

NEWS

219/18



ROHDE & SCHWARZ

軌道との通信

長距離の通信と配信には衛星が不可欠です。
ローデ・シュワルツが提供するリンクの計画／運用向けの
新製品を導入すれば、衛星をフル活用できるようになります。

無線

聴覚の仕組み：ITU-T P.863 POLQAに
準拠した音声品質測定

オートモーティブ

自律運転の実現：新しいシステムに
よるレーダーセンサ用レドームの
テスト

モニタリング

アンテナマストに搭載するため
高耐候性のハウジングに収容された、
小型の方向探知システム

NEWS

発行元：

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Mühldorfstrasse 15 · 81671 München

www.rohde-schwarz.com/jp

地域別連絡先

- ヨーロッパ、アフリカ、中東 | +49 89 4129 12345
customersupport@rohde-schwarz.com
- 北米 | 1 888 TEST RSA (1 888 837 87 72)
customer.support@rsa.rohde-schwarz.com
- 中南米 | +1 410 910 79 88
customersupport.la@rohde-schwarz.com
- アジア太平洋 | +65 65 13 04 88
customersupport.asia@rohde-schwarz.com
- 中国 | +86 800 810 8228 | +86 400 650 5896
customersupport.china@rohde-schwarz.com

編集者へのメール宛先：newsmagazine@rohde-schwarz.com

編集長：Volker Bach (Rohde & Schwarz)

編集およびレイアウト：Redaktion Drexler & Knobloch GmbH (German)

英訳：Dept. 5MS2

写真撮影：Rohde & Schwarz

印刷国：ドイツ、印刷会社：G. Peschke Druckerei GmbH、

所在地：パルスドルフ(ミュンヘン近郊)

ポリウム：58

発行部数：約60,000部(ドイツ語版、英語版、フランス語版、スペイン語版、日本語版)

発行日：2018年1月、No. 219

発行回数：年2回

ISSN 0028-9108

最寄りのローデ・シュワルツ販売店を通して無料で提供します。

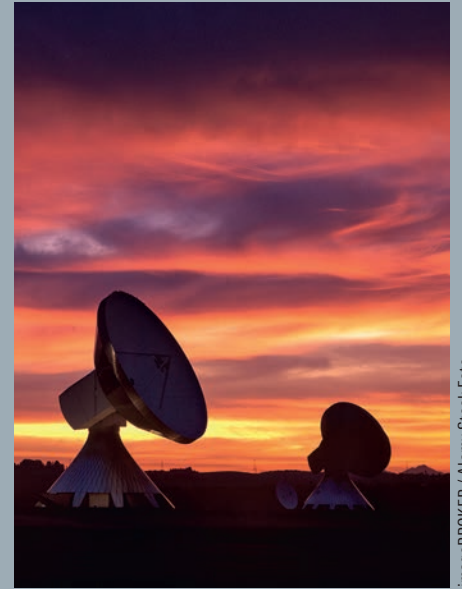
出典が記載される場合には抜粋の転載も許可されます。コピーを Rohde & Schwarz(ミュンヘン)までお送りください。

PD 3606.9691.76

R&S®は、Rohde & Schwarz GmbH & Co. KGの登録商標です。商標名は所有者のトレードマークです。CDMA2000®はTelecommunications Industry Association(TIA - USA)の登録商標です。Bluetooth®の文字標章とロゴは、Bluetooth SIG, Inc.が所有する登録商標であり、ローデ・シュワルツはライセンスの許諾を受けて、これらの商標を使用しています。他のすべての商標はそれらの個々の所有者の財産です。

