

# 5G時代に必須となるMIMOの 基礎知識と測定方法

岡田 信孝

アプリケーション・エンジニア

KEITHLEY

A Tektronix Company

# 本日の内容

## 5G時代に必要となるMIMOの基礎知識と測定方法

- 5G通信とMIMO
- MIMO技術の概要
  - チャネル推定と復調方法
  - シングルユーザMIMO
  - マルチユーザMIMO
  - ビームフォーミング
  - 信号のコヒーレント性
- MIMO測定ソリューション
  - 8chの位相コヒーレントなRF信号が発生可能なAWG5200シリーズ
  - 8ch、12ビット分解能で信号取り込みが可能な5シリーズMSO

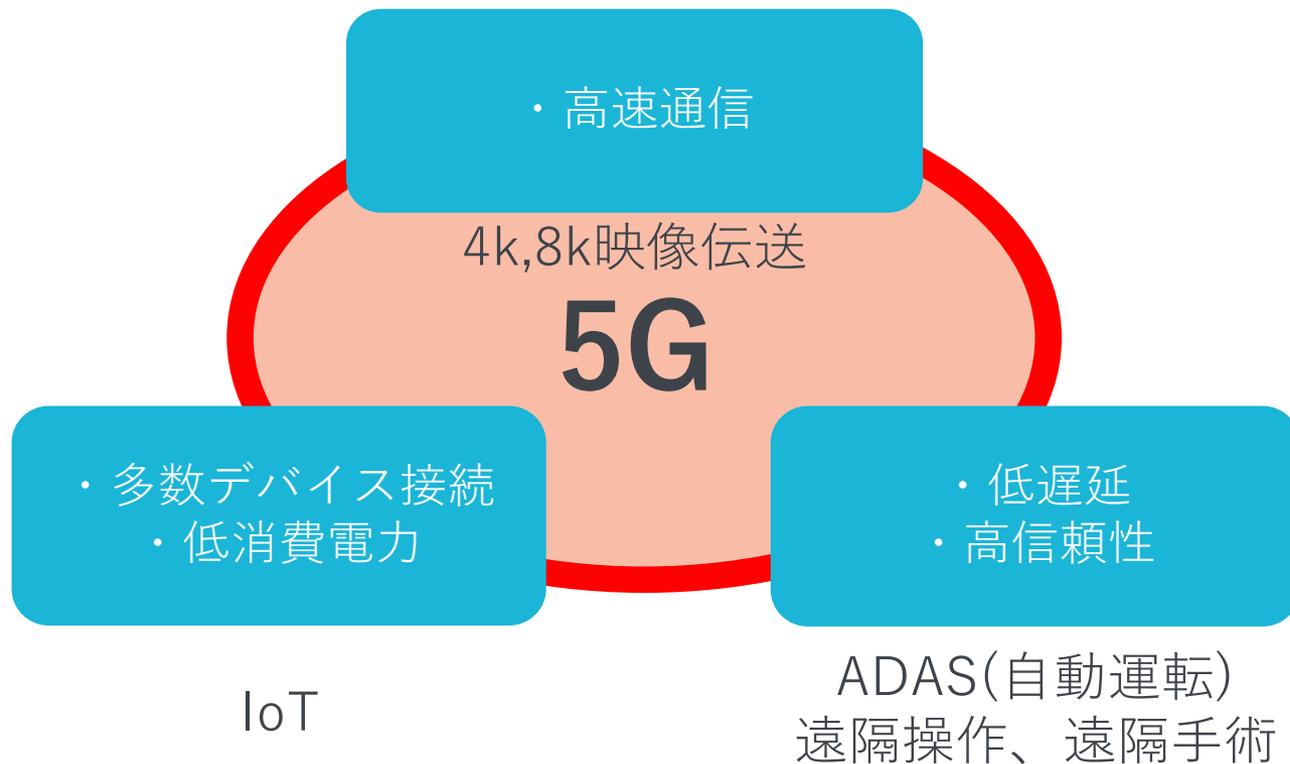
# 携帯ネットワークのあゆみ

	通称	通信規格	データ通信速度	可能になる用途
第1世代	アナログムーバ	アナログ変調	数kbps (モデム使用)	音声通話
第2世代	mov'a	PDC、GSM、 cdmaOne	128kbps	電子メール、写メール
第3世代	FOMA	W-CDMA、 CDMA2000	14Mbps	Webの表示
第4世代	Xi、LTE	LTE、LTE- Advanced	300Mbps	ハイビジョン映像
第5世代	5G		10Gbps	4k、8k映像、IoT、自動運転、遠隔制御など

# 5G通信のターゲット

5Gが目指す3つのターゲット・エリア

- 2020年の実用化を目指している5G通信は高速通信だけでなく、IoTもターゲットの一つ



# 高速通信への対応

- 伝送速度 = 周波数利用効率 x 周波数帯域幅
- 伝送速度向上手法
  - 周波数利用効率の向上
    - 新しい変調方式、Massive MIMO
  - 周波数帯域幅の拡大
    - ミリ波、サブミリ波の使用
    - LAA(他の無線規格との周波数共用)
- もう一つの速度向上手法
  - カバーエリアの縮小(スモールセル化、ヘテロジニアスネットワーク)
    - 最高速度は変わらない
    - セル内の端末数増加によるスループット低下を防ぐ

# MIMO技術採用のメリット

- 伝送レート的高速化
  - 占有する帯域幅が同じで伝送レートを高速化できる
- 特定の端末との通信
  - ビームフォーミングで電波を特定の方向に向けて集中
- 複数端末のサポート(マルチユーザMIMO)
  - 複数の端末と同時に通信

