

信号発生器の基礎



ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



アジェンダ

- ▶ 信号発生器の種類
- ▶ アナログ信号発生器の基礎
 - 信号品質
 - アナログ変調
- ▶ ベクトル信号発生器の基礎
 - ベクトル信号とは
 - 変調方式とアプリケーション
 - ベースバンドとIQ
 - 妨害とフェージング
- ▶ まとめ



信号発生器の種類

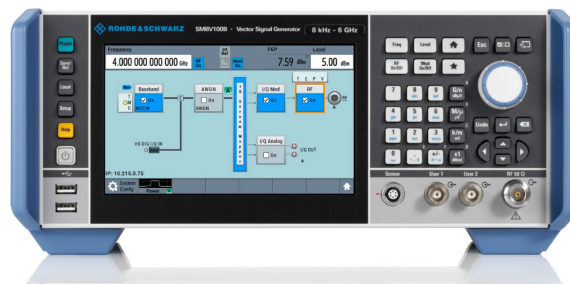
- アナログ信号発生器

- 連続波（搬送波）
- アナログ変調
 - 振幅変調（AM）
 - 周波数変調（FM）
 - 位相変調（PM）
- パルス変調
- アビオニクス（例：VOR, ILS, など）



- ベクトル信号発生器

- 任意のデジタルまたはアナログ信号を作成できます
 - デジタル信号 (Wi-Fi, LTE, GNSS, など)
 - 特殊な信号 (例：MCCW)
 - 任意波形ファイル
- 妨害およびフェージング



どこでアナログ信号発生器は使用されるのか？

- アナログ信号発生器アプリケーション：
 - 高品質の信号（例：ローカル発振器の置換）
 - ゲイン、直線性、帯域幅などの測定
 - コンポーネントの開発/テスト（例：ADC）
 - レシーバーテスト（ツートーンテスト、干渉またはブロッキング信号の作成）
- EMCテスト
- アビオニクスアプリケーション（VOR, ILSなど）
- 軍事 / レーダーアプリケーション
- ベクトル信号源に対するアナログ信号源の主な2つの優位点：
 - 費用
 - 信号品質



アナログ信号品質

アナログ信号発生器は、高品質なRF信号の生成に優れています

周波数

- 範囲
- 確度
- ドリフト
- 設定時間

レベル

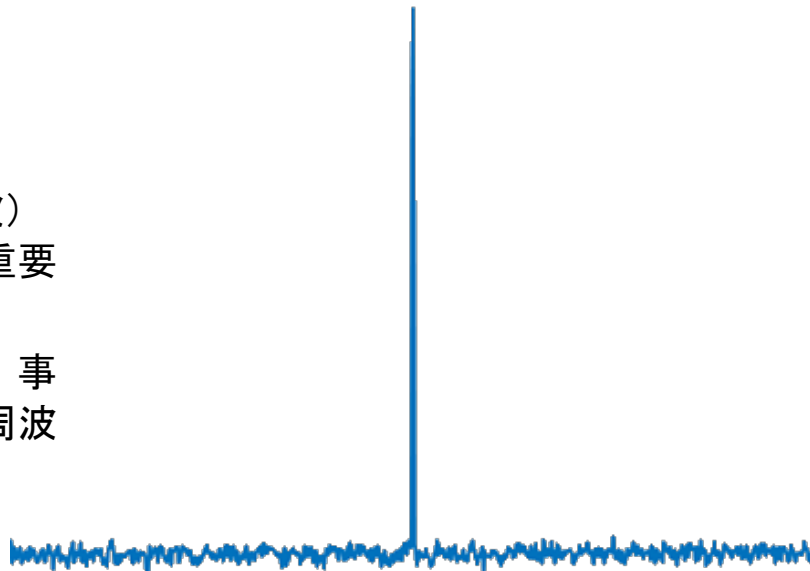
- 範囲
- 確度
- リニアリティ
- 繰り返し
- 設定時間

スペクトル純度

- 位相雑音
- 広帯域ノイズ
- 高調波
- スプリアス

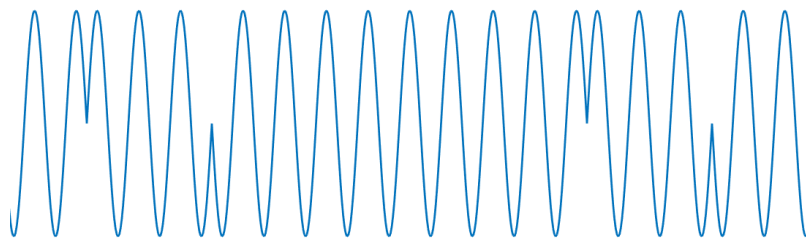
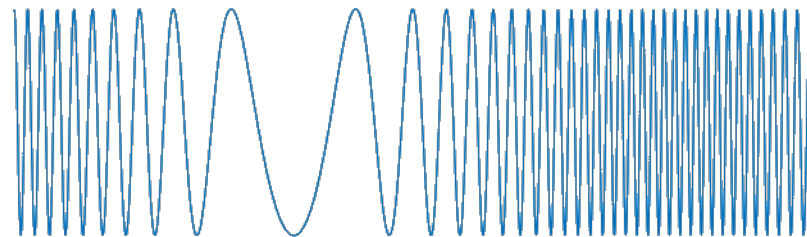
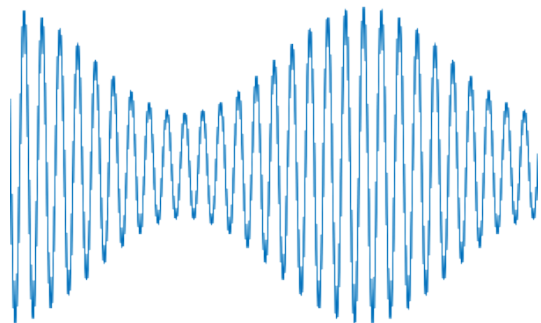
非変調 (CW) 信号

- 単純な変調されていない搬送波（正弦波）信号
- 基本設定：
 - 周波数
 - レベル
- 高品質でスペクトル的に純粋なCW（連続波）信号は、多くのアプリケーションで非常に重要です
- リストモードとスイープモードを使用して、事前定義されたユーザー指定の値を使用して周波数やレベルを変更できます



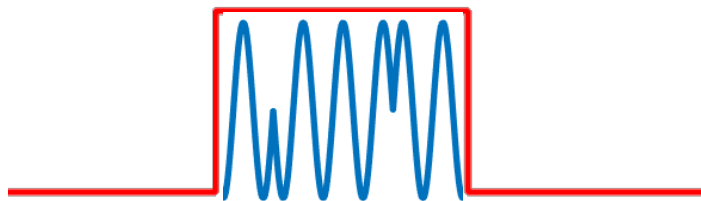
基本的なアナログ変調

- 振幅変調 (AM)
- 周波数変調 (FM)
- 位相変調 (ϕ M)



