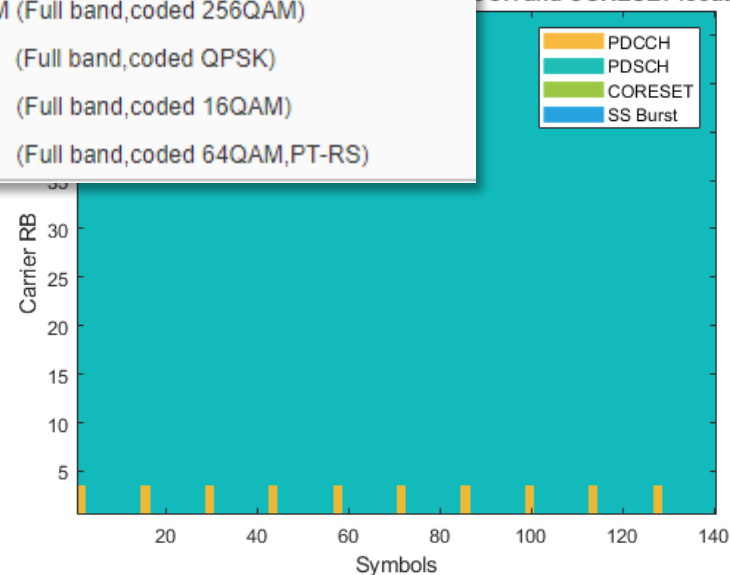
% Generate waveform

```
[refwaveform,refwaveinfo] = generateWaveform(refwavegen);
```

NR-FR1-TM3.2 (...); % Model name and properties

- NR-FR1-TM1.1 (Full band,uniform QPSK)
- NR-FR1-TM1.2 (Full band,boosted QPSK & deboosted QPSK)
- NR-FR1-TM2 (Single PRB,64QAM)
- NR-FR1-TM2a (Single PRB,256QAM)
- NR-FR1-TM3.1 (Full band,uniform 64QAM)
- NR-FR1-TM3.1a (Full band,uniform 256QAM)
- NR-FR1-TM3.2 (Full band,deboosted 16QAM & boosted QPSK)**
- NR-FR1-TM3.3 (Full band,deboosted QPSK & boosted 16QAM)
- NR-FR2-TM1.1 (Full band,uniform QPSK,PT-RS)
- NR-FR2-TM2 (Single PRB,64QAM,PT-RS)
- NR-FR2-TM3.1 (Full band,uniform 64QAM,PT-RS)
- DL-FRC-FR1-QPSK (Full band,coded QPSK)
- DL-FRC-FR1-64QAM (Full band,coded 16QAM)
- DL-FRC-FR1-256QAM (Full band,coded 256QAM)
- DL-FRC-FR2-QPSK (Full band,coded QPSK)
- DL-FRC-FR2-16QAM (Full band,coded 16QAM)
- DL-FRC-FR2-64QAM (Full band,coded 64QAM,PT-RS)

