

車載用レーダー検証のための電子式操縦可能 フロントエンド

世界初の完全電子式操縦可能アンテナアレイ

課題

自動運転 (AD) と先進運転支援システム (ADAS) は、自動車業界のイノベーション推進の最大要因です。レーダーセンサは、ADやADASの鍵となるテクノロジーの1つであり、さまざまなシナリオでのテストを必要とします。例えば、歩行者 (自動車の前を横切る対象物)、街中での運転 (静止状態または低速移動中の車両に向かっての運転)、都市間移動 (都市内での移動と似ているが、テスト車両の中心線がターゲットの中心と一致していない) などです。

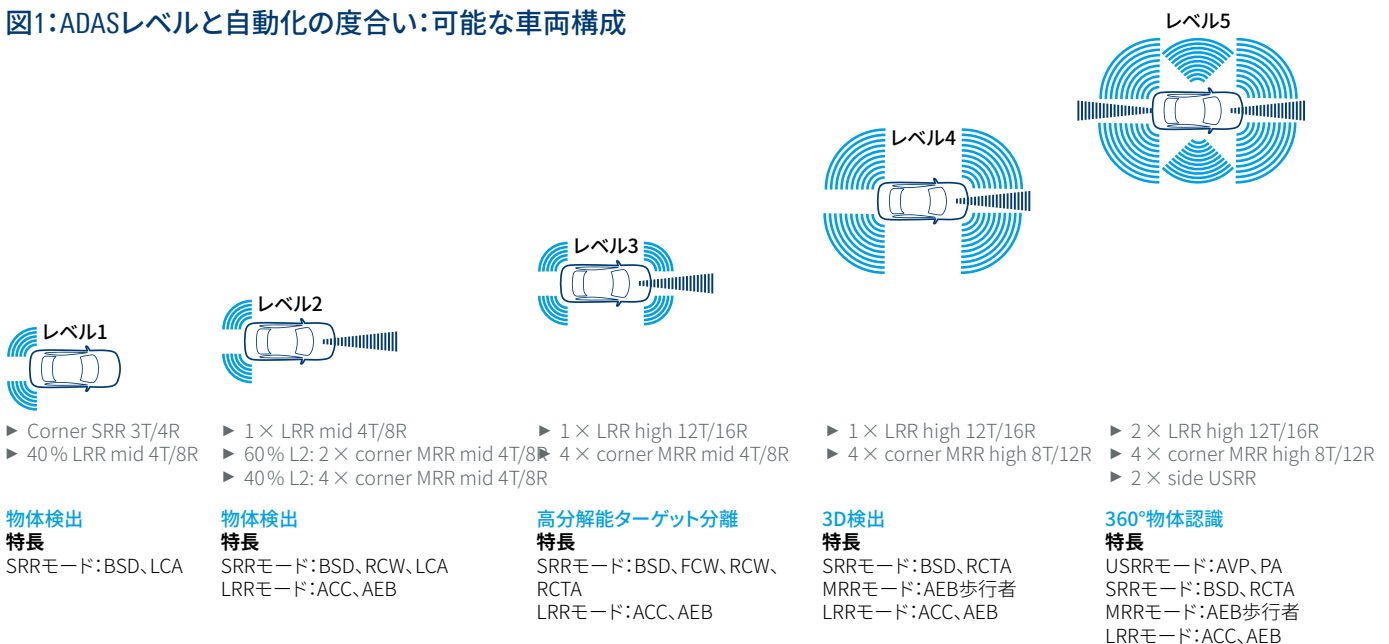
ADASレベル4および5に到達するには、さらに複雑なターゲットシミュレーション機能によるハードウェア・イン・ザ・ループ (HIL) およびビークル・インザループ (VIL) テストシナリオが必要です。検証プロセスの高速化のため、ベンチトップレーダーシミュレーションおよびファンクションテストへの需要も高まっています (図1)。

今日、OEMやエンジニアリングサービスプロバイダーは、ソフトウェア・インザループ (SIL) システムによるシミュレーション環

境を利用して、センサや制御モジュールをテストしています。ソフトウェアエミュレーションは便利ですが、実環境のセンサ応答の潜在的な不完全性は再現できません。完全自動運転車は、このような不規則性に対処できる必要があります。OEMが発売前に最終製品を検証するためには、プロトタイプや公道仕様様の自動車の統合されたシステム全体のロードテストが必要です。ロードテストは開発プロセスにとって重要ですが、ロードテストだけでは不十分です。コストと時間がかかる上、再現性が低いからです。

