

Transform Tomorrow. Today.

ROHDE & SCHWARZ TECHNOLOGY SYMPOSIUM 2024 JAPAN

車載レーダー (FMCWレーダー) OTA評価手法

鈴木 毅至

ローデ・シュワルツ・ジャパン株式会社
アプリケーション・エンジニア

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



COMPANY RESTRICTED

内容

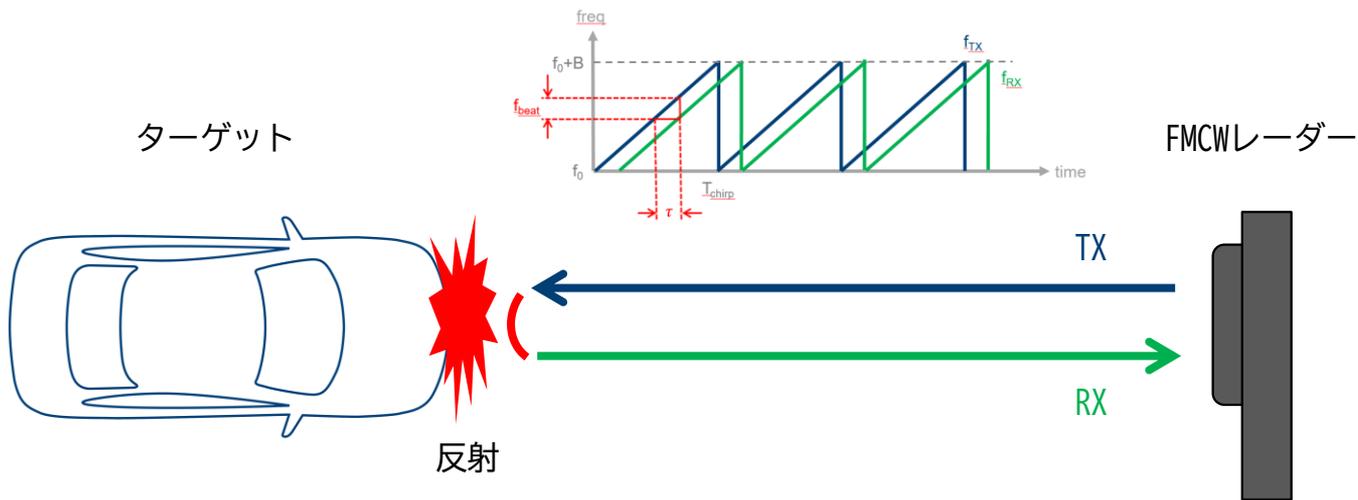
1. 車載（FMCW）レーダー
2. OTAテスト（Over The Airテスト）
3. R&SのFMCWレーダー向けソリューション紹介
4. まとめ

内容

1. 車載（FMCW）レーダー
2. OTAテスト（Over The Airテスト）
3. R&SのFMCWレーダー向けソリューション紹介
4. まとめ

車載（FMCW）レーダー

- ▶ 電波を送信してターゲットに反射して帰ってくるまでの時間： 距離検知
- ▶ ターゲットの接近/離反に伴うドップラ周波数の変化（ドップラ効果）： 速度検知
- ▶ 複数アンテナ間で受信した信号間の位相差（時間差）： 到来角度検知
- ▶ ターゲットがどの程度大きな反射波を返すか？： RCS（レーダー・クロス・セクション）

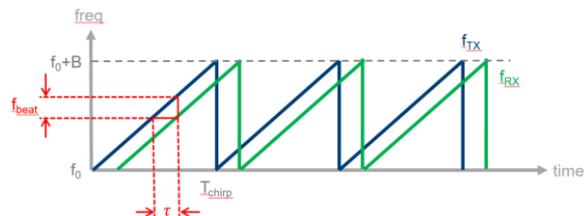


車載（FMCW）レーダー

- ▶ 検知に必要なRF性能を有しているか？： FMCWチャープ解析、EIRP、占有帯域幅
- ▶ 不要な電波を発射していないか？： 高調波、スプリアス

RF性能は
OTAテストにより性能が評価される

シグナルアナライザ or
パワーセンサ or
シグナルジェネレータ



FMCWレーダー

TX

RX

車載（FMCW）レーダー

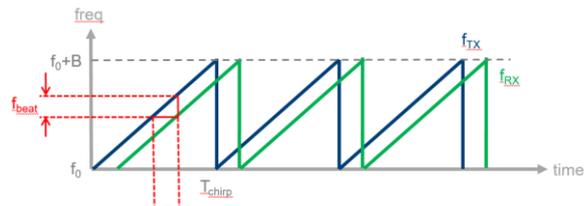
- ▶ レーダー性能評価： 距離分解能、角度分解能、検知距離性能（最小、最大）、干渉波耐性
- ▶ シナリオテスト： 実際の運転シーンの模擬、NCAP

ターゲット・シミュレーションは
OTAテストにより性能が評価される

レーダー・ターゲット・シミュレータ



遅延、振幅、ドップラの付加



FMCWレーダー

TX

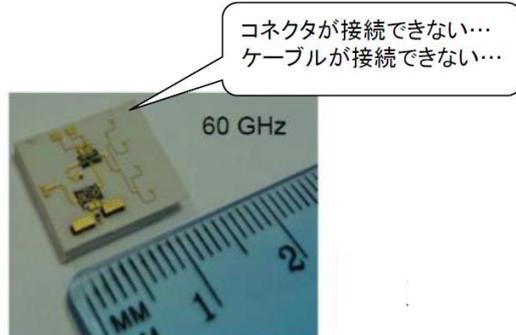
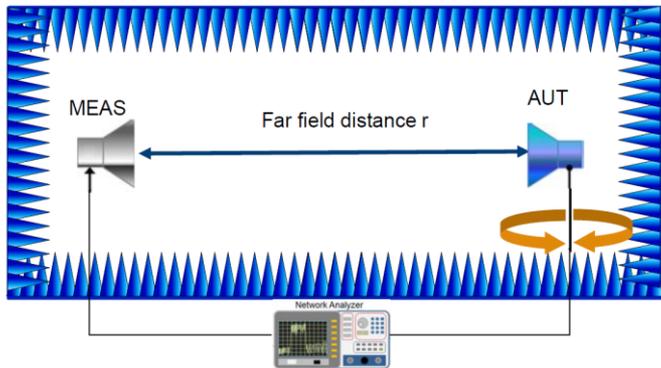
RX

内容

1. 車載（FMCW）レーダー
2. OTAテスト（Over The Airテスト）
3. R&SのFMCWレーダー向けソリューション紹介
4. まとめ

OTA (OVER THE AIR) テスト

- ▶ 自由空間に電波を照射して行うテストのこと
- ▶ アンテナ込みの被測定物の評価を行うことで、実際の使用環境に近い状態で評価が可能
 - > 周波数が高い（伝搬ロスやケーブルのロスなどが大きい、有線テストの難易度が高い）
 - > アンテナ込みの評価が必須（ビームフォーミング、アンテナ内蔵のIC etc.）
 - > 5G関連（高速、低遅延、広帯域幅）のテストへの対応
 - > 3GPPで24GHz以上のモバイルデバイスはOTAテストが規格化
- ▶ 周波数の低いものは、有線（Conducted）で試験を行い、アンテナを別途OTAで評価する

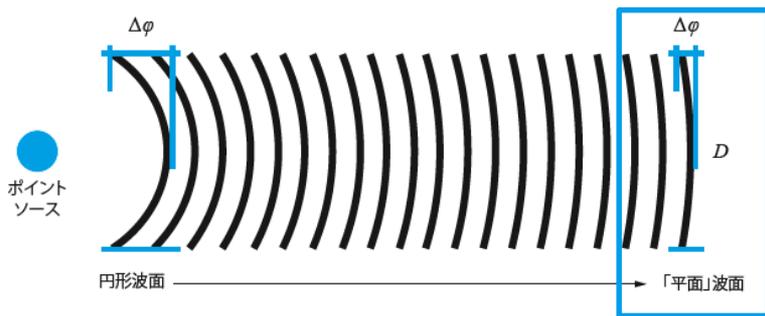


OTA (OVER THE AIR) テスト

▶ OTAテストは、近傍界 (Near Field)、遠方界 (Far Field) でのテストが可能

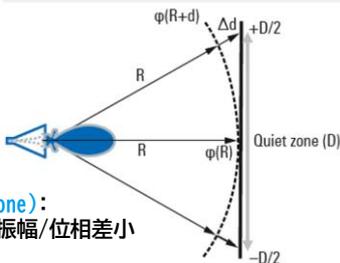
-> **近傍界** : 球面波 (測定時の**エラーが大きい**電波伝搬)

-> **遠方界** : 平面波 (測定時の**エラーが小さい**理想的な電波伝搬)