CCH and CORESET location



5G NR ダウンリンク ACLR 解析

```
% Select the NR-TM waveform parameters
nrtm = NR-FR1-TM1.1 (...); % NR-TM name and properties
bw = 20MHz (FR1); % Channel bandwidth
scs = 15kHz (FR1); % Subcarrier spacing
dm = FDD; % Duplexing mode

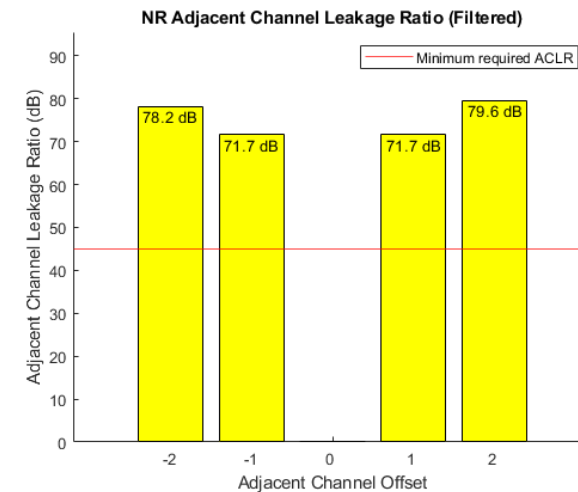
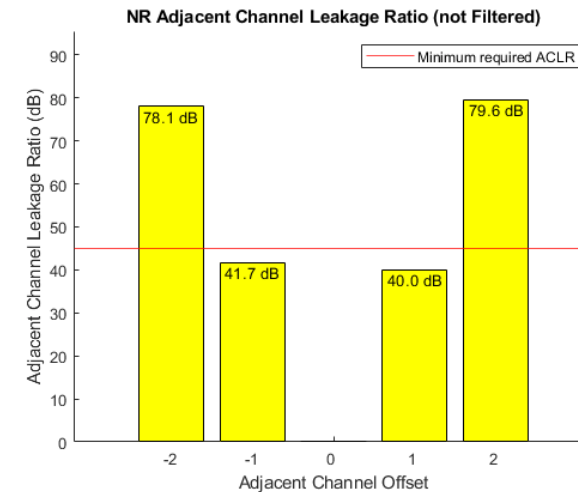
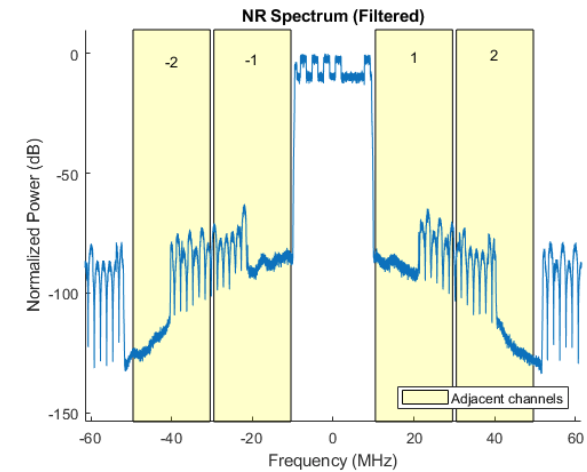
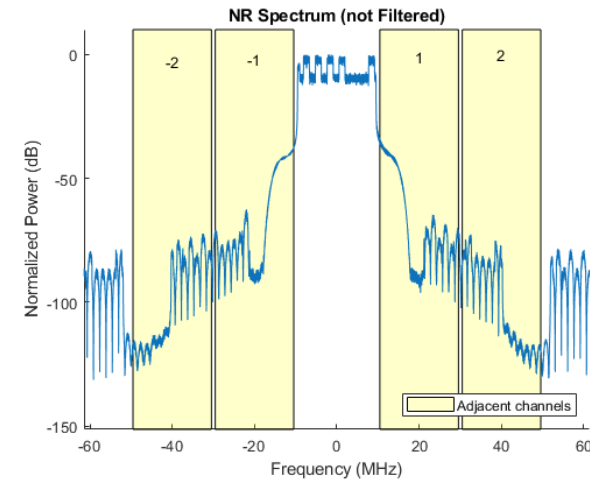
% Create generator object for the above NR-TM
tmwavegen = hNRReferenceWaveformGenerator(nrtm,bw,scs,dm);

% Generate waveform
[tmwaveform,tmwaveinfo] = generateWaveform(tmwavegen);
samplingrate = tmwaveinfo.Info.SamplingRate; % Waveform sampling rate (Hz)

% Visualize the associated PRB and subcarrier resource grids
displayResourceGrid(tmwavegen);

% Apply required oversampling
resampled = resample(filtWaveform,aclr.OSR,1);

% Calculate NR ACLR
aclr = hACLRMeasurementNR(aclr,resampled);
```