単純なパルス変調

- 多くのアナログ信号は、基本的な（無変調）パルスを生成できます
- 「変調されていない」とは、パルス中において搬送周波数、振幅、および位相が変化しないことを意味します
- パルスが以下のように送信されます
 - 一定の間隔
 - ユーザ定義リストに基づく固定されていない間隔
- より複雑な、または「変調された」パルスでは、ベクトル信号発生器を使用する必要があります



アビオニクス関連規格

- 多くのアビオニクス（navaid）標準は、アナログ信号発生器によって生成できます

VOR



ILS (Localizer / Glideslope)



Marker Beacon



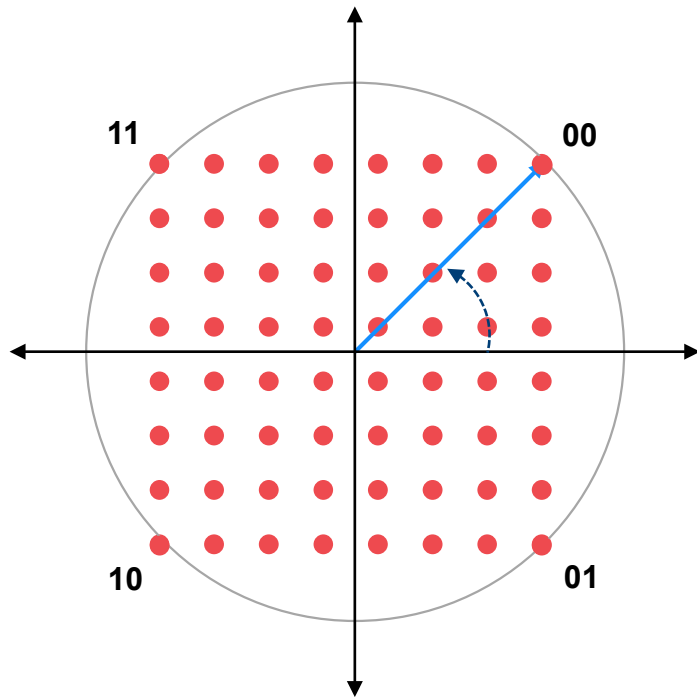
アナログ変調発生器 – 選定基準

- 主な基準
 - 位相ノイズ
 - 高調波
 - 出力電力
- 2番目の基準
 - スイッチング速度（周波数および振幅）
 - 振幅確度
 - 変調のサポート種類



ベクトル信号とは

- アナログ信号には大きさがあります
- ベクトル信号には大きさと位相があります
 - デジタル情報（ビット）の送信に使用されます
- ほとんどすべてのデジタル変調方式（LTE, 5G NR, Wi-Fi, Bluetoothなど）はベクトル変調を使用します



IQとは

- 振幅と位相は、次の2つの振幅値に変換できます。
 - In-phase (Real)
 - Quadrature (Imaginary)
- RFの世界では、ベクトル信号は通常 "IQ" 値として表されます
 - 実数値と虚数値のペア
- ベクトル信号の生成と解析を大幅に簡素化します

I	Q
-0.049083846	-0.056544284i
-0.153649271	-0.243722308i
-0.295466171	-0.365412000i
-0.447319972	-0.402602505i
-0.580561968	-0.351042196i
-0.670057487	-0.221492663i
-0.698369952	-0.037337371i
-0.658464271	+0.169940650i
-0.554508689	+0.366518605i
-0.400714935	+0.522140706i
-0.218511444	+0.615098429i
-0.032627440	+0.635429815i

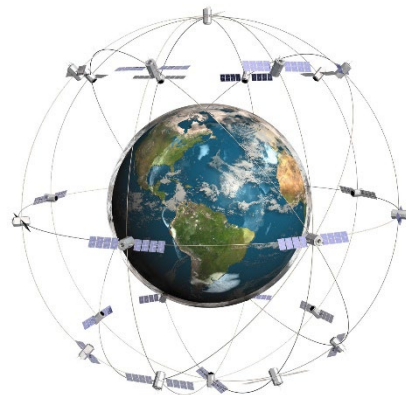
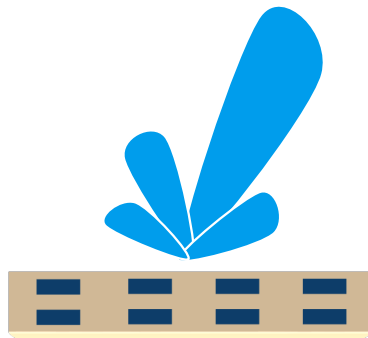
ベクトル信号発生器とは

- ベクトル信号発生器は、IQ値を使用して信号を生成します
- IQ値は次の方法で提供できます。
 - 内部ジェネレータ
 - リアルタイムで生成
 - 内部で事前生成
 - ファイルからロード（外部生成）
 - 外部ソース（アナログまたはデジタル）
- IQデータ形式の業界標準はありません
- ベースバンドという用語は、RFに変換される前のIQ信号を指すために使用されます

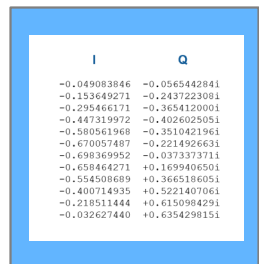


どこでベクトル信号発生器は使用されるのか？

- ベクトル信号発生器アプリケーション
 - 無線通信、デジタル放送、あるいはGNSSなどの信号生成
 - マルチアンテナシステム（MIMO）やビームフォーミング用の信号生成
 - 信号妨害のシミュレーション（ノイズ、干渉、フェージングなど）