表紙について

データの配信と収集の対象地域が地球表面の広い範囲に及ぶとした場合、衛星は労力とコストを比較的かけずに済む、非常に実用的な手段です。北極圏、ジャングル、砂漠、山岳地帯、あるいは大海原にいたとしても、電気通信衛星がそこから文明世界へのリンクを確立できないほど遠い距離ではありません。例えば、こうした利点を活かした大規模プロジェクトには、通常の衛星通信シナリオとはまったく異なる2つの特徴があります。1つ目はプラットフォームの1つが国際宇宙ステーション (ISS) にほかならないこと、2つ目は人類以外が通信に関与していることです。国際研究プロジェクトICARUS (Max Planck Society、ドイツ航空宇宙センター、およびロシアの国営宇宙企業Roscosmosの共同プロジェクト) が、宇宙ベースの動物のインターネットを構築し、動物の移動や行動を研究しています (64ページ)。無線コンポーネントの開発と構築には、ローデ・シュワルツが従事し、これらのコンポーネントの帯域幅消費を非常に小さく抑えました。ただし、帯域幅消費の増加に伴いチャンネル幅を広げた場合でも、限られたリソースを最適に活用し、コストを最小限に抑えるには、リンク計画の慎重な立案が必要です。その際、性能仕様とユーザープリファレンスを技術的なsatlinkパラメータに変換するソフトウェアツールが役立ちます (71ページ)。適切な設定が見つかれば、リンクのセットアップを開始できます。主要なアップリンクコンポーネントの1つが、マイクロ波パワーアンプです。チューブアンプは、エネルギー効率に優れ、コンパクトなデザインであるため、他の欠点はあるものの、この分野で依然として大きな市場シェアを誇っています。ただし、この状況は変わる可能性があります。さまざまな固有の利点を備えたモデルが、トランジスタとして新たに登場したからです (60ページ)。ICARUSが動物のインターネットに取り組む一方、衛星通信会社のワンウェブ (OneWeb LLC) は、人のインターネットを世界の隅々にまで広げる構想を温めています。OneWebでは、小型衛星を大きな一団として打ち上げる計画を立てています。ローデ・シュワルツは、それに必要な電子計測機器を提供できる唯一のメーカーです (19ページ)。



imageBROKER / Alamy Stock Photo

概要 NEWS 219/18

衛星通信

R&S®SMW200A ベクトル信号発生器／ R&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザ
OneWebコンポーネント用の電子計測機器..... 19

R&S®PKU100ファミリーのRFパワーアンプ



真空管より高性能：衛星アップリンク用の半導体増幅器..... 60

ICARUS共同プロジェクト
動物のインターネット 64

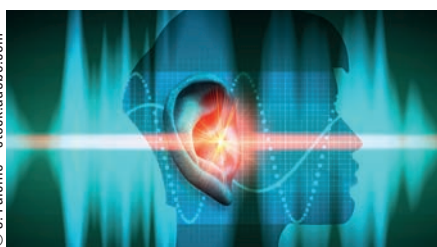
R&S®SLP 衛星リンクプランナー
衛星通信リンクの信頼性の高い計画..... 71

衛星通信リンクの最適化に役立つR&S®SLP 衛星リンクプランナー（71ページ）。



無線

テスト方法

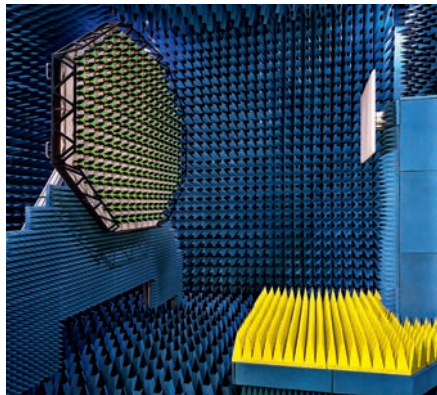


人間の聴覚をシミュレートする測定 – ITU-T P.863の心理音響学..... 8

R&S®SMW200A ベクトル信号発生器／ R&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザ
5G NR用の信号の生成と解析..... 16