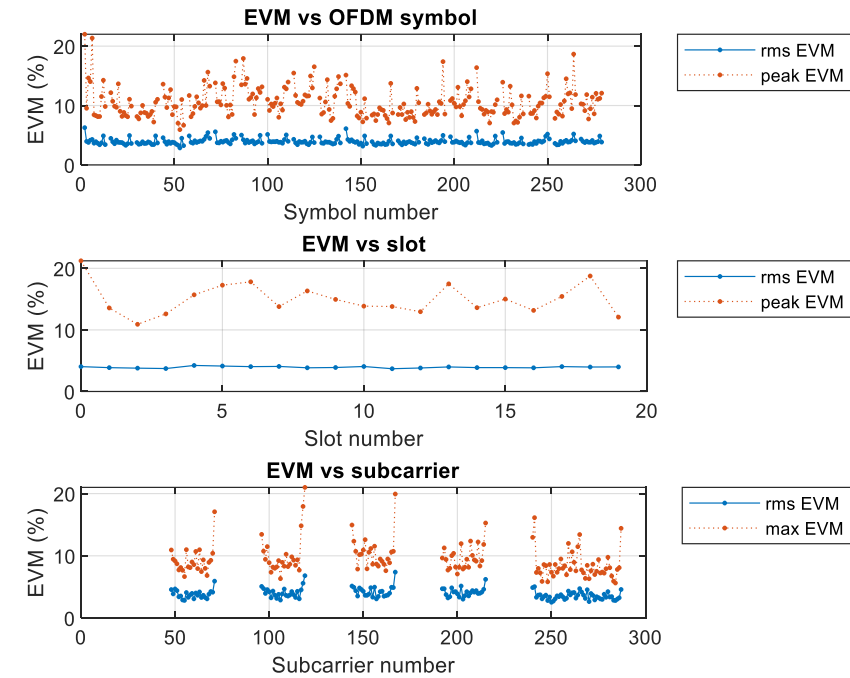
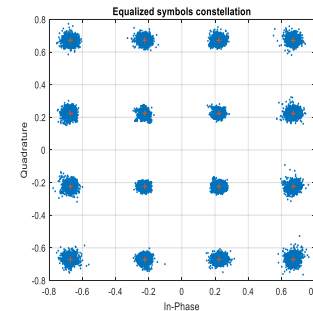
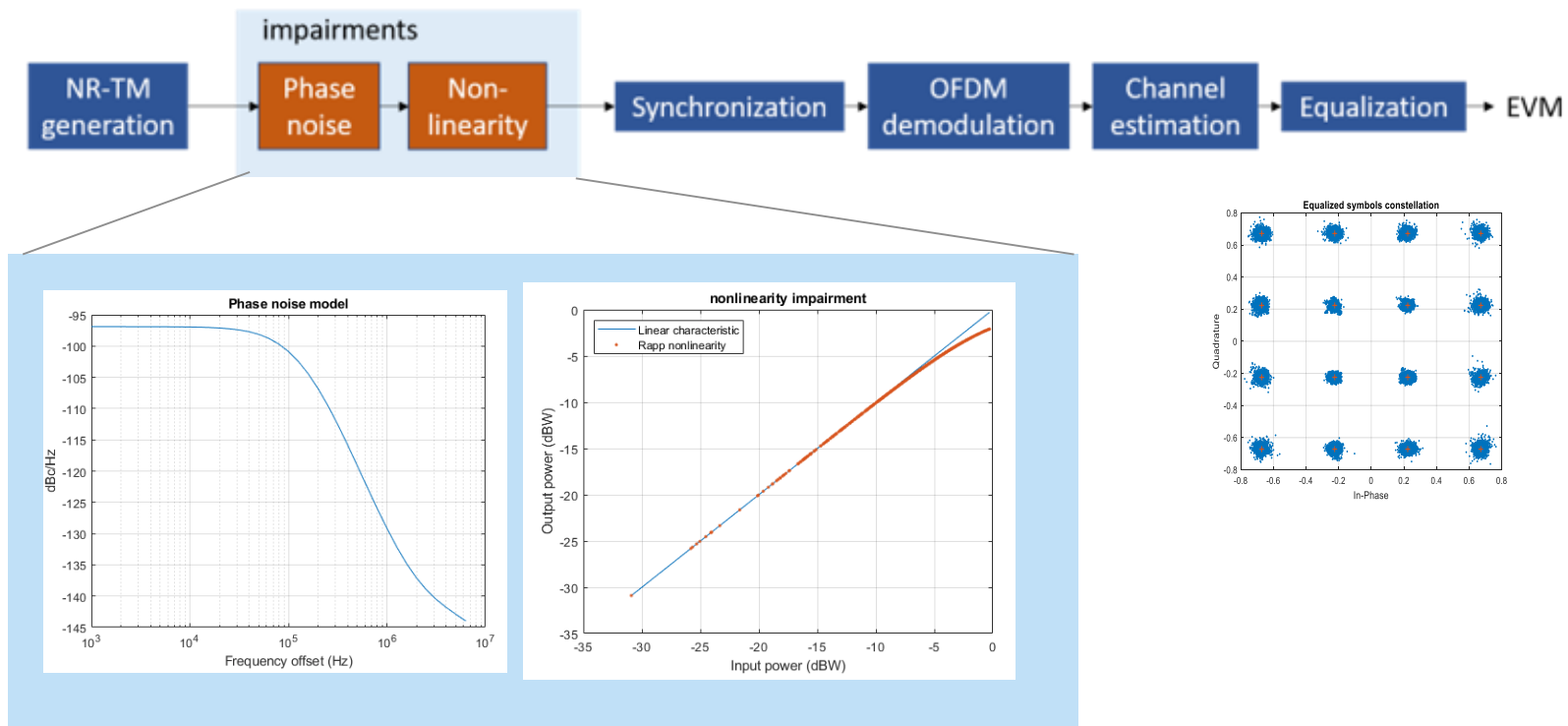