センサ開発のバリューチェーン全体でさらに追加のテストが必要であり、単一のレーダーセンサコンポーネントのテストのような単純なユースケースと、複数のセンサが用いられる複雑なシナリオのテストの両方を統合する必要があります。その目標は、アダプティブクルーズコントロールや緊急ブレーキシステムなどの自動運転機能を、さまざまなラボ条件の下でテストすることです (図2を参照)。

図1: ADASレベルと自動化の度合い: 可能な車両構成



Application Card | Version 01.01

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



センサのバリューチェーン内での現実的で再現性のあるレーダーセンサテストは困難です。

- ▶ レーダーセンサはブラックボックスです。テストシステムは、内部プロセスを知ることなく、レーダーセンサに信号を印加し、その応答を測定できる必要があります。
- ▶ システムは、ホーンアンテナなどの環境やテストセットアップからの不要な反射を防ぐ必要があります。また、テスト/測定機器や外部妨害¹⁾によるレーダー信号への影響を軽減する必要があります。システムはこれらすべての干渉から可能な限り独立し、信頼性の高い動作を確保する必要があります。
- ▶ センサとADASのテストチェーン全体を対象とするには、柔軟でスケラブルなシステムが必要です。そのためには、バリューチェーン全体での使用と展開が可能なシステムが役立ちます。

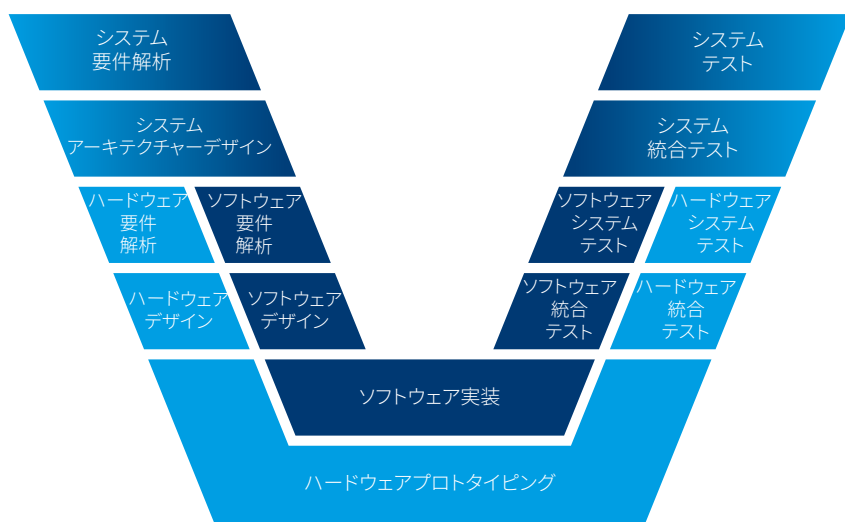
¹⁾ センサのノイズフロアの低減と、近距離ターゲットおよび潜在的なマルチパス反射の抑制。

ローデ・シュワルツのソリューション

現在のターゲットシミュレーターは、ホーンアンテナをフロントエンドとして使用し、各ポイントがレーダーセンサをターゲットとして、アンテナを機械的に動かすことで水平/垂直位置をエミュレートします。この機械式オートメーションでは、テストに時間がかかります。アンテナが移動するたびにエコーの到来角(AoA)が変化するため、アンテナを再計算または再校正しない限り、ターゲットのレンダリングに誤差や精度の低下が生じます。

現在のシステムの制限を克服し、HILおよびVILの重要性の増加に対処するため、ローデ・シュワルツはR&S®QAT100 高度なアンテナアレイを開発しました。これは、世界初の電子式操縦可能アンテナアレイです。R&S®QAT100は、小型のパッチアンテナを作動させることで、方位角と仰角をシミュレートします。アンテナ間の切り替え時間は約2 msなので、方位角方向に高速移動するターゲット(交差点の交差交通や通過などのシナリオ)をシミュレートできます。

