

# 次世代衝突防止レーダ開発における最新評価手法

キーサイト・テクノロジー  
電子計測本部  
アプリケーション  
エンジニアリング部門  
井上 賢一

# 本日の内容

1. 車載ミリ波レーダ概要
2. 送信系の評価
  - ミリ波スペクトラム測定
  - 変調解析：FMCWリニアリティ評価, Coded Pulse EVM評価
3. 基準信号源(受信系の評価)
4. 各種部品評価
  - 発振器位相雑音測定
  - ミリ波部品評価(Amp, Passive部品, ミキサ, アンテナ)
5. シミュレーションの活用

# 車載ミリ波レーダの動向



2016

Partially Automated

- Monitoring of the system required
- Driver needs to be able to take over the driving task any moment

Example stop and go up to 30km/h

2020

Highly Automated

- Monitoring of the system required
- Driver needs to be able to take over the driving task with load time

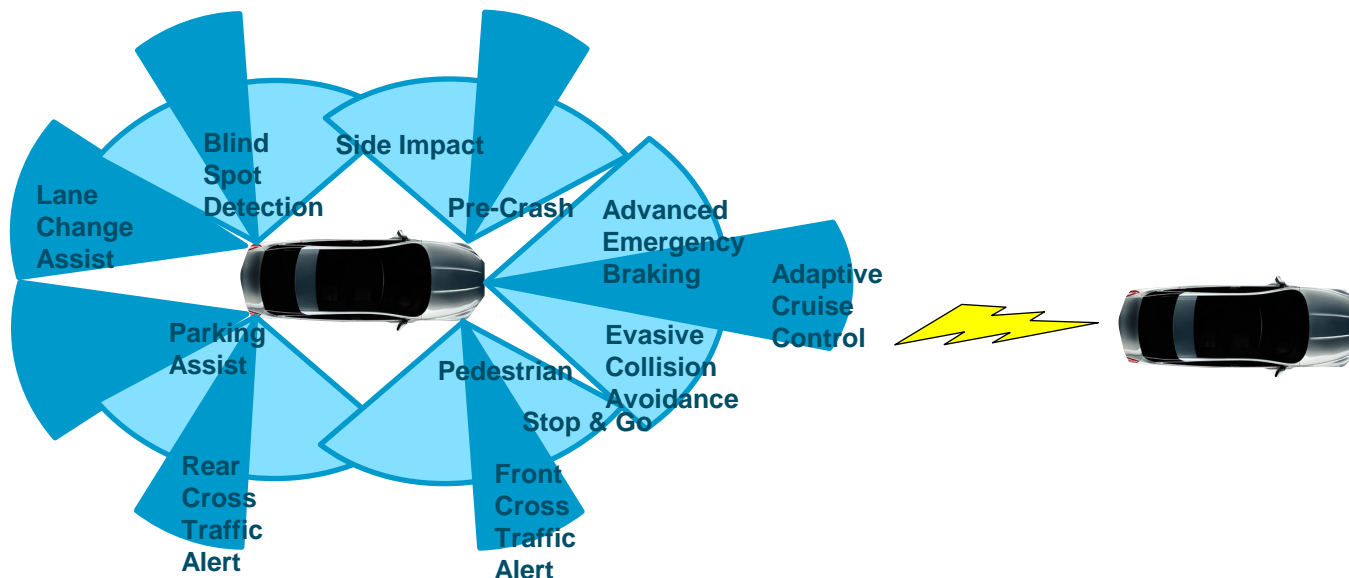
Example stop and go(highway)

>2025

Fully Automated

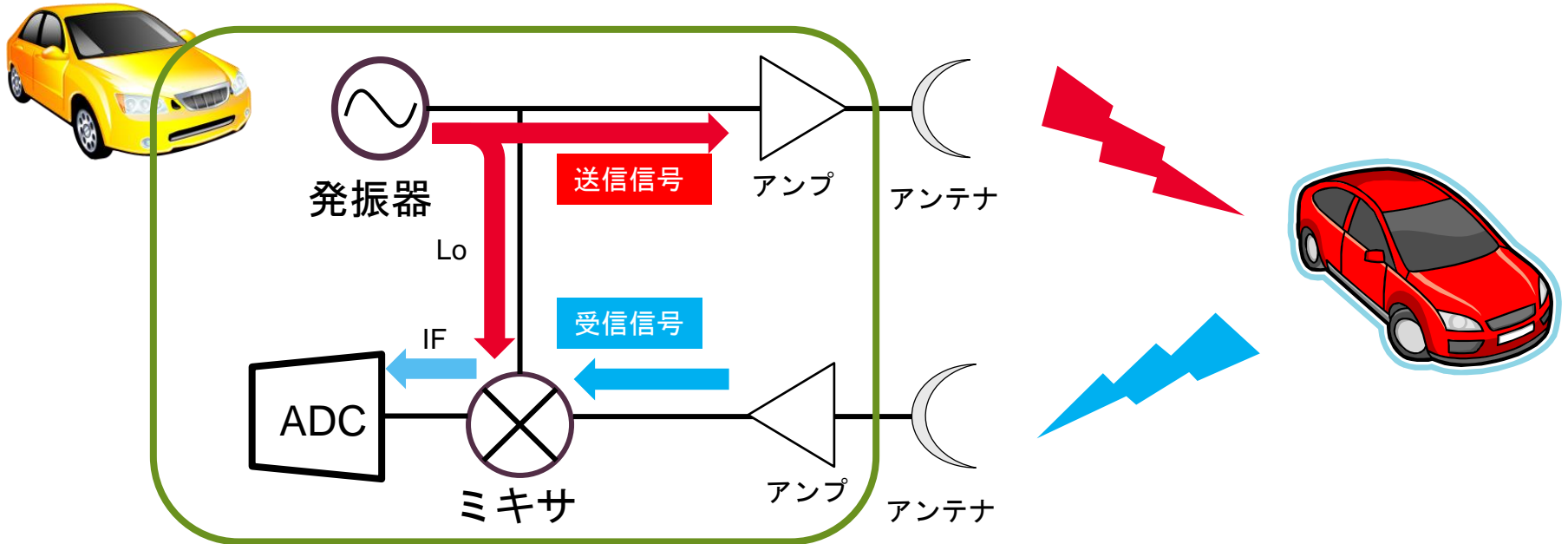
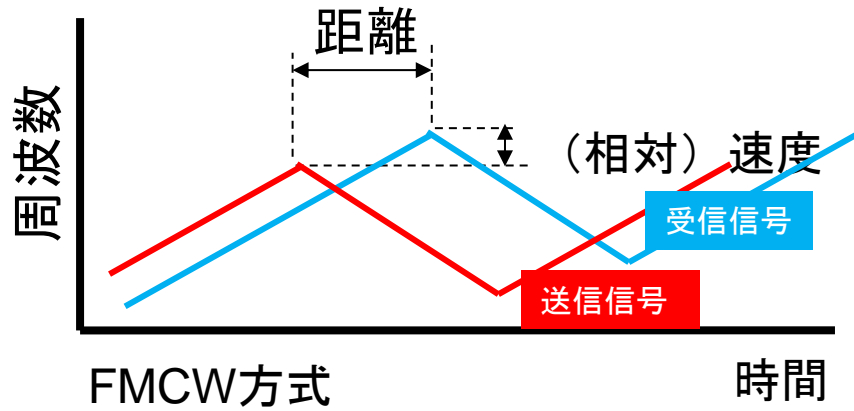
- Monitoring of the system not required
- Driver does not need to be able to take over the driving task

Example: Highway driving up to 130km/h

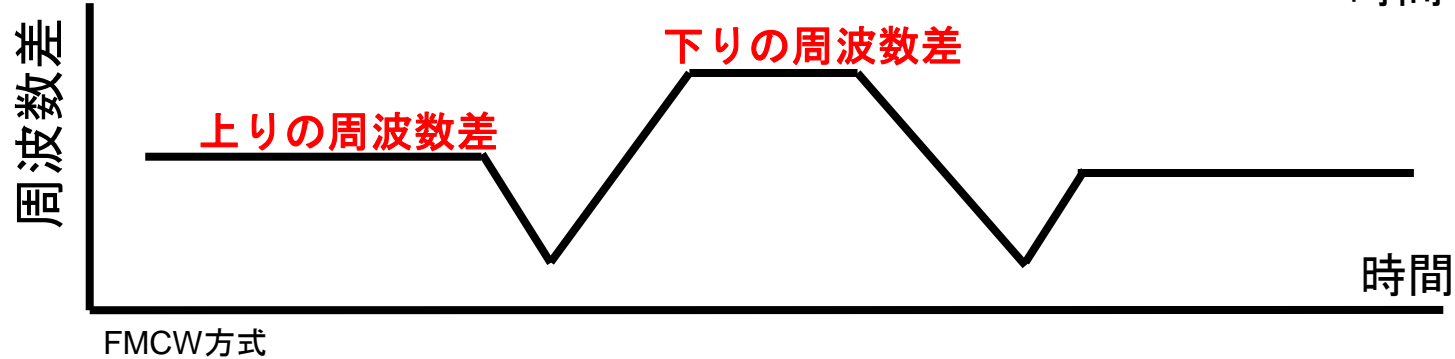
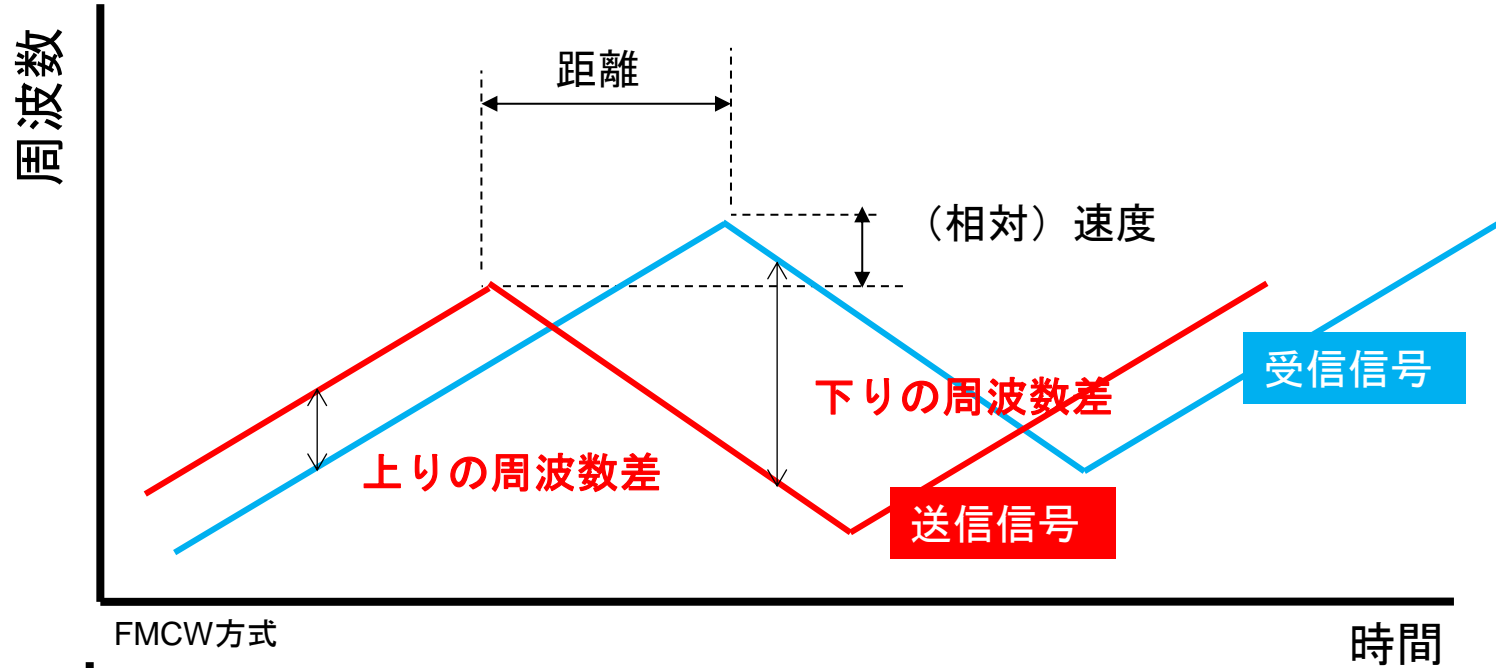


## 2025年には、全自動運転の時代がくる！？

# 車載ミリ波レーダとは？



# FM-CW方式レーダの原理

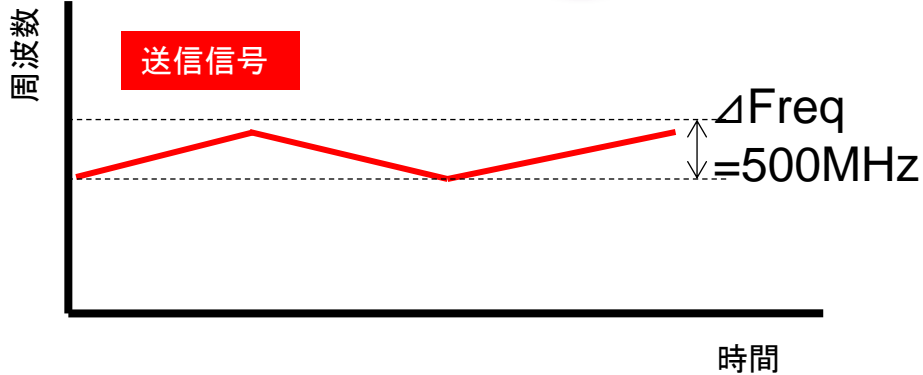
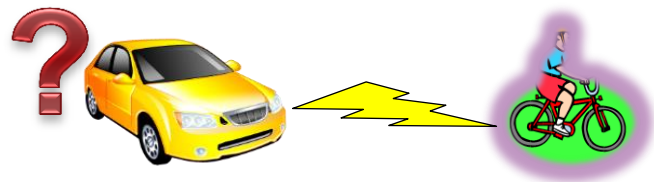


FMCWの距離は、光の速度 ÷ (4x周波数の1s当たりの変化量) x (下りの周波数差 + 上りの周波数差)

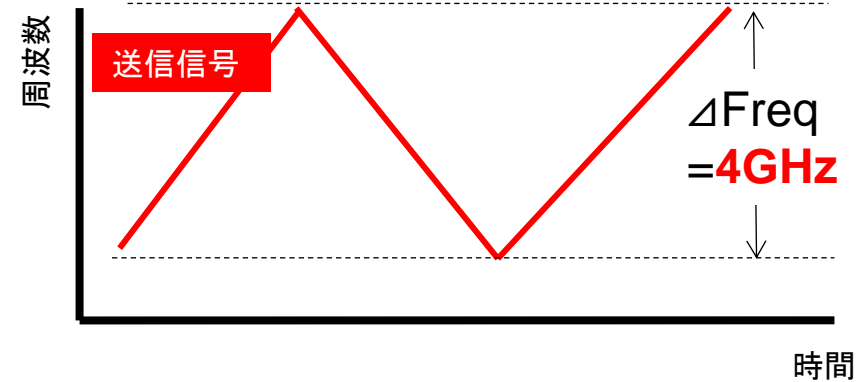
FMCWの速度は、光の速度 ÷ (4x送信周波数) x (下りの周波数差 - 上りの周波数差)

# 次世代の広帯域FMCWレーダ

従来のFMCW方式  
(距離分解能1m程度)



次世代FMCW方式  
(距離分解能10cm程度)