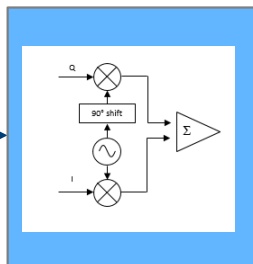


ベクトル信号発生器ブロック図



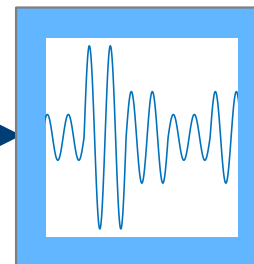
ベースバンド

IQ データ読み込み / 生成、
フィルタリングなど



IQ 変調器

IQ データを
RFに変換

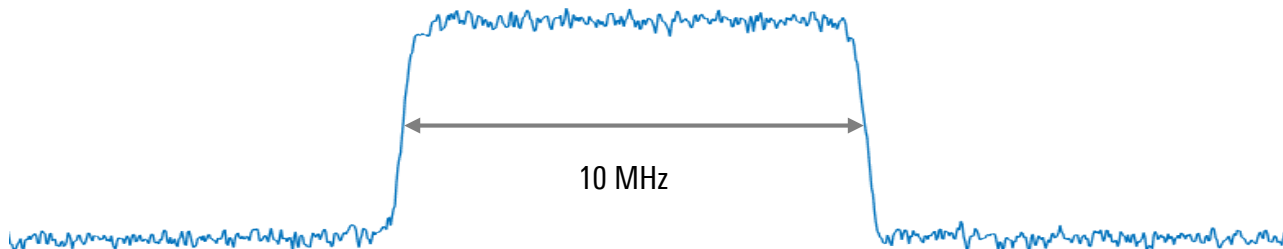


RFブロック

周波数、レベル、
アナログ変調などの
設定

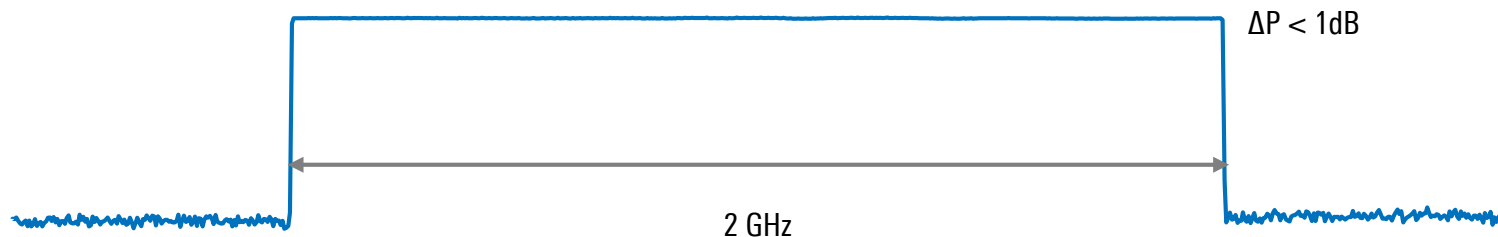
信号帯域

- 発生器の帯域幅は、生成された信号の最大「幅」を表します
 - 10 MHz LTE信号には、少なくとも10 MHzの帯域幅が必要です
- 最新のテクノロジーの多くは、数百MHzまたはGHzの高い帯域幅を必要とします。
- 十分な帯域幅を持つ信号発生器を選択することが重要
- 広い帯域幅には特別な課題があります（スペクトルのフラットネス維持など）

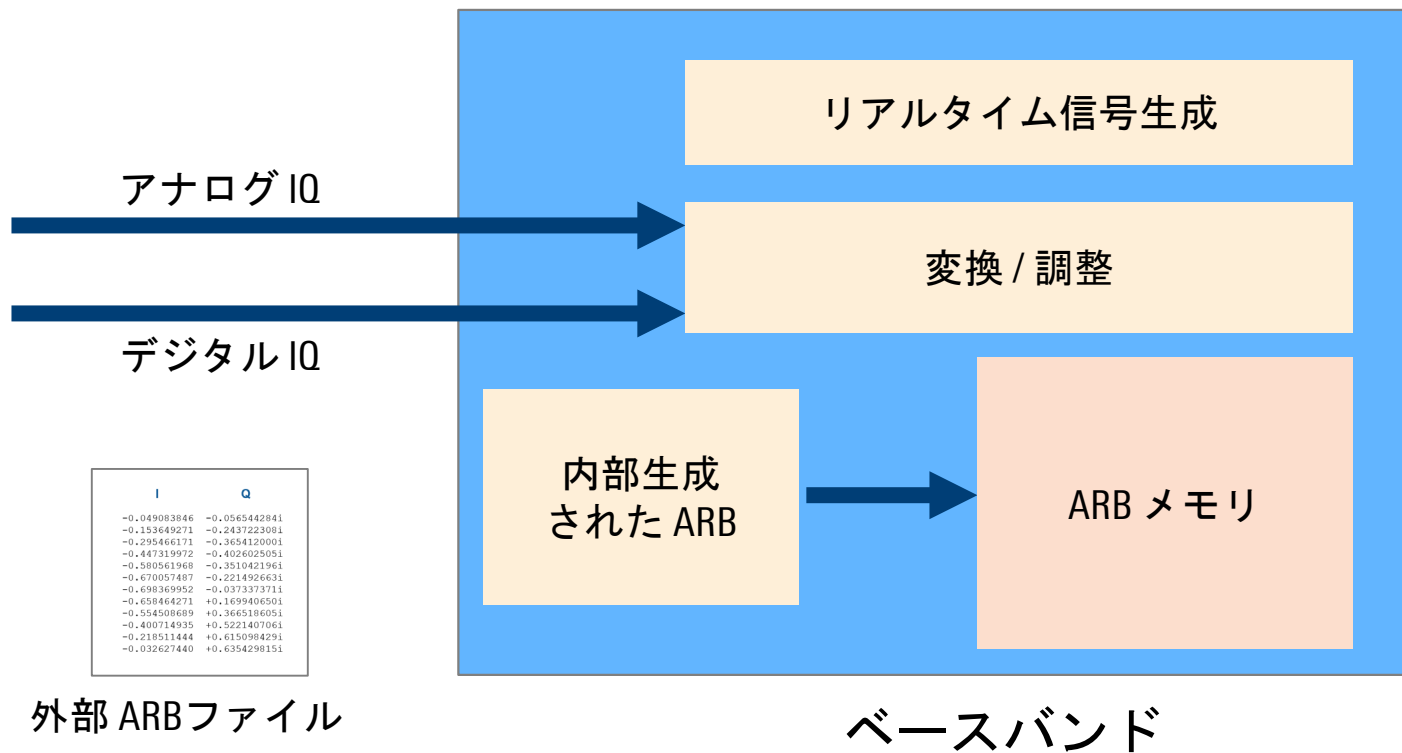


フラットネス

- 信号発生器が広い (r) 帯域幅で振幅エラーを発生させないことが重要
 - 例えば2 GHzの帯域幅で1 dB未満の変動
- これを実現するために、個別のキャリブレーションルーチンを使用可能
 - 時間を要するが、周波数が変化した場合は再度行う必要がある
- 最新のアプローチは内部レベルセンサの登場
 - 高速で周波数を変えてもフラットネスの維持が可能