距離が離れるほど、平面波に近づくが (遠方界)、一定のエラーは存在する

Definition of Fraunhofer distance

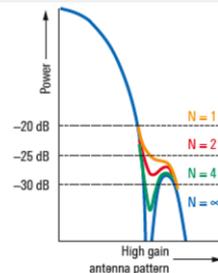


QZ (Quiet Zone):
エリア内の振幅/位相差小

Quiet zone phase deviation and magnitude error

$$R_{\text{min}} = \frac{ND^2}{\lambda}$$

| R_{min} (N) | Phase deviation (φ) |
|----------------------|---------------------|
| D^2/λ | 45° |
| $2D^2/\lambda$ | 22.5° |
| $4D^2/\lambda$ | 11.2° |
| $8D^2/\lambda$ | 5.6° |



▶ **遠方界** : 平面波でのテストが一般的

-> 標準規格のテスト仕様は**遠方界**での評価を要求

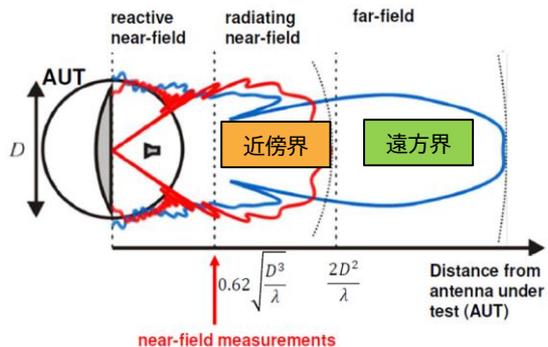
-> 直接遠方界 (**DFF: Direct Far Field**) : 電波が**平面波になる距離まで離して**テスト

-> 間接遠方界 (**IFF: Indirect Far Field**) : 電波を**球面波から平面波に変換して**テスト

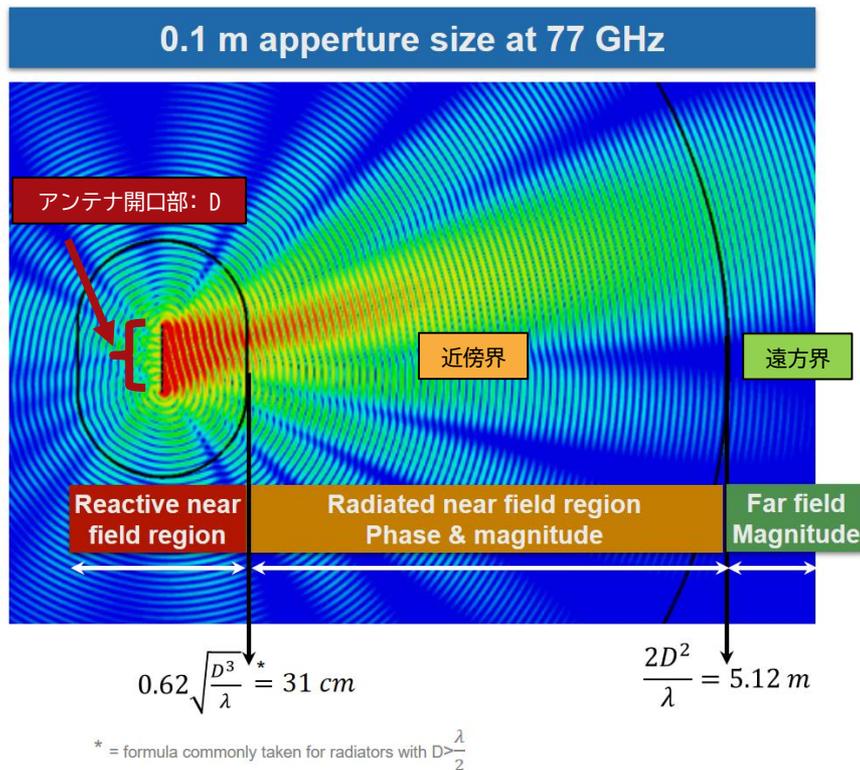
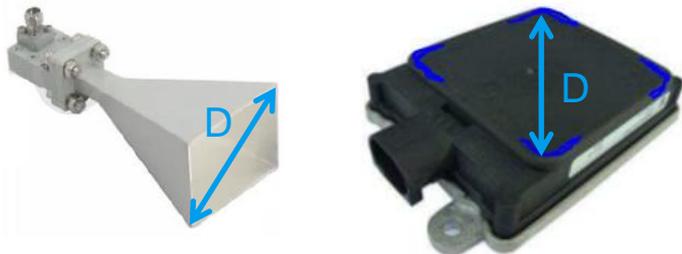
▶ Free space conditionを満たす (第一フレネルゾーン: 理想的な電波伝搬のための条件)

近傍界と遠方界

- ▶ Fraunhofer距離により計算可能



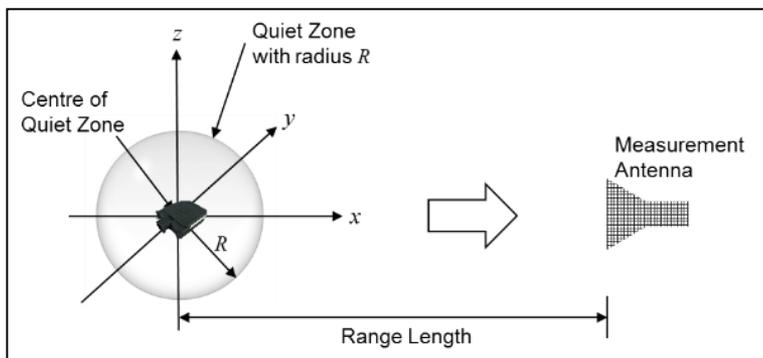
- ▶ D: アンテナ開口面のサイズ



直接遠方界(DFF)と間接遠方界(IFF)

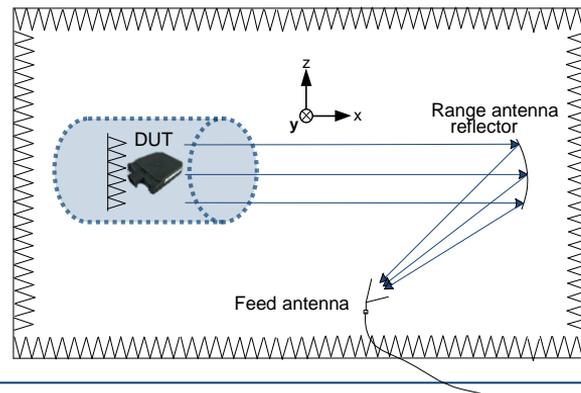
Direct Far Field (DFF)

Quiet zoneは小さい, 長いテスト距離



Indirect Far Field (IFF)

Quiet zoneは大きい, 短いテスト距離

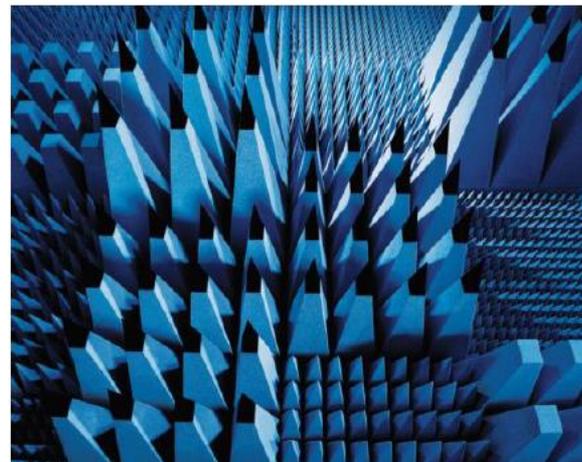
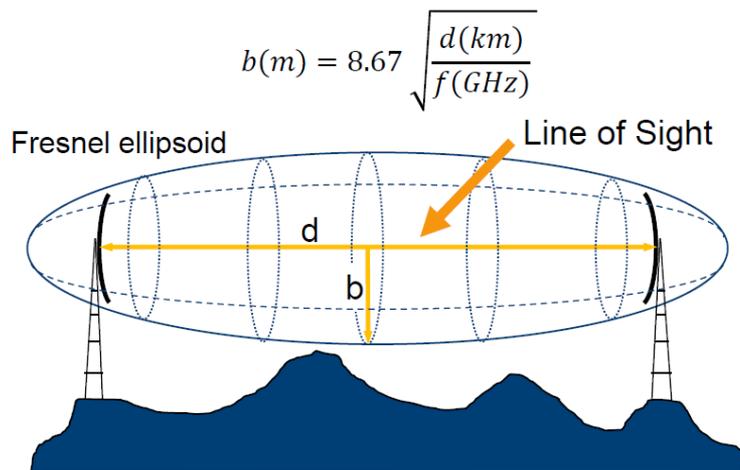


Indirect Far Field (IFF)のメリット:

- DUT~リフレクタ間のロスがない (~0dB)
- DFFと比較して狭いスペースでテストが可能 (伝搬ロス、試験系のロスが小さい)
- 大きいQuiet Zone(QZ)が確保出来る (エラーの少ない安定した電波伝搬環境)