R&S®PWC200 平面波コンバーター
5G基地局用OTAテストシステム 18

大規模MIMO 5G基地局の測定用テストシステム（18ページ）。



航空および防衛

R&S®SMW200A ベクトル信号発生器
PDWストリームの処理 20

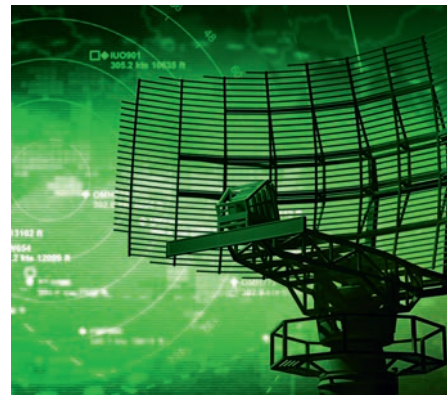
R&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザ
周波数アジャイル・レーダー・システムと超短パルスの解析 22

オートモーティブ

R&S®QAR 高品質車載用レドームテスター
自律運転の実現 24

R&S®FSW85 シグナル・スペクトラム・アナライザ／ R&S®RTO2064 オシロスコープ
5 GHzの解析帯域幅によるEバンド車載用レーダーのテスト 30

最大パルスレートでのレーダー受信機のテスト（20ページ）。



汎用測定器

R&S®SMW200A ベクトル信号発生器

優れたGNSSシミュレーション 33

R&S®NRQ6 周波数選択型 パワー・センサ



不可能を可能にする 36

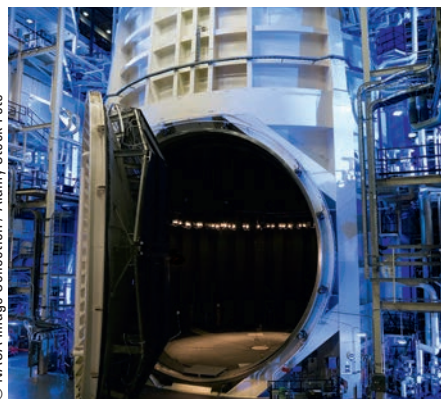
ネットワーク解析用のインライン校正 ユニット

真空への挑戦..... 40

アナログ/ベクトル: R&S®SMB 100B/R&S®SMBV100B 信号 発生器

Bクラス登場 43

リモート校正を必要とする真空チャンバーでの
DUTのネットワーク解析 (40ページ)。



R&S®EVSF1000/R&S®EVSG1000 Nav/Flightアナライザ/Airnav/Com アナライザ

航空管制のための2種類の
アナライザ..... 44

R&S®ZNL ネットワーク・アナライザ およびR&S®FPL1000 スペクトラム・ アナライザ

コンパクトなアナライザ
プラットフォーム 48

放送およびメディア

R&S®TLU9 ギャップフィルアー

ギャップフィルアー界の
「ゲームチェンジャー」..... 51

R&S®THU9evo UHF高出力 トランスミッター

タワーにパワーを..... 54

R&S®DSA リアルタイムDOCSIS シグナル・アナライザ

DOCSIS3.1ケーブルネットワークの
詳細 56

地上と空中のフライト航法システムを測定する
新しいアナライザ (44ページ)。



モニタリング

R&S®DF-ATC-Sファミリー方向探知 システム

航空機の安全性を高める新しい
無線方向探知機 78



その他

発行人..... 2

NEWS コンパクト 6

ニュース 82

1ワールドトレードセンター (フリーダムタワー) に
配備された最も強力なソリッドステートTV送信機
(54ページ)。





オシロスコープファミリーの更新

3つの新モデルR&S®RTC1000、R&S®RTM3000、R&S®RTA4000と、2017年に発売されたR&S®RTB2000により、ローデ・シュワルツのエコノミッククラスのオシロスコープのポートフォリオは、一新されたことになります。非常にコンパクトなR&S®RTC1000は、特に教育や趣味の分野にお勧めしたい製品です。8チャンネル・ロジック・アナライザ、4チャンネル・パターン・ジェネレーター、プロトコル・アナライザ (I²C、SPI、UART/RS-232、CAN、およびLIN用)、デジタル電圧計、コンポーネントテスタ、スペクトラム・アナライザ、カウンタなど、さまざまなアクセサリ機能を装備することができます。ソフトウェアライセンスによる、50 MHzから300 MHzまでの帯域幅のアップグレードも可能です。2000、3000、4000クラスのモデルは、同じプラットフォームをベースにしています。すべてのモデルに10ビット