without filter

with filter

5G NR ダウンリンク EVM 解析

- RF特性を含めたEVM解析



MATLABの解析機能を実測に活用

■ Instrument Control Toolboxを使用してダイレクトに測定器をコントロール

MATLABで信号生成/解析

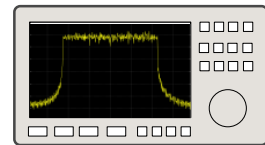
- 妨害信号の生成等、フレキシブルな信号生成
- ご自身のアルゴリズムを活用

測定器を自動制御

- 測定器を制御して、自動測定系実現可能

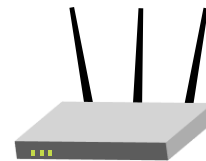


IQ
⇒
⇐



RF 信号発生器
/アナライザ

RF
⇒
⇐



DUT

シグナルアナライザから信号を取り込み

- RFの信号をI/Qベースバンド信号でMATLABで同期、チャネル推定後解析
- 送受信で測定器と連携して、RFデバイスの解析で活用

```
% Create generator object for NR-TM/PDSCH FRC reference model
wavegen = hNRReferenceWaveformGenerator(dlnrref,bw,scs,dm,ncellid,sv);

% Generate Waveform
[dlrefwaveform,~,~] = generateWaveform(wavegen);

% Configure and connect to the signal generator
rf = rfsiggen;
rf.Resource = 'TCPIP0::172.28.21.217::inst0::INSTR';
rf.Driver = 'AgRfSigGen';
connect(rf);
reset(rf);

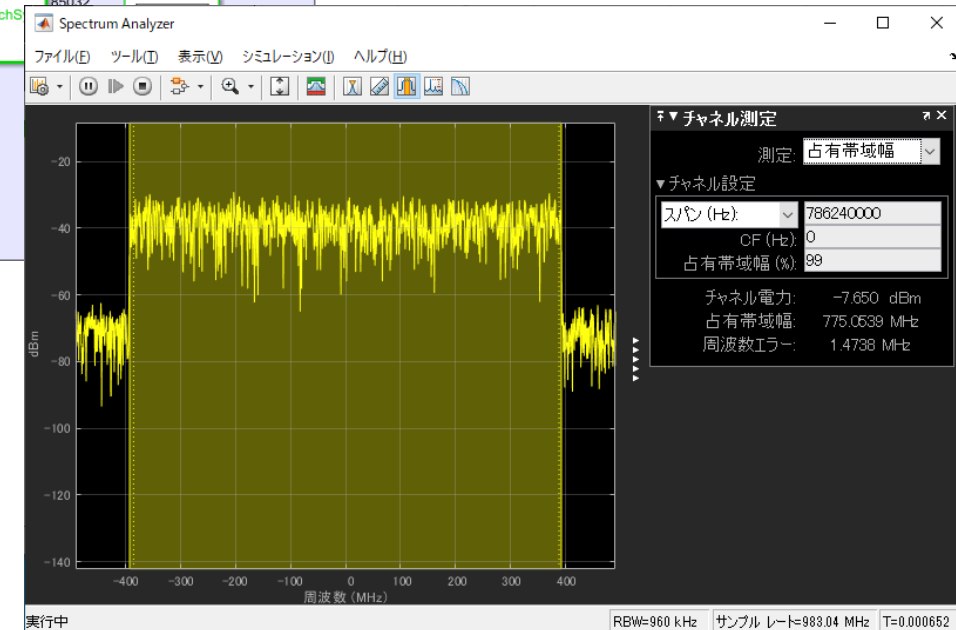
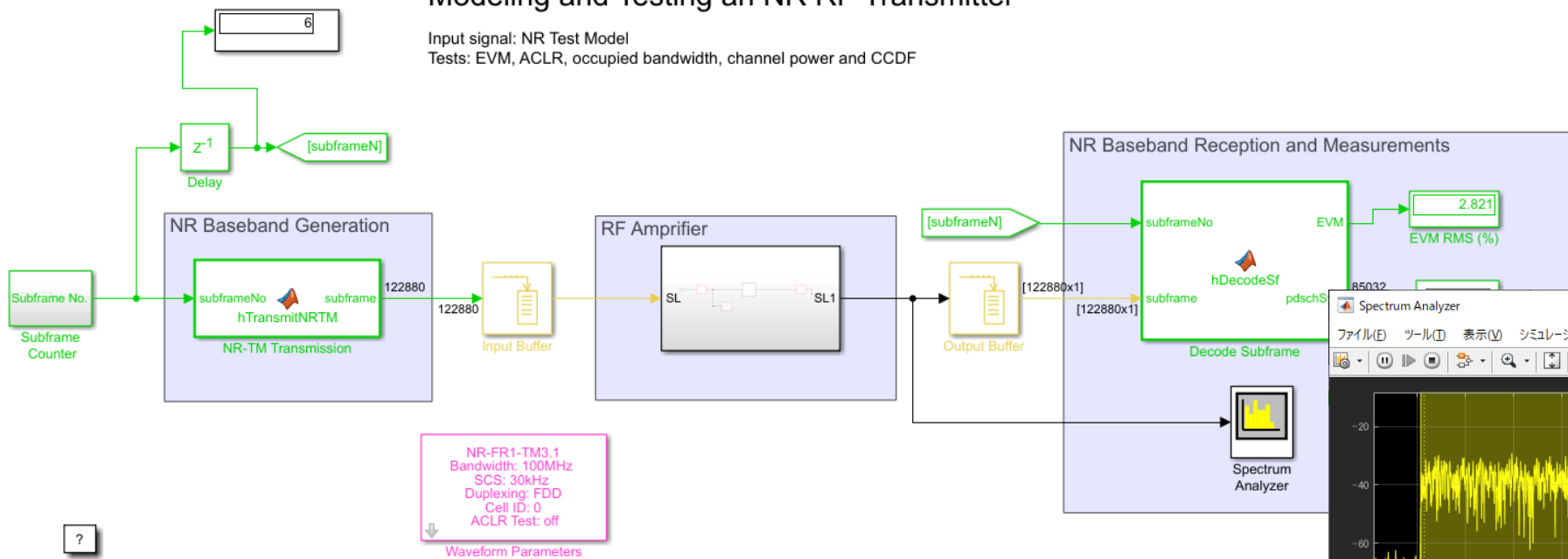
% Download the waveform and loop
download(rf,transpose(txWaveform),sampleRate);
centerFrequency = 5.26e9;
outputPower = 0;
loopCount = Inf;
start(rf,centerFrequency,outputPower,loopCount);
```