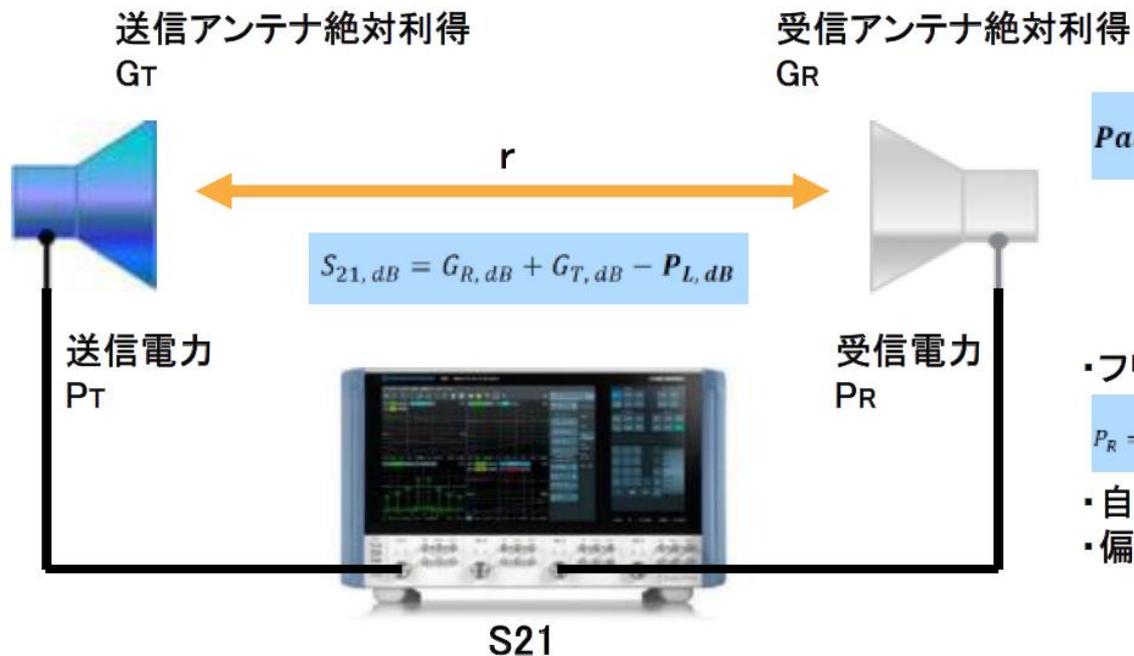
FREE SPACE CONDITIONS

- ▶ 電波が自由空間を理想的に伝搬することが可能
- ▶ 実際の無線システム
第一フレネルゾーン内に障害物がない状態
- ▶ 電波暗室
使用周波数帯に応じた最適なアブソーバを使用



空間伝搬ロス

- ▶ 自由空間に照射された電波は伝搬距離に応じて減衰する



$$Pathloss P_{L,dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)$$

- ・フリスの伝達関数を参照

$$P_R = P_T G_R G_T \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

- ・自由空間、遠方界にて成立
- ・偏波方向は同一

内容

1. 車載（FMCW）レーダー
2. OTAテスト（Over The Airテスト）
3. R&SのFMCWレーダー向けソリューション紹介
4. まとめ

電波法試験用のサンプルを評価したい

- ▶ 車載レーダー（FMCWレーダー）関連の各国電波法
 - 日本：技適（技術基準適合証明）
 - アメリカ：FCC
 - ヨーロッパ：ETSI

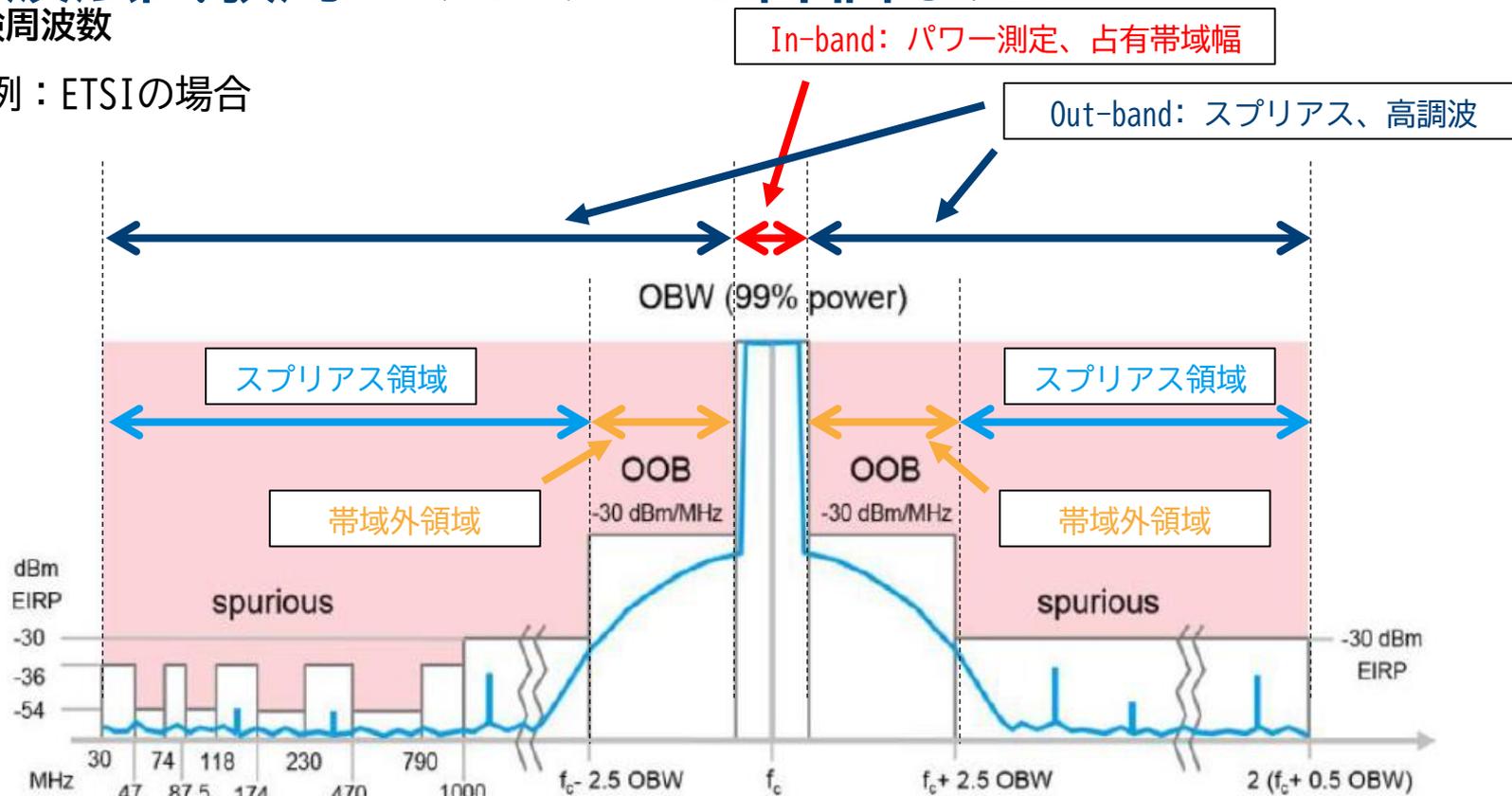
- ▶ 電波法での主な試験項目
 - 送信パワー（EIRP_average/EIRP_peak）
 - 占有帯域幅
 - 高調波&スプリアス

実際の試験は登録証明機関で実施

電波法試験用のサンプルを評価したい

試験周波数

▶ 例：ETSIの場合



電波法試験用のサンプルを評価したい

送信パワー測定 (EIRP)

- ▶ EIRP(Equivalent Isotropic Radiation Power): 等価等方放射電力
- ▶ EIRP_average/EIRP_peakの2種類あり、最適なものを選択

R&S®FSW85
シグナルアナライザ
2Hz~90GHz

or



R&S®NRP90S
パワーセンサ (Coax. 1mm)
50MHz~90GHz



R&S®NRP90TWG
パワーセンサ (WR12)
60GHz~90GHz

EIRP_averageのみ for 技適

被測定レーダー (RUT)

受信アンテナ



SGH90G25
WR12
Ant. Gain=25dBi

伝搬距離: d

EIRP_average/EIRP_peak
for ETSI/FCC

R&S®HA-Z24E
ローノイズアンプ (Coax. 1mm)
1GHz~85GHz

$$EIRP = Txアンテナゲイン + アンテナ入力レベル$$

電波法試験用のサンプルを評価したい

送信パワー測定 (EIRP)

- ▶ EIRP(Equivalent Isotropic Radiation Power): 等価等方放射電力
- ▶ OTAパワーセンサ: アンテナ検波器一体型でロス校正不要

EIRP_average

単偏波モデル



R&S®NRPM-A90 single-polarized antenna module

両偏波モデル



R&S®NRPM-A90 dual-polarized antenna module

両偏波モデルで垂直/水平同時測定

R&S®NRPM-A90
OTAパワーセンサ (アンテナ一体型/直線偏波)
18GHz~90GHz



被測定レーダー (RUT)

伝搬距離: d



$$EIRP = T_x \text{アンテナゲイン} + \text{アンテナ入力レベル}$$

電波法試験用サンプル評価や
簡易パワー測定に使用可能

電波法試験用のサンプルを評価したい

占有帯域幅

- ▶ 使用周波数帯域内の変調信号における99%の電力を含む周波数帯域幅

R&S®FSW85
シグナルアナライザ
2Hz~90GHz



R&S®HA-Z24E
ローノイズアンプ (Coax. 1mm)
1GHz~85GHz

受信アンテナ



SGH90G25
WR12
Ant. Gain=25dBi

被測定レーダー (RUT)