# MIMOからMassive MIMOへ

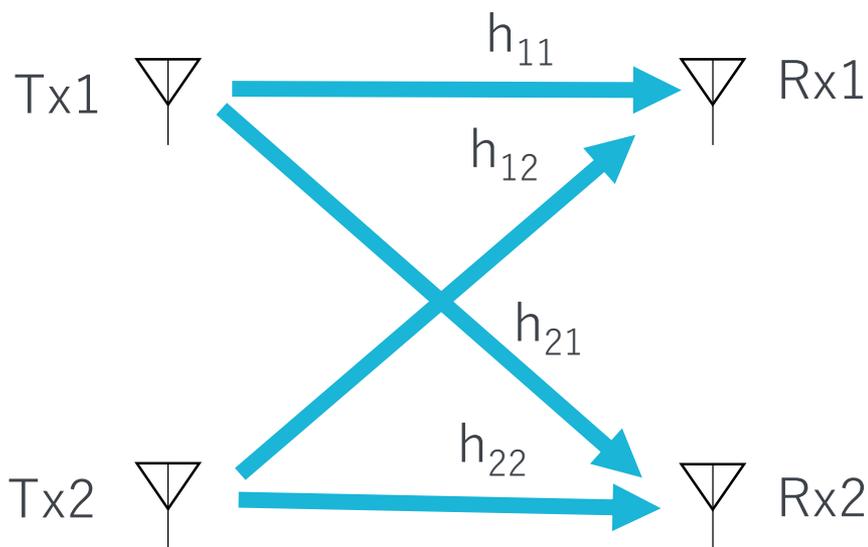
## アンテナの数を非常に多くしたMIMO

- アンテナ数
  - LTE：4本(カテゴリー6)、8本(カテゴリー14)
  - 無線LAN：2本(IEEE802.11n)、8本(IEEE802.11ac)
  - 5G：数100本
- アンテナ数が多いメリット
  - 送受信とも $n$ 個のアンテナがあれば、伝送速度が $n$ 倍に
  - 端末ごとにアンテナのグループを割り当てることが可能
- デメリット
  - アンテナのサイズが大きくなる
  - 消費電力が増大する

# 伝送路推定

## 2 X 2 MIMOの例

- 送信側から既知のパイロット信号を送信し、受信信号からチャネル特性( $h_{xx}$ )を抽出
- その後ペイロードを送信



受信信号

$$R_1 = h_{11} \cdot T_1 + h_{12} \cdot T_2$$

$$R_2 = h_{21} \cdot T_1 + h_{22} \cdot T_2$$

チャネル特性が既知であれば受信信号から送信信号が求まる

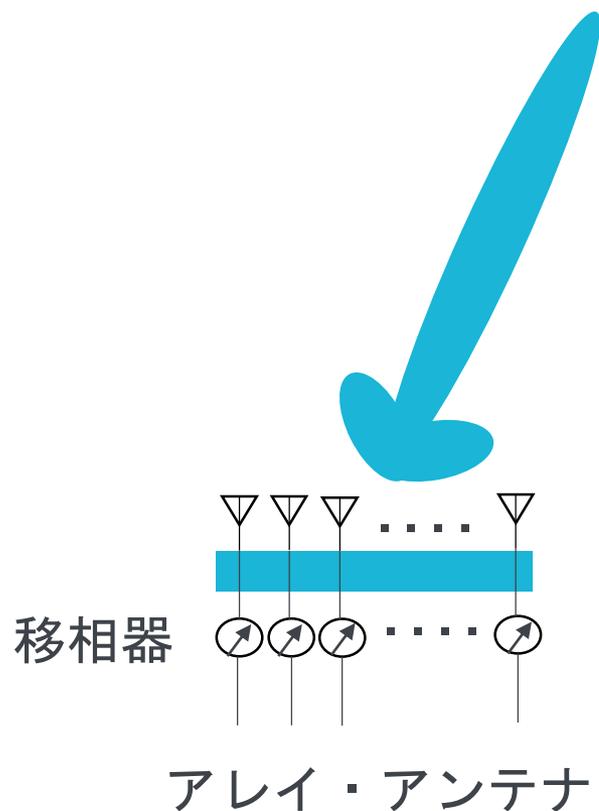
$$T_1 = \frac{h_{22} \cdot R_1 - h_{12} \cdot R_2}{h_{11} \cdot h_{22} - h_{12} \cdot h_{21}}$$

$$T_2 = \frac{h_{21} \cdot R_1 - h_{11} \cdot R_2}{h_{21} \cdot h_{12} - h_{11} \cdot h_{22}}$$

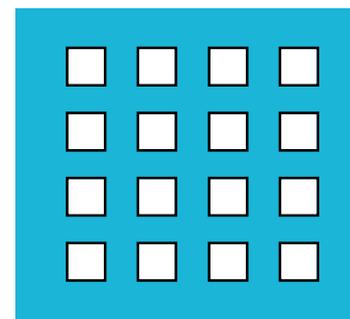
# MIMOの信号分離方法

- ZF(ゼロ・フォーシング)方式
  - 伝達関数行列  $H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$  の逆行列を使用
- MMSE(最小平均 2 乗誤差)方式
  - 雑音も考慮した線形行列演算
  - ZF方式よりも演算量は増えるが優れた特性を得ることができる
- MLD(最尤検出)方式
  - 送信信号のIQベクトル(16QAMであれば16個)と空間多重の組み合わせの全ベクトルから最も確からしい信号を検出
  - 最も優れた結果が得られるが、MIMOの多重数が多いと演算量が膨大