5 Gの先を見据えて

■ 5 Gでの解析を広帯域信号でRF特性解析

Modeling and Testing an NR RF Transmitter

Input signal: NR Test Model
Tests: EVM, ACLR, occupied bandwidth, channel power and CCDF



5G: サンプリング周波数122.88MHz
ベースを8倍のサンプリング122.88x8=983.04MHz
でシミュレーション

内容

- はじめに
- 5G シミュレーション環境
- 5G信号生成/解析(シミュレーション/測定)
- 各種SDR機器を使用したプロトタイピング
- まとめ

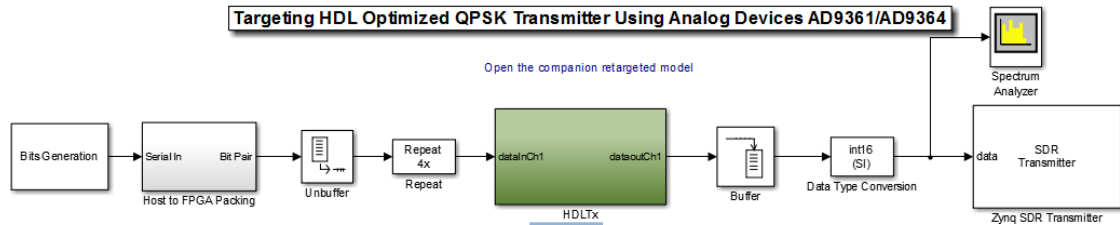


5G Toolbox™ は、5G New Radio (NR) 通信システムのモデリング、シミュレーション、検証を目的とした、規格に準拠した関数や参照例を提供します。このツールボックスでは、リンクレベルシミュレーション、ゴールデン リファレンスによる検証およびコンフォーマンステスト、テスト波形生成をサポートしています。

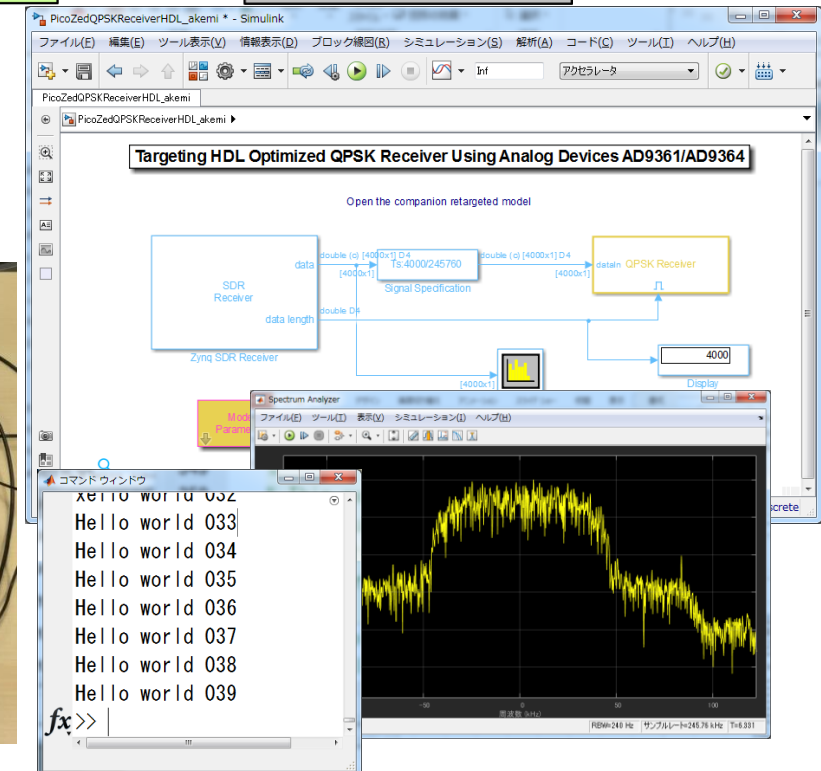
また、エンドツーエンド 5G NR 通信リンクの構成、シミュレーション、測定、解析が可能です。ツールボックスの関数を変更またはカスタマイズして、5G システムや 5G デバイスに参照モデルとして実装する際にも使用できます。