伝搬距離 : d

電波法試験用のサンプルを評価したい

占有帯域幅

- ▶ 被測定信号の総電力の内、99%の電力を含む周波数帯域幅
- ▶ シグナルアナライザのOBWモードで簡単に測定可能 (MEAS->OBW)

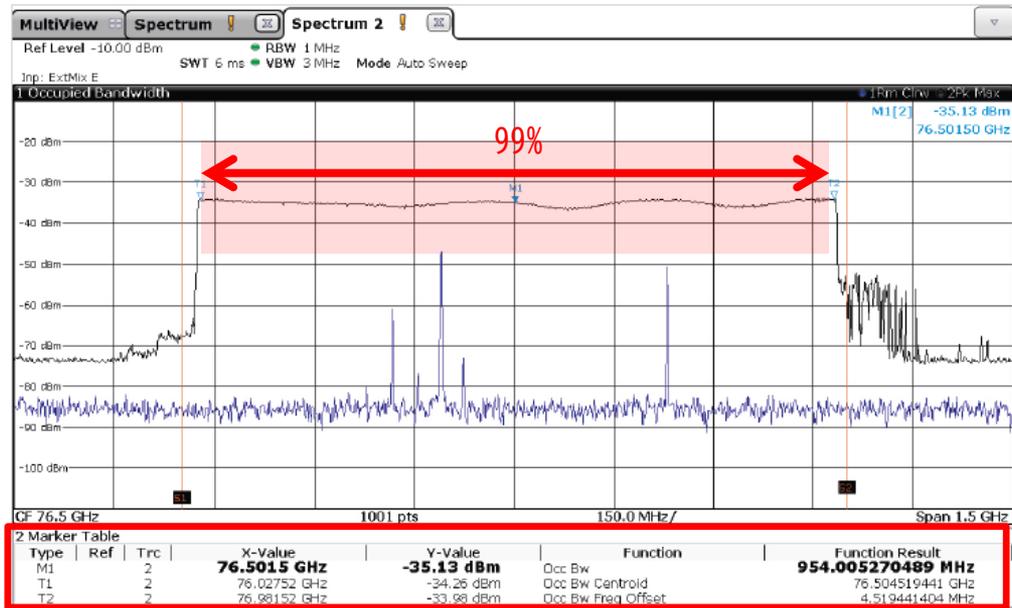
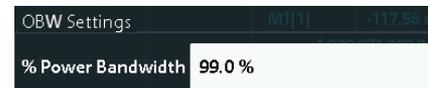
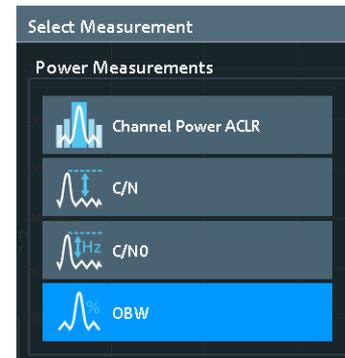


Fig. 12: Example of an OBW measurement on a 77 GHz radar



- 測定に必要なデータを自動で抽出
- 占有帯域幅
 - 周波数 (Lower/Center/Upper)
 - 中心周波数からの周波数オフセット

電波法試験用のサンプルを評価したい

高調波&スプリアス

- ▶ シグナルアナライザのスペクトラム測定モードで測定（被測定信号はCW）
- ▶ 測定周波数に応じて、ハーモニックミキサを使用して測定周波数を拡張（～325GHz）
- ▶ 要求される最大測定周波数
技適：～110GHz / ETSI：～164GHz / FCC：～231GHz

R&S®FSW85
シグナルアナライザ
2Hz～90GHz



IF(固定) L0
L0(可変) IF



R&S®FS-Z110
ハーモニックミキサ (WM-2540/WR10)
75GHz～110GHz

受信アンテナ
SGH90G25
WR12
Ant. Gain=25dBi



被測定レーダー (RUT)

伝搬距離：d

測定周波数帯に応じて
複数の受信アンテナの準備が必要

FMCWチャープのスペクトラム評価

チャープ信号解析オプション FSW-K60/K60C

R&S®FSW43/FSW67



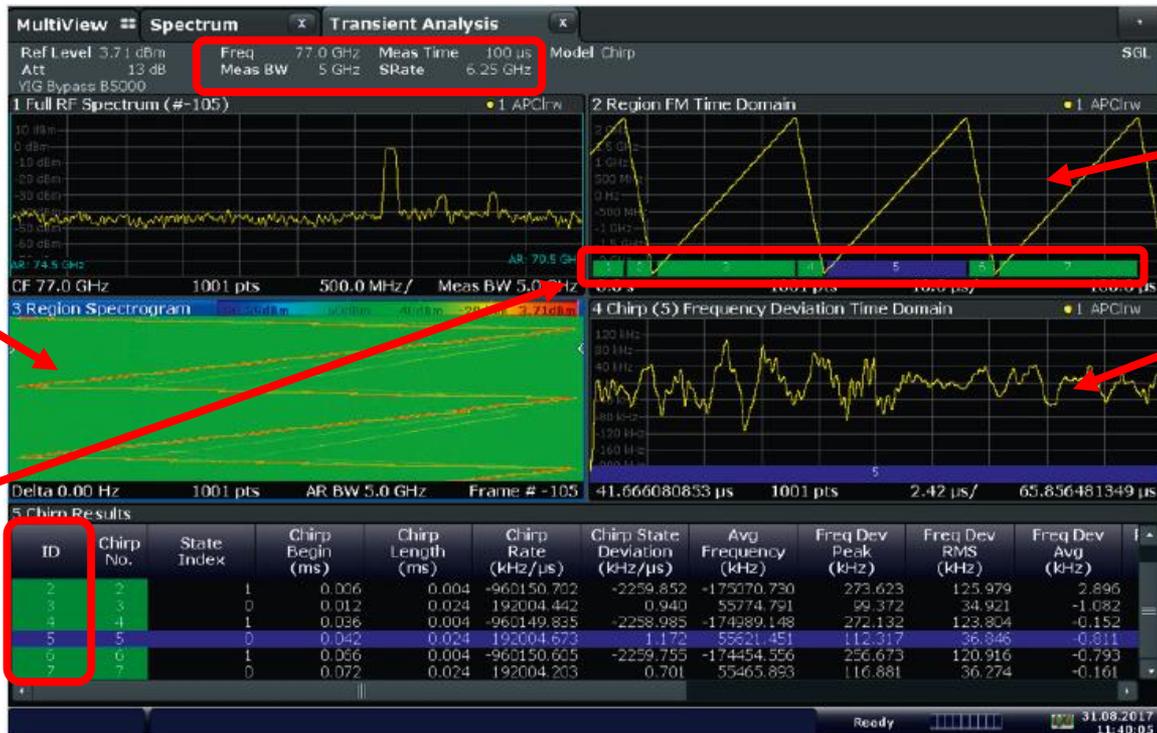
R&S®FSVA3000/FSV3000



▶ シグナルアナライザでFMCWチャープの特性を解析

スペクトログラムによる信号のモニタ
(周波数 vs 時間)

チャープ毎の特性を
リスト表示



キャプチャバッファ内の
複数チャープ信号

選択されたチャープ内の
周波数偏差

FMCWチャープのスペクトラム評価

シグナルアナライザで直接計測

- ▶ R&S®FSW85で～90GHzのRFを直接測定
- ▶ 周波数変換なしで測定可能（～8.3GHzBWまで）

R&S®FSW85
シグナルアナライザ
2Hz～90GHz



SGH90G25
WR12
Ant. Gain=25dBi



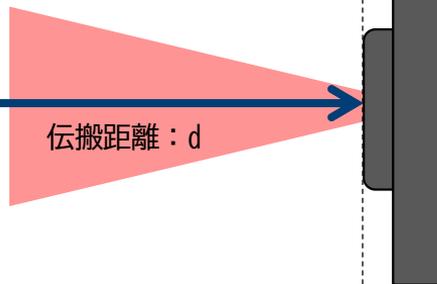
RF



周波数変換なし

R&S®HA-Z24E
ローノイズアンプ (Coax. 1mm)
1GHz～85GHz

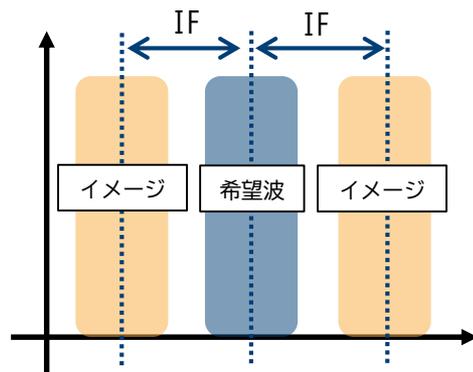
被測定レーダー (RUT)



FMCWチャープのスペクトラム評価

ハーモニックミキサ(R&S®FS-Z75/FS-Z90)