# ビーム・フォーミング



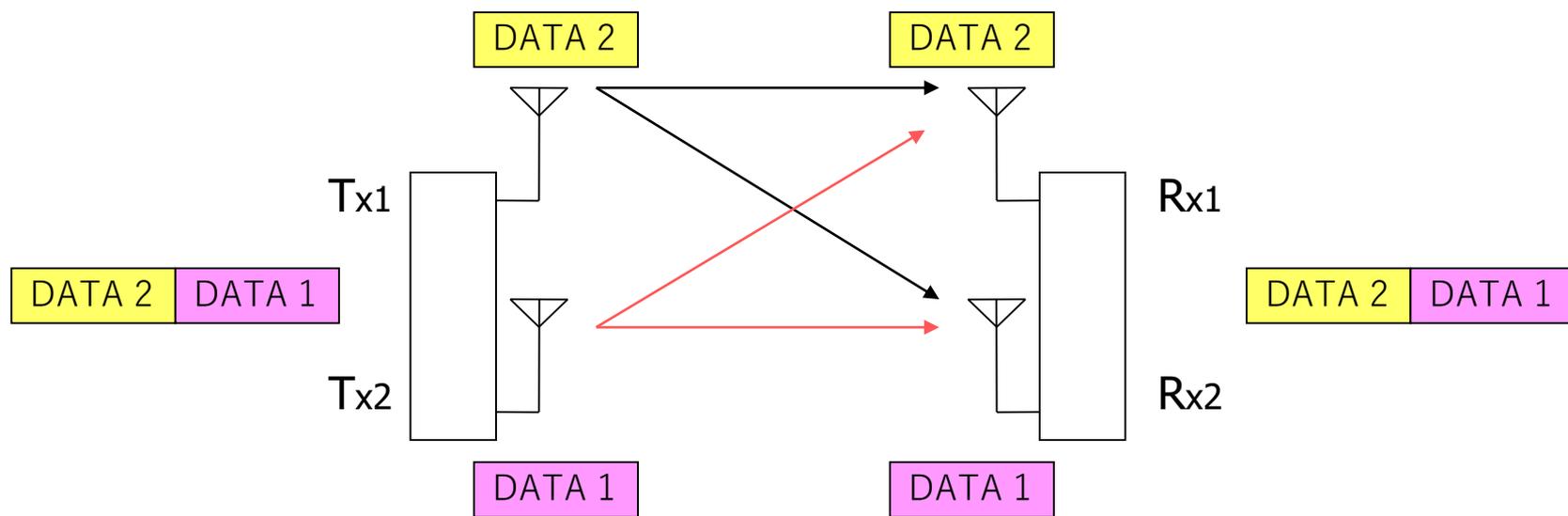
- アレイアンテナの各アンテナへ信号位相を調整することで、任意の指向性を持たせる
- アンテナの数が多いほど指向性は鋭くなる
- アンテナを2次元に配置すればXY方向に指向性を制御可能