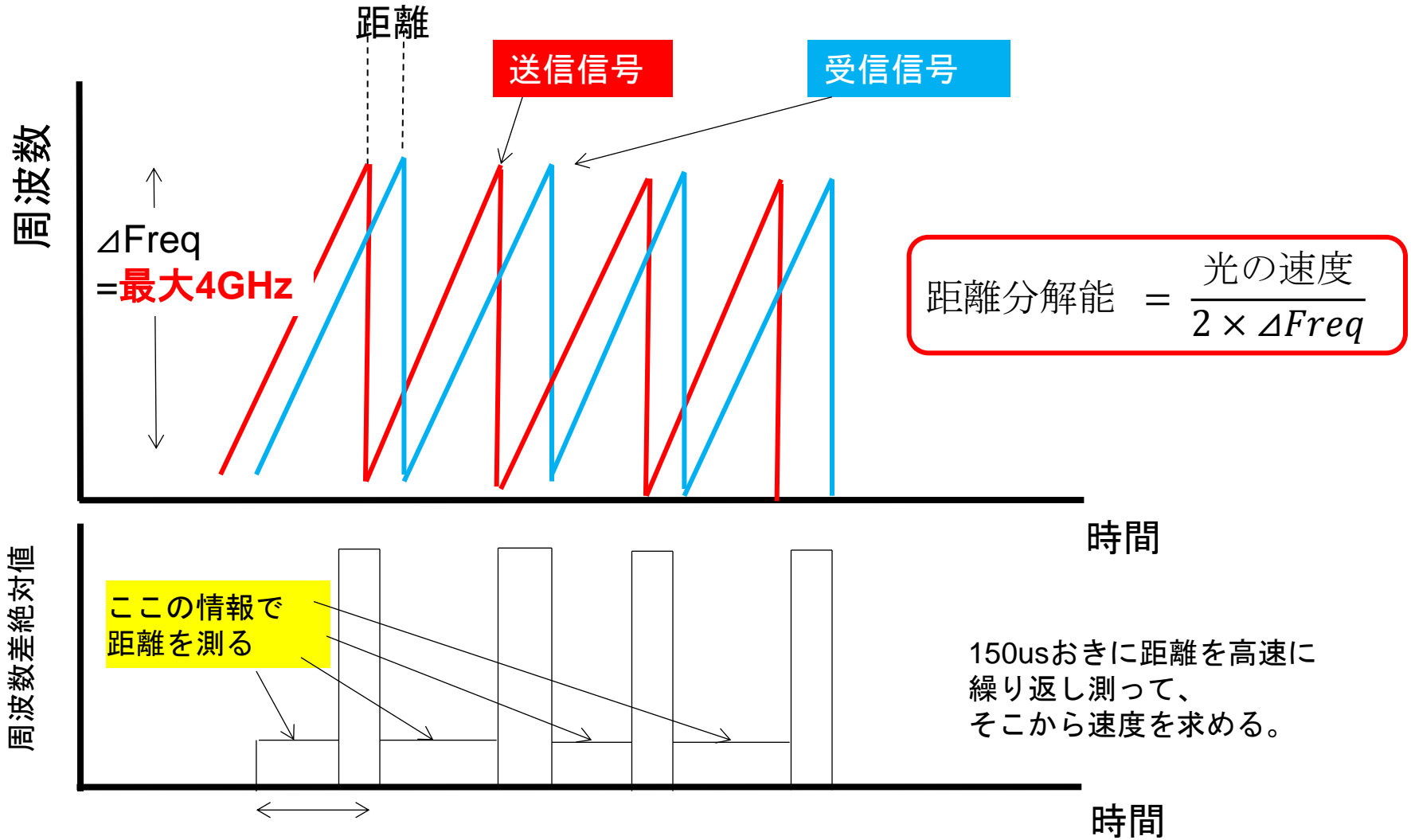


$$\text{距離分解能} = \frac{\text{光の速度}}{2 \times \Delta Freq}$$

→  $\Delta Freq$ を大きくすると、  
距離分解能が改善

これからのFMCWレーダは、FM変調帯域幅が最大4GHzの超広帯域FM信号

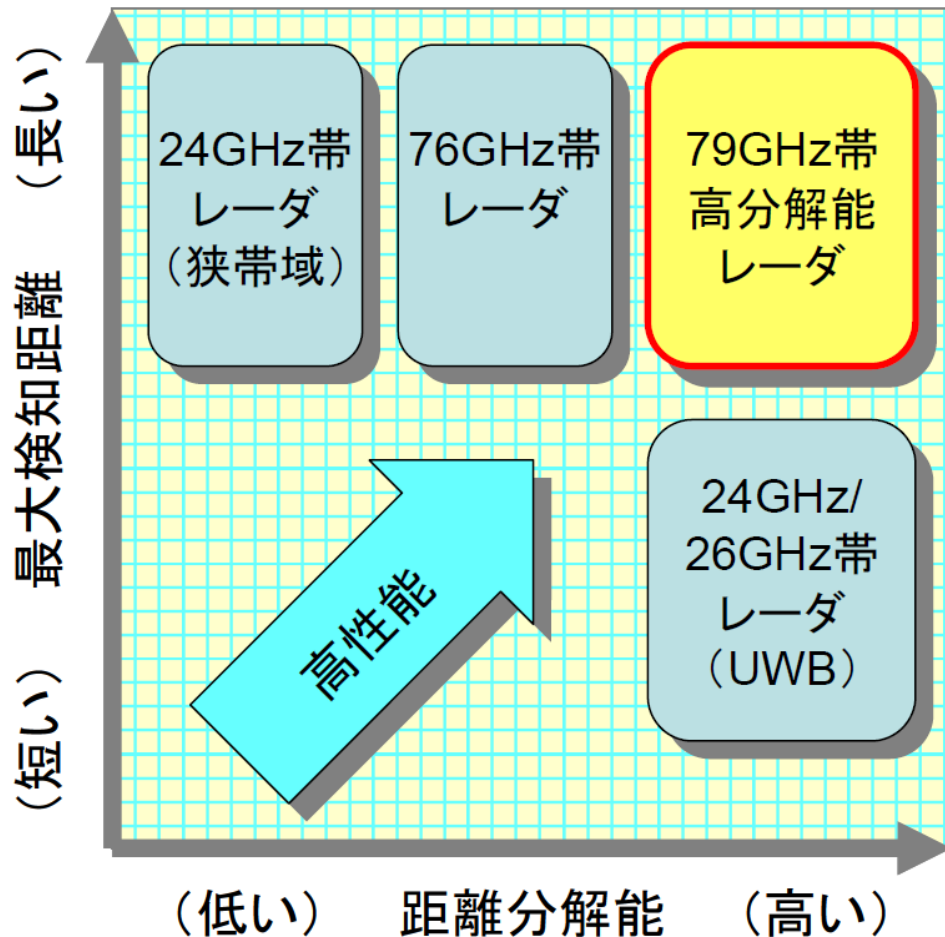
# Fast Ramp方式



距離は、光の速度 ÷ (2x周波数の1s当たりの変化量) x(上りの周波数差)

# 79GHz高分解能車載レーダ

(一部、総務省 平成24年の資料から抜粋)



- 最大検知距離と距離分解能の両立を目標とする
- 距離分解能はレーダの帯域幅に反比例する → **3~4GHzの超広帯域**
- 高速スキャン等により広い視野角も目指す
- 76GHz帯の要素技術やノウハウの応用が可能で参入障壁が比較的低い



# 車載ミリ波レーダ:使用される周波数帯と帯域幅

## 現行製品

- ・ 24GHz普通のレーダー : 方式=FM-CW  
BW=200MHz程度
- ・ 24GHzUWBレーダー : 方式=FM-CW or Fast Ramp  
BW= 最大2GHz~4GHz程度

## 現行製品

- ・ 76GHzレーダー : 方式=FM-CW or Fast Ramp  
BW= 最大1000MHz (300MHz程度が一般的)

## 次世代製品

- ・ 79GHzレーダ : 方式=FM-CW or Fast Ramp or Pulseなんでも  
BW= 最大4GHz (普通は1GHz程度が一般的)

現行の24GHz・76GHzレーダは、**BW=300MHz程度**  
次世代の79GHzレーダは、**BW=1GHz程度**の解析が必要

# 本日の内容

## 1. 車載ミリ波レーダ概要

## 2. 送信系の評価

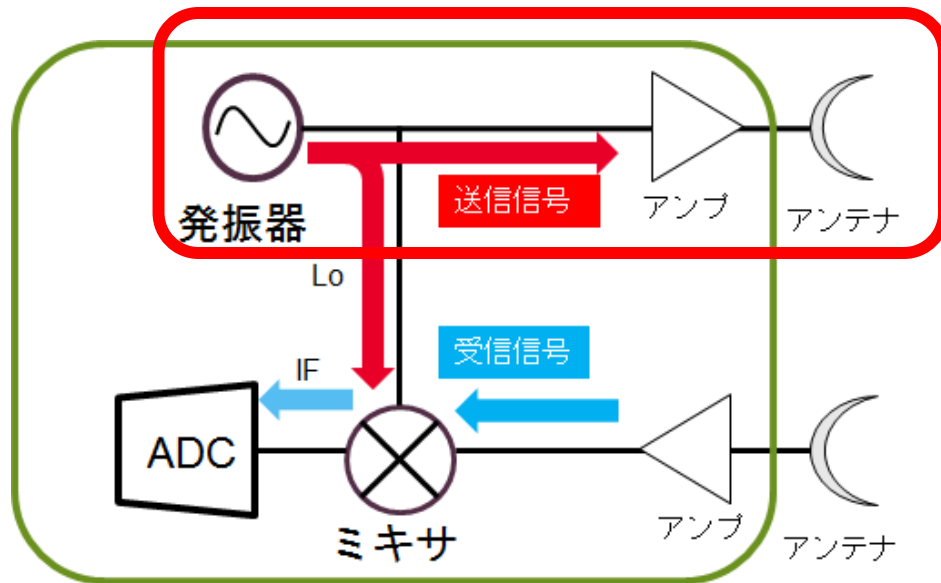
ミリ波スペクトラム測定

変調解析：FMCWリニアリティ評価, Coded Pulse EVM評価

## 3. 基準信号源(受信系の評価)

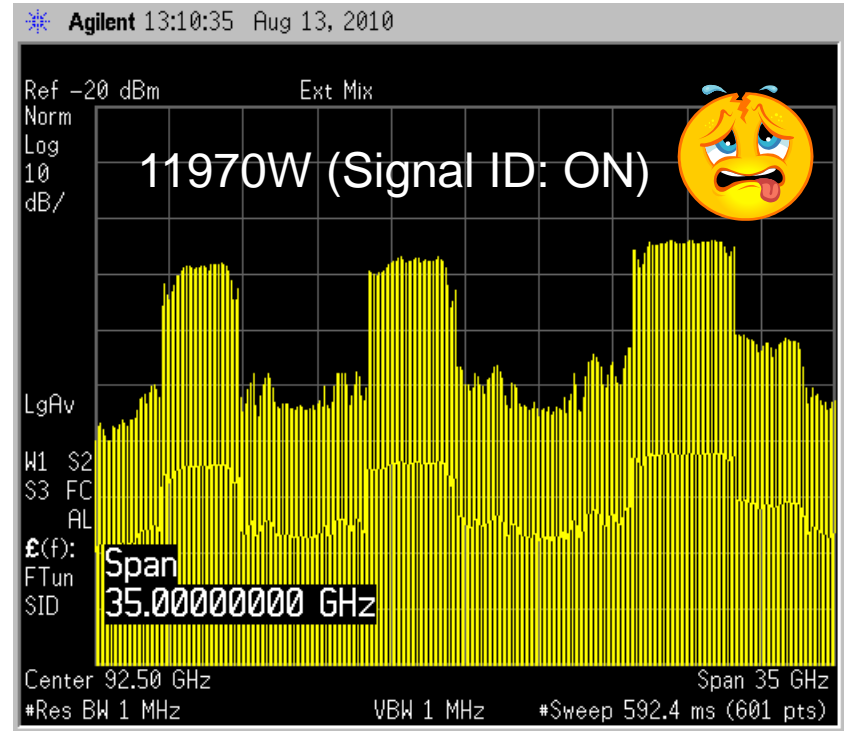
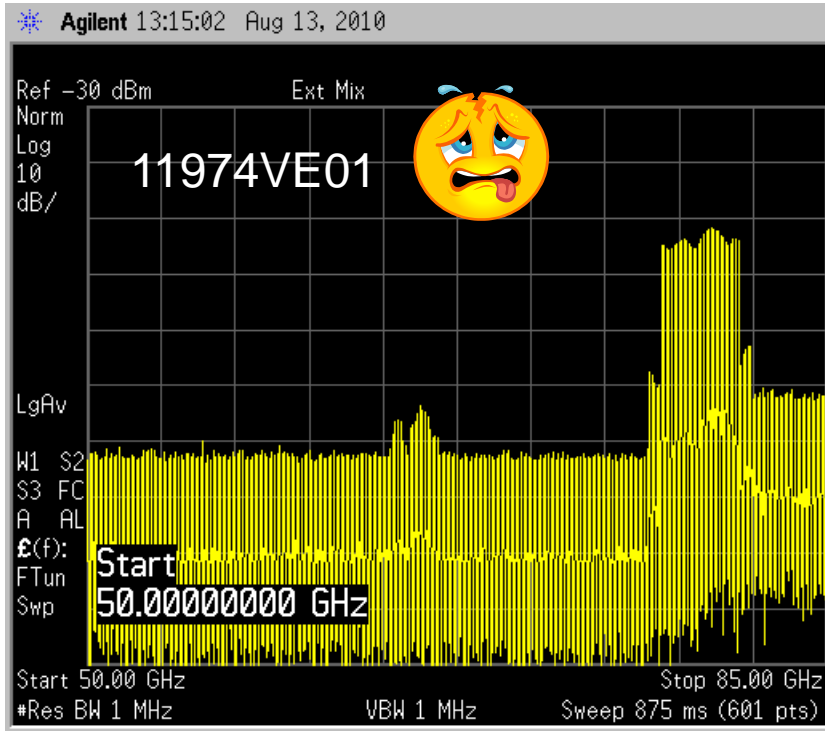
## 4. 各種部品評価

## 5. シミュレーションの活用



# 既存の高調波ミキサによる測定結果

レーダ模擬信号（79GHz, 3.6GHzp-pのFM-CW信号）を50～85GHzで測定



元々の仕様が～80GHzであり、この信号の測定は性能保証外。75GHzを超えると変換損が急速に増えるので、スペクトラムも平坦にならない。

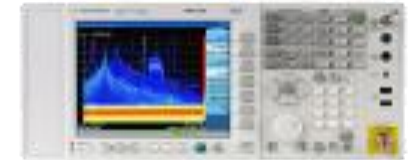
プリセクタが無いいため原理的にイメージが多発する。またこの種の超広帯域信号

ではSignal ID機能も正常に動作せず、不正なイメージが多数残ってしまう。

# 75~83GHz ブロックダウンコンバータ

PS-X30\_W10117A  
ブロックダウンコンバータ

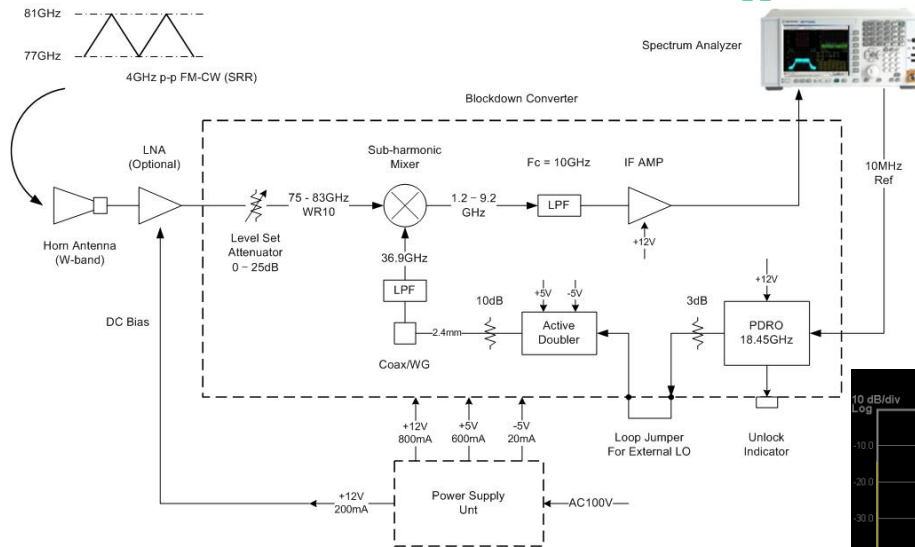
スペクトラムアナライザ



もしくはオシロスコープ



**DUT**  
mmW Output  
(Typ. Test RF = 76 - 81GHz)



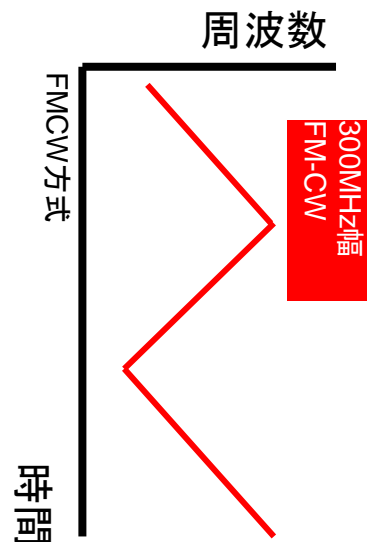
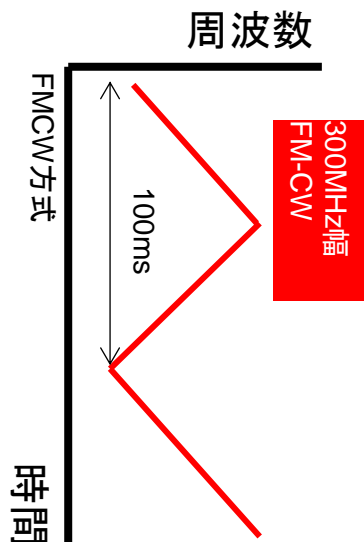
- ・ 75~83GHzの帯域をイメージ信号の影響を受けずに測定可能
- ・ 内蔵LO (外部LO入力も可能)
- ・ 4GHzといった超広帯域変調でも、スペクトラム測定可能