ベースバンド信号源



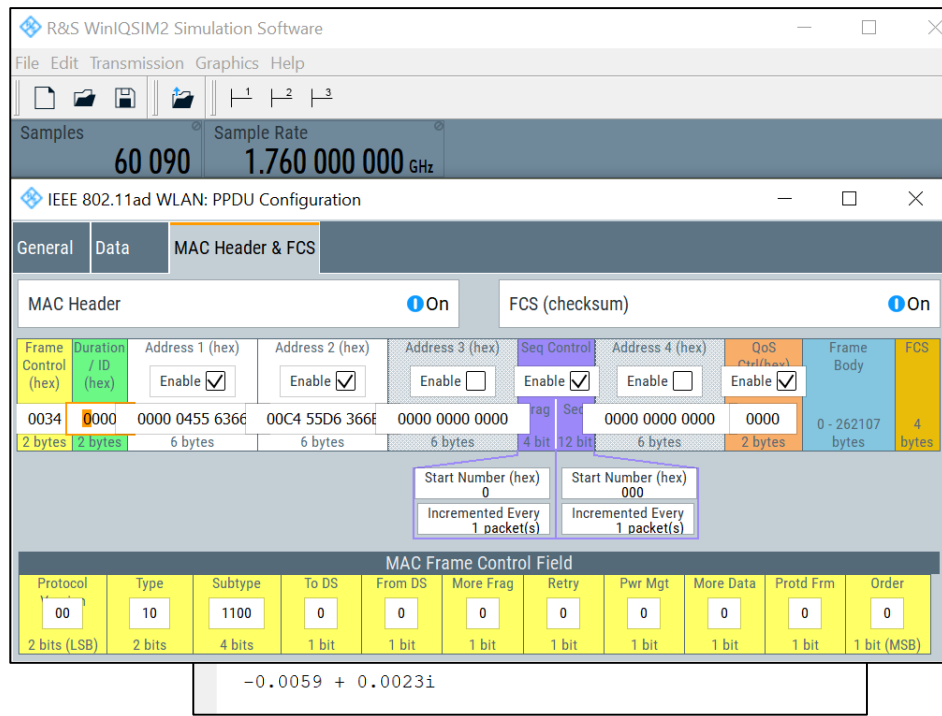
IQ 入力 / 出力

- IQデータは、外部のアナログまたはデジタルIQ入力を介してベースバンドに提供できます
- 信号は外部の任意波形発生器で作成されます
- 信号がキャプチャされ、IQデータとして保存されます
- ほとんどの場合、BNCコネクタは、デジタル用のアナログ専用コネクタに使用されます
- ベースバンドデータも出力できます（つまり、RFにアップコンバートされません）



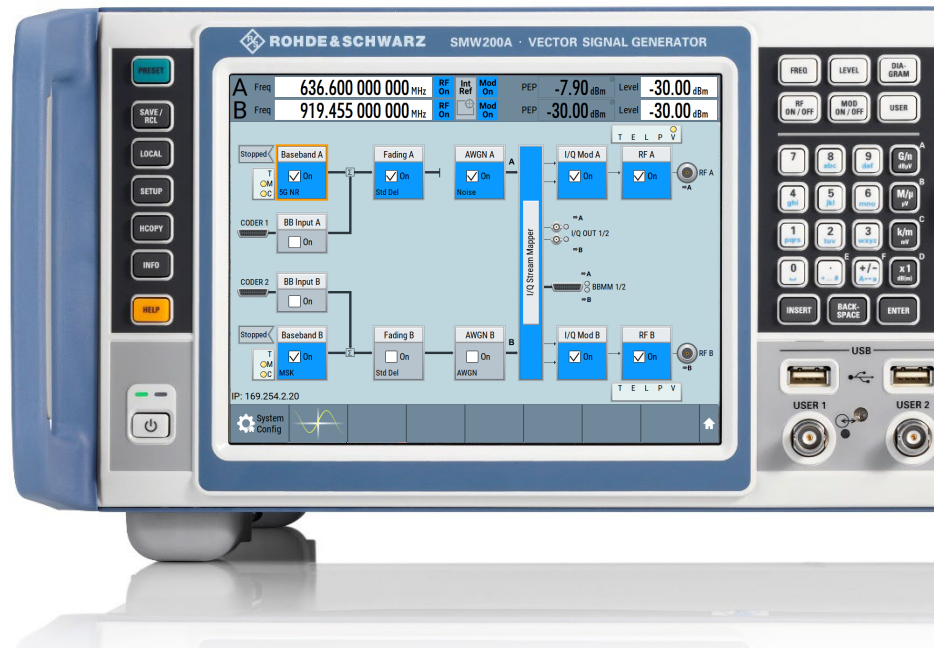
外部生成された任意波形 (ARB) ファイル

- 事前に計算された波形
- IQ値を含むファイルとして保存
- ARBファイル生成には
 - MATLABなどを使用
 - 複雑な作業
 - 専用ソフトウェア
 - 波形とパラメータを定義できるので、高い柔軟性があります
- メモリ要件により波形長が制限されます



内部生成された任意波形 (ARB) ファイル

- GUIを使用して信号発生器本体で作成
 - 変調方式とパラメータの簡単な設定
 - 内部メモリおよびファイルとして保存
- 外部での波形生成と比較して、非常に簡単



例: 内部 ARB ファイルの生成

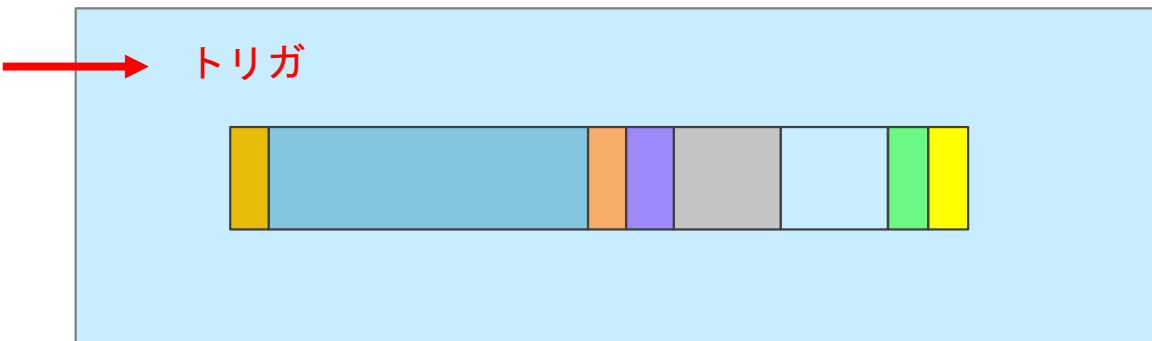
The screenshot displays the configuration interface for Baseband A OFDM Standards, specifically for EUTRA/LTE A. The main configuration window is titled "EUTRA/LTE A" and includes tabs for General, Stop, Trigger In, Marker, Clock, Info, and Notch Filter. The "General" tab is active, showing parameters for Cell ID (0), Physical Cell ID Group (0), Physical Layer ID (0), and Cyclic Prefix (Normal). Other parameters include PDSCH P_B (0), PDCCH Ratio rho_B/rho_A (0.000 dB), PHICH N_g (1/6), and RA_RNTI (1). A "Generate Waveform" button is visible.

Below the main configuration, a "EUTRA/LTE A: DL Frame Configuration" window is open, showing the "Time Plan" tab. It displays the "Cell" as PCell, "1st Subframe" as 0, and "Subframes" as 1. The "View Mode" is set to VRB. A "Detach Time Plan ..." button is also present.

The Time Plan window shows a timing diagram for OFDM Symbols (0 to 14) and Resource Blocks (0 to 50). The diagram illustrates the allocation of resources for different channels and users. The channels shown are PDCCH, PDSCH, USER1, USER2, USER3, USER4, EPDCCH1, EPDCCH2, EPDCCH3, EPDCCH4, PBCH, and MBSFN. The diagram shows that the PDCCH is allocated in the first subframe (0 to 1), and the PDSCH is allocated in the first subframe (0 to 1) and the second subframe (2 to 3). The users are allocated resources in the second subframe (2 to 3) and the third subframe (4 to 5). The EPDCCHs are allocated in the fourth subframe (6 to 7), and the PBCH is allocated in the eighth subframe (8 to 9). The MBSFN is allocated in the tenth subframe (10 to 11).