- ▶ ハイエンドのスペクトラム・アナライザを使用しない安価なソリューション (ハーモニックミキサを使用: LO信号はSAから供給)
- ▶ イメージ周波数により測定可能な周波数帯域幅に制限 (~2GHzBWに対応)



シグナルアナライザ

R&S®FSW43/FSW67



R&S®FSVA3000/FSV3000



R&S®FS-Zxx
ハーモニックミキサ

IF(固定)



LO(可変)

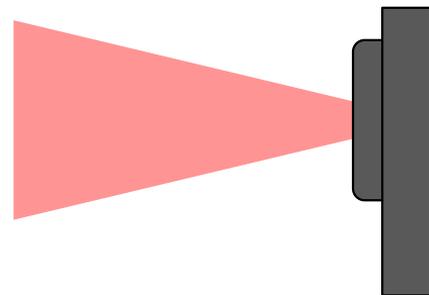


RF



SGH90G25
WR12
Ant. Gain=25dBi

被測定レーダー (RUT)



SAにLO内蔵/SMAコネクタで簡単配線

FMCWチャープのスペクトラム評価

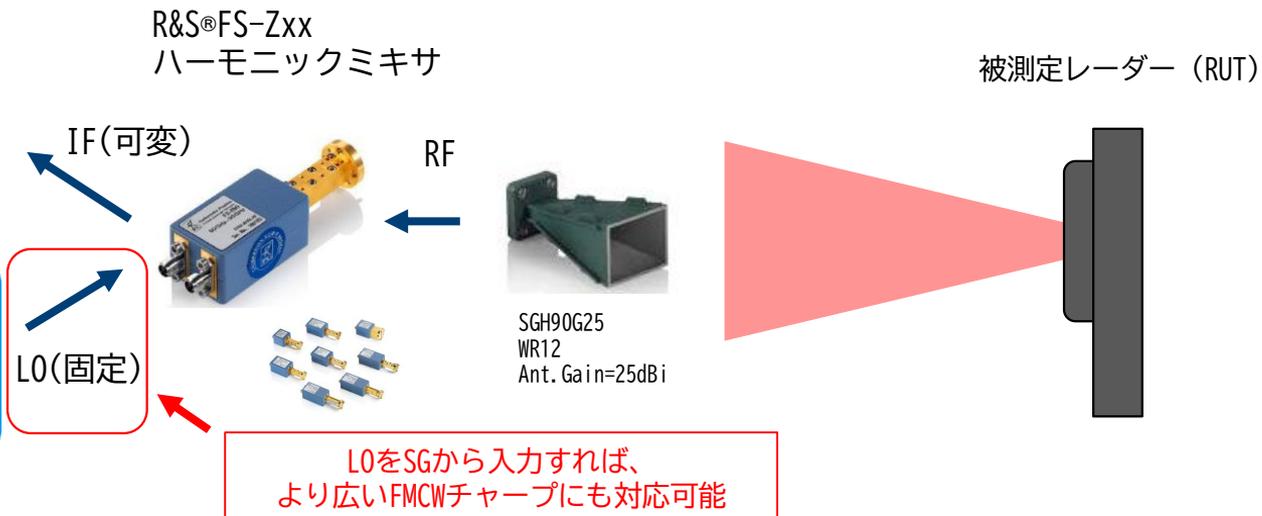
ハーモニックミキサ(R&S®FS-Z75/FS-Z90)+アナログ信号源(R&S®SMA100B)

- ▶ ハイエンドのスペクトラム・アナライザを使用しない安価なソリューション
(ハーモニックミキサを使用: L0信号は外部信号源から供給)
- ▶ イメージ周波数による制限なし (~4GHzBWにも対応)

シグナルアナライザ
R&S®FSVA3000/FSV3000



シグナルジェネレータ
R&S®SMA100B(20GHz~)

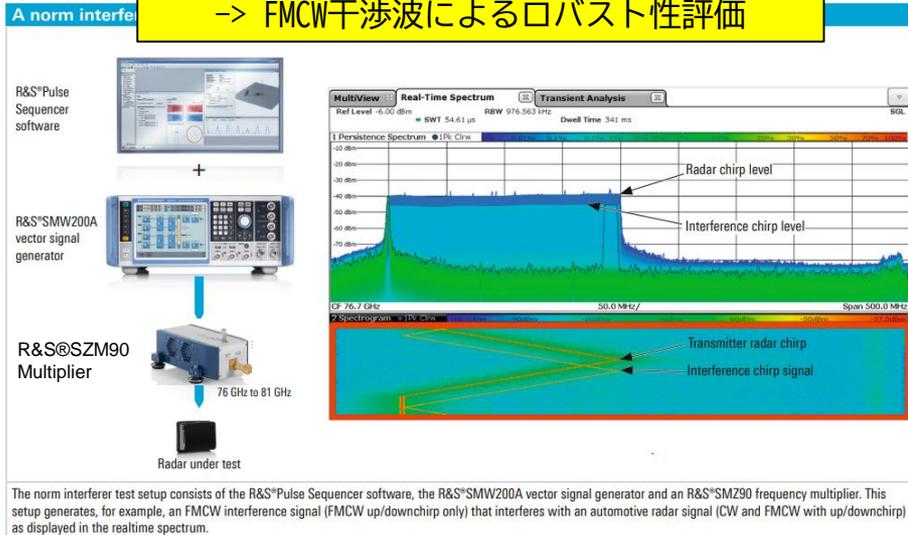


レーダー周波数の信号生成

周波数マルチプライヤ(R&S@SZM75/SZM90)

- ▶ デジタル信号発生器(SMW200A)と組み合わせ：干渉波(FMCW)
- ▶ アナログ信号発生器(SMB100A)と組み合わせ：干渉波(CW)、OTAテストの空間ロス測定

バクトルSGと組み合わせてFMCW信号の生成
-> FMCW干渉波によるロバスト性評価



New Release



アナログSGと組み合わせてレーダー周波数のCWを生成
-> CW干渉波 or 空間伝搬ロスの測定

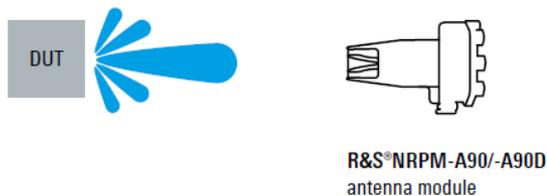
簡単にパワーを測定したい

OTAパワーセンサ(R&S®NRPM)

- ▶ アンテナ/ダイオード検波器一体型でロス補正などが容易 (空間伝搬ロスのみ)
- ▶ 広い周波数レンジ：18GHz-90GHz (すべての車載レーダー周波数帯に対応)
- ▶ 複数センサ (最大12個) の組み合わせ可能 (ビームフォーミングの評価)