# スペクトラム測定（占有帯幅）

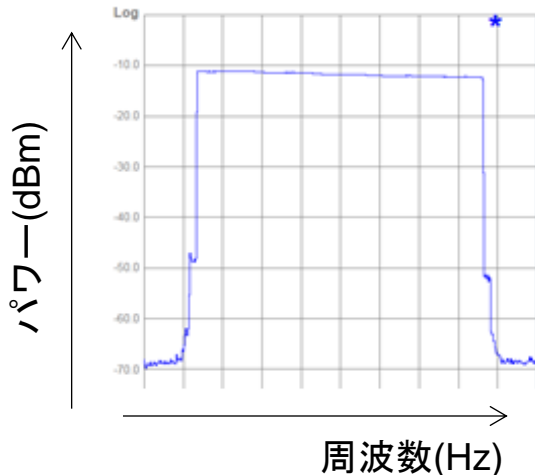
## 【測定例】

- 占有帯域幅 300MHz
- 変調周期=100ms
- 周波数ポイント数=401点

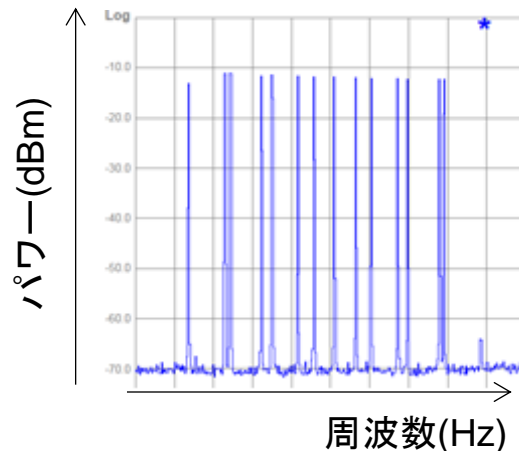


【掃引時間=40秒】  
（100msの変調周期を401回待つ）

取りこぼしが無い  
が遅い



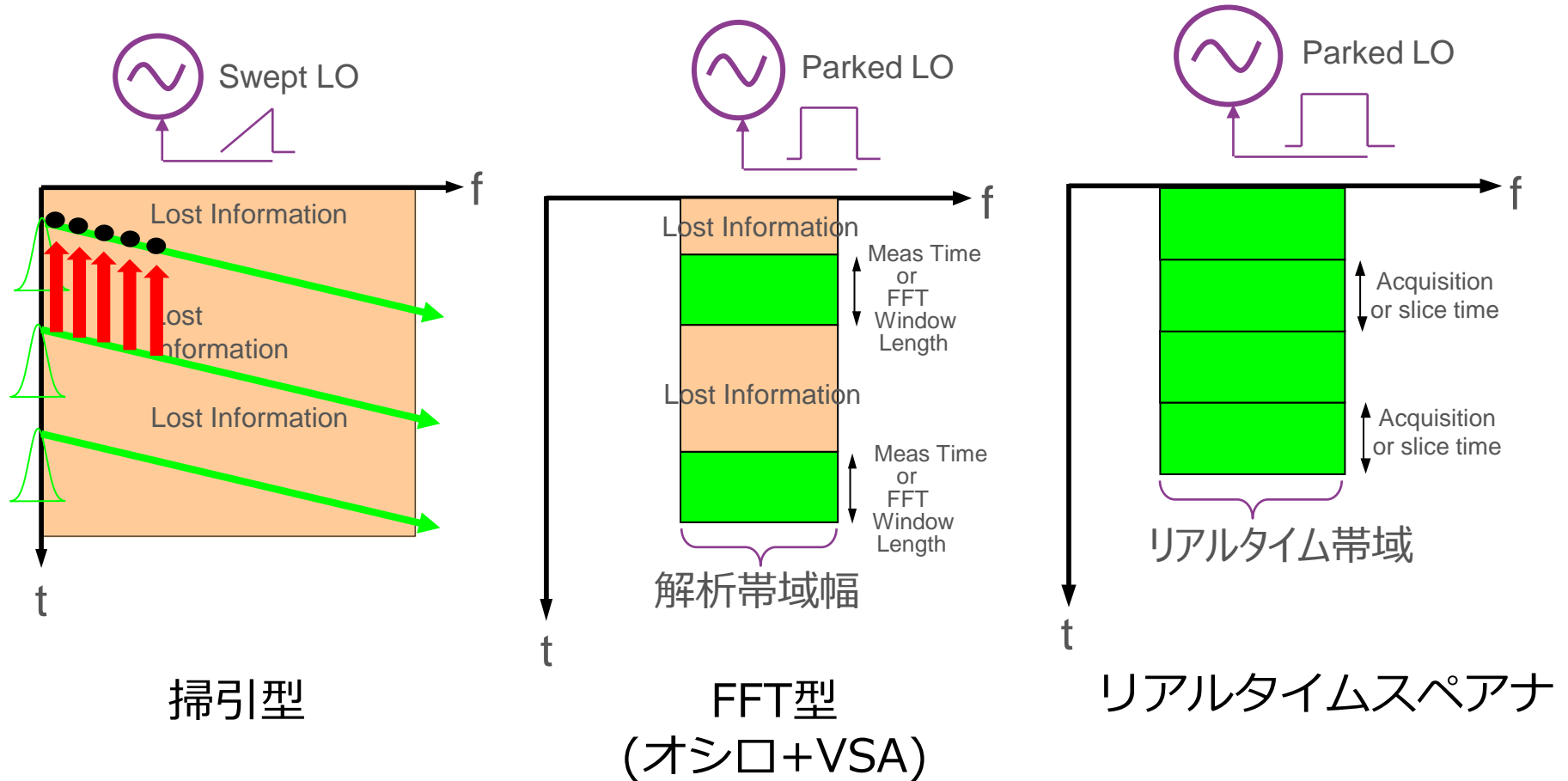
【掃引時間=1秒】  
測定は速いが、  
取りこぼしがあるので、  
正しく測定できていない



従来の掃引型スペクトラム測定では時間がかかる

# スペクトラム・アナライザの各種方式

## 掃引型とFFTとRTSAの処理の違い

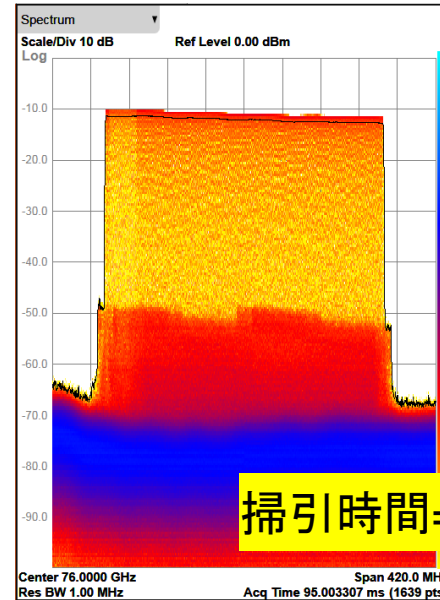


# 高速スペクトラム測定 ～510MHz

→ ダウンコンバータ + UXA(N9040B)シグナル・アナライザによる解析

【掃引型スペクトラム・アナライザ】

【リアルタイム・スペクトラム・アナライザ】

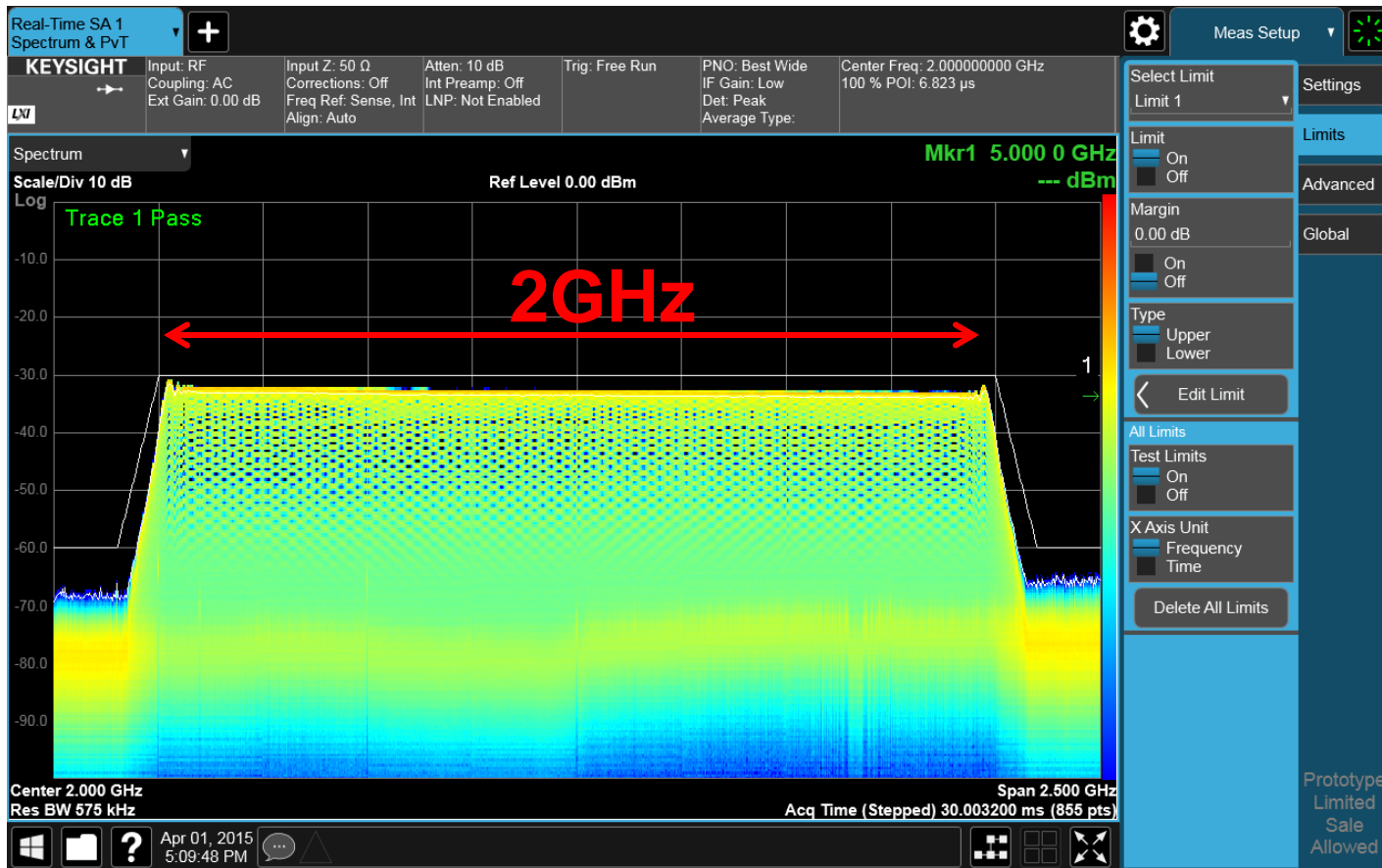


電波法試験に応じた、設定測定が可能  
ただし、測定時間が長い

測定時間が非常に短い  
電波法試験に応じた、設定や測定はできない  
本格的な試験を掃引型スペアナで行う前の、  
簡易的な試験に便利

# 高速スペクトラム測定 ～GHz帯域幅

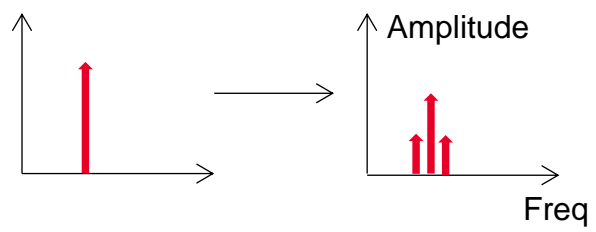
→ ダウンコンバータ + UXA(N9040B)シグナル・アナライザによる解析



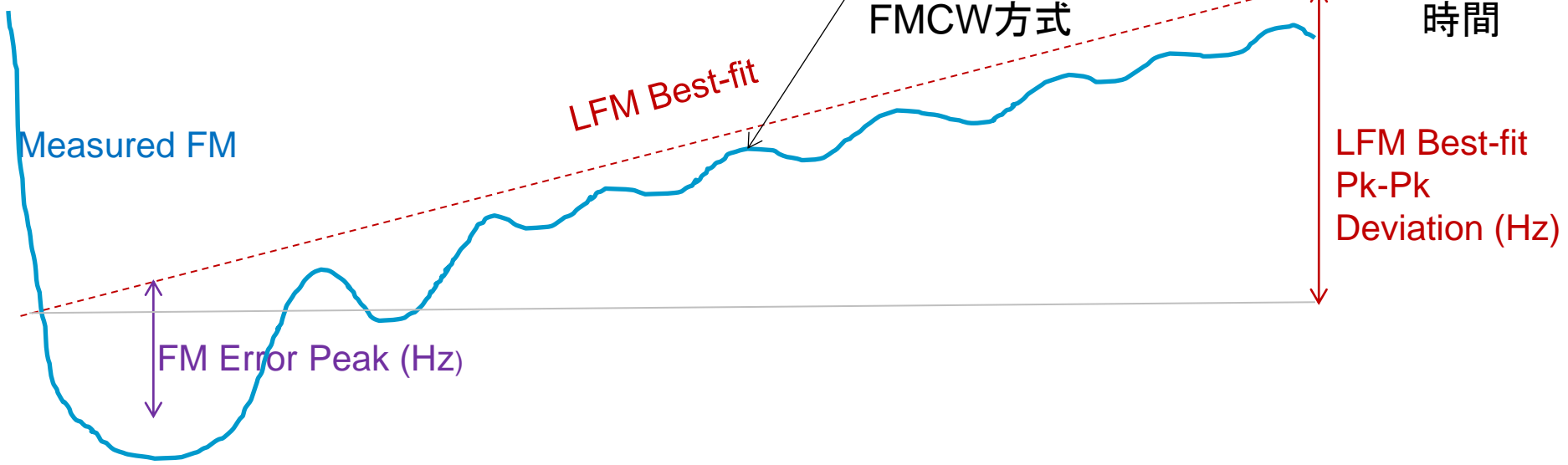
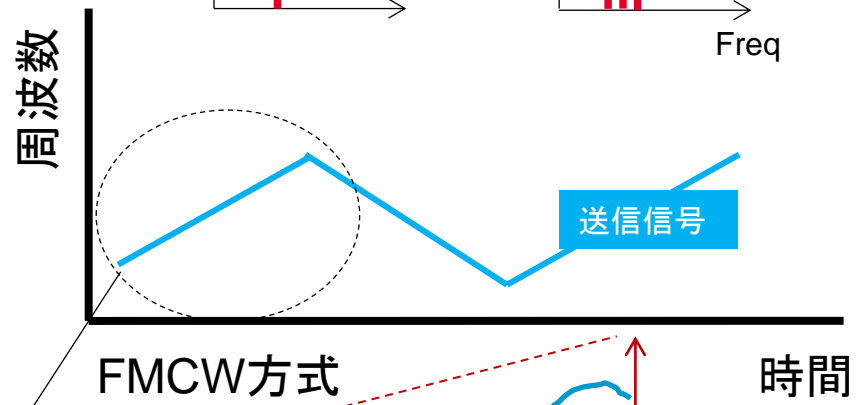
RTSAを複数のバンドに分けて実施し、510MHzを超える帯域をカバー



# FMリニアリティ (変調解析)



どれだけまっすぐに  
FM変調がかかっているのかを測定  
これが曲がっているとレーダの検知情報がおかしくなる



$$\text{FM Error Peak (Hz)} = \max(\text{Measured FM} - \text{LFM Best-fit})$$

# FMリニアリティ（変調解析）～1GHz

→UXA(N9040B)シグナル・アナライザ及び  
VSA(89601B)による解析

**1GHz**  
**Wide Bandwidth**



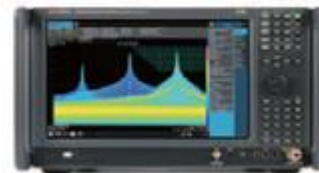
**EXA(N9010B)**  
10 Hz to 44 GHz, 40 MHz BW



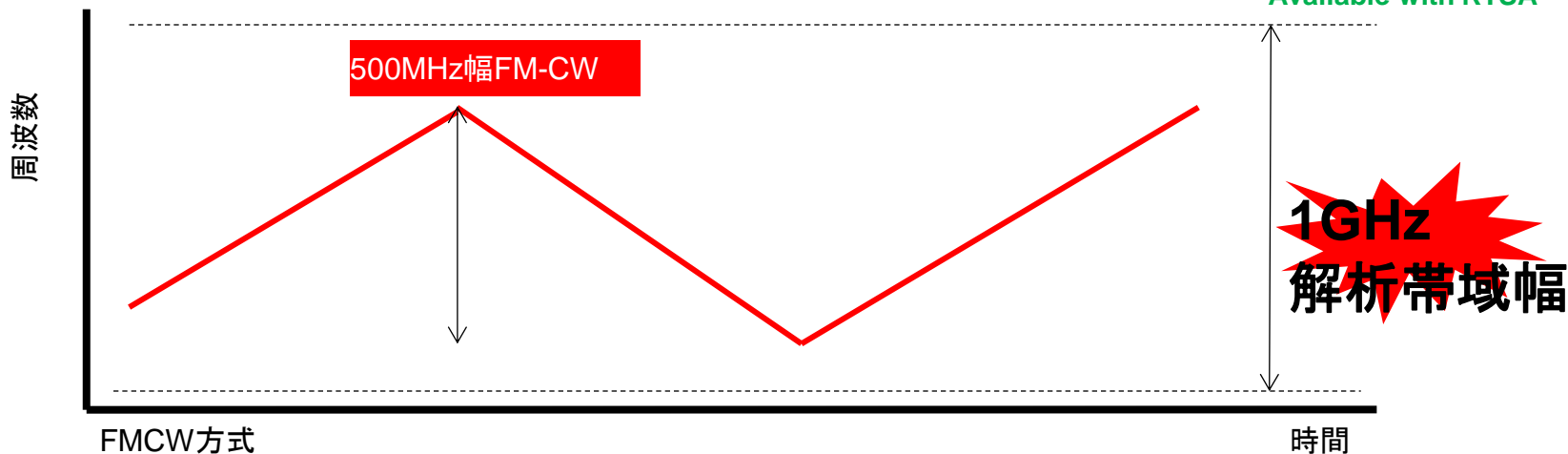
**MXA(N9020B)**  
10 Hz to 26.5 GHz, 160 MHz BW  
Available with RTSA