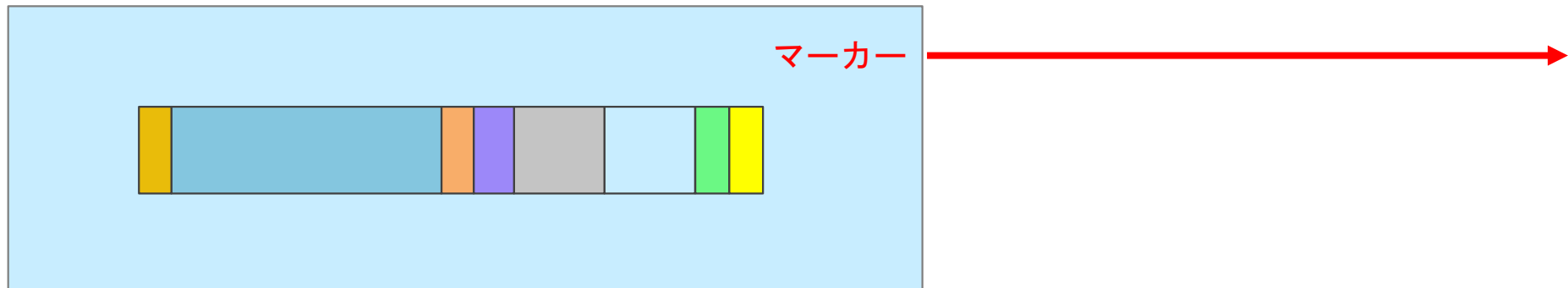
ARB波形の再生

- 変調信号の波形は、通常フレーム（サブフレーム）を基本に生成されます
 - 例：LTE, 5G NR, 802.11 (Wi-Fi), など
- 波形は以下のように再生できます
 - 1回再生
 - 連続再生
 - 外部トリガが入力されるまで再生



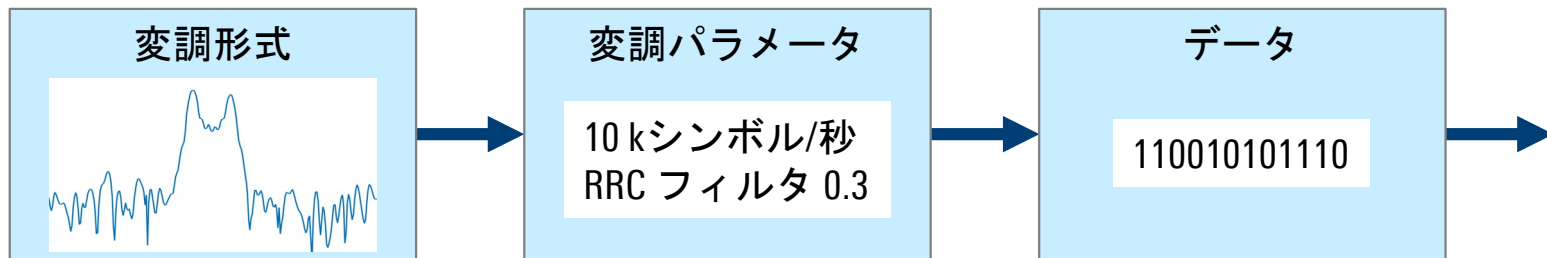
マーカ

- 一部のテストシナリオでは、生成された信号との同期が必要です
- マーカは、波形（または波形の一部）がいつ生成されたのかを示すために使用できます
 - 例：送信された各フレームの開始時にマーカが出力されます
- 発生器と受信機の上に二次接続が必要です



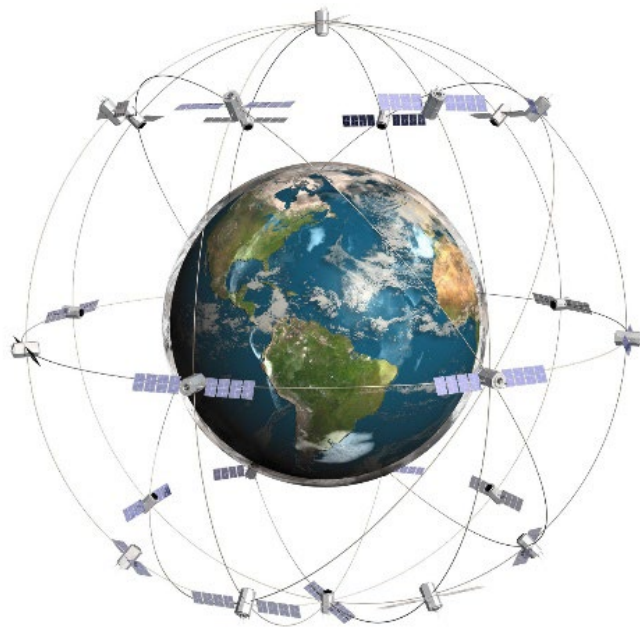
リアルタイム信号生成- 一般例

- 設定パラメータに基づくリアルタイム信号生成
 - 変調景気 (FSK, PSK, QAM, など)
 - 変調パラメータ (例: シンボルレート, フィルタ, など)
 - データ (ファイル, パターン, PRBS)
- 長いシーケンスが生成可能
- 長いメモリが必要
- アプリケーション例: ビットエラーレート試験



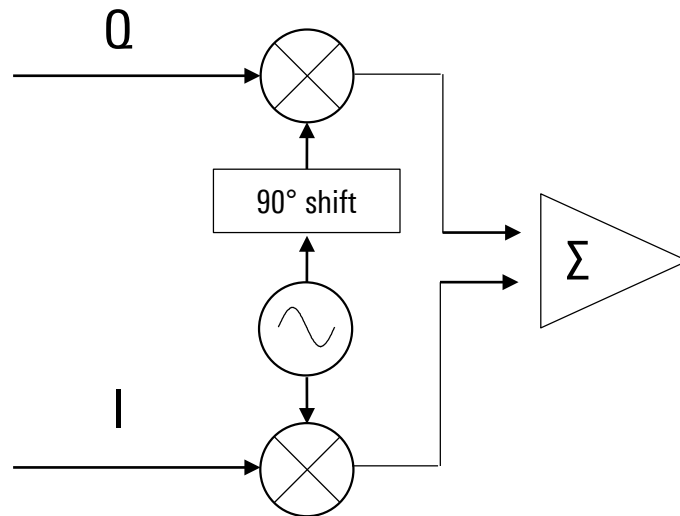
リアルタイム信号生成 - GNSS

- 現実的なGNSS（グローバルナビゲーション衛星システム）シミュレーションには、長期的な信号生成が必要
 - 受信機は信号をロックするのに時間を要する
 - 受信機のテストには、長期間（分、時間、日）にわたって衛星を追跡することが含まれる
 - 衛星は時間と共に上昇して沈む
- 静的ARGファイルは受信機の感度試験には使用できるが、ロケーション評価には使えない
- ベクトル信号発生器は、衛星コンステレーション、時刻／日付、受信機の位置などに関するユーザー提供のデータに基づいて、多くの衛星からリアルタイムのGNSS信号生成が可能