A/Dコンバーターが内蔵されているほか、R&S®RTM3000とR&S®RTA4000は、16ビットの高解像度モードと非常に大きなメモリも備えています。こうした仕様と特長を持つR&S®RTM3000とR&S®RTA4000は、研究開発分野で威力を発揮します。例えば、標準プローブインタフェースは、すべてのローデ・シュワルツのプローブをサポートしています。これらのオシロスコープを使用することで、対応可能なアプリケーションの範囲が大幅に広がります。R&S®RTM3000はパワーエレクトロニクスの測定に最適であり、タイムベースの精度が高くメモリ容量の大きいR&S®RTA4000は、シリアルプロトコルの解析に特にお勧めします。購入後も、すべてのモデルで、ニーズの変化に対応したキーコードによるアップグレードが可能です。



ドローン警告システムの機能拡張

R&S®ARDRONIS ドローン警告／防衛システムを使用すると、招かれざる空中の来訪者から機密領域を保護できます。このシステムは、ドローンが使用する無線スペクトラムをモニターし、リモート制御信号に含まれる情報を入手します。それらのスペクトラム指紋に基づいて接近するドローンを分類し、ドローンまたはドローンのパイロットの位置を特定します。対抗手段として、必要に応じてリモート制御用の無線コンタクトをブロックすることができます。R&S®ARDRONIS DisruptionとR&S®ARDRONIS Protectionがリリースされ、システムのすべての構成レベルが利用可能

になりました。これにより、Wi-Fi制御されたドローンを検出してリモート制御をブロックする機能と、ドローンが地上に送信するライブ・ビデオ・ストリームを復調して表示する機能が新たに加わりました。その結果、監視スタッフは、侵入者を見張り、侵入者の関心がどこにあるかを見極め、ドローンを脅威として分類すべきかどうかの判定作業を効果的に行えます。R&S®ARDRONISは、システムインテグレーターがセンサや防衛機器を追加することで拡張できる、オープンシステムです (www.drohnenabwehr.de/en)。



コンパクトボディスキャナー

空港の保安検査場のボディスキャナーには、セキュリティチェックに時間を費やすことなく、危険性の高い物体を確実に検出する能力が求められます。スキャン手順は、乗客に不必要に不快感を与えることなく、倫理的に正しい方法で実施される必要があります。R&S®QPS200は、こうした要件にすべて適合する初のスキャナーとして、2016年に発売されました。オープンなポータルソリューションという特長は、セキュリティ担当者だけでなく、乗客の要望にも叶っています。乗客は、閉所恐怖症に陥いる心配がなく、不自然な姿勢をとる必要もありません。一方、警備員は、セキュリティエリアをはっきりと見通すことができるほか、車いすユーザー向けに別の経路を設ける必要がありません。車いすユーザーは、段差

のない広い開口部を簡単に通過できます。新しいR&S®QPS201モデルでは、R&S®QPSファミリーの利点がさらに機能拡張されています。動作原理とテクノロジーは同じです。対向する2つのパネル間で、ミリ波パルスを放射し、反射パルスエコーを受信することで被検体をスキャンします。高速統合されたコンピュータが、何十億もの振幅と位相のサンプルから、人のミリ波画像を再構成し、ニューラルネットワークを使用して、インパーソナルなアバター（人間型の画像）上に表示される異常を検出します。R&S®QPS201は、高い処理能力を備えているため、この作業を4秒未満で行えます。大きな点でも、新モデルは先行モデルよりもかなりスリムなので、セキュリティエリアへの統合がさらに容易です。