**PXA(N9030B)**  
3 Hz to 50 GHz, 510 MHz BW  
Available with RTSA



**UXA(N9040B)**  
3 Hz to 50 GHz, 1GHz BW  
Available with RTSA



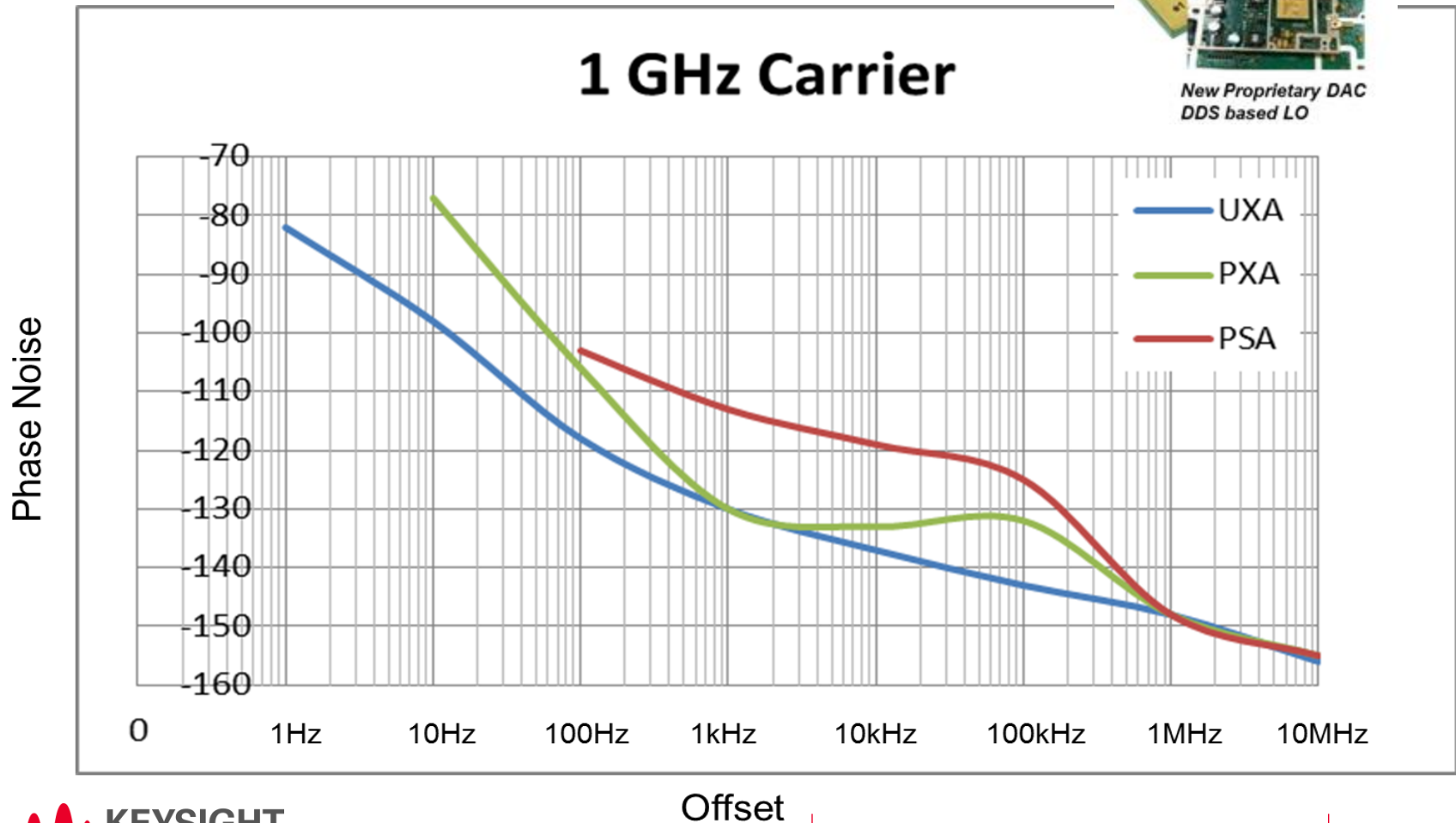
**UXAなら300MHz帯域幅の現行FM-CWレーダの帯域幅をカバー**

\* 広帯域解析時は、一部解析機能が～数ms周期程度の短時間の解析に制限される場合があります。

# PXAに比べ10-100倍高性能な位相雑音



w/ a DDS based LO and a new freq. ref. assembly

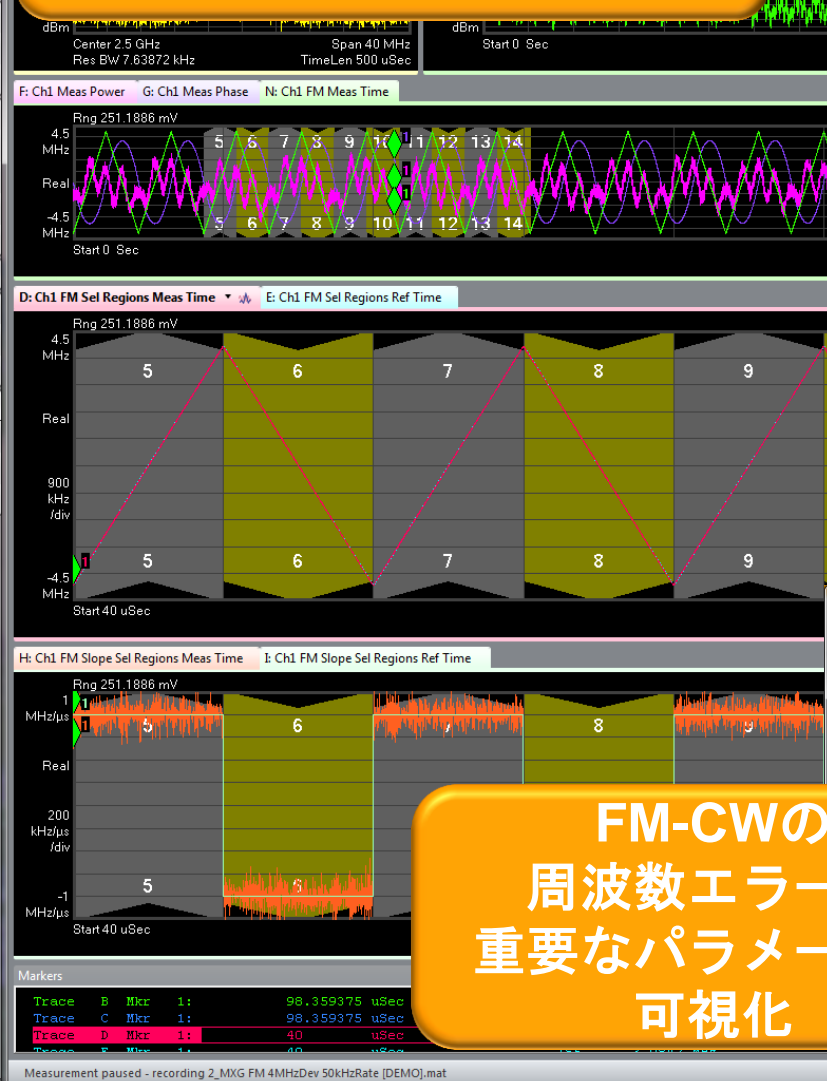






# FMCW Radar Analysis - 89600 VSA Solution

測定結果から  
自動でFM変調のスロープ検出、  
FMリニアリティを解析

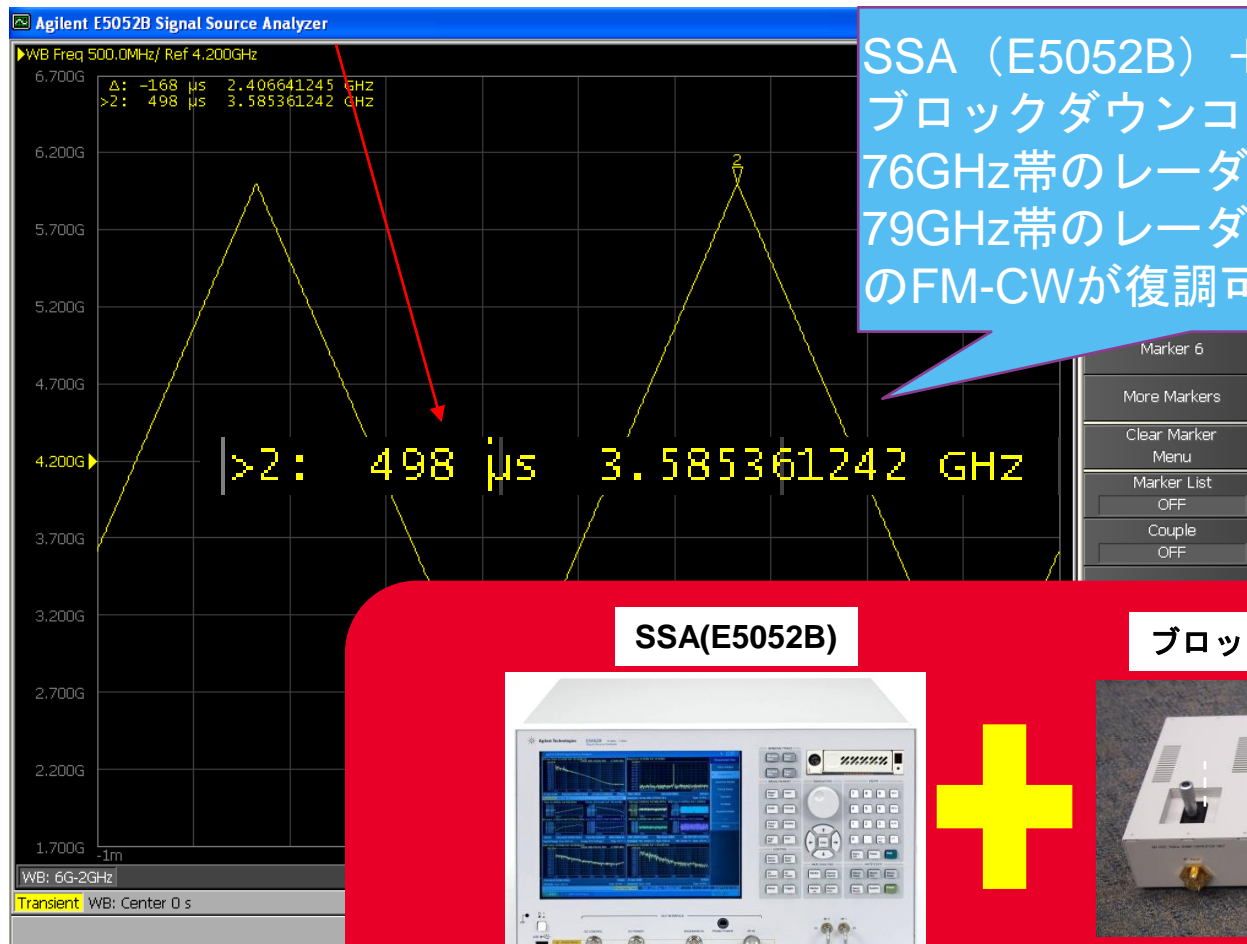


統計処理を行い  
ヒストグラムや数値データとして表示

FM-CWの  
周波数エラー等  
重要なパラメータを  
可視化

# GHz帯域幅のFMCWのリニアリティ測定

msec order周期の場合→ シグナル・ソース・アナライザ(E5052B)による解析



SSA (E5052B) +  
ブロックダウンコンバータなら、  
76GHz帯のレーダなら2GHz帯域、  
79GHz帯のレーダなら3.6GHz帯域、  
のFM-CWが復調可能

SSA(E5052B)



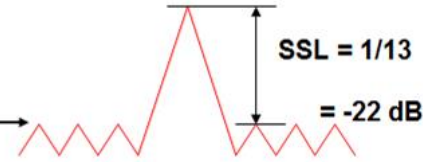
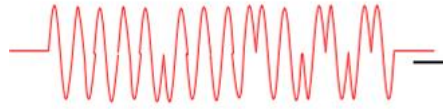
ブロックダウンコンバータ





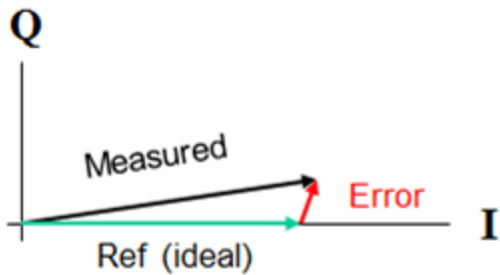
# パルス符号変調レーダ解析- 89600 VSA Solution

Barkerコード(BPSK信号)



パルス圧縮

## Barker EVM



- Carrier Lock
- Symbol Lock
- Filter
- Demod Bits
- Construct Reference from bits

Use for SSL

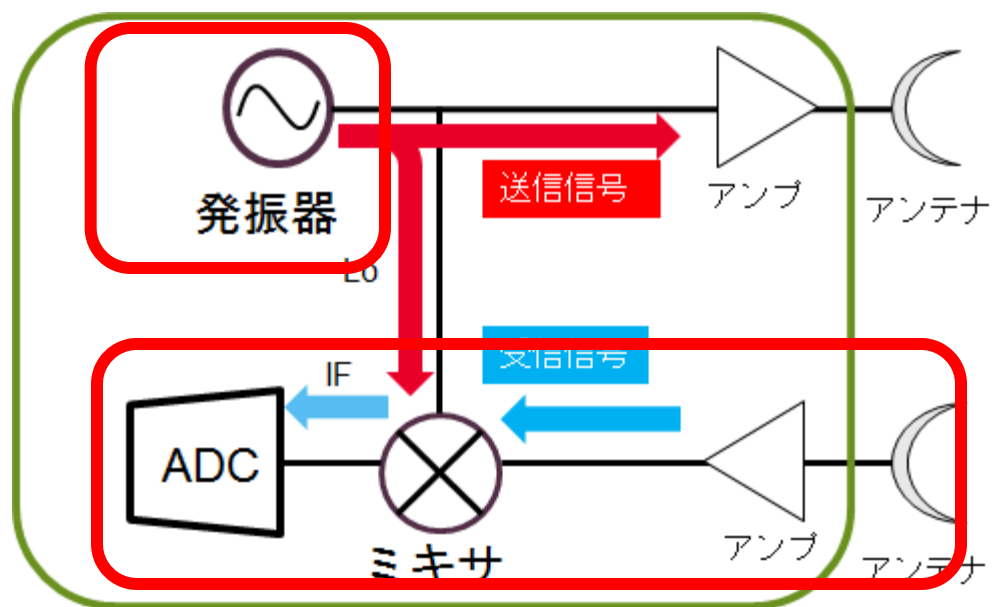
89601B(AYA)を使った  
Barker信号の解析例 EVM

EVM		
EVM	= 2.7785	%rms
Mag Err	= 2.7562	%rms
Phase Err	= 201.46	mdeg
Freq Err	= 26.209	Hz
IQ Offset	= -40.598	dB
Amp Droop	= 86.01	dB/sym

0 0000110 01010

# 本日の内容

1. 車載ミリ波レーダ概要
2. 送信系の評価
3. 基準信号源（受信系の評価）

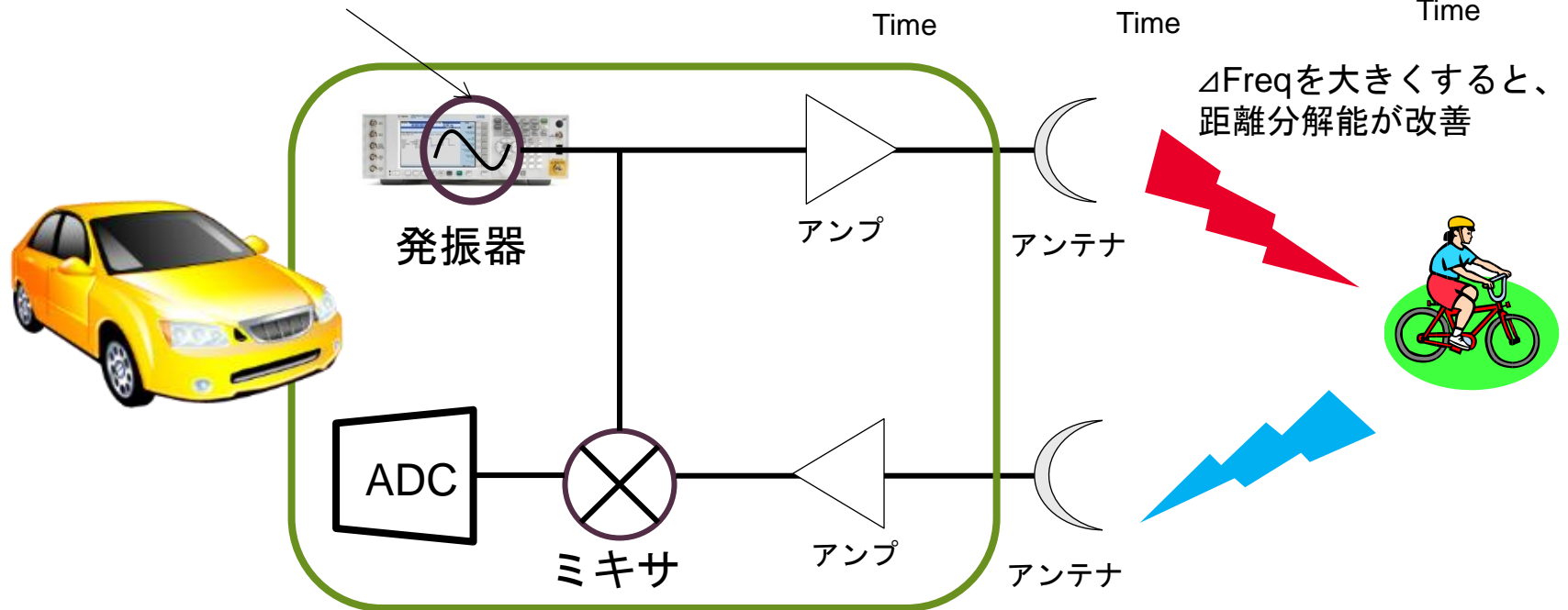
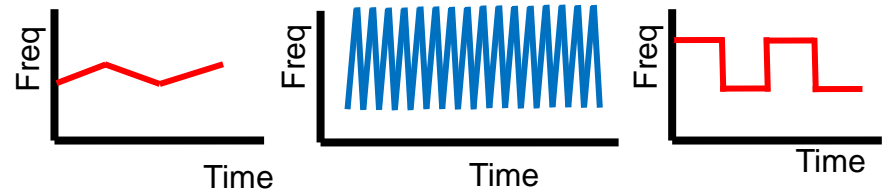




# 車載レーダのプロトタイプの研究開発用途に 色々な変調を試すための信号発生器はあるか？

色々な変調方式、変調帯域、  
変調レートを試したい・・・。

内部発振器の代わりとなる  
信号発生器はないのか？



# 従来の信号発生器のアナログ変調では、 4GHzといった高帯域のFM変調は出せない！！



キャリア周波数	最大FM変調幅 (占有帯域幅)	PSG(E8257D) FM変調幅(p-p)	E8257Dで 出力可能？
24GHz帯	～200MHz	64MHz	NG X
76GHz帯	～500MHz	384MHz (withミリ波エクステンダ)	NG X
79GHz帯	～4GHz	384MHz (withミリ波エクステンダ)	NG X