2次元アレイ・アンテナ

# シングルユーザMIMO

- 送信側と受信側は1対1
- $N \times N$  MIMOで伝送速度はN倍に

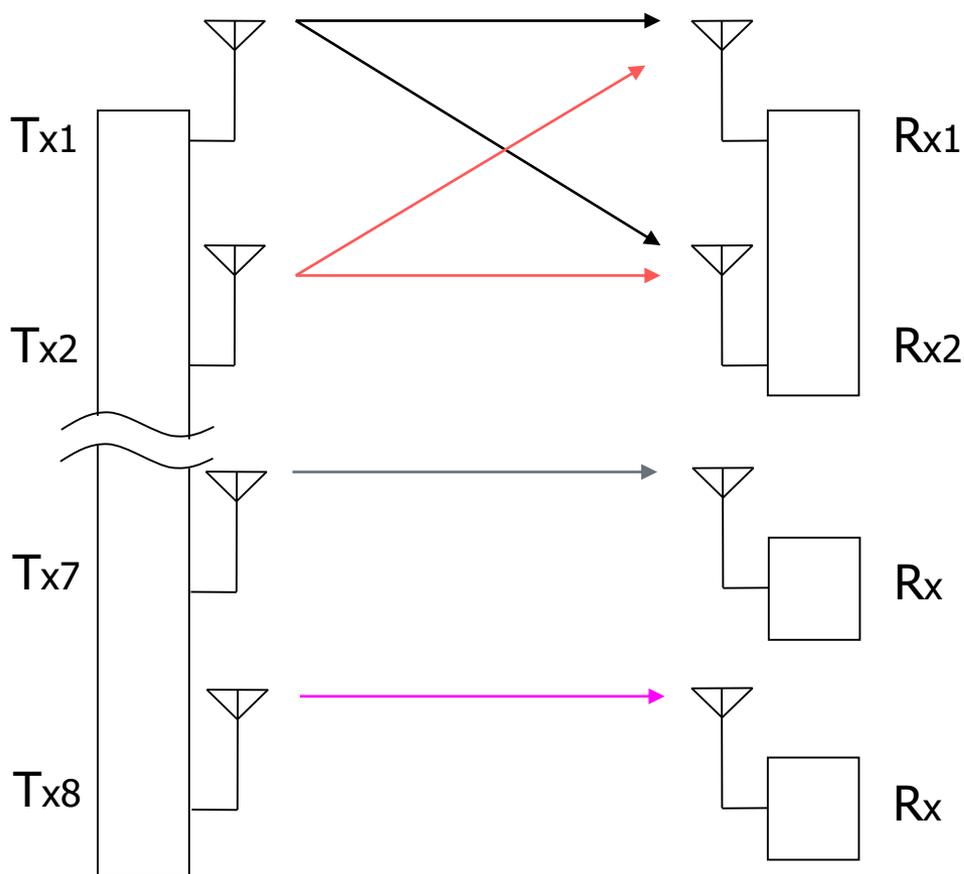


2 x 2 MIMOの例

# マルチユーザMIMO

## MU-MIMO (MultiUser-MIMO)

- 複数のユーザと同時に通信が行なえ、効率が向上
- シングルユーザMIMOでは一度に通信できるのは端末1台

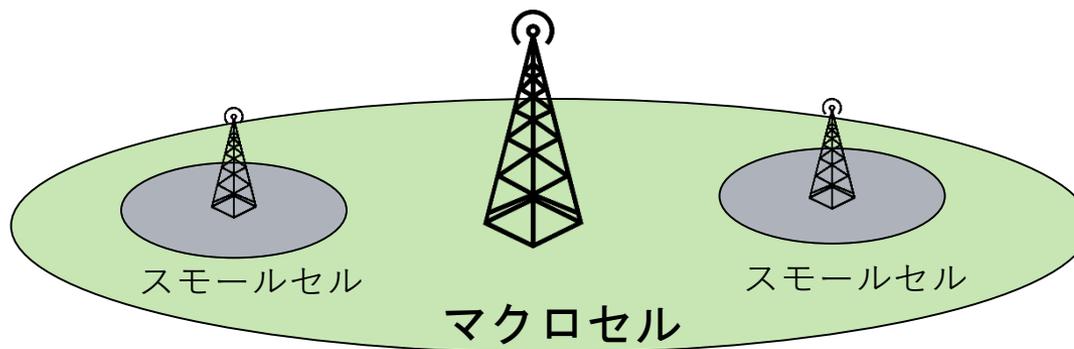


11ac では、  
・最大8ストリーム／1システム  
・最大4ストリーム／1ユーザ

# ヘテロジニアス・ネットワーク

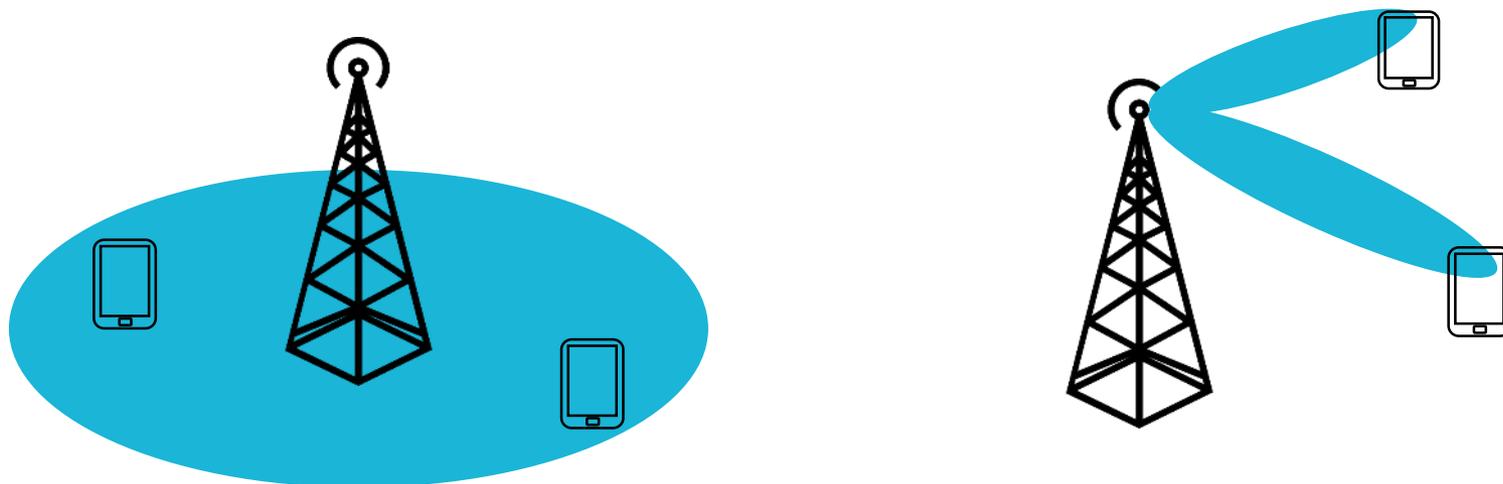
Heterogeneous(異質の) Network

- マクロセルとスモールセルの連携
  - 周波数が高いほど長距離の通信には不向きだが、広帯域(高速通信可)
  - マクロセルは低い周波数を使って広いエリアをカバー
  - スモールセルは狭いエリア内での高速通信をサポート
  - 制御信号はマクロセル、データ信号はスモールセルと役割を分けて協調動作



# カバーエリアの動的変更

- カバーエリア内の端末数が増えるとスループット低下
- MIMOを使ったビームフォーミングにより特定の端末にだけ送信エネルギーを集中
  - 全方位に均等に送信するよりも帯域の有効活用ができる



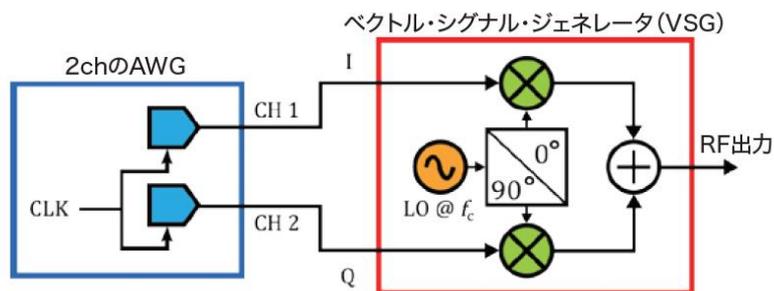
# 5Gへの適用

5Gで使用する新たな周波数はまだ決定していない

- 必要な帯域幅のIF信号をベースバンドで作成し、アップコンバータを使用してRF信号を出力する
  - IF(ベースバンド)信号は任意信号発生器で発生
  - 使用する帯域毎にミキサを交換することにより様々な周波数の出力に対応
  - ベースバンド用信号発生器のIF帯域幅はRFで使用する帯域幅と同じ帯域幅が必要
- 5Gで新たに使用が検討されている周波数の候補
  - 28GHz帯(帯域幅800MHz)
  - 39GHz帯(帯域幅1.6GHz)
  - 73GHz帯(帯域幅 2 GHz)