図2: ADASセンサの開発プロセス



レーダーセンサの概要

レーダーモジュール パラメータ ¹⁾	レーダーのタイプ					
	短距離	標準中距離	プレミアム中距離	標準長距離	プレミアム長距離	イメージング
周波数レンジ	76 GHz~77 GHz、 77 GHz~81 GHz	76 GHz~77 GHz	77 GHz~81 GHz	76 GHz~77 GHz	76 GHz~77 GHz	76 GHz~81 GHz
代表的帯域幅	200/1000/4000 MHz	1000 MHz	2000 MHz	500 MHz	1000 MHz	2000 MHz
レンジ	80 m	150 m	150 m	250 m	300 m	300 m
レンジ分解能	300/30/3.5 cm	30 cm	7.5 cm	75 cm	30 cm	60 cm/9.5 cm
FOV ²⁾ 方位角/仰角	±60°/±0°	±30°/±0°	±50°/±15°	±15°/±5°	±15°/±10°	±50°/±15°
代表的チャンネル番号(送信/受信)	3/4	4/8	8/12	4/8	12/16	48/48

¹⁾ 各サプライヤーから市販されているセンサのデータシート値。

²⁾ 視野角。

図3: R&S®QAT100の2種類のモデル



R&S®QAT-B11 標準フロントエンド

- ▶ 96個の送信アンテナと5個の受信アンテナ
- ▶ オプションの第2独立TX/RXライン
- ▶ 異なる方向からの最大8つのエコーのシミュレーション



R&S®QAT-B21 シングルラインMIMOフロントエンド

- ▶ 96個の送信/受信アンテナペア
- ▶ MIMOテクノロジーに最適化
- ▶ 異なる方向からの最大4つのエコーのシミュレーション

機械式に対するR&S®QAT100の利点

- アンテナを物理的に動かさずに仰角と方位角のOTAレーダーシミュレーションが可能
- ▶ 切替可能な送信アンテナにより、R&S®QAT100の分解能、速度、再現性、RF性能が向上
 - ▶ 電子式アンテナ切り替えではRFケーブルやその他の可動部品の消耗が生じない
 - ▶ 機械的ハンドオーバーが不要

クリーンなRF:FEからの反射なし

PCBアンテナは、他のシステムで用いられる標準利得ホーンよりRCSがはるかに小さくなります。R&S®QAT-B50 シールドシステムにより、シールドされたRF環境が得られます。

- ▶ 信頼性の高い動作
- ▶ 他のテスト/測定機器や外部妨害要因の影響の軽減 (センサのノイズフロアの低下、近距離ターゲットや潜在的マルチパス反射の抑制)
- ▶ レーダーにテストベッドモードが不要

スケーラブルなソリューション

複数のフロントエンドを組み合わせることで、最大360°のレーダー環境のシミュレーションが可能:

- ▶ さわめて柔軟で拡張が容易
- ▶ 複数のセンサのレーダーFOV¹⁾を1つまたは複数のフロントエンドによりシミュレート可能
- ▶ スタンドアロンでも、R&S®AREG800A 車載用レーダーエコー発生器と組み合わせたワンボックスソリューションとしても使用可能

高い耐振動性:VILテストベッドへの取り付けに最適

- ▶ RF接続数の減少
- ▶ 耐振動性の高い設計による信頼性の向上
- ▶ テストベッドに最適

¹⁾ 視野角。

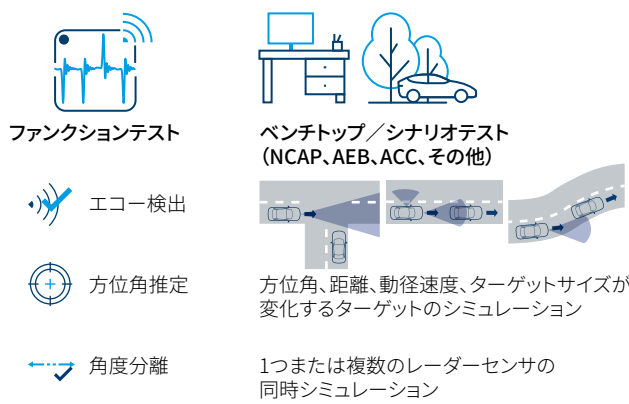
ユースケース

R&S®QAT100のモジュラーセットアップは、レーダーターゲットシミュレーションのさまざまなアプリケーションに使用できます。

コンポーネント/ファンクションテスト

最初は、単一のレーダーセンサのコンポーネントテストのようなきわめて単純なユースケースです。レーダーセンサがエコーを正しく検出し、所定の距離または角度の2つのターゲットを識別できるかどうかと、レーダーセンサの角度分解能をテストします。