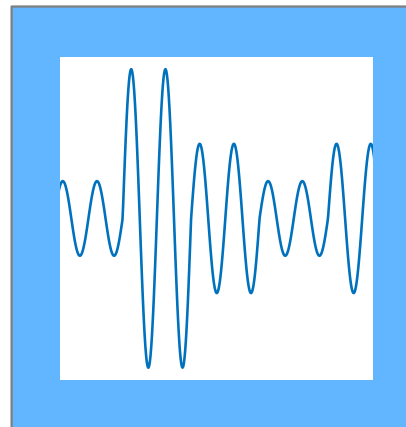
IQ 変調器

- I および Q の値は、IQ 変調器を使用して RF 信号に変換される
- 変調に IQ を使用する場合、信号は 2 つのパートに分離します (I および Q)
 - Q 経路においては、発信器が 90° シフトされます (直交は 90° 離れていることを意味します)
- I と Q 信号は、結合して送信するときに互いに干渉しない
- 通常、IQ 変調器の設定はユーザーが調整する必要はありません

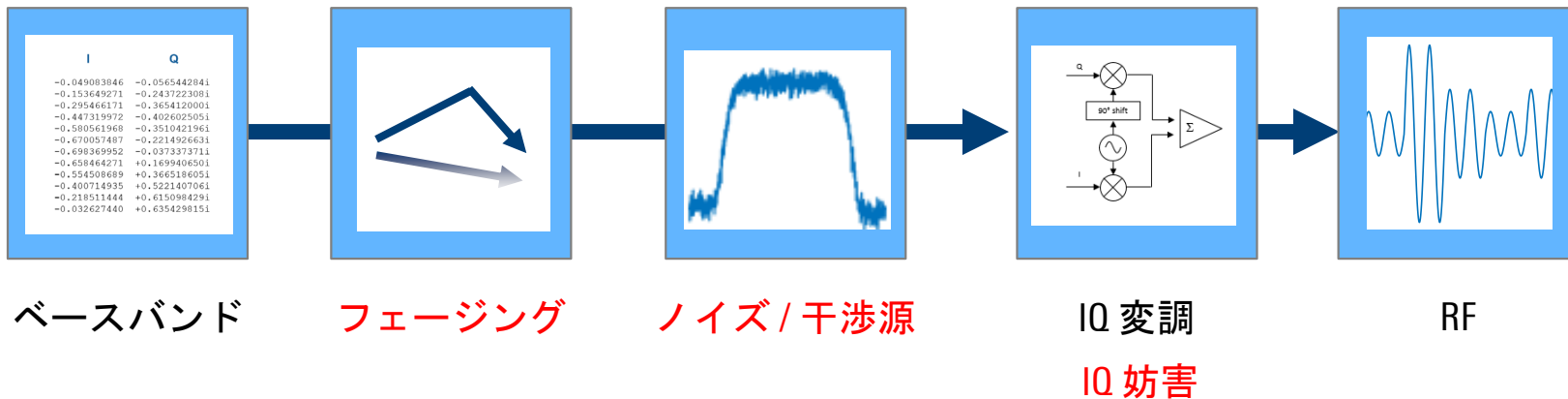


RF ブロック

- ベクトル信号発生器内の最後のブロック
- 定義に使用：
 - 周波数
 - 振幅
 - アナログ変調（AM, FM, Φ M, パルス）
 - ステップ / 周波数およびレベルの掃引

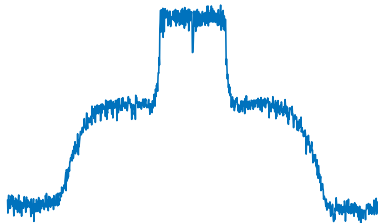


妨害波

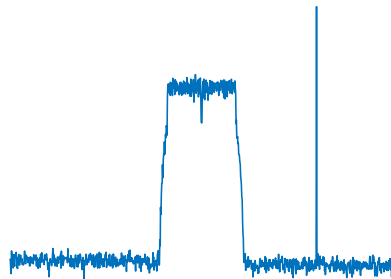


ベースバンド妨害

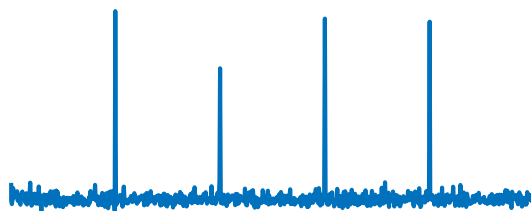
- ベースバンド妨害
 - ノイズ (AWGN)
 - CW 干渉
 - インパルスノイズ
 - 位相ノイズ



ノイズ
(AWGN)