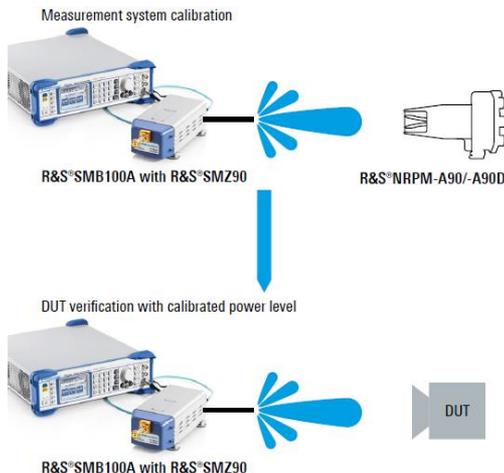


General OTA power calibration



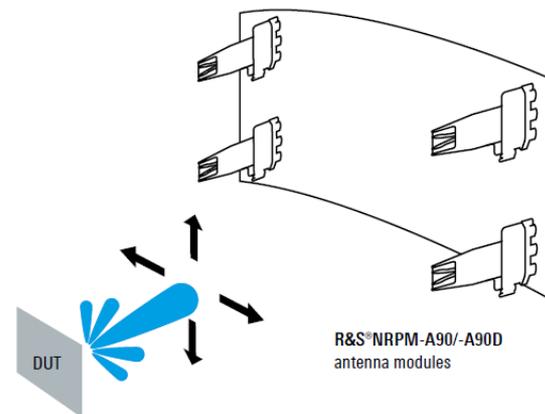
DUTのパワー測定

System calibration for OTA receiver tests



空間伝搬ロスの校正
/DUTへの入力レベル校正

TX beamforming verification

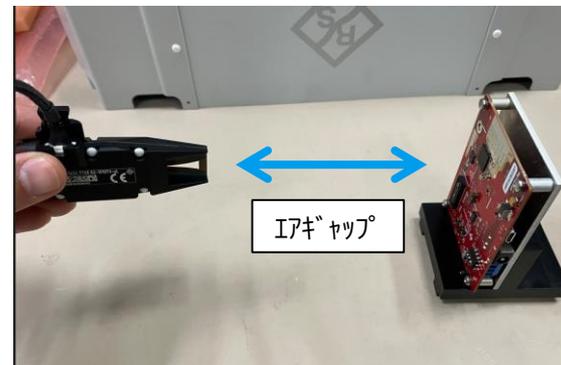
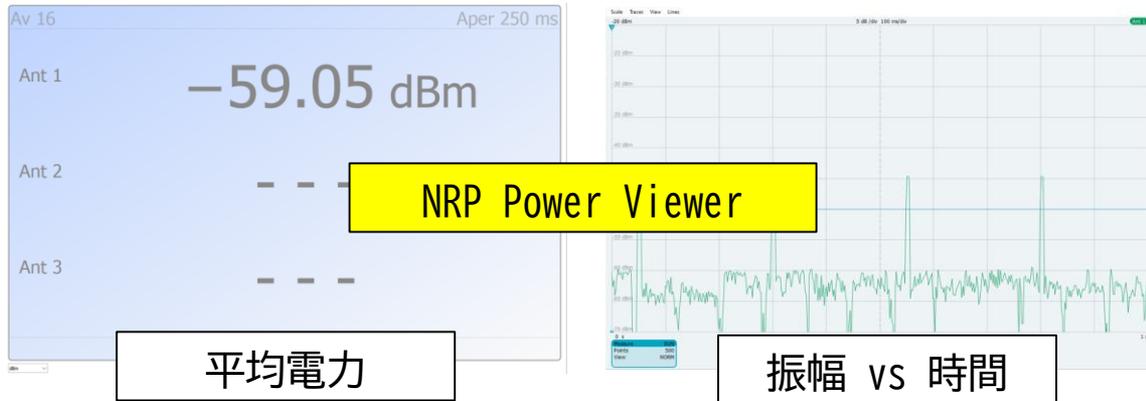


ビームフォーミング評価

簡単にパワーを測定したい

OTAパワーセンサ(R&S®NRPM)

- ▶ 単偏波、両偏波2つのモデル (直線偏波)
 - > 垂直/水平偏波の同時測定
- ▶ R&S製パワーセンサ用モニタソフトウェア (フリーソフト)
 - > モードを使い分け可能 (数値表示 / 時間軸表示)
 - > 以下、FMCWパルスの測定例



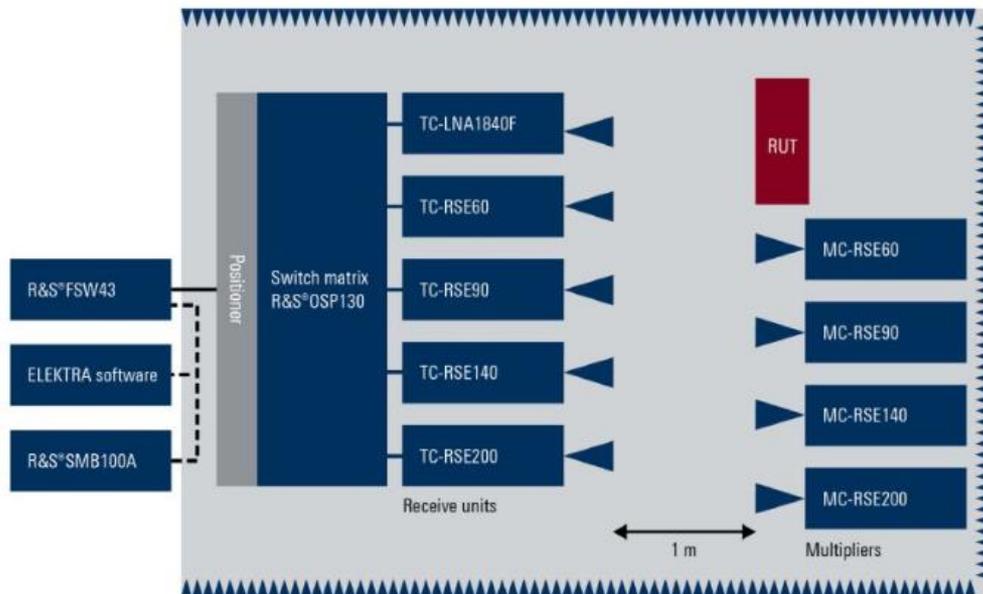
スプリアス測定システム

RSEテストシステム

- ▶ 車載レーダーに要求されるスプリアステストを自動でテスト（～200GHz：DFF）
- ▶ ポジショナによるアンテナの自動位置設定



High sensitivity OOB and spurious measurement up to 200 GHz



Direct-field chamber or lab setup with absorber walls

レーダー・ターゲット・シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレータ (R&S®AREG800A/QAT100)

- ▶ アレイアンテナを使用した機械走査なしのターゲット・シミュレーション
- ▶ QAT100の複数台使用による高い拡張性 (広いシミュレーション角度のカバー)

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



R&S®AREG800A
レーダー・ターゲット・シミュレータ



R&S®QAT100
アドバンスド・アンテナアレイ



QAT100
スタンダード・
フロントエンド



QAT100
MIMO・
フロントエンド

レーダー・ターゲット・シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレータ (R&S®AREG800A/QAT100)

▶ 用途ごとのバリエーション



1) R&S®AREG800A & QAT100

76G-81GHz
アンテナアレイ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*QAT100による角度シミュレーション

2) R&S®AREG800A & AREG8-xxS/D

24G-24.25GHz/76G-81GHz
ホーンアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS
*ミリ波フロントエンドにより各周波数に対応

3) R&S®AREG800A & AREG8-81S & ATS1500C

76G-81GHz
フィードアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*ポジションナによる角度シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレータ (R&S®AREG800A/QAT100)

▶ 用途ごとのバリエーション



1) R&S®AREG800A & QAT100

76G-81GHz
アンテナアレイ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*QAT100による角度シミュレーション



2) R&S®AREG800A & AREG8-xxS/D

24G-24.25GHz/76G-81GHz
ホーンアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS
*ミリ波フロントエンドにより各周波数に対応



3) R&S®AREG800A & AREG8-81S & ATS1500C

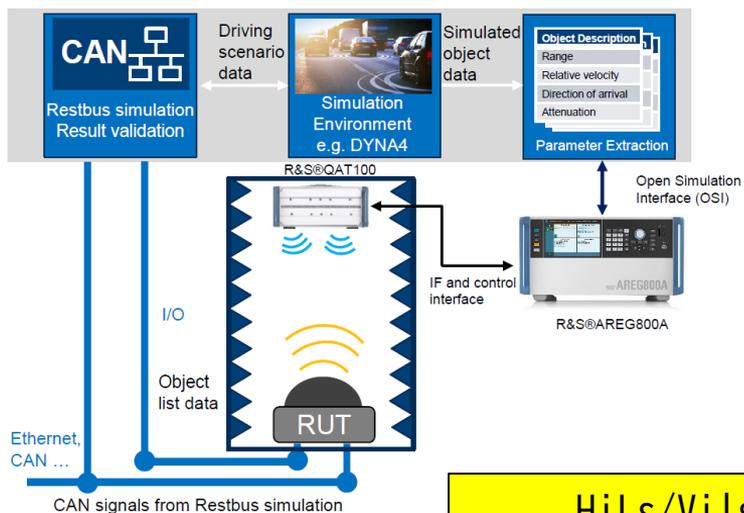
76G-81GHz
フィードアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*ポジションナによる角度シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレーション

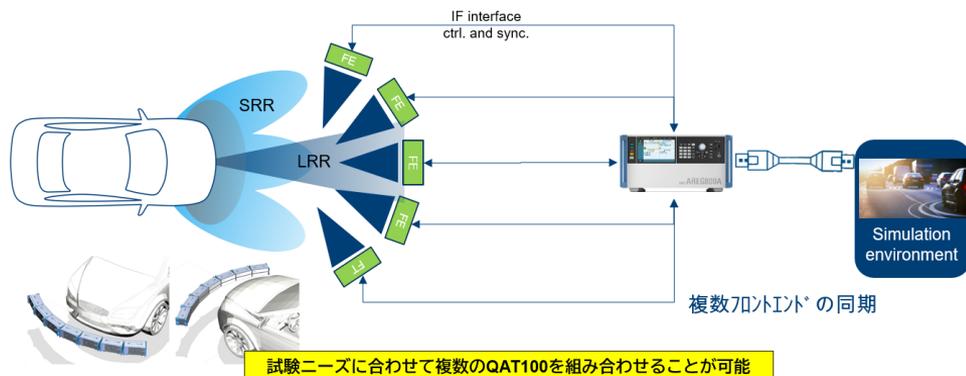
レーダー・ターゲット・シミュレータ (R&S®AREG800A/QAT100)

- ▶ HiLs/ViLsシステムとの連携 (OSI: Open Simulation Interface)
- ▶ シミュレータ上のターゲットからの反射を模擬 (実際の運転シーン)

Hardware in the Loop (HiLs)



Vehicle in the Loop (ViLs)



HiLs/ViLs以外での使用も可能

レーダー・ターゲット・シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレータ (R&S®AREG800A/QAT100)

▶ 用途ごとのバリエーション

-角度シミュレーションが不要な場合
-EIRP測定 (IF周波数)



1) R&S®AREG800A & QAT100

76G-81GHz
アンテナアレイ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*QAT100による角度シミュレーション