図4: R&S®QAT100によるレーダーターゲットシミュレーションのユースケース

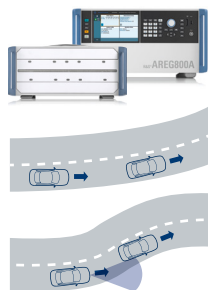


シナリオテスト

2番目のユースケースは、シナリオテストです。これには、複数の自動車、緊急ブレーキシステム、またはアダプティブクルーズコントロール (ACC) を含むトラフィックシナリオが含まれます。目標は、移動するターゲットの方位角、距離、動径速度、ターゲットサイズをシミュレートすることです。シナリオに応じて、1つまたは複数のセンサがシミュレートされます。

図5: ADASセンサのテスト

基本的なADAS
センサのテスト



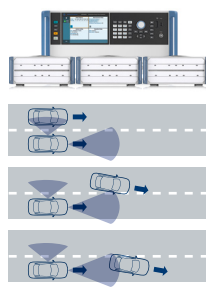
構成機器:

- ▶ R&S®QAT100 高度なアンテナアレイ1台
- ▶ R&S®AREG800A 車載用レーダーエコー発生器

主な特長:

- ▶ R&S®QAT100A 高度なアンテナアレイによる4 GHzの帯域幅
- ▶ 個別の距離、RCS、動径速度/方位角を持つ動的な人工的物体
- ▶ 動的な物体: R&S®QAT100のエアギャップからセンサまでの最大3000 mの範囲で1~8個の物体
- ▶ IF入力、IF出力、HILインタフェース

高度なADAS
センサのテスト



構成機器:

- ▶ R&S®QAT100 高度なアンテナアレイ3台 (最大8台まで可能)
- ▶ R&S®AREG800A 車載用レーダーエコー発生器

主な特長:

- ▶ R&S®QAT100A 高度なアンテナアレイによる4 GHzの帯域幅
- ▶ 個別の距離、RCS、動径速度/方位角を持つ動的な人工的物体
- ▶ 動的な物体: R&S®QAT100のエアギャップからセンサまでの最大3000 mの範囲で1~8個の物体
- ▶ IF入力、IF出力、HILインタフェース
- ▶ 複数のレーダーセンサに並列に信号を印加可能

R&S®QAT100は、レーダーセンサチェーンのプロセス全体をサポートする汎用性と機能を備えています。

初期段階では、一般的なベンチトップセットアップで、R&S®QAT100をスタンドアロンのデバイスとして使用して、レーダーセンサの性能評価を行い、センサをOEM仕様に適合させる際には、レーダーセンサモジュールレベルでのHIL/VILアプリケーション(ターゲットシミュレーターをバックエンドに使用)を実行できます(図6)。

SIMOフロントエンド

R&S®QAT-B11 標準フロントエンドには、96個の送信アンテナと5個の受信アンテナがあり、4つの独立したセグメントに分割されています。この構成は、SIMOセンサの要件を満たします。R&S®QAT100は、必要に応じてラインモードまたはセグメントモードで動作させることができます。セグメントモードでは、各ラインが4つのセグメントに分割されます。各セグメントは独立のRFコネクタを備え、異なる方向からの最大4つのターゲットをシミュレートできます。R&S®QAT-B11に追加のTX/RXライン(R&S®QAT-B2)を装備することで、さらに96個の送信アンテナと5個の受信アンテナを追加して、アレイ全体で異なる方向からの最大8つのターゲットまたは2つの対象物をシミュレートできます。

図6: ADASセンサの開発プロセス(オレンジの部分がR&S®QAT100のユースケース)