CW 干渉



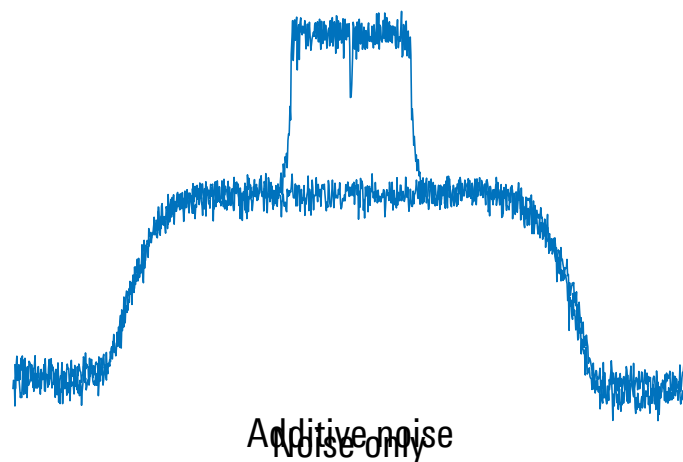
インパルスノイズ



位相ノイズ

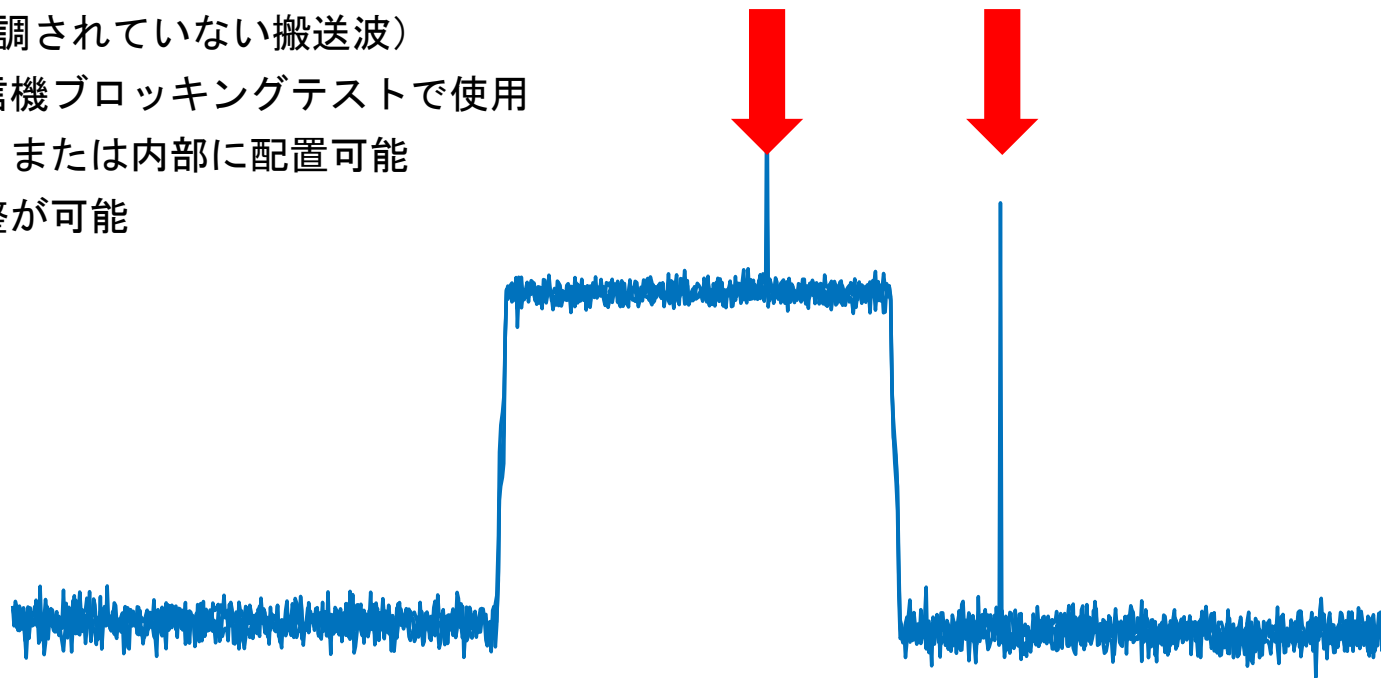
AWGN（加法的ホワイトガウスノイズ）について

- AWGN = 加法的ホワイトガウスノイズ
 - 加法的とは有用な信号と組み合わせることを意味する
 - ホワイトとはノイズが全周波数で一定を意味する
 - ガウシアンとはノイズの経時変化を意味する
- 現実世界における試験
- 制御可能な信号対雑音比（SNR）を作成する
 - 受信機感度テスト
 - ビット／ブロックエラー率テスト
- 「ノイズのみ」の信号を生成することが可能
 - 幾つかの試験に役立ちます



CW 干渉について

- CW = 連続波（変調されていない搬送波）
- 多くの種類の受信機ブロッキングテストで使用
- 有用な信号の近くまたは内部に配置可能
- 電力レベルの調整が可能



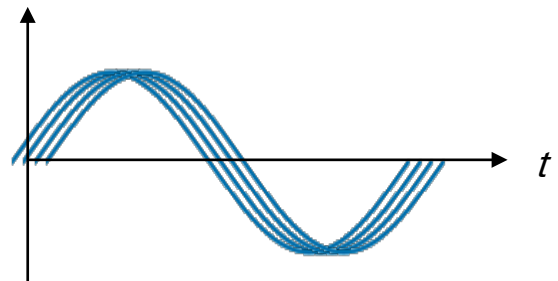
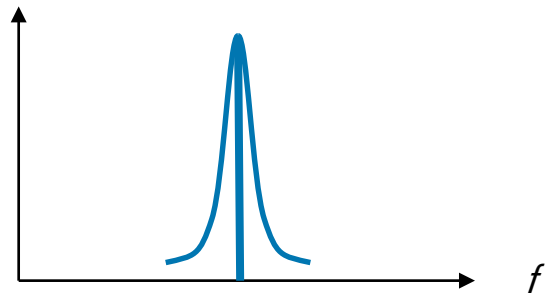
インパルスノイズについて

- インパルスノイズは、オン-オフあるいはバーストなパターンがある
- 現実世界での多く干渉源はインパルスノイズ
 - 意図しない信号：スパークプラグ、モーターなど。
 - 意図的な信号：レーダーまたはバースト変調タイプ
- パルス幅、パルス数、パルス間隔を使用して定義



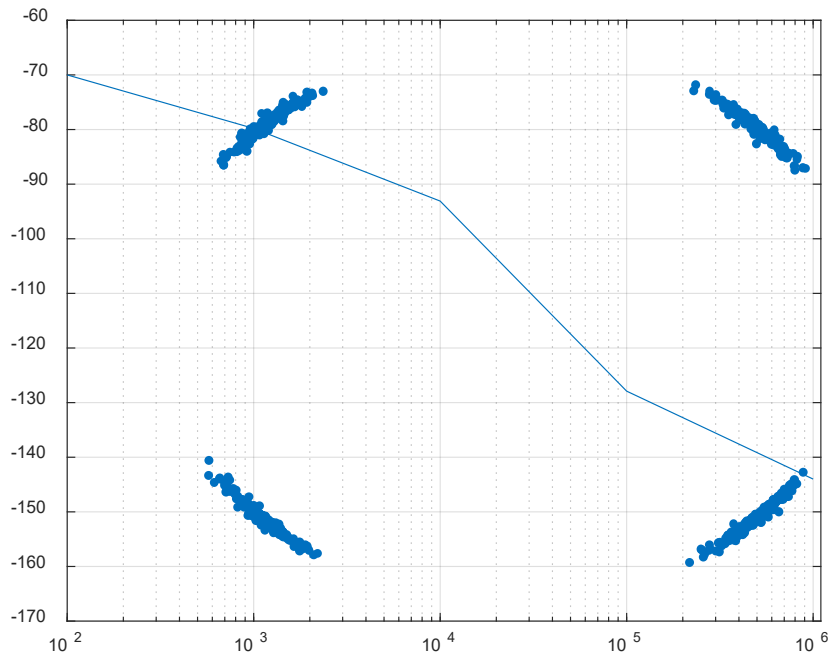
位相ノイズについて

- 位相ノイズは、信号の周波数の短期間の変動
- 過度の位相ノイズは、さまざまな問題を引き起こす可能性がある
 - 通信システムにおけるEVMの悪化
 - レーダーシステムのエラー（動きの遅いターゲットをマスクする）
- 位相ノイズが可能な限り低い信号発生器が必要
- 場合によっては、評価用に生成された信号に制御可能で定義可能な位相ノイズを付加したいケースもある