# 従来のRF信号発生

ベクトル信号発生器とダイレクト・デジタル・シンセシス



IQ信号発生器 + ベクトル・シグナル・ジェネレータ

- ・ 高分解能のDACが使用可能
- ・ マイクロ波からミリ波まで出力可能
- ・ 変調帯域幅に制限あり(最大で2GHz幅)



DAコンバータで直接RF信号を出力

- ・ 変調帯域幅の制限無し
- ・ 最大出力周波数の制限(~10数GHz)
- ・ 高速DACは垂直分解能が低い
- ・ 長時間の信号発生が困難  
(16Gポイントのメモリでも50GS/sの時には最長出力時間は320ms)

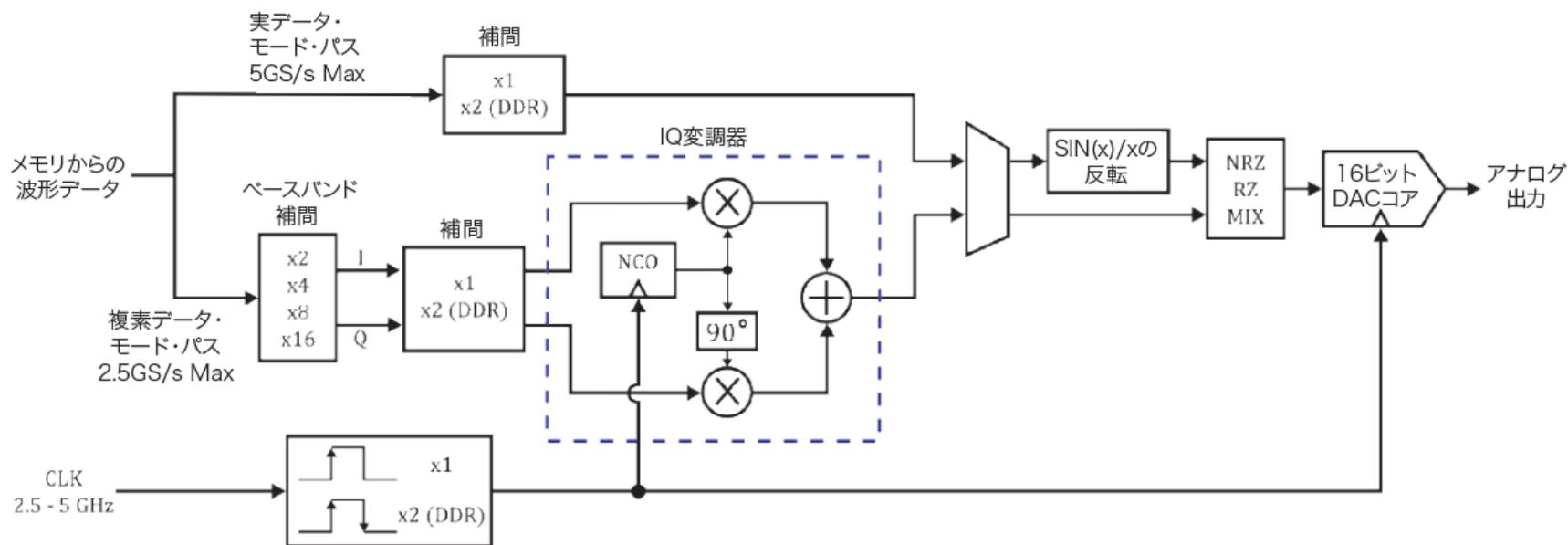
# AWG5200シリーズ任意波形ジェネレータ



- 1.5 kS/s – 10 GS/s サンプル・レート
- 16 ビット垂直分解能
- 2 Gポイント/chのメモリ
- 2, 4, or 8 チャンネル
- 世界で最も高速な16ビットAWG+多チャンネル出力+高ダイナミックレンジ

モデル	Ch数	サンプル・レート	垂直分解能	SFDR (DC-2GHz)	アナログ帯域 BW (-6 dB)	出力モード
AWG5202	2	1.5 kS/s – 10 GS/s	16 bit	<-62 dBc (AC direct)	4 GHz	DC出力: 1.5Vp-p 差動 (標準) 3Vp-p差動 (オプション)
AWG5204	4	1.5 kS/s – 10 GS/s	16 bit		4 GHz	AC出力: -17 to -5 dBm single-ended, BW 10MHz to 2.5 GHz (標準)
AWG5208	8	1.5 kS/s – 10 GS/s	16 bit		4 GHz	アンプ付きAC出力: -60 to +10 dBm single-ended, BW 10MHz to 4GHz (オプション)

# フルデジタルRF信号発生



- ・ IQ変調をリアルタイムでデジタル処理
- ・ NCO(数値制御発信器)の設定でキャリア周波数を変更
- ・ 変調後のRF信号(デジタル・データ)をDAコンバータで出力