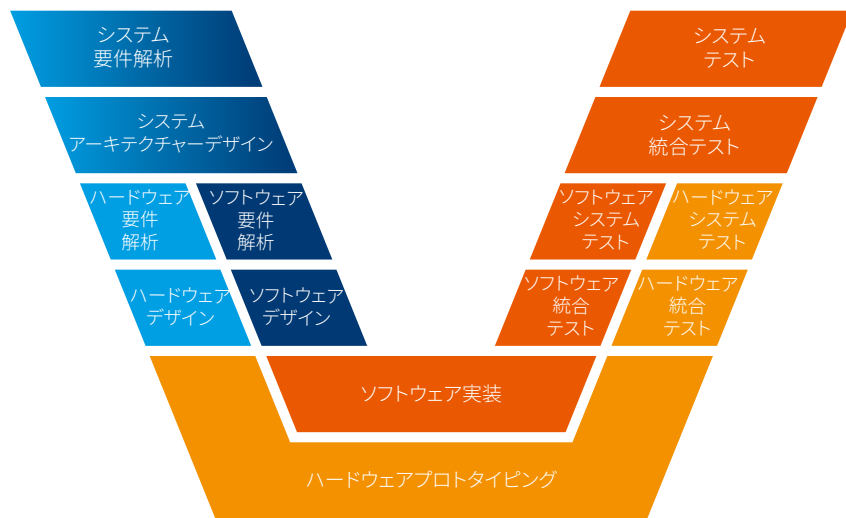
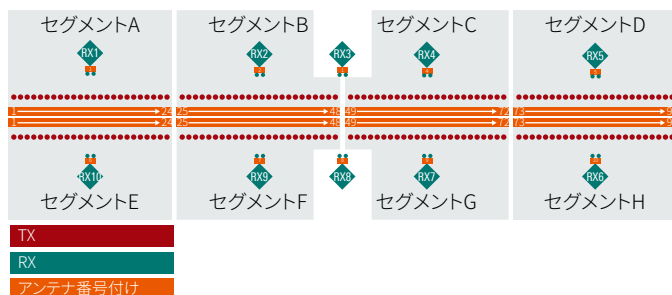


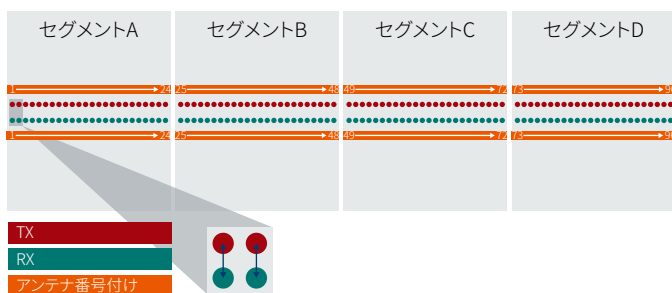
図7: R&S®QAT-B11 標準フロントエンドと、96個の送信アンテナを備えるR&S®QAT-B2 セカンドライン



MIMOフロントエンド

R&S®QAT-B11は、RXアンテナとTXアンテナの間のオフセットが大きいため、MIMOの要件を完全には満たしません。異なる角度でジャンプする可能性があるためです。R&S®QAT-B21 シングルラインMIMOフロントエンドは、受信アンテナと送信アンテナのラインを1つずつ備えています。すべての送信アンテナが受信アンテナと対応付けられているため、MIMOの要件を満たします。96個の受信アンテナと96個の送信アンテナにより、位相誤差を最小化し、3つの次元での空間エコー分解能の向上により、MIMOレーダーの容易な検証を可能にします。

図8: R&S®QAT-B21 シングルラインMIMOフロントエンド



測定の設定

センサからR&S®QAT100までの物理的距離の定義

各アンテナの間隔は3.7 mm (0.146インチ)、ユニット全体の幅は351 mm (13.818インチ)です。セットアップはセンサに合わせて変更できます。R&S®QAT100は、ADASレーダーの代表的な送信パワーに合わせて設計されています。

図9: センサの配置とR&S®QAT100の寸法



R&S®QAT100の視野角 (FOV) と達成可能な角度分解能はセットアップに基づき、次のように計算できます。

視野角:
$$\alpha = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{351 \text{ mm}}{d} \right)$$

角度分解能:
$$\Delta\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{3.7 \text{ mm}}{d} \right)$$