カスタマイズされたATSC 3.0信号の作成

ATSC 3.0は、現在、最も高度な地上波配信規格です。UHD解像度までのビデオ伝送をサポートします。モバイルレシーバーに適用でき、単一周波数ネットワークアーキテクチャーに適しています。IPベースバンドアーキテクチャーを採用しているため、リターンチャンネル機能を持つアプリケーションを含め、さまざまなアプリケーションに使用できます。R&S®BTCブロードキャスト・テスト・センタ用にさまざまなソフトウェアオプションが用意されており、チューナーチップセットやブロードキャストレシーバーの開発者は、テストセットアップで規格のさまざまな側面をフルに活用できるようになります。R&S®WV-K818オプションは、ATSCテストケースの使用を希望する、ATSC組織の仕様に厳密に準拠したテストを実施するユーザーを対象としています。R&S®BTCのメモリには、

I/Q波形ライブラリが標準でロードされています。測定器のARBは、このライブラリを使用して規格に準拠したRF信号を作成します。R&S®BTC-K520 リアルタイム・コーデック・オプションを搭載すると、規格の柔軟性が最大限に高まります。コーデックオプションは、ROUTE/DASH、MMT、TS形式のIPデータストリームのサポート、STLインタフェースの実装、複数のPLP(最大64)および複数のサブフレーム(最大256)の管理を行います。2チャンネルのR&S®BTCを操作する場合、両方のチャンネルにコーデックオプションをインストールできます。ATSC Verification & Validationグループの正式なテストケースをサポートするため、一連のSCPIスクリプトファイルが含まれており、このファイルを使用すると、R&S®BTCをV&Vテストシナリオ用に素早く簡単に設定できます。



スマート・モバイル・ネットワーク・テスト

移動体通信ネットワークの品質を、常時モニターすることが必要です。オペレーターは、ネットワークの弱点がどこにあり、競合と比べてどうであるかを知る必要があります。ニュートラルテスト機関には、サービス条件について一般の人々に知らせ、全国的な測定を実施する義務があります。移動車両ベースの測定システムおよびポータブルの測定システムは、こうした目的に使用されます。これらのシステムのデータは、マージして、効率的な評価に利用する必要があります。その作業には、当然、Webベースのソリューションが選ばれます。まさにこの機能を提供するのが、ローデ・シュワルツのモバイル・ネットワーク・テストの新しいスマートプラットフォームです。SmartBenchmarkerシ

ステムが、測定データをWebデータベースに転送し、同様に高機能でユーザーフレンドリーなSmartReports解析ツールが、このデータベースにアクセスします。ユーザーは、カスタムグラフィック・ダッシュボードを構成し、任意のデータセットを解析に含めることができます。ネットワーク条件をリアルタイムでモニターする場合、SmartMonitorの同様の機能を利用できます。さらに、SmartLicensorにより、QualiPoc測定器のソフトウェアライセンスの中央管理が可能です。SmartLicensorには、ブールされたライセンスを測定システムに動的に割り当てたり、回収したりする機能があります。すべてのQualiPoc測定器が、スマートバージョンとして入手できるようになりました。



軍用プラットフォーム用の高度な空中用無線機の発表

最近発表されたローデ・シュワルツのR&S®SDARソフトウェア定義空中用無線機は、世界で最も高度な軍用の航空機用無線機です。国際的に標準化されたSCA(Software Communications Architecture)に基づくオープンプラットフォームとしてデザインされているため、お客様の柔軟性と独立性が最大限に高まります。SCAは、デバイスプラットフォームとソフトウェア(波形と暗号化)の厳密な分離を特長としています。この特長により、既存波形の継続使用が可能となるほか、他のメーカーの波形を測定器に移植することも可能です。ローデ・シュワルツは、さまざまな配備要件に対応するため、高速デー

タレートのネットワーク対応波形と高セキュリティ暗号化アルゴリズムのファミリーを、独自に開発しています。これらのR&S®HDR波形は、最大2つの音声チャンネルとデータを、異なる優先度で高速に平行伝送できます。R&S®SDARの固有の機能の1つが、民間認証機能です。これにより、民間規格に準拠して認定された2機目のオンボード無線機が不要となります。統合、訓練、物流に関連する支出もなくなります。政府機関のお客様および開発中のプラットフォームメーカーとの緊密な調整のおかげで、最初の顧客契約をすでに履行中です。