2) R&S®AREG800A & AREG8-xxS/D

24G-24.25GHz/76G-81GHz
ホーンアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS
*ミリ波フロントエンドにより各周波数に対応



3) R&S®AREG800A & AREG8-81S & ATS1500C

76G-81GHz
フィードアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*ポジションナによる角度シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレーション

レーダー・ターゲット・シミュレータ (R&S®AREG800A/QAT100)

▶ 用途ごとのバリエーション



1) R&S®AREG800A & QAT100

76G-81GHz
アンテナアレイ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*QAT100による角度シミュレーション



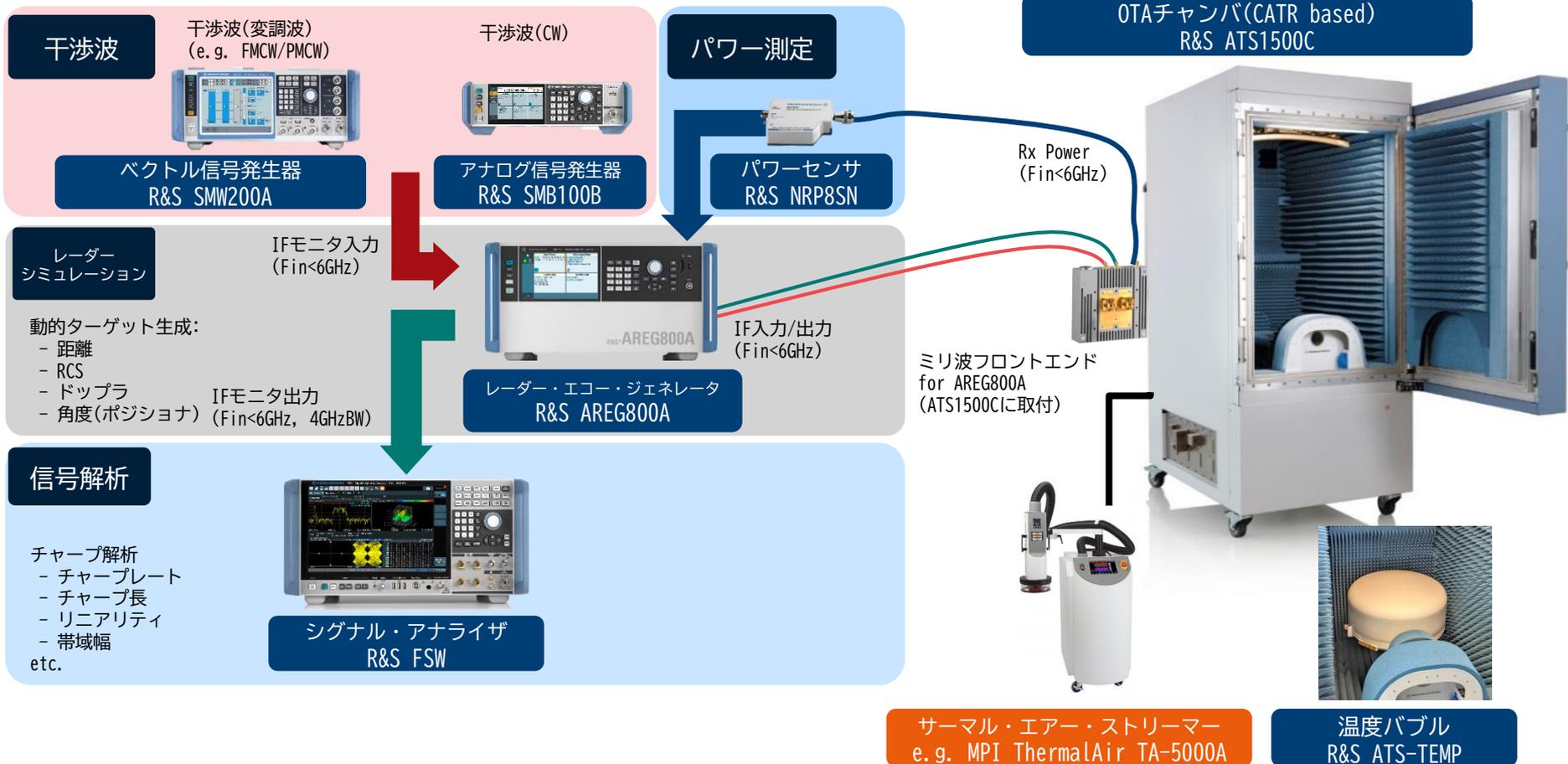
2) R&S®AREG800A & AREG8-xxS/D

24G-24.25GHz/76G-81GHz
ホーンアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS
*ミリ波フロントエンドにより各周波数に対応



3) R&S®AREG800A & AREG8-81S & ATS1500C

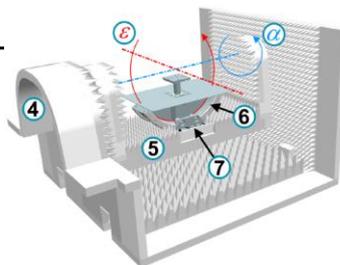
76G-81GHz
フィードアンテナ
動的ターゲット生成
距離、ドップラ、RCS、角度
*ポジションナによる角度シミュレーション



ATS1500C 車載レーダー用OTAチャンバ

概要

- ▶ 車載レーダーに最適化されたコンパクトかつ可搬可能なOTAチャンバ
-> 対応周波数範囲: 60GHz-90GHz
- ▶ CATRリフレクタを用いた近傍界RF -> 遠方界RF変換
-> Indirect Far Field
- ▶ \varnothing 30 cm quiet zoneでイメージングレーダーに対応
- ▶ 精密、高速な3D tilt-tilt ポジシヨナ
-> +/-45deg @Elevation
-> +/-180deg @Azimuth
- ▶ 垂直/水平偏波を同時測定可能



ポジシヨナ



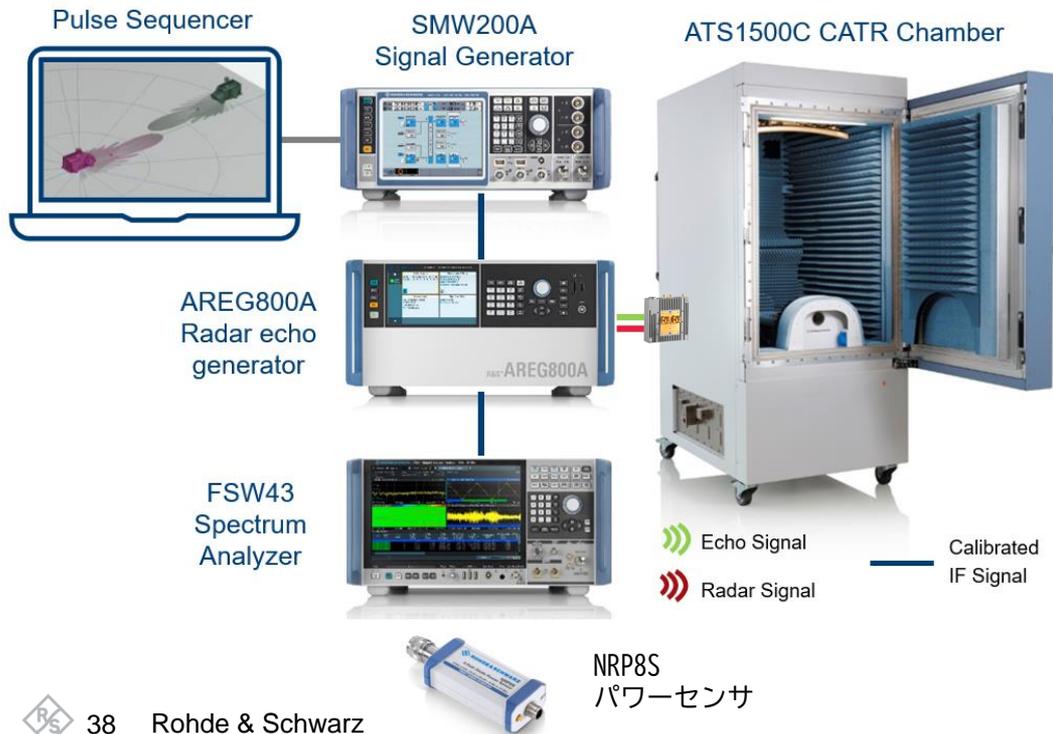
ARC-FX90UP

フィードアンテナ (垂直/水平_両偏波対応)

ATS1500C 車載レーダー用OTAチャンバ

レーダー・ターゲット・シミュレータと組み合わせ

▶ 使用例①：レーダー・ターゲット・シミュレータと使用する場合



- 76G-81GHzのレーダー周波数に対応
*60GHzレーダー非対応
- レーダーターゲットシミュレーション
-> 距離/ドップラ/RCS by AREG800
-> 角度 by ポジショナ
- スペクトラムモニタ (IF OUT)
-> FMCWチャープ解析
-> EIRP_Average/Peak
- パワーセンサ (IF OUT)
-> EIRP_Average
- 干渉波入力 (CW、FMCW etc.)
-> レーダーロバストネス