# フルデジタルIQ変調器の設定

SourceXpress®

File Connectivity Tools Windows Help

Stopped

Home Setup Waveform Plug-ins Sequence Editor Capture/Playback Precompensation

General Channel Clock Trigger Skew Aux Out

Channel 1 Couple Settings None

Output Settings I/Q Modulator DAC Options Output Options

Digital I/Q modulator is enabled automatically when an IQ waveform is assigned to the channel

Center Frequency 4.000 000 000 GHz

Enable DDR (2x Interpolation) ?  
Output Sample Rate: 10 GS/s

Baseband IQ Interpolation 16x ?  
Baseband IQ Data Input Rate: 312.5 MS/s

Sample Rate: 5 GS/s

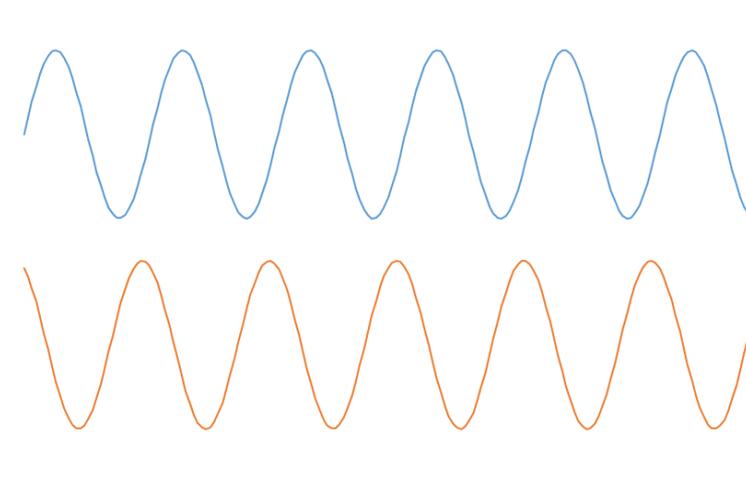
NCO(数値制御発信器)の周波数を設定するだけで  
キャリア周波数が変更可能

# 位相コヒーレント信号

- MIMO評価のためには位相コヒーレントな信号源が必要
  - MIMOのチャネル推定にはチャネル間の位相情報が重要なので、各チャネルの信号位相が一致していることが必要
  - アレイアンテナでは波の干渉を利用するので、位相が完全に合っている必要がある
- リファレンス同期
  - 出力周波数は完全に一致するが、信号位相は揃わない
- 位相コヒーレント信号の出力
  - 共通のクロックを使用したDAコンバータを使用
  - 共通のLo信号源を分岐して各チャネルのミキサ／アップコンバータに入力

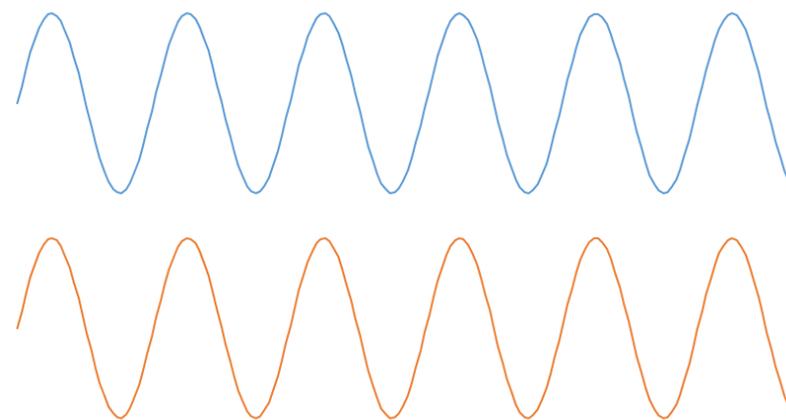
# 位相コヒーレント信号の例

- リファレンス同期した2信号



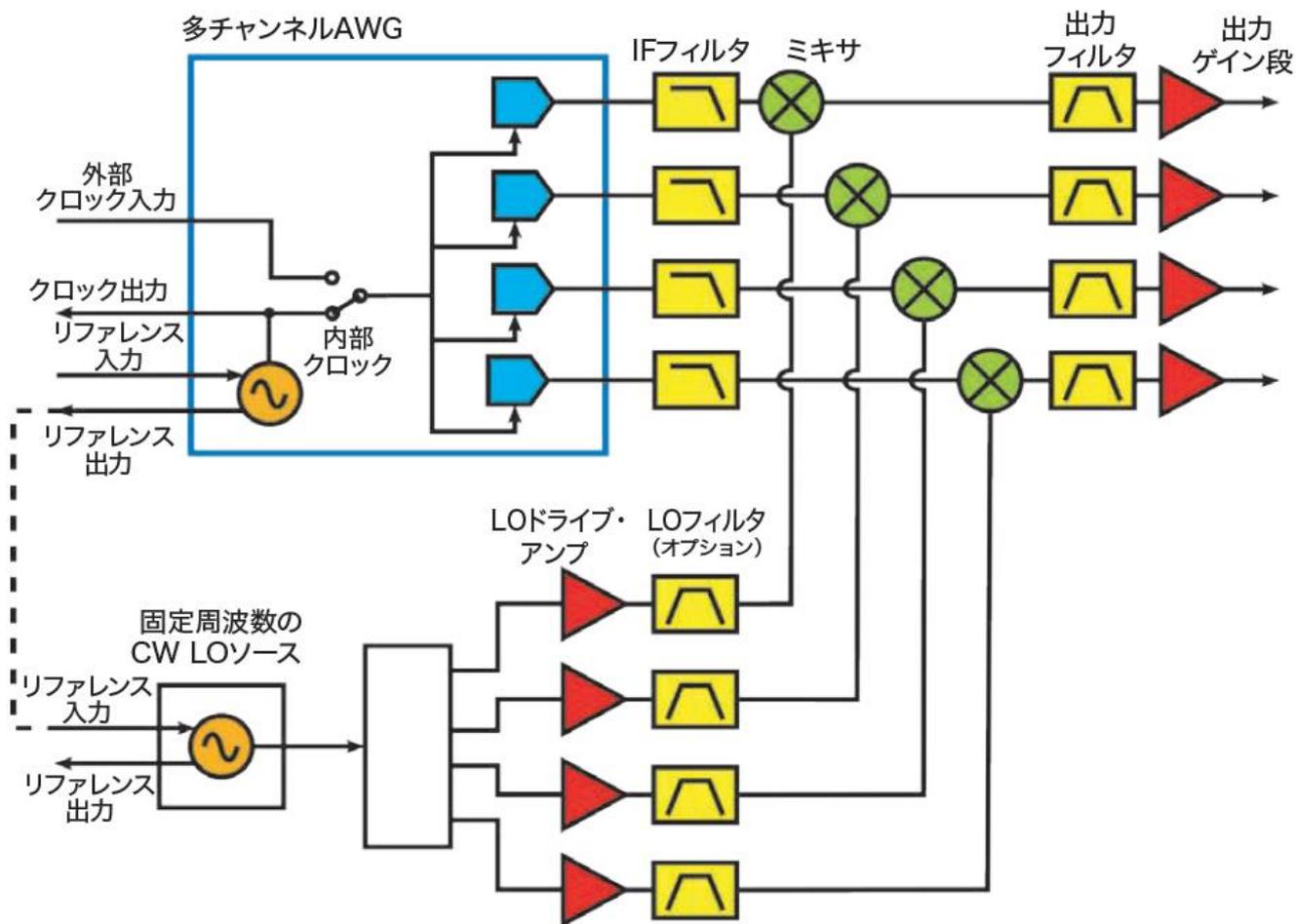
各信号の周波数は完全に一致するが、位相は合わない(毎回異なる)