# N5193A UXG Agile Signal Generator

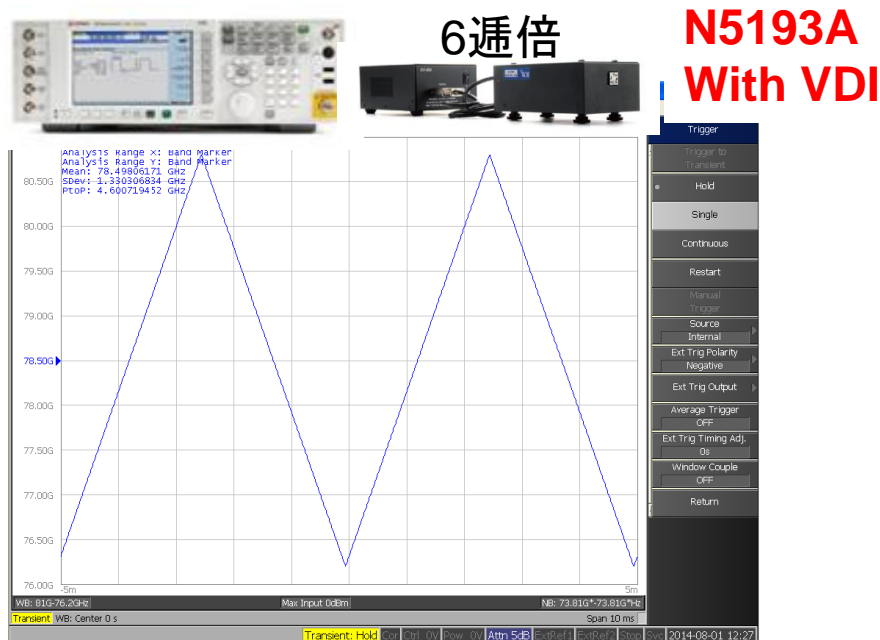
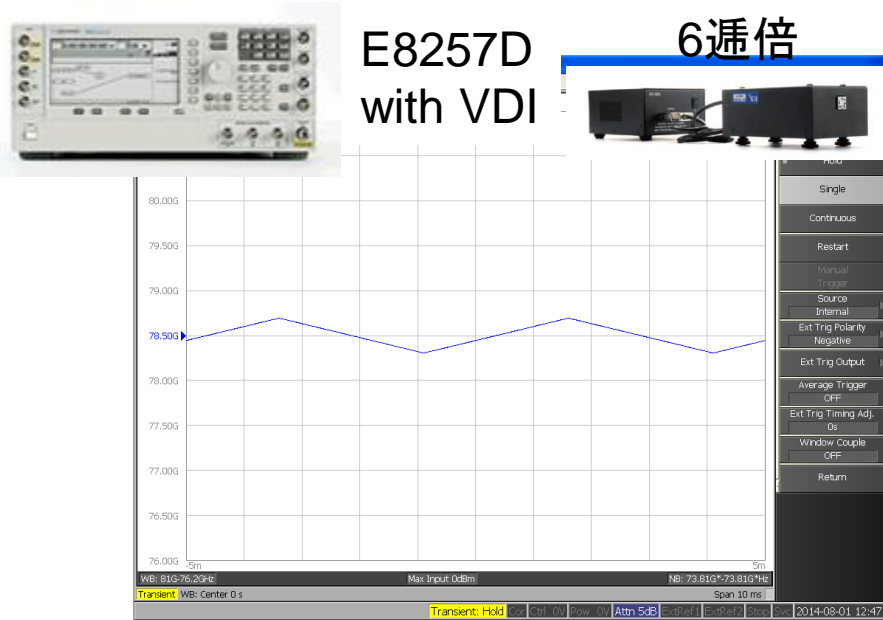
Signal Generation Redefined



可能です！！

# 79GHzキャリア FM変調比較

# PSG (E8257D)vs UXG(N5193A)



FM Deviation 384MHzp-pが限界

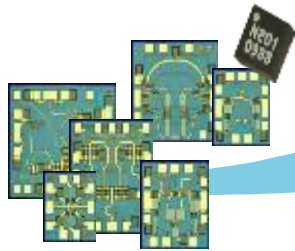
FM Deviation 4.6GHzp-pが簡単に出力可

キャリア周波数	最大FM変調幅 (占有帯域幅)	PSG(E8257Dの FM変調で出力可能?)	UXG(N5193Aの FM変調で出力可能?)
24GHz帯	~ 200MHz	NG X	OK! ✓
76GHz帯	~ 500MHz	NG X	OK! (withミリ波エクステンダ) ✓
79GHz帯	~ 4GHz	NG X	OK! (withミリ波エクステンダ) ✓

# UXG - Enabling Technologies



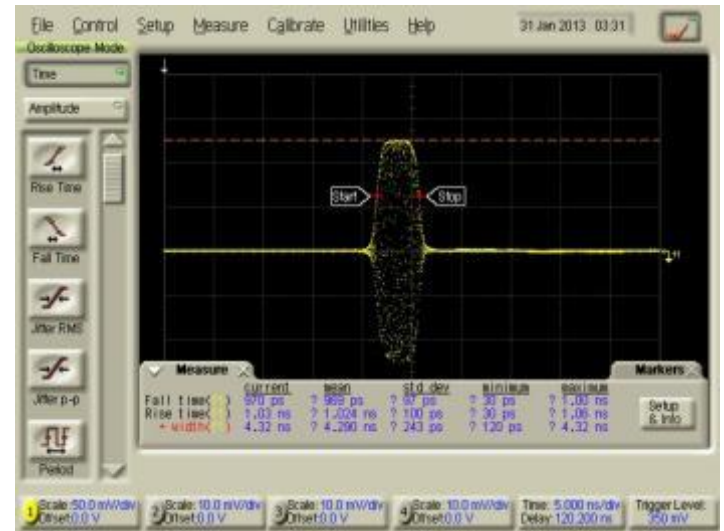
**UXG Agile Signal Generator**



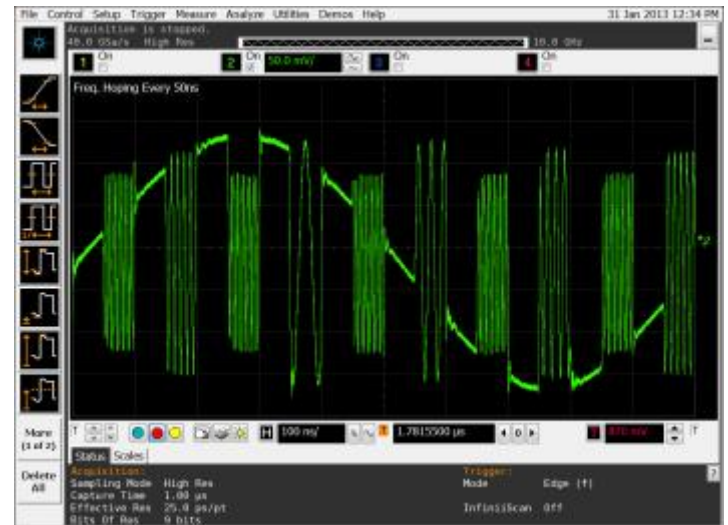
**nanoFET MMIC  
Switches & Attenuators**



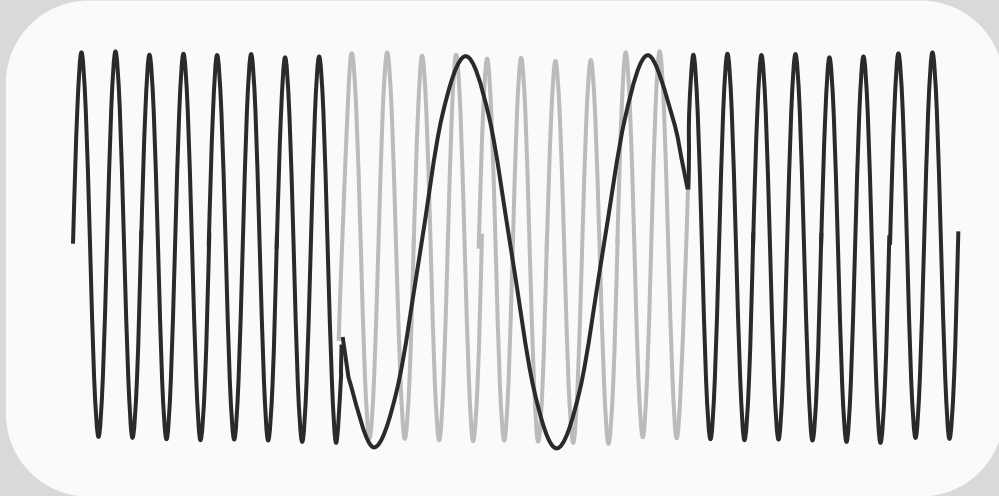
**Proprietary  
DDS DAC**



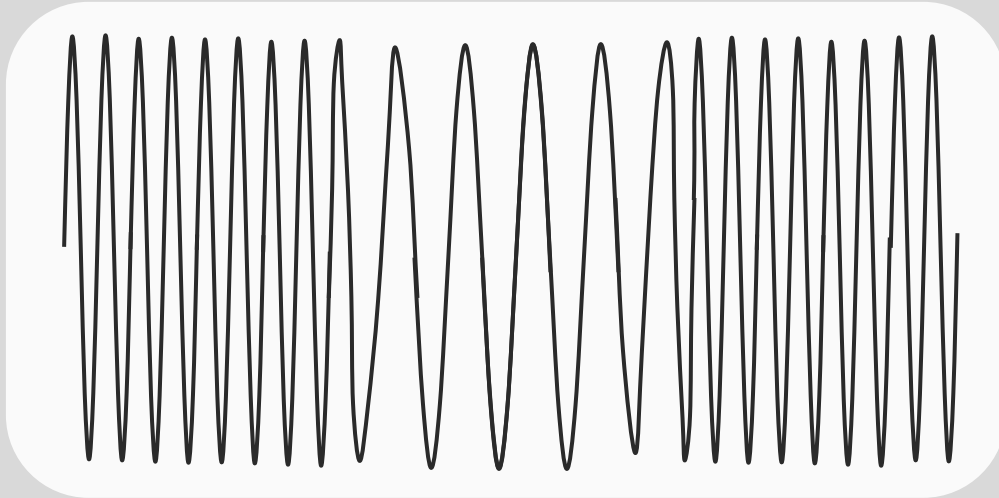
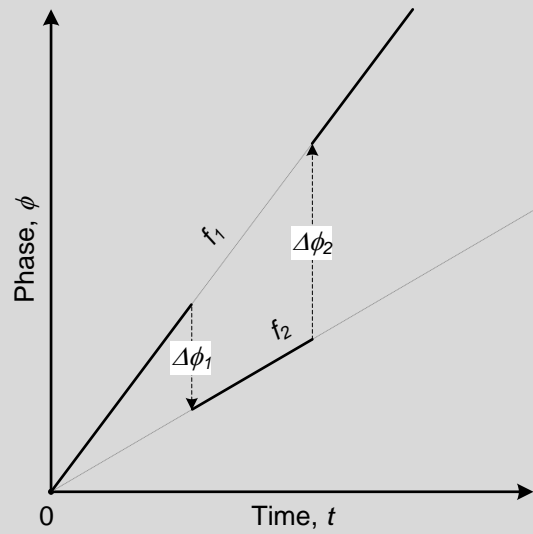
**1ns on/off switch**



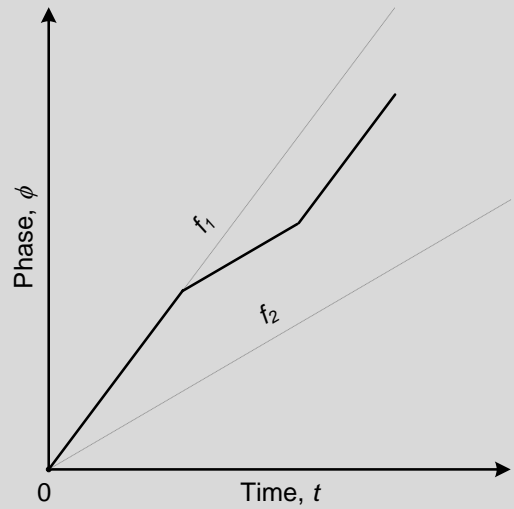
**Freq / Phase Complete control**



Phase Repeatable



Phase Continuous



# より複雑な変調方式の場合にはAWG+Upconverter

任意波形発生器(AWG)

79GHz帯 Up-converter

## M8190A

14 bit 8 GSa/s /  
12 bit 12 Gsa/s  
5 GHz analog bw



Best signal quality and  
longest playtime

SFDR: -90 dBc .

## M8195A

65 GSa/s  
20 GHz analog bw



Highest bandwidth and port  
density in a 1U AXIe module

Jitter 5 ps pp @ 16Gb/s  
SFDR: up to -80 dBc

IF信号



+



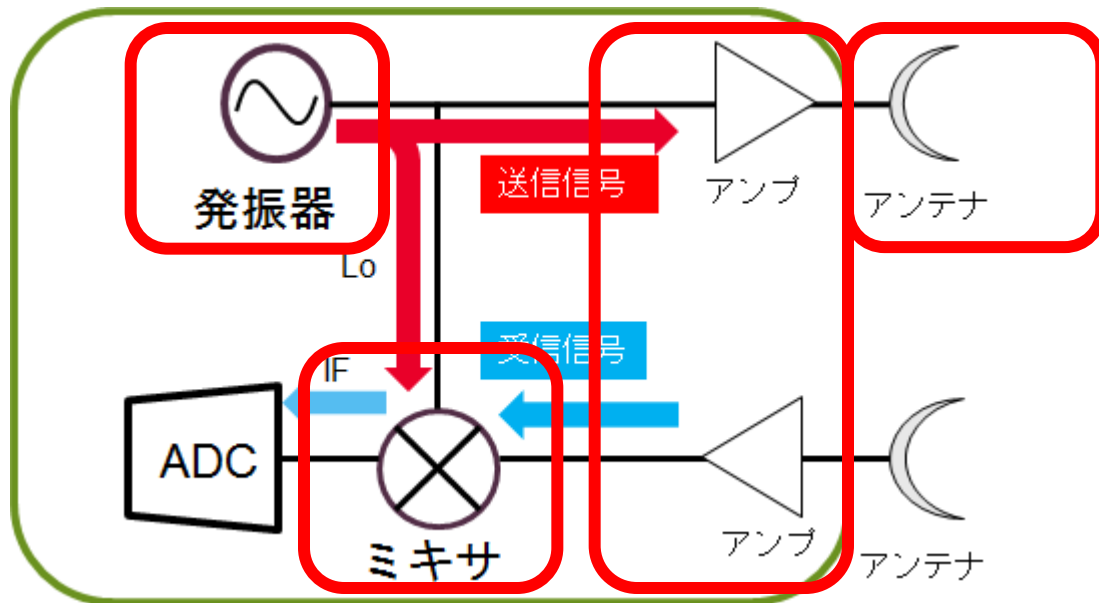
79GHz



AWGとミキサベースなので、  
FMCWだけでなく Coded パルス信号その他複雑な信号を生成可能

# 本日の内容

1. 車載ミリ波レーダ概要
2. 送信系の評価
3. 受信系の評価



## 4. 各種部品評価

発振器位相雑音測定

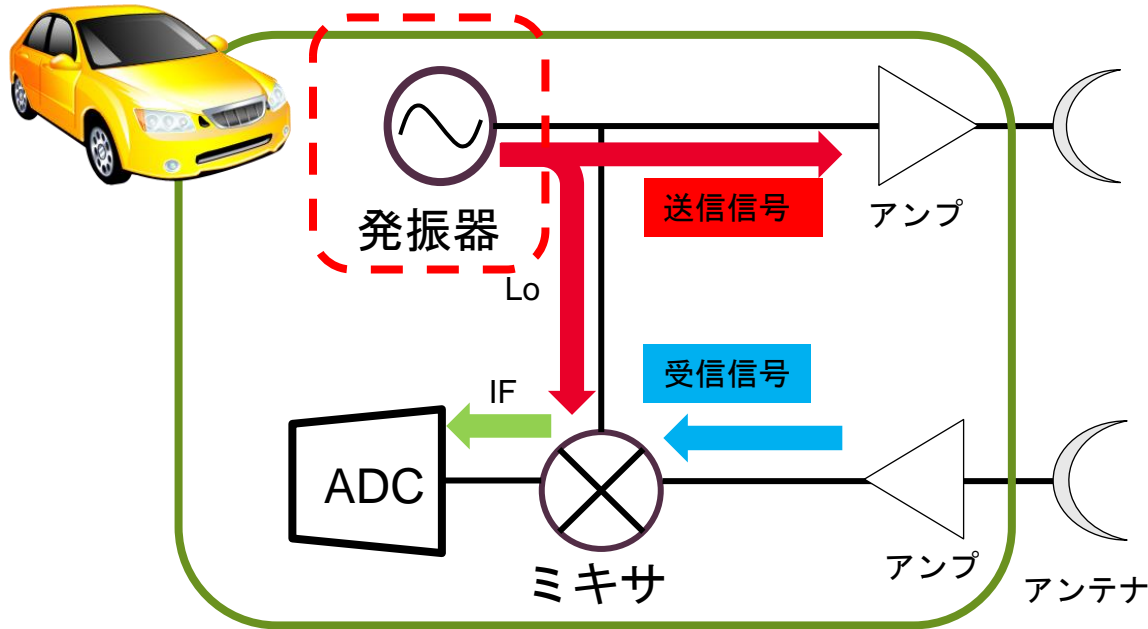
ミリ波部品評価(Amp, Passive部品, ミキサ, アンテナ)