さまざまな距離でのFOVと角度分解能の値

距離 (d)	視野角 (α)	角度分解能 (Δα)
500 mm	38.7°	0.42°
700 mm	28.1°	0.30°
1000 mm	19.9°	0.21°
1500 mm	13.34°	0.14°
2100 mm	10.0°	0.10°

自由場減衰は次のように求められます。

$$10 \log_{10} = \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f \cdot 10^9}{c_0} \right]^2$$

π: =3.1415...

d: =被試験レーダーからR&S®QAT100までの距離

f: =周波数

c₀: =299,792,458 m/s (光の速度)

距離と周波数レンジに応じて、次の値が適用されます。

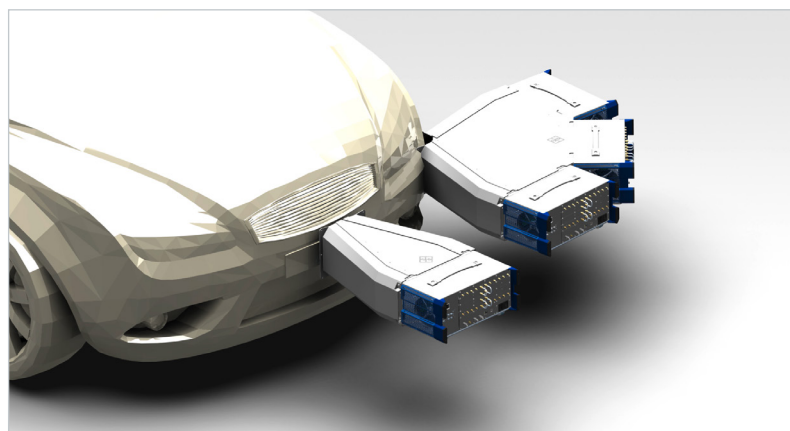
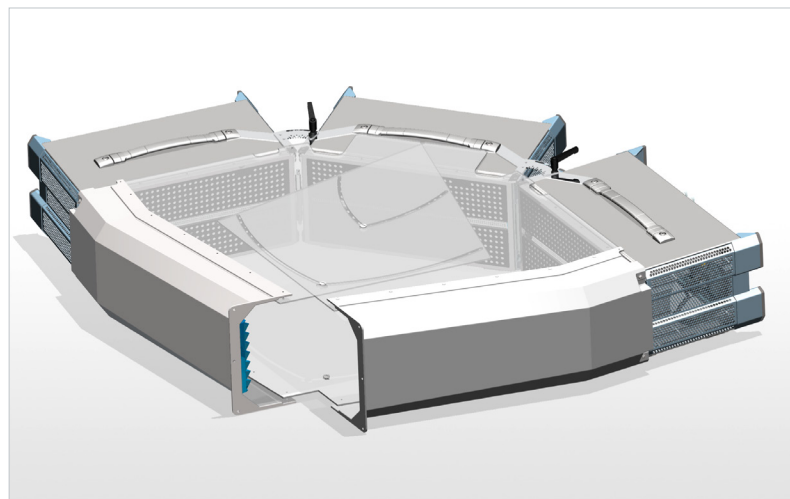
オープン フィールド 減衰	76 GHz	77 GHz	78 GHz	79 GHz	80 GHz	81 GHz
0.5 m	64.0 dB	64.2 dB	64.3 dB	64.4 dB	64.5 dB	64.6 dB
1 m	70.1 dB	70.2 dB	70.3 dB	70.4 dB	70.5 dB	70.6 dB
1.5 m	73.6 dB	73.7 dB	73.8 dB	73.9 dB	74.0 dB	74.1 dB
2 m	76.1 dB	76.2 dB	76.3 dB	76.4 dB	76.5 dB	76.6 dB
2.5 m	78.0 dB	78.1 dB	78.2 dB	78.4 dB	78.5 dB	78.6 dB
3 m	79.6 dB	79.7 dB	79.8 dB	79.9 dB	80.1 dB	80.2 dB
3.5 m	80.9 dB	81.1 dB	81.2 dB	81.3 dB	81.4 dB	81.5 dB
4 m	82.1 dB	82.2 dB	82.3 dB	82.4 dB	82.6 dB	82.7 dB
4.5 m	83.1 dB	83.2 dB	83.4 dB	83.5 dB	83.6 dB	83.7 dB
5 m	84.0 dB	84.2 dB	84.3 dB	84.4 dB	84.5 dB	84.6 dB