このツールボックスには関数と参照例が用意されており、アップリ

-
- PC
MATLAB
信号処理
- Ethernet
Cable/USB
- FPGA
MATLABで設計
送信用
- RF
- RF
- FPGA
MATLABで設計
受信用
- Ethernet
Cable/USB
- PC
MATLAB
信号処理



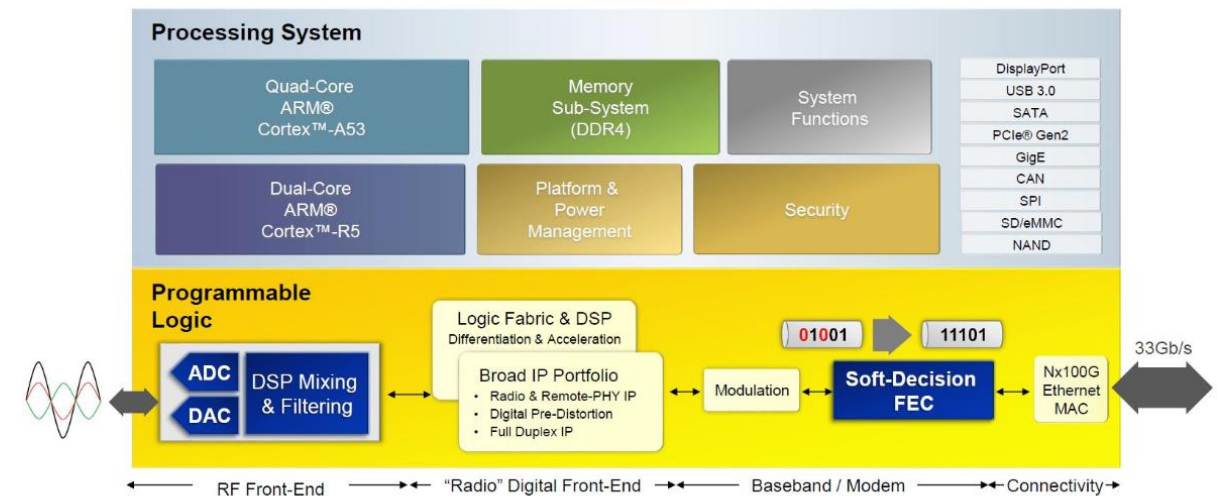
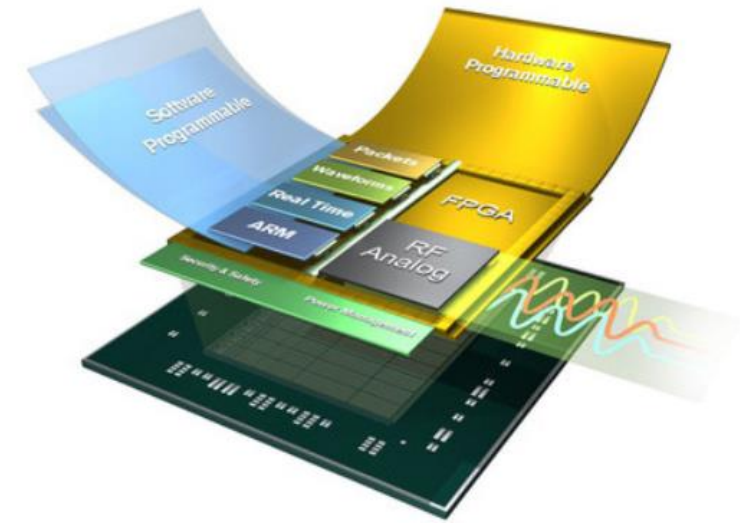
FPGAに実装



* 弊社では送信機⇔受信機間は常にケーブルで接続しています

Zynq RFSoc ZCU111評価ボード対応 *SoC Blockset™*

- *SoC Blockset*機能でZynq RFSoc ZCU111ボードへの実装が可能
- RF Data Converterブロックを提供
- HWとSWの両方を実装可能
 - HDL CoderとEmbedded Coderが必要



Integrating the RF Signal Chain

RF Data Converterブロック

ブロックパラメーター: RF Data Converter

RF Data Converter (mask) (link)

Provide RF data path interfaces to hardware logic.

The block accepts 16-bit samples packed into 16, 32, 64, or 128 bits through dacxData ports and outputs a vector of N samples through dacx ports. The block accepts a vector of N samples through adcx ports and outputs 16-bit samples packed into 16, 32, 64, or 128 bits through adcxData ports based on the N value. N indicates the number of samples per clock cycle and the possible values of x range from 1 to 8. The block supports a maximum of eight ADC and eight DAC data paths connecting to the hardware logic.