## 5. シミュレーションの活用



# 発振器位相雑音測定

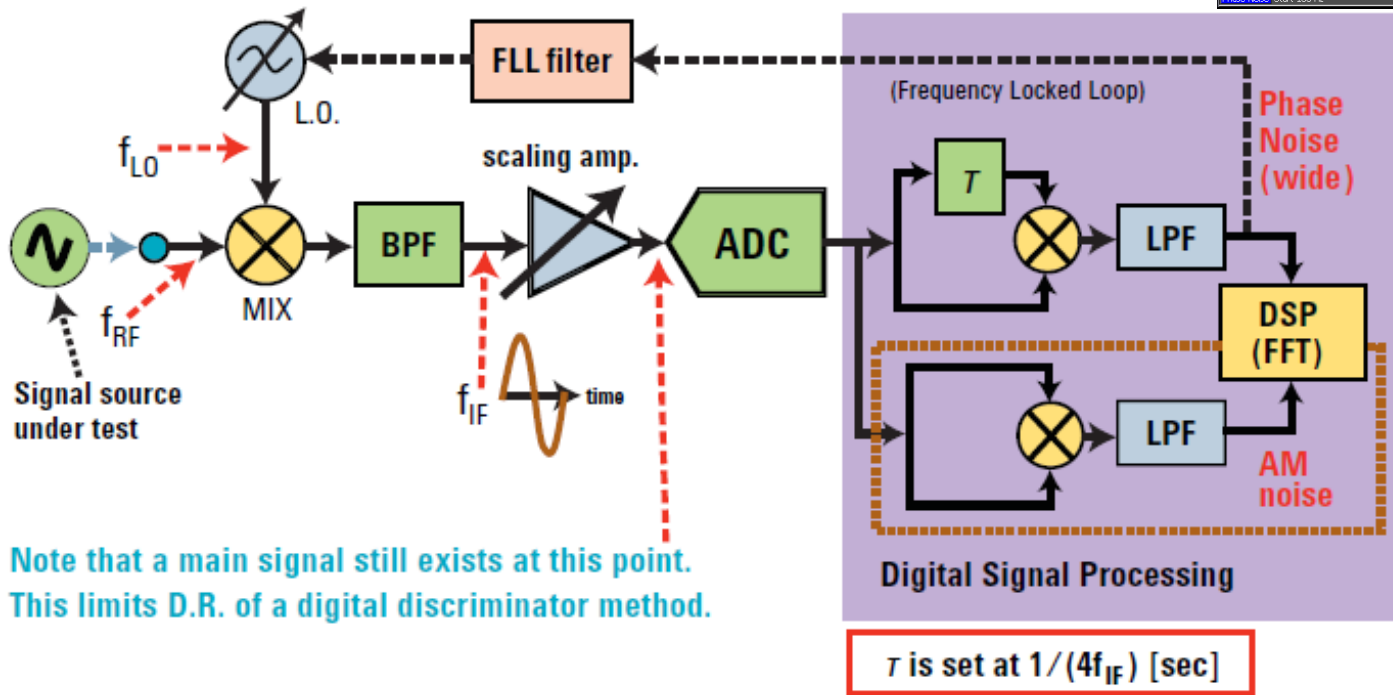
E5052Bシグナル・ソース・アナライザ



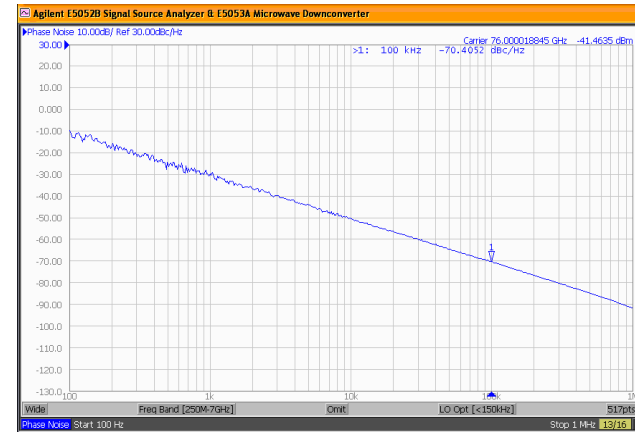
車載レーダに用いられる発振器の位相雑音（揺らぎ）特性が悪いと、ターゲットがぼやける

# 発振器位相雑音測定

Basic theory of operation (for a single channel of the E5052B)



位相雑音



オフセット周波数  
E5052Bによるミリ波発振器位相雑音測定結果



- ・ 車載レーダ用発振器のCW状態での安定度（位相雑音）を測定可能
- ・ スペクトラム・アナライザでは測定できないような不安定な発振器でも評価可能

# ミリ波対応ネットワーク・アナライザ

N5251A 10MHz-110GHz(Single Sweep)

ミリ波ネットワーク・アナライザ

60-90GHz(Eband)

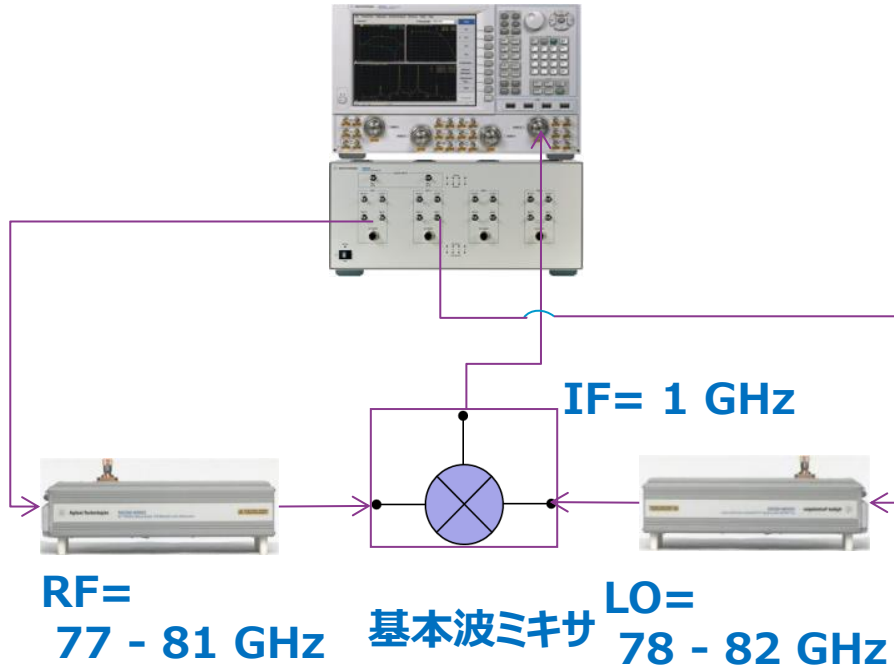
Banded ミリ波ネットワークアナライザ



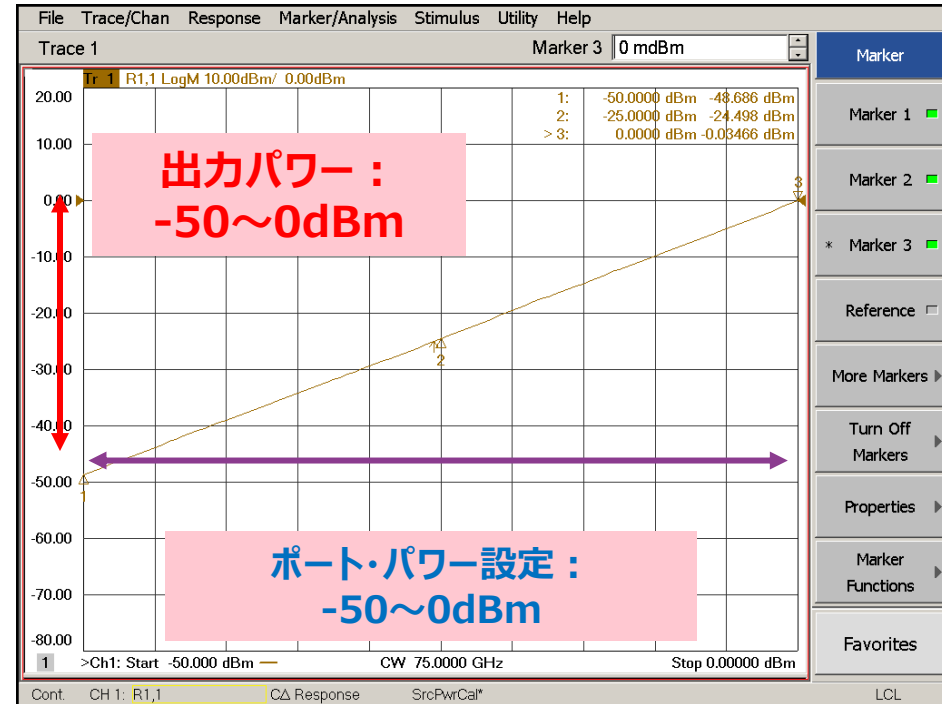
- ・ ミリ波でのパワーレベリング
- ・ ミキサ, 差動デバイスなど多ポートデバイスの測定にも対応  
(真の差動測定にも対応)
- ・ Eband帯でIMD測定にも対応可能なモジュールあり

# ミリ波対応ネットワーク・アナライザ

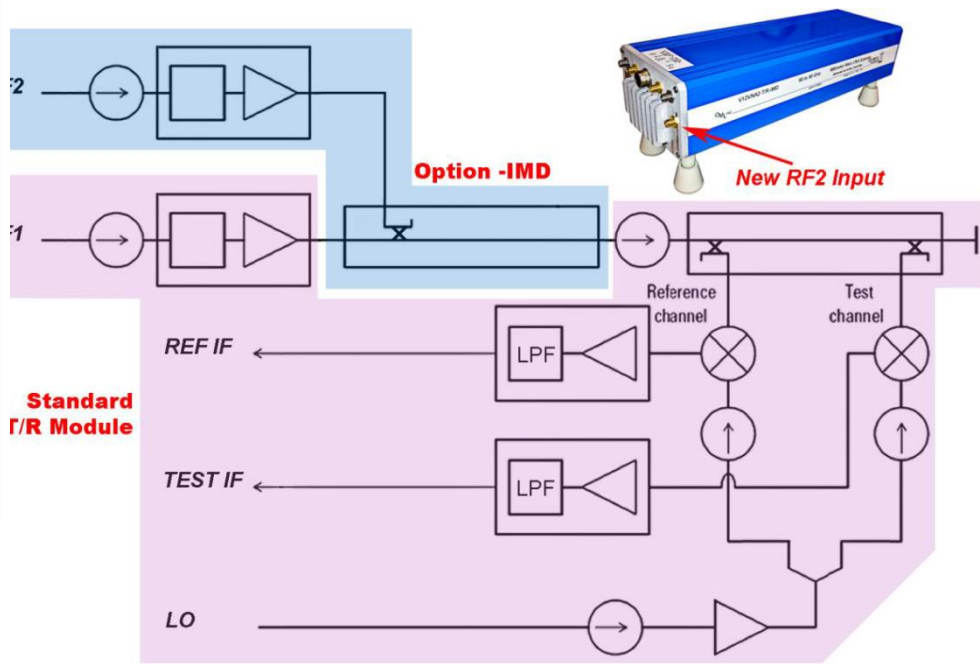
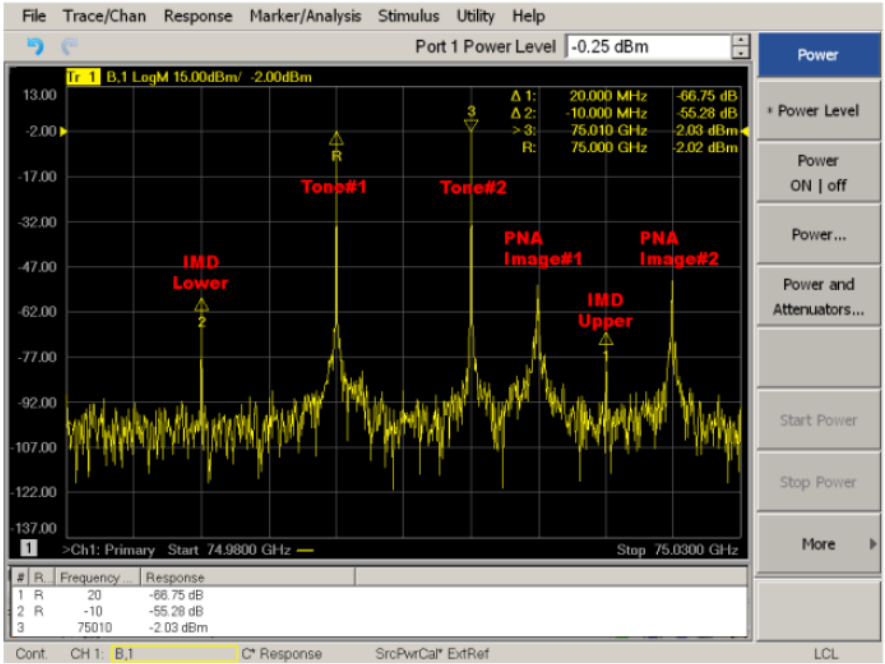
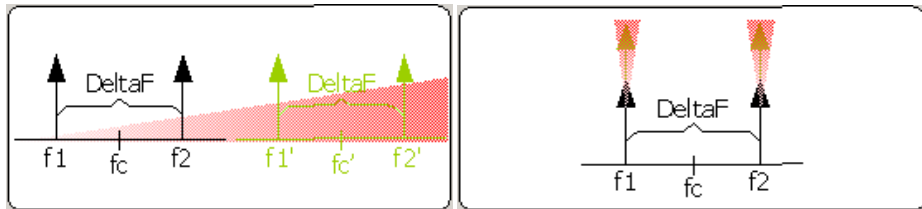
## ミキサ測定セットアップ