外部干渉の最小化

外部干渉の影響を最小化するため、追加のシールドシステムにより、R&S®QAT100に最適な、ほぼ干渉のないRF環境が得られます。このシールドシステムは、ラボのベンチトップでも、車両内のテストスタンドでも使用できます。シールドにより、被試験レーダーに対してマルチパスと反射のない環境が提供されます。表面が吸収材で覆われた小型パッチアンテナをR&S®QAT100と組み合わせることで、クリーンなRFフロントエンドが得られ、近距離のターゲットや潜在的なマルチパス反射が抑制されます(図10を参照)。

図10: シールドおよび取り付けセット

シールドシステムはR&S®QAT100に接続され、レーダーを外部信号からシールドします。接続するR&S®QAT100 高度なアンテナアレイの数に応じて、いくつかのサイズがあります(R&S®QAT-Z50 シールドシステム、R&S®QAT-Z53 シールドトリオなど)。



測定器のセットアップとレーダーエコー発生器への接続

レーダーエコー発生器への接続の数とタイプは、テストセットアップの複雑さによって変わります。セットアップの複雑さは、シミュレートするレーダー対象物の数、R&S®QAT100 高度なアンテナアレイの数、または受信アンテナの数に依存します(受信アンテナは常に受信しますが、信号を転送できるのはバックエンドに接続された場合だけです)。

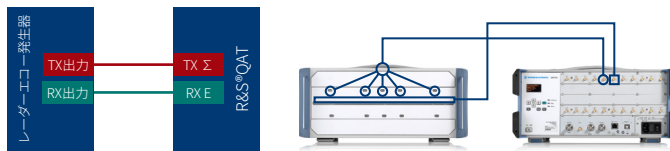
個別に制御されるアンテナセグメントの数に応じて、レーダーエコー発生器には特定の数の入力が必要です。

- ▶ R&S®QATをLANに接続します。
- ▶ TXコネクタをレーダーエコー発生器の "TX IF Out" に接続します。TXコネクタは次の2通りの方法で使用できます。

図11:TXコネクタの使用法

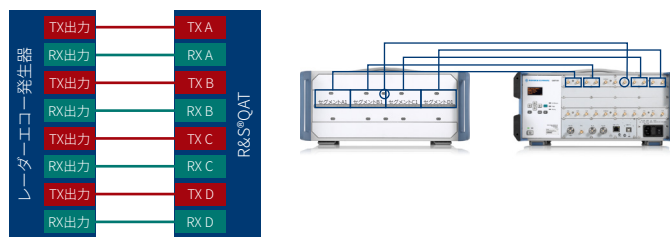
バリエーション1

送信信号を "TX Σ" コネクタに接続します。この場合、すべての送信アンテナが同じ信号を共有します。



バリエーション2

送信信号を "TX A" ~ "TX D" コネクタに接続します。この場合、各アンテナセグメントが異なる信号を送信でき、TXラインあたり最大4つのターゲットを実現できます。RXアンテナをレーダーエコー発生器の "RX IF In" に接続します。レーダーエコー発生器から1つの受信信号だけを得たい場合は、"RX Select" を1つの "RX IF In" に接続します。スペクトラム・アナライザなどの他の外部機器を接続するには、"RX Select" コネクタを使用します。



基準周波数を同期するには、周波数基準(入力または出力)をレーダーエコー発生器に接続します。

96個の送信アンテナを備えたR&S®QAT-B2 セカンドラインを装備した場合、R&S®QAT100は4つの独立したセグメントからなるラインを2つ備え、個別に制御可能な8つのIF経路に1台の測定器で接続できます。これは、フル装備のR&S®AREG800A 車載用レーダーエコー発生器でシミュレートされる8つの完全に独立した人工的物体と最適な組み合わせになります。各IF経路は、R&S®QAT100セグメント内で自由に操縦可能です。