Set the RF interface parameter to select the required number of DACs and ADCs. In the DAC tab, set DAC parameters and in the ADC tab, set ADC parameters.

パラメーター

RF interface: ADC & DAC 8x8 RF Interface

Digital interface: Real

☐ Multi tile sync

DAC ADC

Sample rate (MSPS): 2048

Interpolation mode (xN): 4

Samples per clock cycle: 4

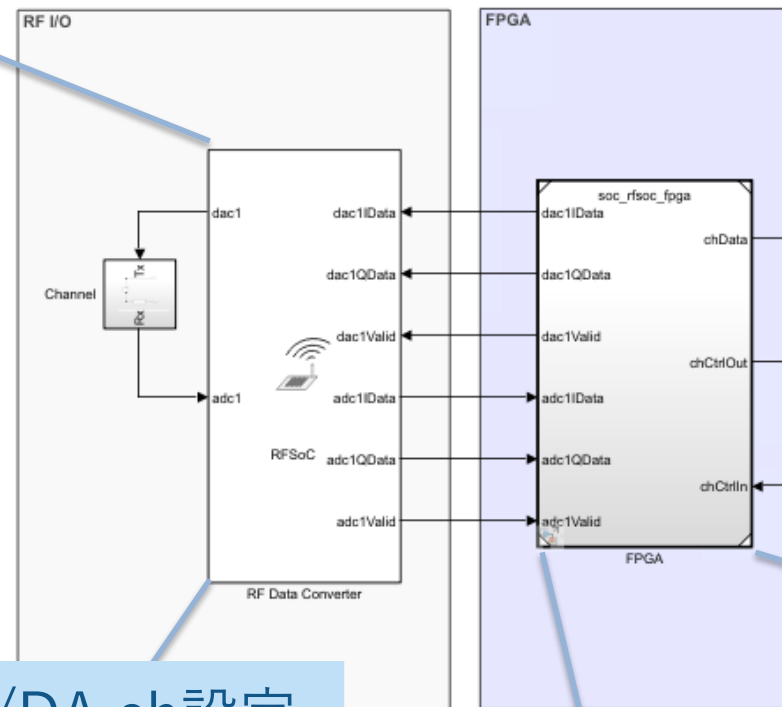
Stream data width (bits): 64

Stream clock frequency (MHz): 128

Mixer type: Bypassed

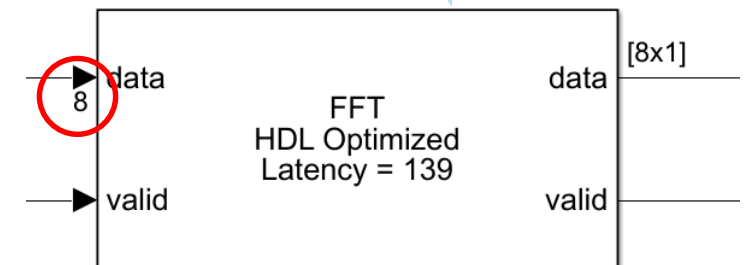
Mixer mode: Real->Real

☐ Inverse sinc filter



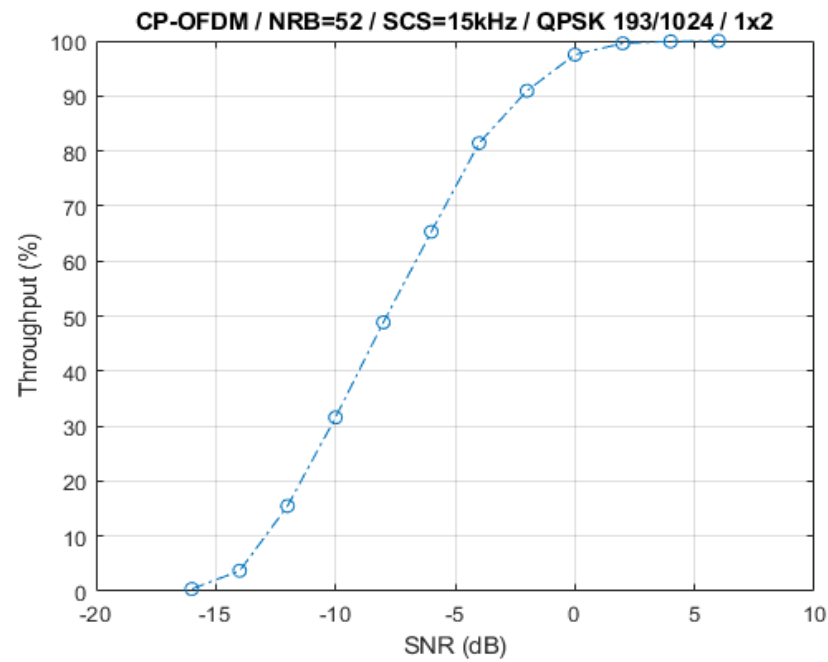
AD/DA ch設定

GSPS(Gigasample/sec) に対応したフレーム処理が可能な
FFTやFIRフィルタブロック

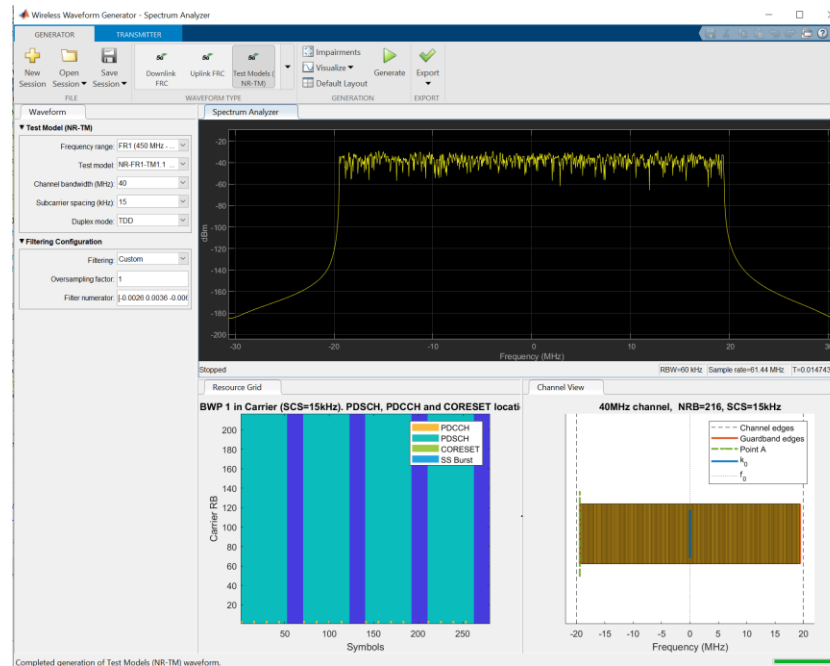


まとめ

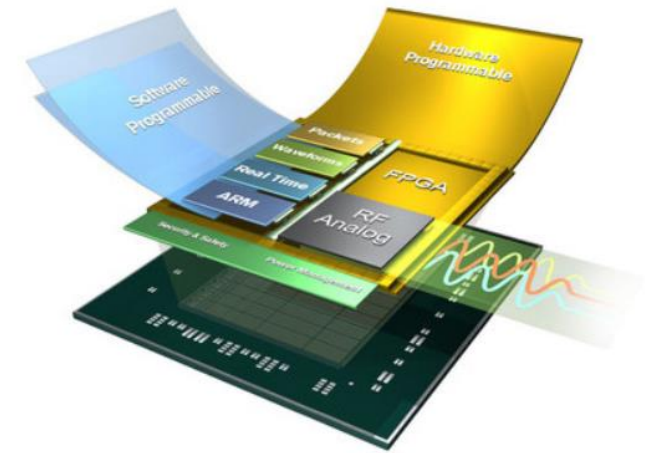
5G シミュレーション



5G NR 信号生成/解析



プロトタイピング



5G Toolbox でシミュレーションからプロトタイピング、測定まで活用

各種コンテンツ

5G Toolbox 製品ページ

jp.mathworks.com/products/5g

5G Toolbox ビデオを参照

5G Explained シリーズを参照

ホワイトペーパーをダウンロード

Testing 5G NR Devices with Standard Waveforms

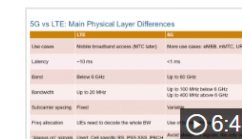
Video and Webinar Series

Search Videos

Videos Home Search

5G Explained

The video series explains key concepts behind the 5G New Radio (NR) physical layer standard. You will learn about the requirements and use cases of 5G and the resulting differences between the 5G and LTE standards. Each video offers a deep dive into the technologies and concepts behind 5G NR, including 5G waveforms, frame structure and numerology, downlink and uplink data, Control Resource Sets (CORESETs), demodulation reference symbols (DMRS), synchronization signal blocks (SSB), Cell Search and RACH procedures, and channel estimation.



Introduction to 5G NR PHY

Learn about use cases, requirements, some of the main differences between 5G New Radio (NR) and LTE, and deployment scenarios for 5G NR. You'll also learn about frequency ranges for 5G NR, FR1 and FR2.



5G Waveforms, Frame Structure, and Numerology

Explore the basics behind 5G NR waveforms, frame structure, and numerology. This video also explains how adaptive bandwidth parts help reduce power consumption.

<https://jp.mathworks.com/videos/series/5g-explained.html>