人間の聴覚を シミュレートする 測定 – ITU-T P.863での 心理音響学

現在、電話のネットワークリソース利用率は小さいものの、実際の使用持続時間を測定した場合、電話は依然として電気通信ネットワークのコア機能といえます。そして、音声品質は、サービス受諾の重要な基準です。エンドツーエンド接続の性能レベルの評価には、自動測定手順を使用することができます。これらの手順には、心理音響モデルに基づいた人間の聴覚の細かな特性評価が含まれます。ここでは、最先端のITU-T P.863規格を使用した例を示します。

ほとんどのエンジニアは、S/N比、全高調波歪み、周波数応答などの技術パラメータに精通しており、これらのパラメータは、忠実度の高いオーディオ機器の音質の把握に使用されます。1990年代まで、電話接続の品質の技術的評価には、この種の純粋に物理的なパラメータが使用されていました。アナログ伝送や単純なPCM方法を使用する場合、伝送品質のおおまかな評価も、これらのタイプのパラメータで十分間に合いました。これまで通りに波形(DPCM、ADPCM)をできるだけ正確に複製することを目標とした、最初のコード化方法が実用化された後でも、測定は、送信信号と元の信号間の振幅差を捕捉することに大きく限定されたままでした。チャンネルは、音声伝送用の線形時不変システムとしてモデリングすることによって簡素化され、仮定からのずれは相加性歪みとして処理されました。

これらの仮定は、新たな音声コード化方法の導入により、変更を迫られています。符号励振線形予測(CELP)、および周波数領域コード化方法は、コード化されたオーディオまたは音声信号の容認率が高まるように最適化されています。信号を波形として、ほぼ正確に複製する必要はなくなりました。その結果、入力信号と出力信号の振幅差を、音声信号の知覚可能な定性的歪みと一般に見なすことは、できなくなっています。

この時期、心理音響学を取り入れた最初の音声品質測定アルゴリズムが作成されました。現行のITU-T規格P.863 POLQAは、これらのアルゴリズムの最も成功した、まさに代表といえます。

その目標は、被験者を使った聴覚テストで得られる評価に匹敵する、送信音声信号の技術的に導出された品質評価を確立することです。音声品質測定手順では、大きなリスナーグループの場合と同様の規模で、短い音声の品質を評価します。すなわち、5段階の1次元平均意見スコア(MOS)を用いて品質を評価し、すべての被験者の意見の平均をとります。したがって、この音声品質に対する単一値を計算するには、音声信号の技術的な解析が必要です。心理音響学的方法では、可能な限り正確な結果を得るため、聴覚状況、人間の聴覚生理、音声知覚をモデリングします。

ITU-T P.863の基本構造

ITU-T P.863方法は、完全参照と呼ばれており、歪みのない基準(オリジナル)信号と受信信号の比較に基づいて品質予測を行います。移動体通信チャンネルを評価するには、構成済みのリモートステーションの基準音声信号を受信し、記録して、基準信号のローカルコピーと比較します。これは、代表的なエンドツーエンド測定です。最も一般的なユースケースでは、2つの携帯電話間または携帯電話