もっと短距離のターゲットをシミュレートする場合、R&S®QAT100にアナログステップ遅延ライン(ASDL)を装備することで、最小遅延ラインを短縮できます。このラインを使えば、レーダーエコー発生器では困難な1.8 m~12.9 mという非常に短い距離のレーダー対象物をシミュレートできます。また、これによりR&S®QAT100のスタンドアロン使用も可能になります。レーダーセンサの角度分解能をテストする場合、レーダーセンサは所定の距離または角度の2つのターゲットを識別します。

ターゲットシミュレーターと組み合わせることで、R&S®AREG800Aは移動するターゲットをエミュレートできます。

合計発生エコー数		1 (調整可能)
距離	最小	<1.8 m ²⁾
	最大	12.9 m ²⁾
減衰	解像度	0.1 m
	範囲	60 dB
	解像度	1 dB

²⁾ エアギャップなし。

まとめ

自動運転支援システムでは、環境内の対象物を検出するさまざまなレーダーセンサからの信頼性の高い高品質のデータが緊急に必要なとされます。自動車会社やサプライヤーは、自動運転シナリオでのこのようなセンサのテストがどれほど複雑かを知っています。

R&S®QAT100は、初めての完全電子式操縦可能アンテナアレイであり、76 GHz~81 GHzのレンジの車載用レーダーセンサに信号を供給できます。R&S®QAT100はモジュラー方式なので、自動車OEMやパートナーは、ADASシステムの開発とテストに専念できます。

オープンアーキテクチャーのOEMの場合、サプライヤーやサービスプロバイダーは、R&S®QAT100プラットフォームを、商用の3Dモデリング、HILシステム、既存のテスト/シミュレーション環境に容易に統合できます。シンプルな機能コンポーネント検証から高度に複雑なマルチターゲットシナリオのテストまで、バリューチェーン全体で車載用レーダーセンサのテストを高速化できます。

利点のまとめ

利点	説明
機械的可動部がなく、耐振動性が高いため、精密で再現性の高い測定が可能	R&S®QAT100の切換可能な送信アンテナは、高分解能、高速性、高い再現性に寄与します。電子式アンテナ切り替えにより、RFケーブルやその他の可動部品の消耗が生じません。4 GHzの瞬時帯域幅により、周波数レンジ76 GHz~81 GHzの最先端の車載用レーダーセンサをサポートします。
高度なシナリオとスケーラブルなソリューションのサポート	アンテナの間隔がわずか3.7 mmで、高い角度分解能が得られるため、複雑なレーダーシナリオの現実的なシミュレーションが可能です。R&S®QAT100ユニットを複数組み合わせることで、視野角を拡げることができます。複雑なADASシナリオ用のターゲットシミュレーターにより、複数の機器からなる高度なアンテナアレイのすべてのR&S®QAT100アレイを同期させることができます。
シールド環境と、反射およびマルチパス効果の低減	R&S®QAT-Z50 シールドシステムおよびR&S®QAT-Z53 シールドトリオを使用すれば、R&S®QAT100に最適な、ほぼ干渉のないRF環境を実現できます。小型パッチアンテナと吸収材で覆われた表面の組み合わせにより、RCSがきわめて小さいクリーンなRFフロントエンドを実現し、センサのノイズフロアを下げ、近距離ターゲットや潜在的なマルチパス反射を抑制できます。
スタンドアロンモードでファンクションテストを短時間で実行	R&S®QAT-B5 アナログステップ遅延ライン (ASDL) を使えば、R&S®QAT100をスタンドアロンモードで動作させることができます。このモードでは、R&S®QAT100によって遅延距離内の近距離エコーをシミュレートできるので、短時間でスペースを取らずにファンクションテストを実行できます。

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

www.rohde-schwarz.com

ローデ・シュワルツ トレーニング

www.training.rohde-schwarz.com

ローデ・シュワルツ カスタマーサポート

www.rohde-schwarz.com/support

R&S® は、ドイツRohde & Schwarz の商標または登録商標です。

PD 3684.0160.96 | Version 01.01 | 12月 2023 (sk)

車載用レーダー検証のための電子式操縦可能フロントエンド

掲載されている記事・図表などの無断転載を禁止します。

おことわりなしに掲載内容の一部を変更させていただくことがあります。

あらかじめご了承ください。

© 2023 Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG | 81671 Munich, Germany