## 75GHzでのPower sweep

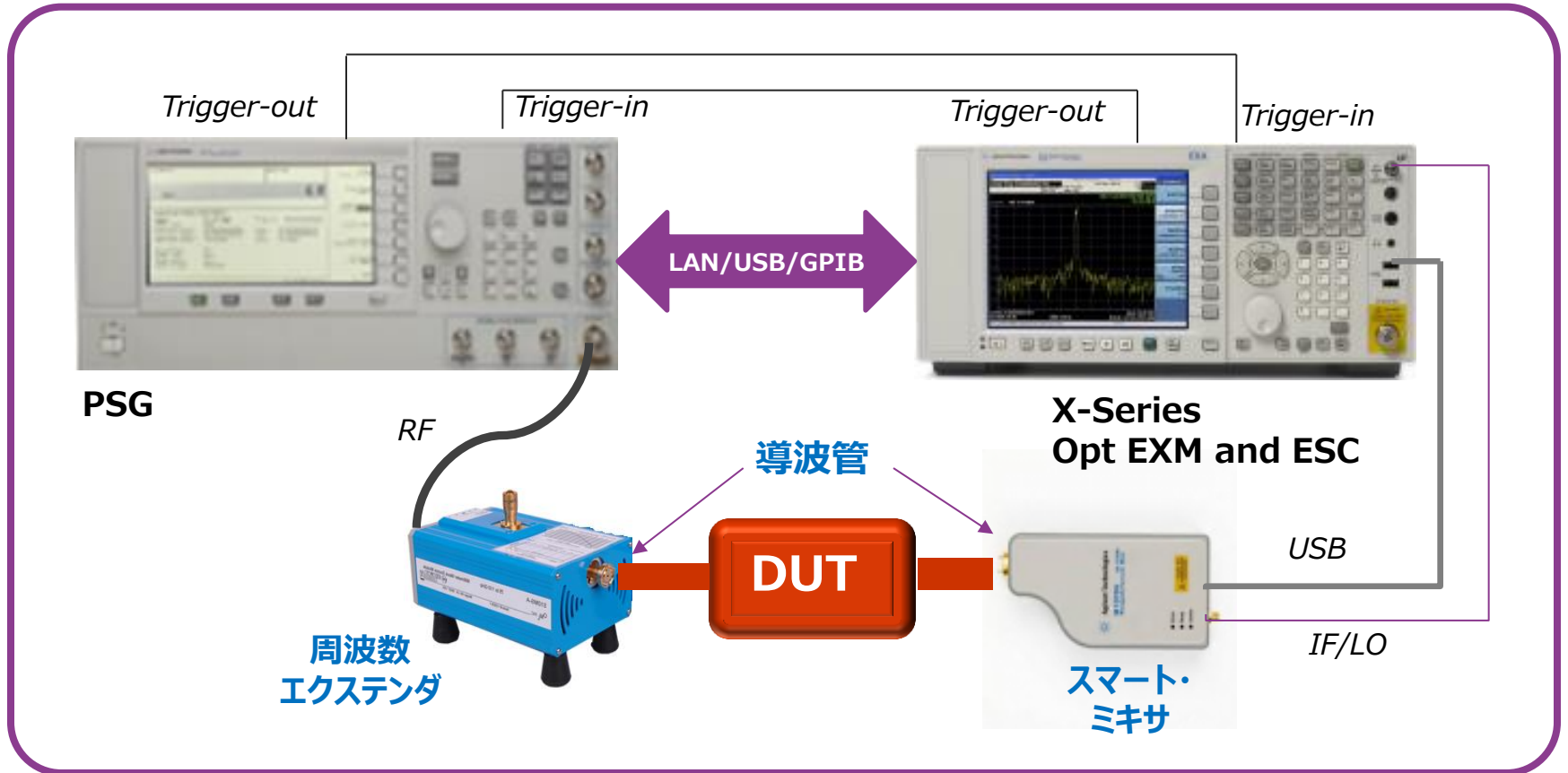


# ミリ波構成でのIMD測定： モジュール内に 2つのエクステンダとコンバイナ内蔵



**OML T/R-IMD Block Diagram**

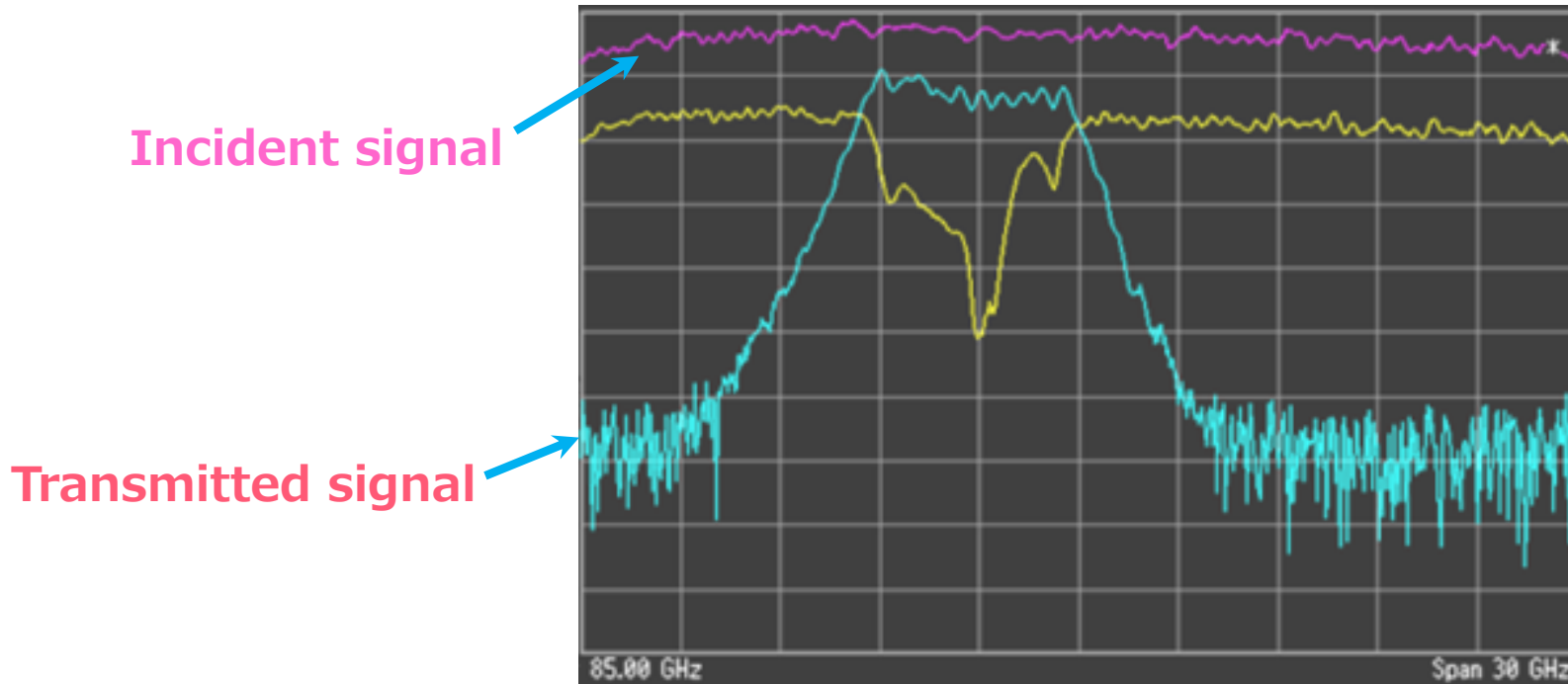
# 信号源とスペアナでのスカラ測定 外部SGを制御しトラッキングジェネレータとして動作



ミキサ（周波数変換デバイス）の測定も可能

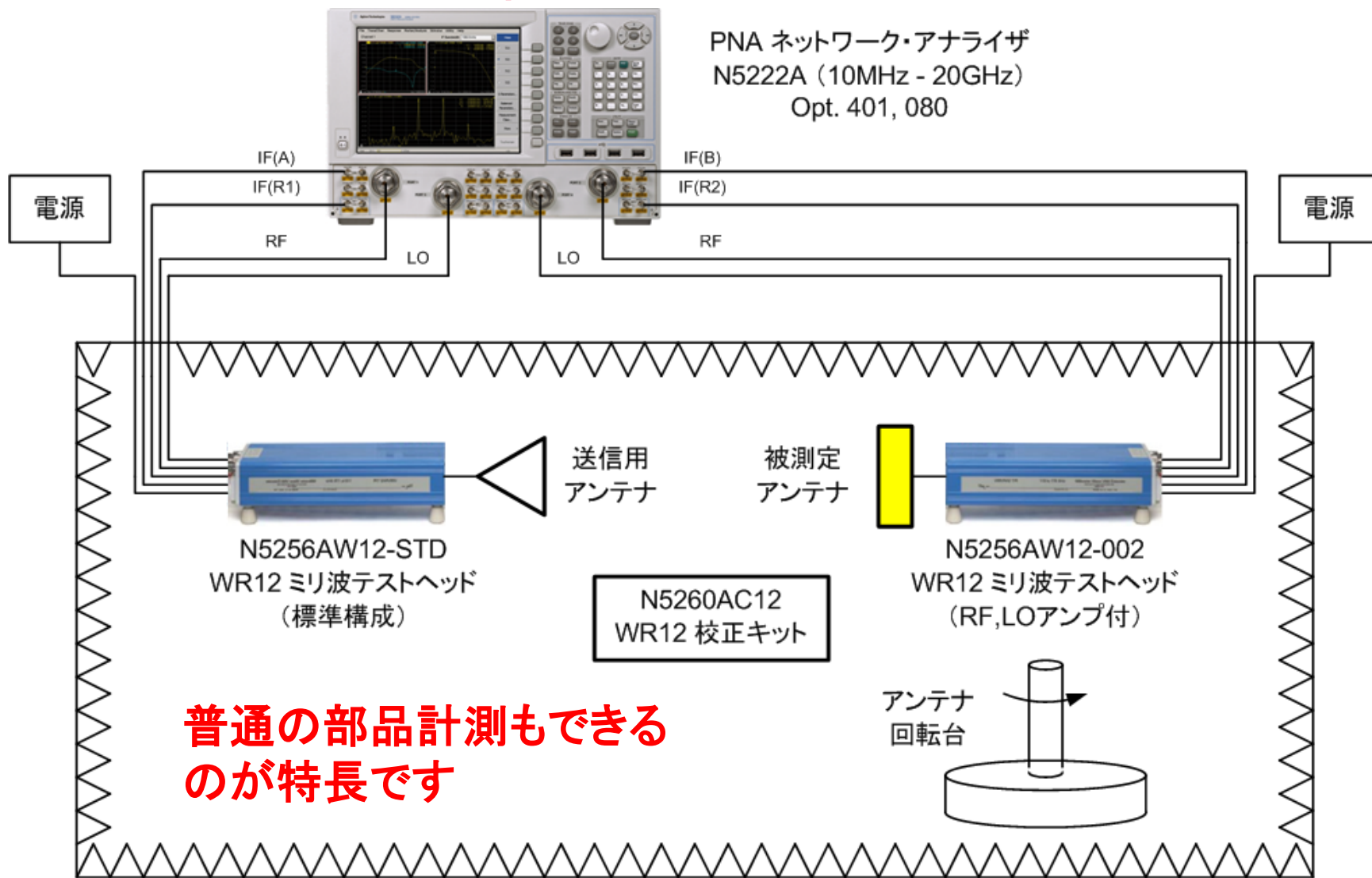
# ミリ波SG, SAでの測定例

## 85 GHz帯周波数特性の実測データ



補正は周波数レスポンスのみ  
→ポート・ミスマッチによるリップルあり  
Isolator等で改善要

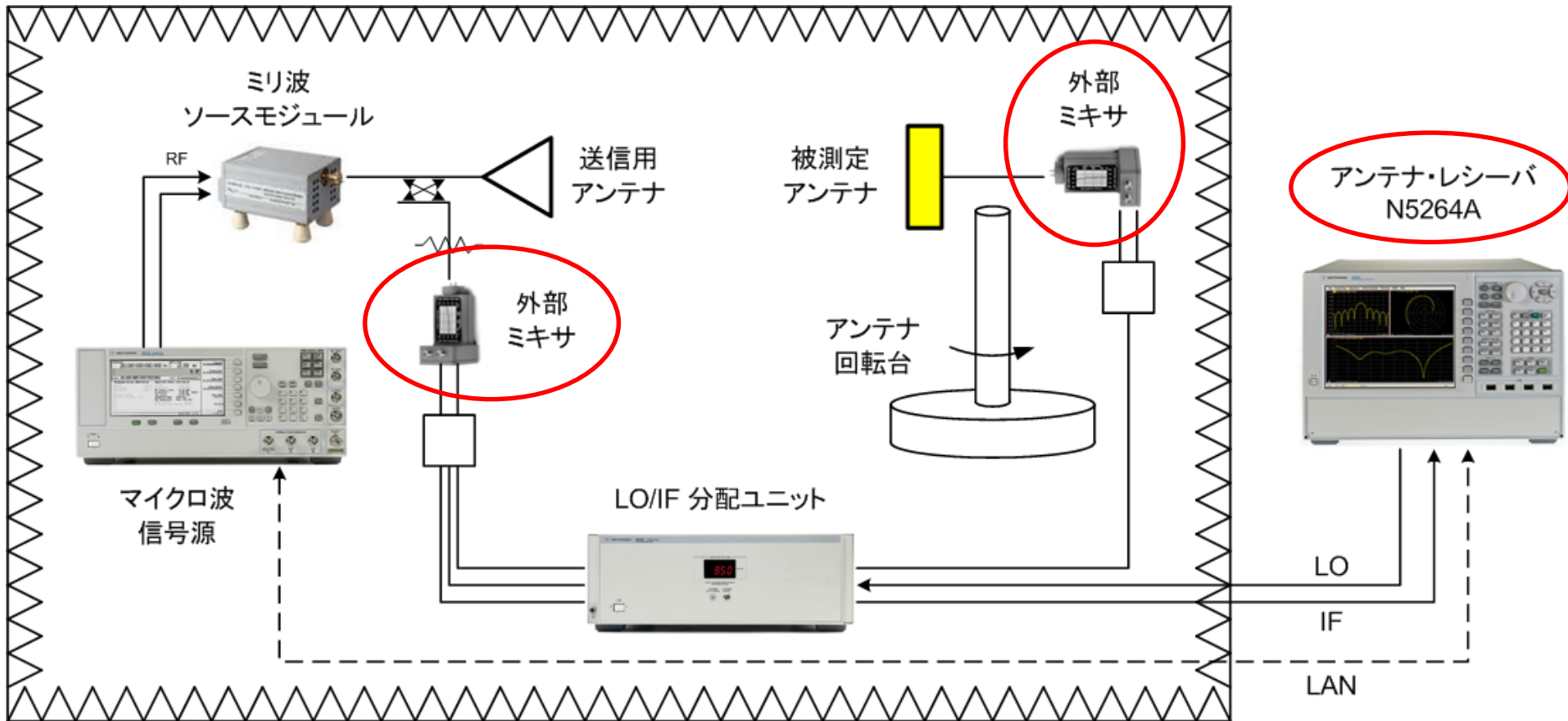
# アンテナ・パターン測定 ネットアナベースの構成例



普通の部品計測もできる  
のが特長です



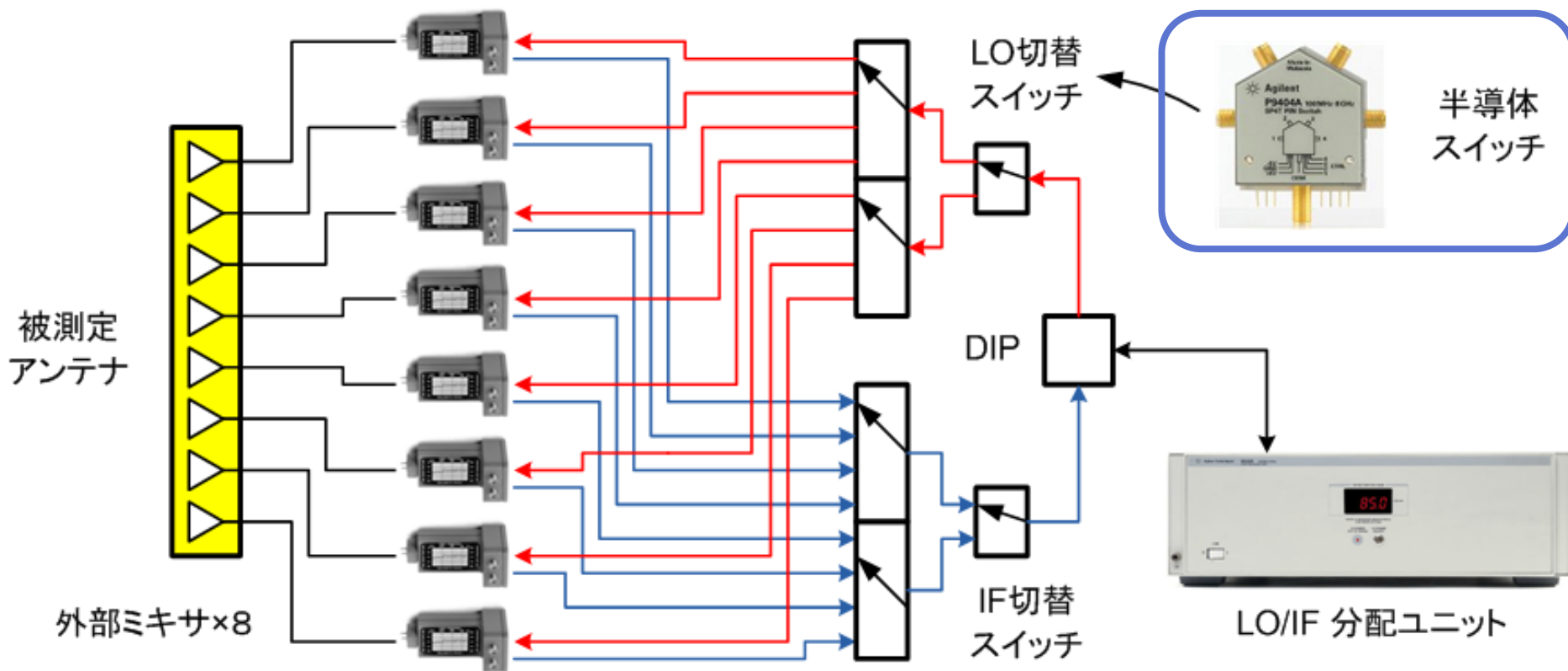
# アンテナパターン測定



- ・信号源や周波数コンバータを暗室内に**分散して配置**
- ・基本的に**放射特性の測定に特化**

# マルチチャンネルにも対応できます

- ・外部ミキサのみ増設して切り替えればOK！
- ・高速 & 長寿命の**半導体スイッチ**がお奨め



# パワー測定

## 24GHzレーダ向け



U2022XA 50MHz~40GHz  
USBピーク・パワーセンサ

- 50 MHz~40 GHzの周波数レンジ
- 30 dBm~+20 dBm (ピーク/ゲートッド)
- 45 dBm~+20 dBm (アベラージュのみモード) の広いダイナミックレンジ
- 30 MHzのビデオ帯域幅
- 80 Mサンプル/sのシングル・ショット、リアルタイム捕捉
- 内部ゼロ調整/校正
- 最高25,000回/s (フリー・ラン/高速バッファ・モード) の高速測定

## 76 or 79GHzレーダ向け



E8486A Eバンド導波管パワーセンサ

**-60dBmから測れるのが特徴**



N1913A EPM

シリーズ・シングル・チャンネル・パワー・メータ

Model	E8486A (60G-90GHz)
使用可能 パワーメータ	EPM (N1913A/14A、 E4418B/19B) EPM-P (E4416A/17A) , P-series (N1911A/12A)
ダイナミック レンジ	--30 to +20dBm option100 (標準) -60 to +20dBm option200
最大SWR	1.06 option100 (標準) 1.25 option200
導波管 type	WR-12
特長	1) 優れたSWR 2) -60dBmへのダイナミック レンジ拡張オプション

# Noise Figure測定

## 79GHz用 雑音指数測定系

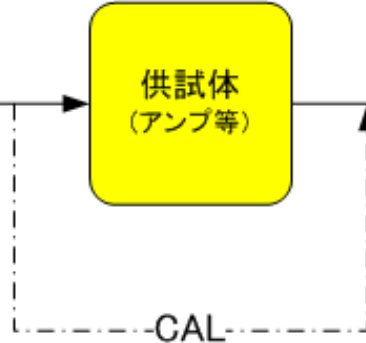
Noise/Com  
NC5110  
ノイズソース  
(75~110GHz)



N8975AZ-K88  
(75.0GHz~88.5GHz)  
ダウンコンバータ



N9030A PXA  
スペクトラムアナライザ  
(+ NF測定パーソナリティ)