音声品質測定のためのテストシナリオ

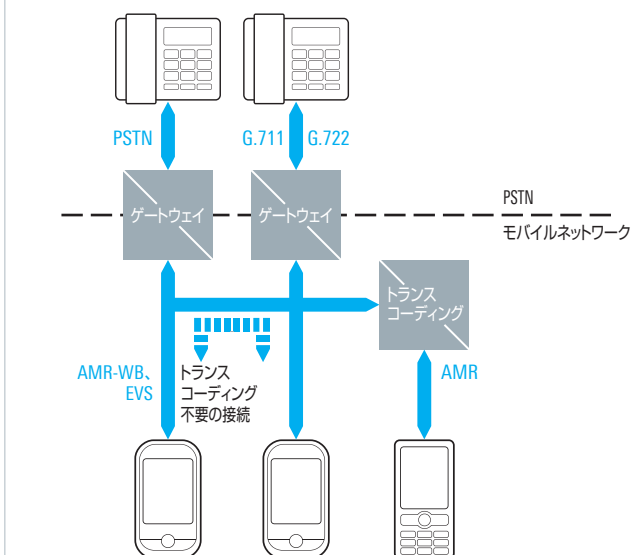


図1: 音声品質測定用の代表的なエンドツーエンドのテスト接続。

から固定電話接続へのテスト通話を実行します(図1)。測定システムは、実際のネットワーク内の音声接続の品質を移動中に測定するため、主にモバイル向けにデザインされています。無論、P.863は、純粋な固定電話やVoIP接続、およびラボでの評価にも使用できます。

つまり、ITU-T P.863には、その前身であるITU-T P.862と同様、以下の3つの側面があります。

- 基準信号とテスト信号の前処理と同期
- 聴覚生理学のモデリング
- 音声知覚と時間的統合のモデリング

品質値の解析と計算はすべて、音声信号自体にのみ基づいています。ITU-T P.863は、追加情報やIPデータを必要としません。測定の実行時、伝送システムに関する知識が不要となるため、非常に幅広いアプリケーションが可能になります。伝送チャンネルは、ブラックボックスとして扱われます(図2)。

ITU-T P.863での伝送経路とモデリング

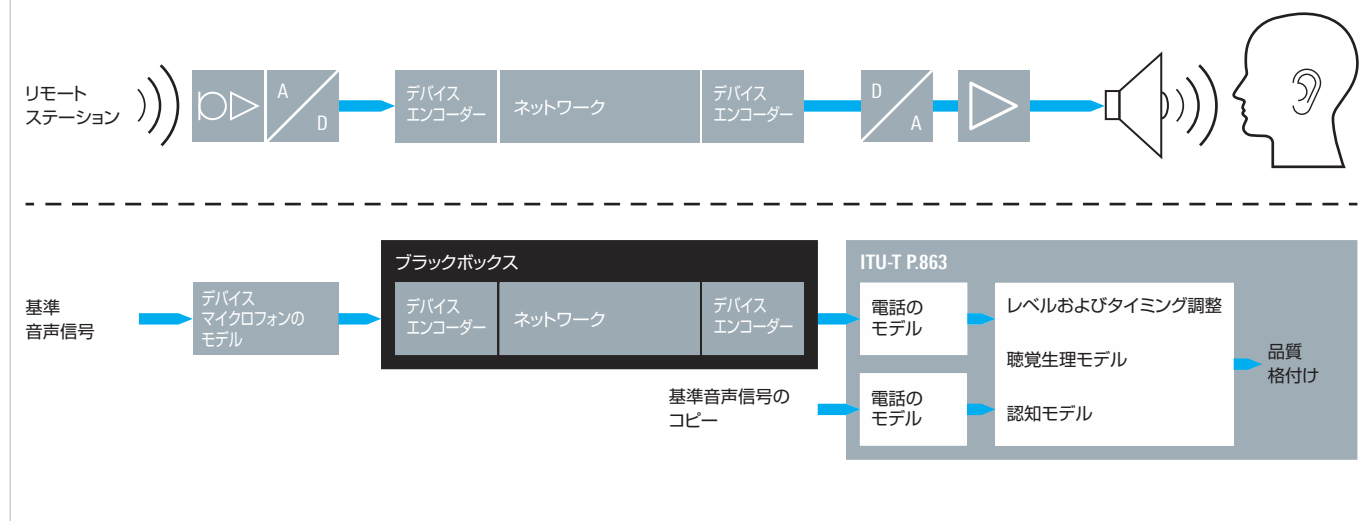


図2：ブラックボックスとして扱われる伝送チャネル。

基準信号とテスト信号の前処理と同期

信号の前処理には、聴覚状況をモデリングするため、送信中の逸脱するクロック周波数の補正、信号レベルの調整、および必要に応じた信号のプレフィルタ（すなわち、ヘッドセットの周波数応答を使用するか、または狭帯域モードでは、代表的な電話受信機の周波数応答を使用）など、いくつかの基本的技術的側面が含まれます。ただし、前処理の最も重要かつ困難な部分は、基準信号とテスト信号を正確に同期させ、短い時間ウィンドウで後続の解析を行えるようにすることです。