- 位相コヒーレントな2信号

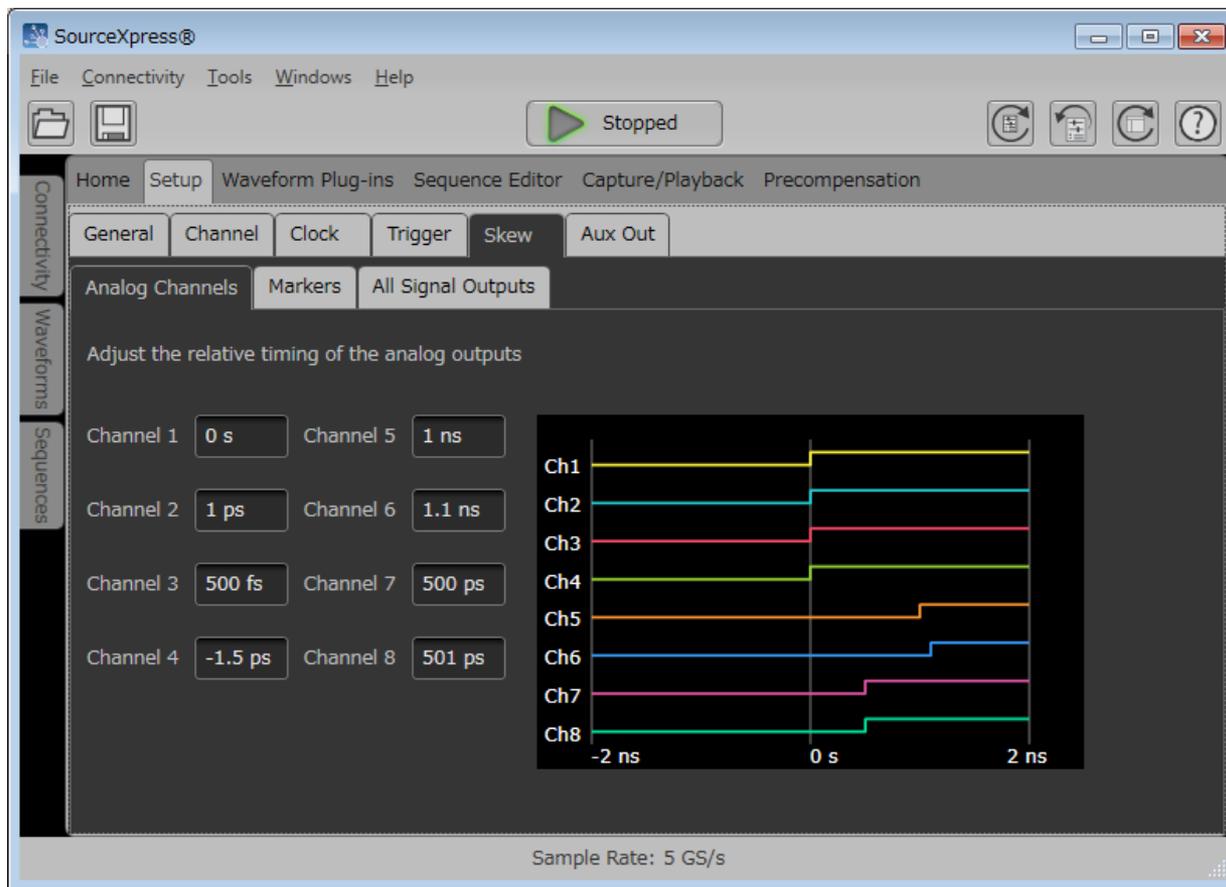


各信号の周波数及び位相が完全にコントロールされて常に一致

# 位相コヒーレントなRF信号発生

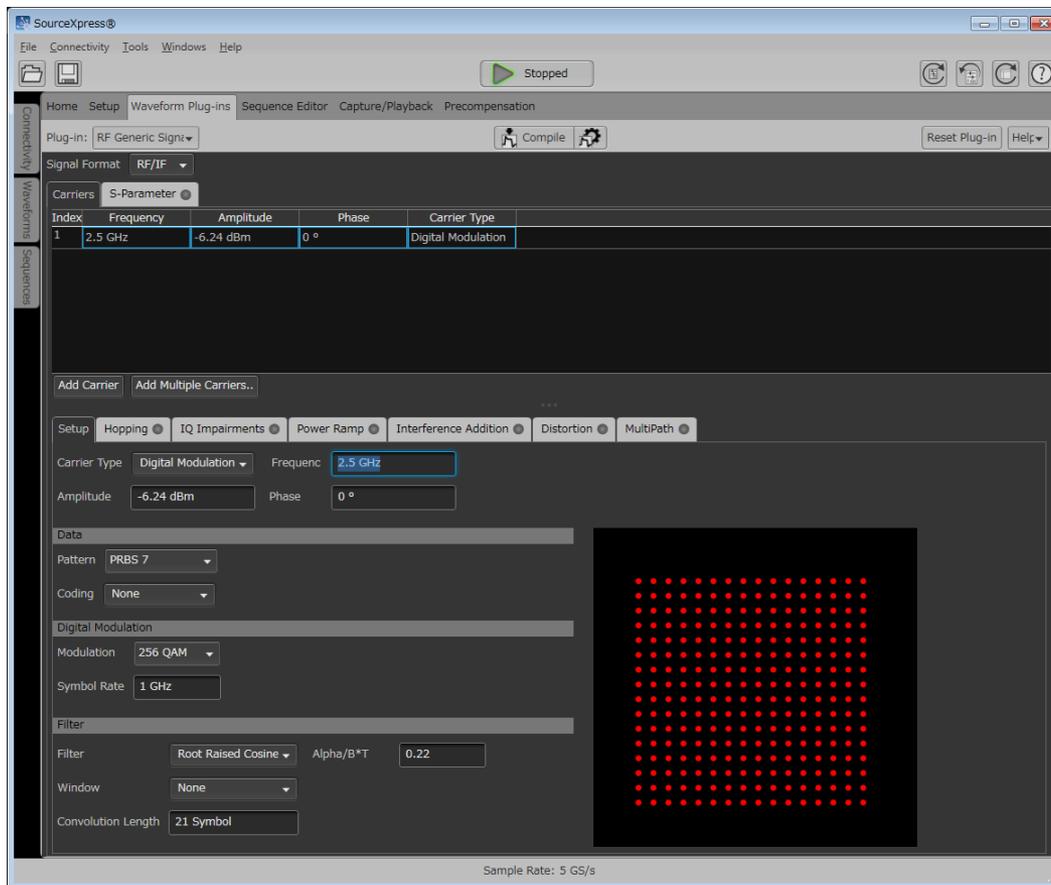


# チャンネルごとの位相調整



信号を出力しながら各チャンネルの位相(スキュー)調整が可能  
設定分解能 : 500fs

# RF信号発生プラグイン



各種デジタル変調信号、OFDM信号、レーダ信号等の信号作成は専用の波形生成プラグインを追加することで対応

# MIMO信号の受信・解析

- MIMOの解析を行うためには、受信側でも各チャンネル間の位相を正確に測定する必要がある
- 複数チャンネルの信号取込
  - 複数台のシグナル・アナライザをリファレンス同期しても信号間の位相測定はできない
  - 汎用の測定器を使用する場合はオシロスコープを使用
- オシロスコープを使用するときの課題
  - 感度不足→外部アンプを併用
  - 周波数帯域→ダウンコンバータを併用
    - 各チャンネルのダウンコンバータのローカル信号を共通にすれば位相コヒーレントを保って信号取得可能

# MIMO信号の取込・解析

- 8chのオシロスコープと8chの信号発生器を組み合わせることにより、8x8 MIMOの信号発生&解析が可能



•MATLAB®はMathWorks社の登録商標です

# MIMOのフィールド実験

- 許可無く信号発生器の出力にアンテナをつないだ実験はできない
  - 通常の実験局申請は手続きが大変