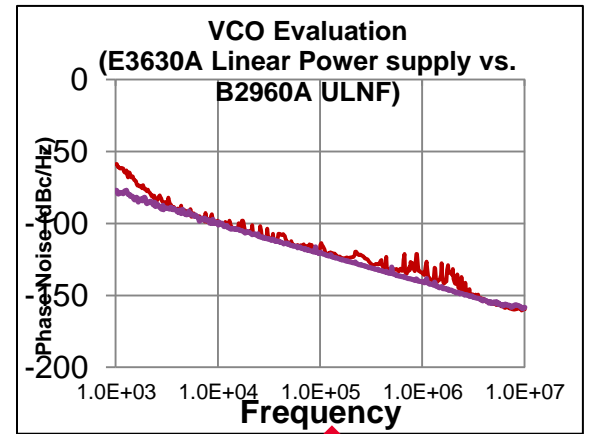


↑  
スペクトラム測定用の  
広帯域ダウンコンバータ  
を転用することも  
できます

+28V Drive

# パラメータ抽出, DC Source

各コンポーネントを形成する素子のパラメータ抽出に  
部品駆動用によりクリーンなDC電源を提供



B1500A

半導体デバイス・アナライザ



B2900A

プレジジョン  
ソースメジャーユニット

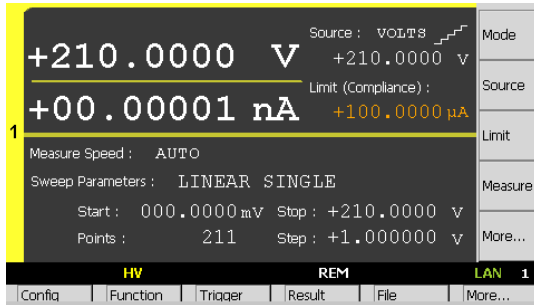


B296xA

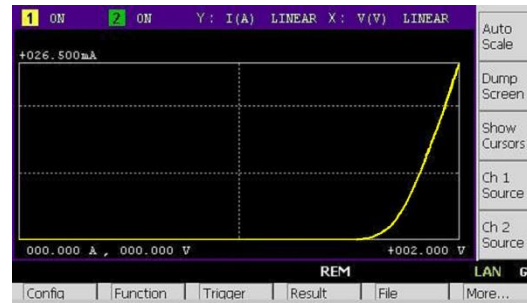
Low noise power ソース



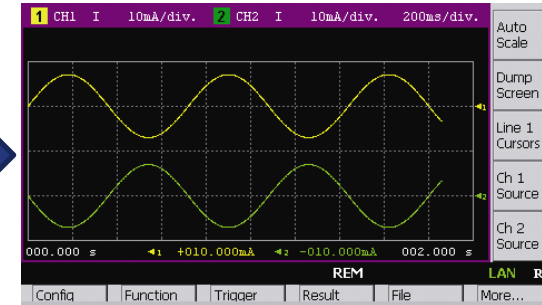
シングルビュー・モード



グラフビュー・モード



ロールビュー・モード



PCなしでスイープ設定

フロントパネル上で  
I-Vカーブ表示

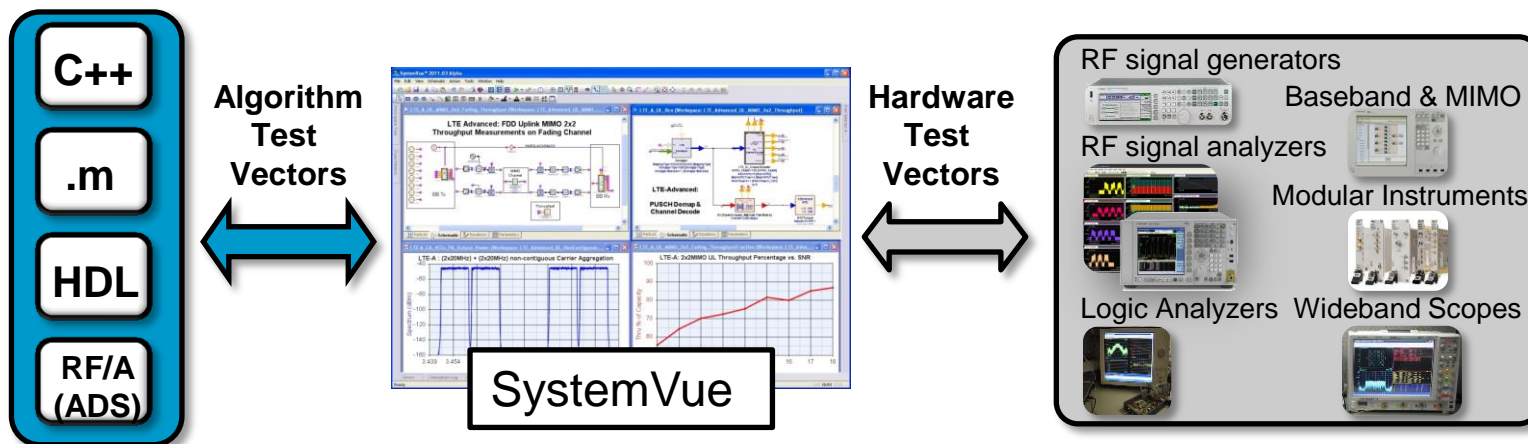
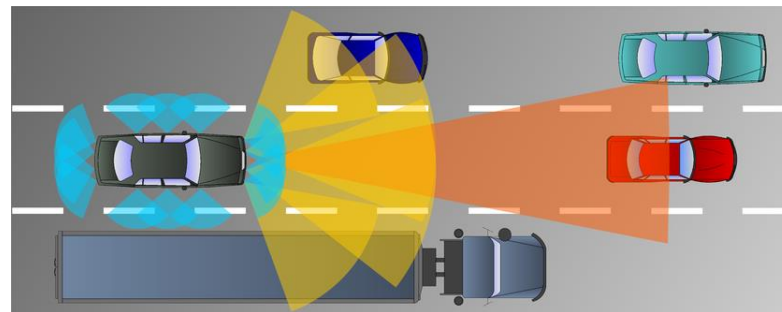
測定値の  
タイムドメイン表示

# 本日の内容

1. 車載ミリ波レーダ概要
2. 送信系の評価
3. 受信系の評価
4. 各種部品評価  
発振器位相雑音測定  
ミリ波部品評価(Amp, Passive部品, ミキサ, アンテナ)
5. シミュレーションの活用

# レーダーシステム開発でのシミュレーション活用

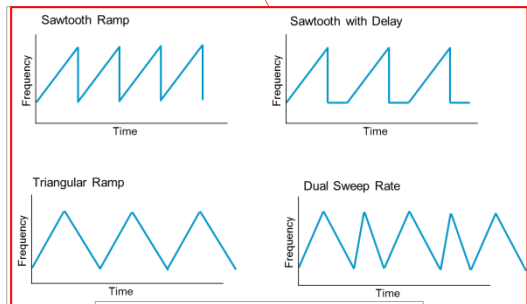
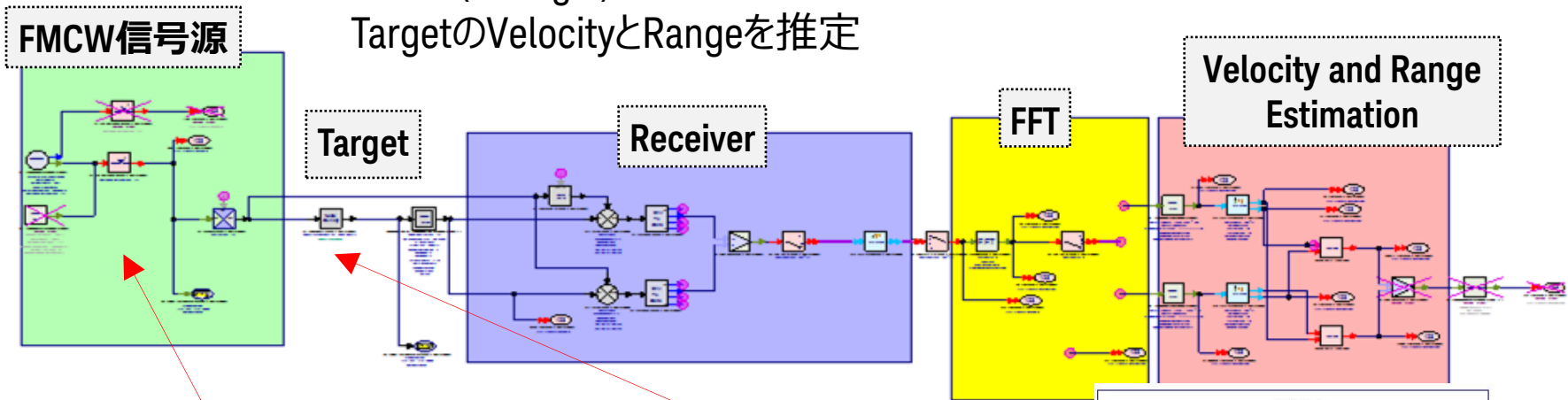
- システム開発には、様々な条件の試行錯誤が必要です。
- 使用波形、信号処理方法、外乱の影響などを考慮した解析の活用により、開発を効率化できます。
- Keysight SystemVueはシステム全体の解析を可能にするだけでなく、解析と同じ条件での測定による検証にも利用できます。



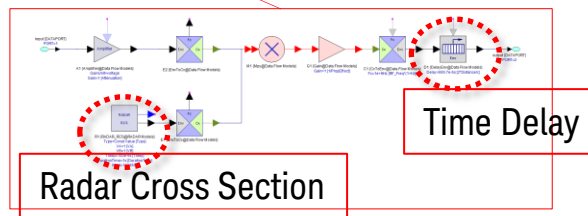


# FMCWシステム・シミュレーション

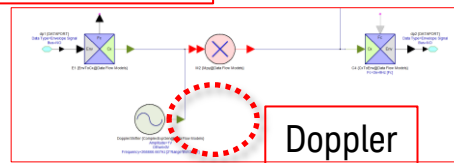
FMCW(Triangle)を印加し、MTD結果に基づき  
TargetのVelocityとRangeを推定



様々な波形の利用

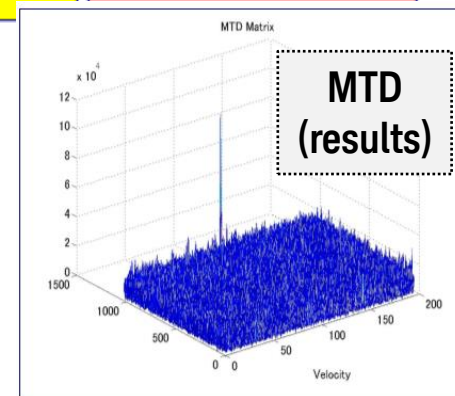


Time Delay



Doppler

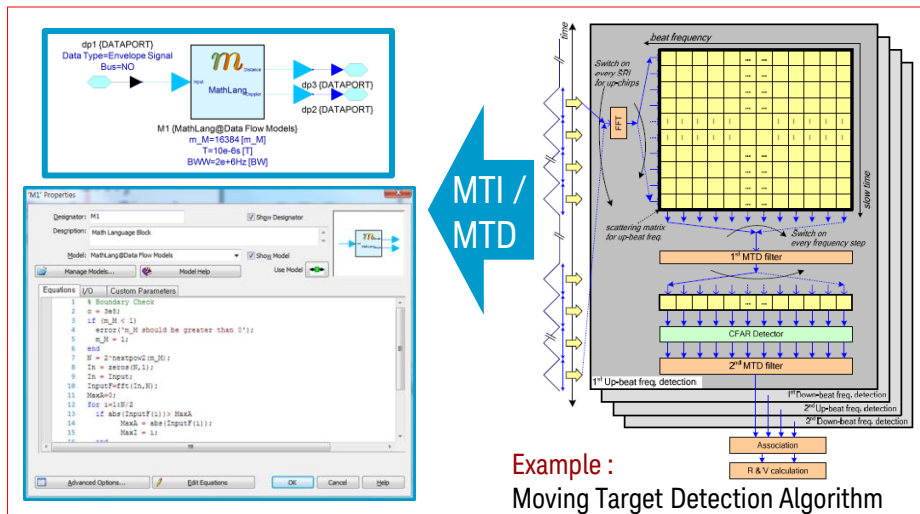
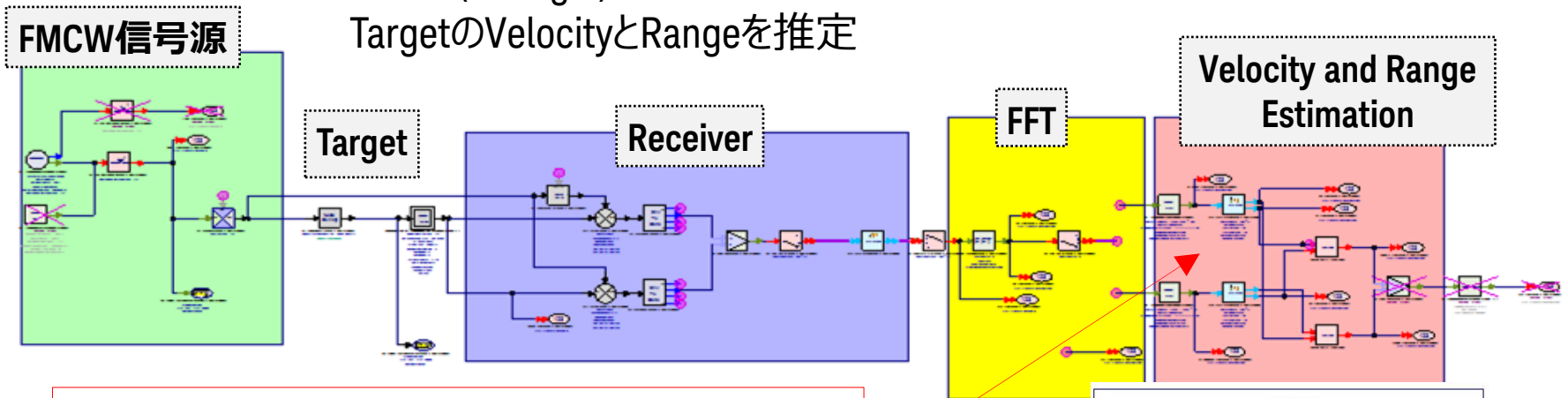
RCSやDopplerなどの影響を考慮



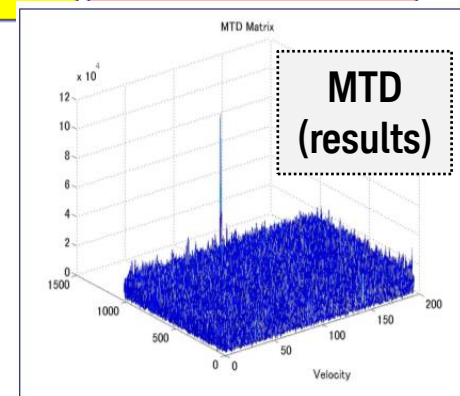


# FMCWシステム・シミュレーション

FMCW(Triangle)を印加し、MTD結果に基づき  
TargetのVelocityとRangeを推定



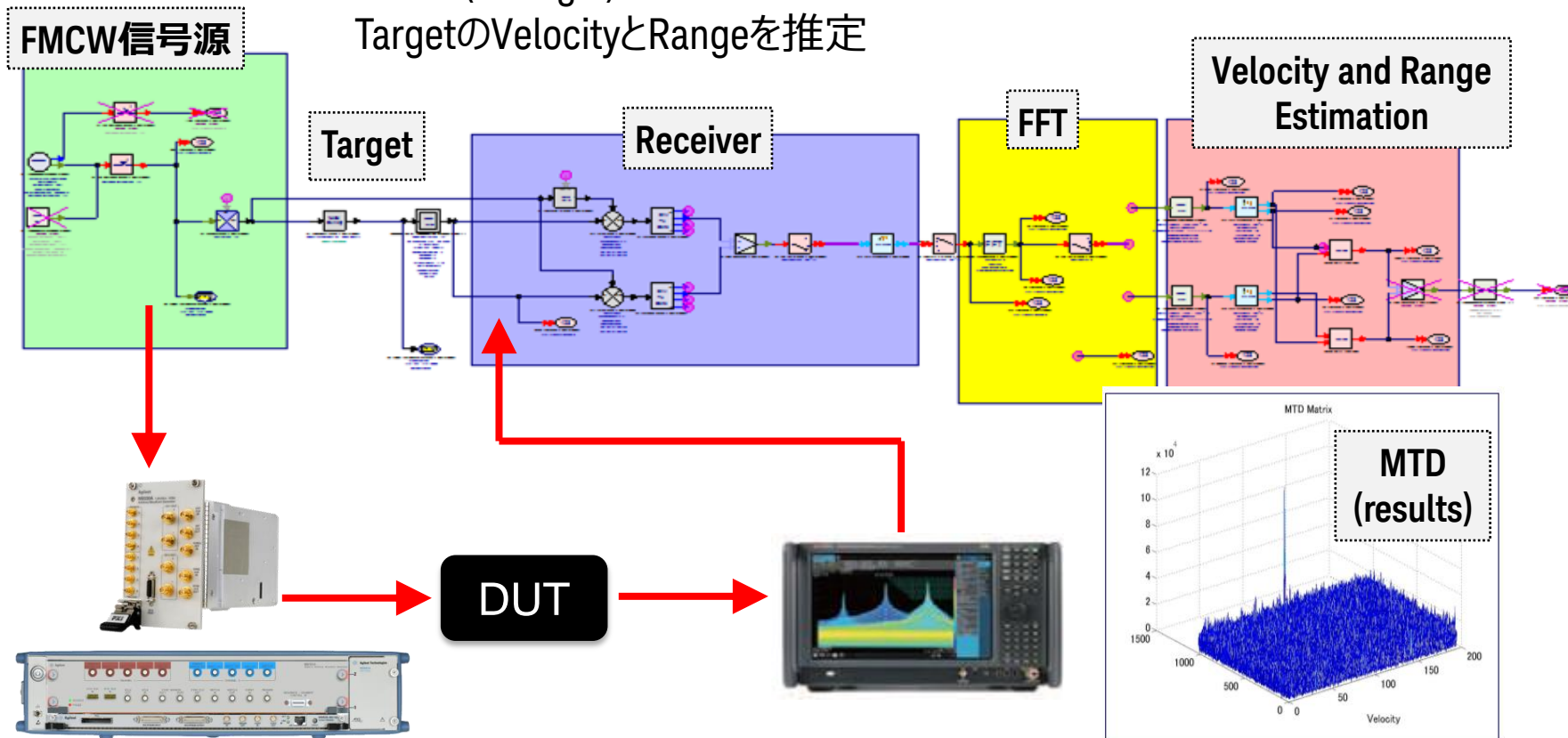
Example :  
Moving Target Detection Algorithm



独自アルゴリズムを **MATLAB**や、**C++**, **HDL**等で解析に利用できます

# シミュレーション環境を測定でも活用

FMCW(Triangle)を印加し、MTD結果に基づき  
TargetのVelocityとRangeを推定



シミュレーション環境をそのまま測定での検証に利用できます