ATS1500C 車載レーダー用OTAチャンバ

レーダーRFを直接評価

▶ 使用例②：レーダーRFを周波数変換なしで直接評価する場合



- レーダーRFの直接測定
-> WR12インターフェース
-> 60GHz-90GHz
- スペクトラムモニタ (IF OUT)
-> FMCWチャープ解析
-> EIRP_Average/Peak
-> アンテナパターン
-> スプリアス 60GHz to 90GHz
*フィードアンテナによる
- パワーセンサ
-> EIRP_Average

エンブレム/バンパーなどの均一性評価

レーダー・レドーム・テスター(R&S@QAR50)

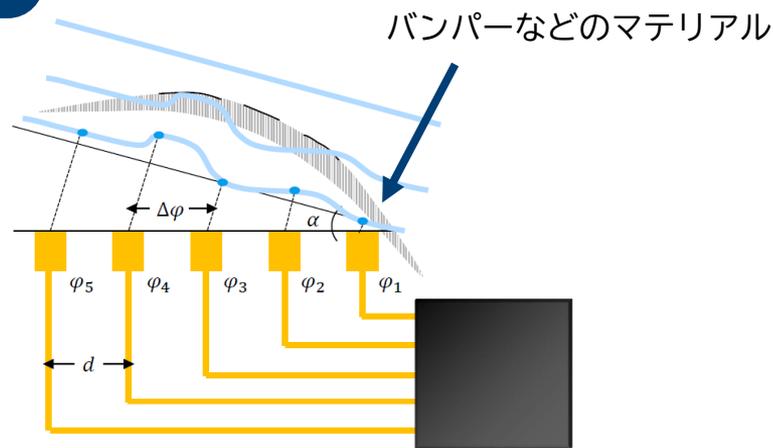
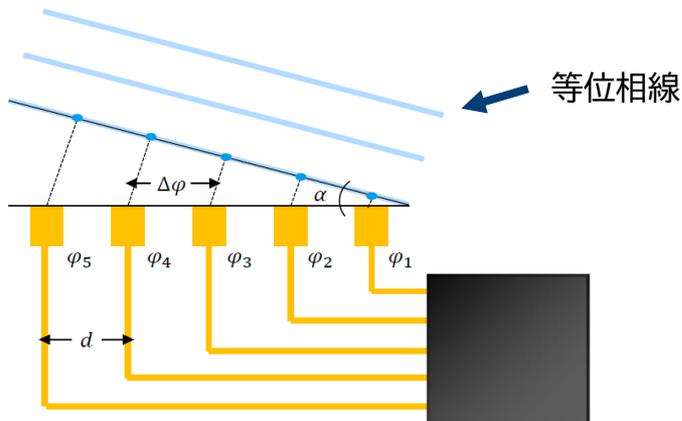
- ▶ レーダーが搭載されるエンブレム、バンパーなどがレーダーの検知に影響を及ぼさないか？
- ▶ 検知距離、検知角度に影響がないかどうか、RF特性の均一性を評価する

レーダーRFへの影響：

ロスが大きい → 検知距離が短くなる

反射が大きい → レーダーRFをブロック（透過しない）

均一ではない → 検知角度エラー（エリア毎に透過位相が違う）



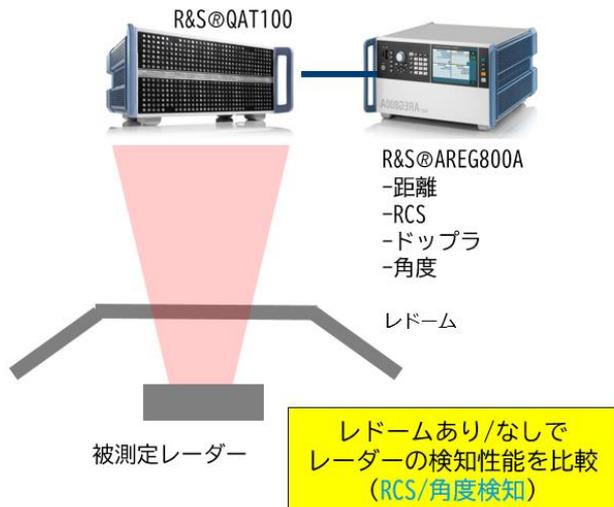
エンブレム/バンパーなどの均一性評価

レーダー・レドーム・テスター(R&S@QAR50)

- ▶ レーダーが搭載されるエンブレム、バンパーなどがレーダーの検知に影響を及ぼさないか？
- ▶ 検知距離、検知角度に影響がないかどうか、RF特性の均一性を評価する

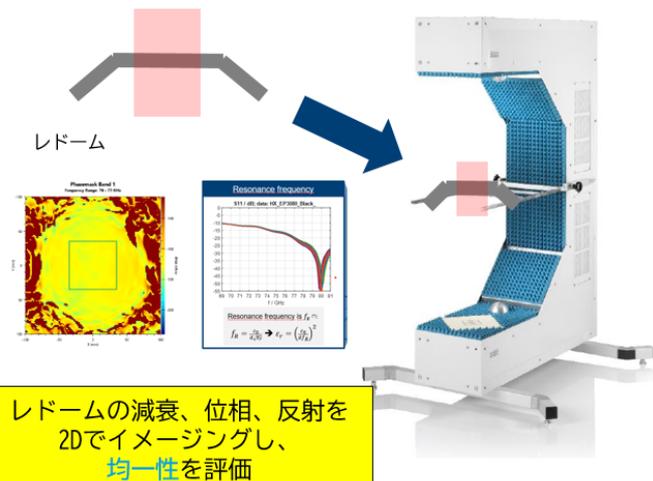
- ▶ レドームあり/なしで検知性能を比較

*角度シミュレーション / HiLsへの拡張



- ▶ レドームの均一性を評価

*誘電率測定にも対応



エンブレム/バンパーなどの均一性評価

レーダー・レドーム・テスター(R&S@QAR50)

- ▶ 置いて測るだけの簡単操作で誰でも簡単に測定が可能（～4秒で測定可能）
- ▶ 値付けされたVerificationキットで簡単にトレーサビリティ管理が可能



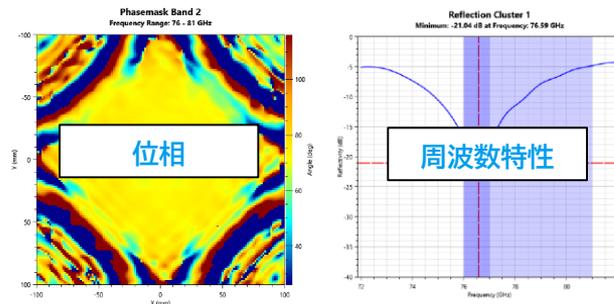
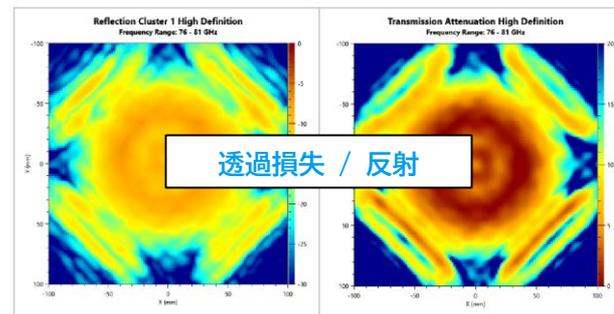
R&S@QAR50
レーダー・レドーム・テスタ



Verificationキット
(フレーム+マテリアル)



QAR50-Z44: Verificationキット



内容

1. 車載（FMCW）レーダー
2. OTAテスト（Over The Airテスト）
3. R&SのFMCWレーダー向けソリューション紹介
4. まとめ

まとめ

- ▶ レーダー評価
レーダーはアンテナ内蔵のデバイス、OTAテストの知見が必要
- ▶ OTAテストの基本的なトピックを確認
 - 近傍界/遠方界 → 遠方界測定が理想的（振幅/位相のエラーが少ない）
 - Fraunhofer距離 → アンテナ開口面のサイズから遠方界になる距離を計算
 - 空間伝搬ロス → 周波数と伝搬距離から空間を伝搬するロスを計算
- ▶ R&SのFMCWレーダー向け測定ソリューション
RF評価からレーダーターゲットシミュレーション、OTAチャンバまであらゆるニーズに対応
 - 電波法試験（EIRP、占有帯域幅、スプリアス）
 - OTAチャンバ（CATRリフレクタ → IFF:間接遠方界）
 - レーダー・ターゲット・シミュレータ（動的ターゲット：距離/ドップラ/RCS/到来角度）
 - レーダー・レドーム・テスト（ロス、反射、位相の均一性評価）

技術談窓口を開設しています！

- ▶ 弊社のアプリケーションエンジニアが、お客様の計測に関する、困りごとを解決します。是非、この機会に技術相談窓口にお立ち寄りください！



Rohde & Schwarz Technology Symposium 2024
ローデ・シュワルツ・ジャパン
技術相談窓口

普段のお仕事でお困りのことや疑問点を
ぜひお気軽にご相談ください

ROHDE & SCHWARZ
Measurement Solutions



5F 展示会会場