- 周波数及び期間限定で、実験局の申請が簡単に行える「特定実験試験局」という制度が存在
  - 27.5GHz～28.28GHz(平成30年9月30日まで)
  - 39.5GHz～41GHz(平成33年6月30日まで)
  - 66GHz～71GHz(平成33年6月30日まで)
- 実験局申請が承認されれば、定められた条件内でフィールド実験が可能
- 詳細は総務省 電波利用ホームページで
  - <http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/spexp/>

# まとめ：5G時代に必須となるMIMOの基礎知識と測定方法

- MIMO技術の基礎
- 位相コヒーレントの
- MIMO評価には複数チャンネルの同期した信号源が必要
  - AWG5208型は完全に同期したRF信号を8ch出力可能で、各チャンネルの周波数や位相を簡単に変更することができる。
- MIMO信号の受信には同期した多チャンネルの取込が必要
  - 5シリーズMSOでは8chの同期した信号取り込みが可能で、12ビット分解能によりダイナミックレンジの高い信号取り込みが可能。
- AWG5200とMSO58型の組み合わせで、シンプルな構成で8x8の位相コヒーレントRF計測が可能

# ご静聴ありがとうございました。

展示コーナーで実機デモを行っております。ぜひご覧ください。

**展示：**  
RFからパワー、高速シリアルまでの最新のソリューション展示。新製品も多数ご紹介。



**ミニ・セミナー：**  
5シリーズMSO  
オシロスコープのご紹介  
【登録不要】