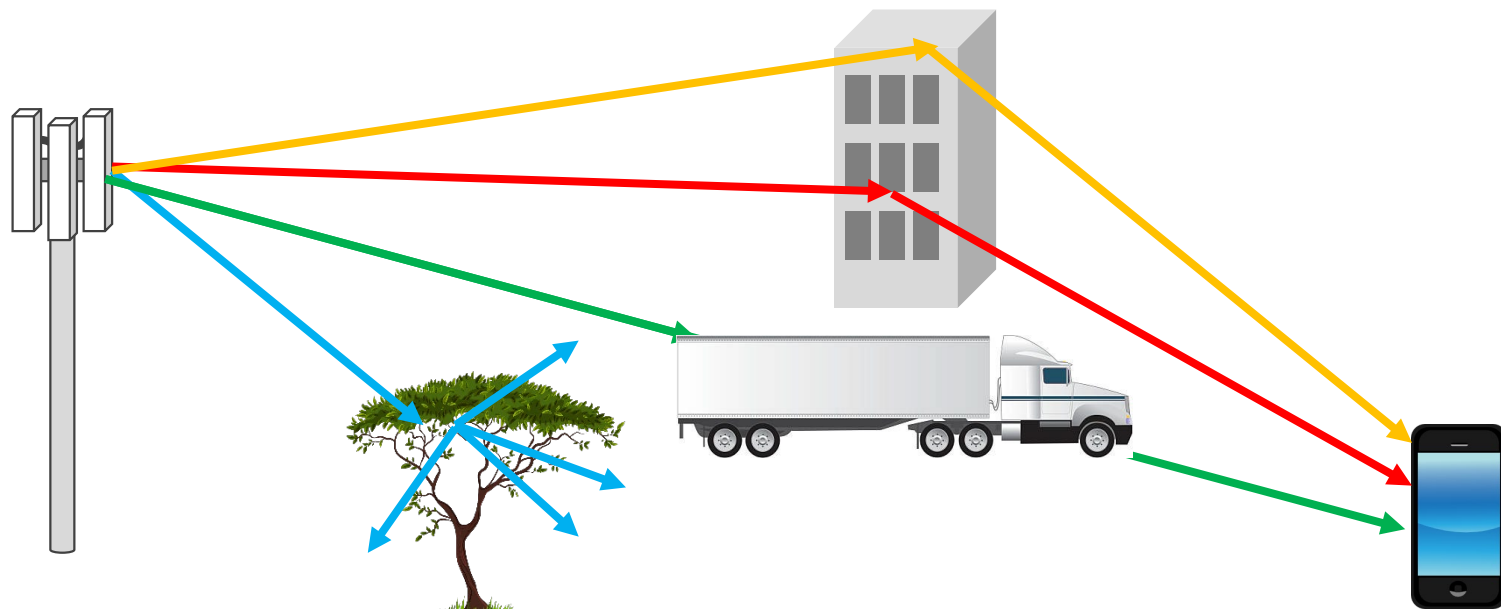


位相ノイズ妨害の付加

- 与えられた周波数オフセットでの位相ノイズの量を定義することにより、位相ノイズをベースバンド信号に追加可能
- 例：信号に位相ノイズを追加すると、コンスタレーションダイアグラムが「回転」し、ビットエラーが増加
- コンポーネント、システムなどの位相ノイズの最大許容レベルが確認可能

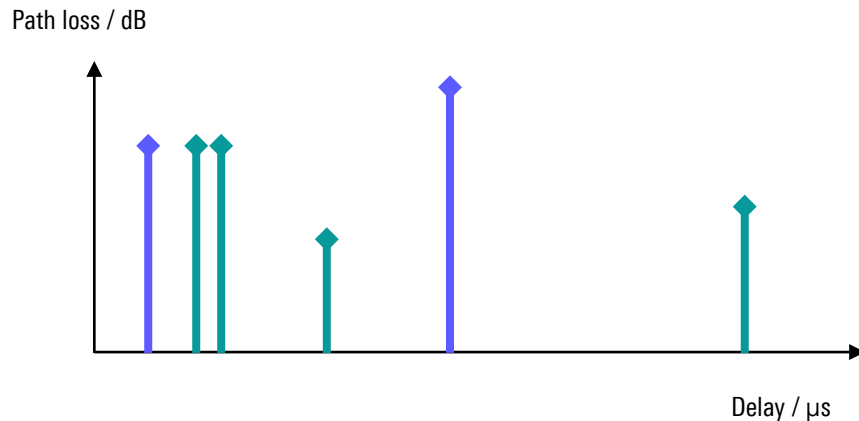


フェージングについて



フェージングの定量化とシミュレーション

- 複数のコピー信号が到着する可能性がある
 - 異なる遅延
 - 異なるレベル
 - 異なる周波数シフト（ドップラー）
- 同様の遅延を持つエコーは、異なる「タップ」としてモデル化可能
- 各タップの遅延、減衰、およびフェージングの動作が定義されている
- ベクトル信号発生器は、各タップのパラメータを使用して信号の「フェード」が可能
- 多くの通信規格では、標準化されたフェージングプロファイルを使用したテストが必要

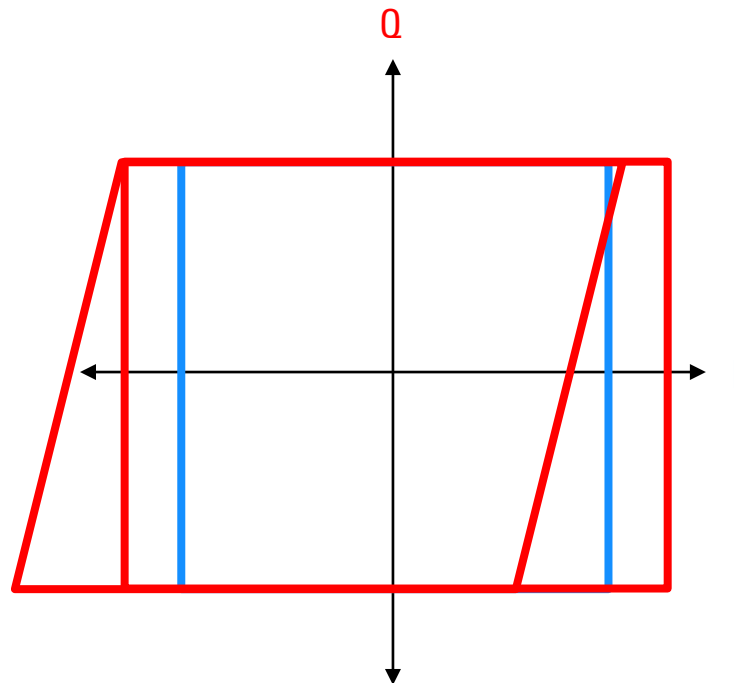


ライスフェージング：一般に時間と共に一定

レイリーフェージング：急激な変動を示す

IQ 不均衡

- I および Q 信号は（正確に） 90° 離れており、同振幅であるべき
- IQ 変調器/復調器の不均衡はエラーにつながる可能性がある
 - 伝播関数ではない
 - ベクトル信号発生器は、異なる種類のIQ信号の不均衡を生成できる：
 - 直交オフセット
 - ゲインオフセット



ベクトル信号発生器 – 選択のポイント

- 最重要ポイント
 - 帯域
 - 出力信号のフラットネス
 - 低位相雑音
 - 優れたEVM
- 重要ポイント
 - 出力パワー
 - ARB メモリ長
- 特殊な機能やアプリケーションに特化したオプションの用意



サマリ

- ▶ アナログ信号発生器
 - 信号品質
 - アナログ変調機能
- ▶ ベクトル信号発生器
 - デジタル変調信号
 - ベースバンド → IQ → RF
 - 妨害とフェージング