この測定手順（後ほど説明）は、基準信号と送信信号の内部周波数-時間表現の比較に基づいています。2つの表現を時間軸上で、正確に合致した状態で比較できなければなりません。すなわち、評価対象信号の特定のセグメント $y(t + \tau)$ が、対応する基準セグメント $x(t + \tau)$ と同等である必要があります。これまでの、伝送システムに一定の遅延、すなわち2つの信号間 $x(t + \tau + c) \sim y(t + \tau)$ の一定の時間オフセットがあると仮定することは妥当でした。その場合、時間軸上の表現を同期させるには、定数 c を用いた単純な補正で十分でした。大部分の線形システムでは、入力信号と出力信号間の相互相関の解析により、 c を十分な精度で容易に決定できました。

現在の伝送システムは、時間変動する非線形システムであるため、これらの前提条件を満たさなくなっています。一般的なインターネット音声通信サービスでは、音声レートに知覚可能なばらつきがあるため、時間的な変動が顕著に見られます。音声テンポは、時には圧縮され、時には引き延ばされたように見えます。こうした状況であっても、基準信号と評価対象信号の短期スペクトラムを正確に比較するには、2つの信号の等価セグメントをすべて整理させる必要があります。

ITU-T P.863では、これを複数段階の反復手順で実行します。最初に、信号をタイムドメインで事前整理させます。初期遅延を除去し、信号を文や単語グループのような長いセグメントに分割します。これらのセグメントは、ほぼ同期された状態にあります。この大まかな整理をベースとして、個別セクションをさらに細分化した後、セクションを正確に整理させます。

2つの信号は、タイムドメインでなければ、周波数ドメインでは必ず、少なくとも短いタイムインターバルにわたって相関していると仮定されます。したがって、スペクトラムの類似性と相互相関の両方が、同期基準として使用されます。評価対象信号を、より小さいセグメントに反復的に分割し、基準信号内の対応する部分と照合する作業が、同期基準に合致するまで行われます。同期手順の最後には、評価対象信号の各セグメントが、基準信号の対応するセグメントと整理されていることになります。

基準信号とテスト信号の比較

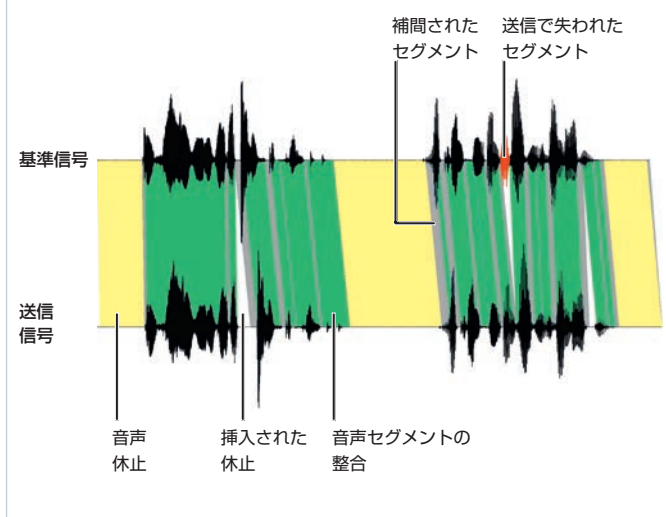


図3：時間変動伝送の場合の基準信号とテスト信号における音声セグメントのタイミング調整の例。

すべての音声セグメントを整列したら、信号を繰り返し様にシフトすること（送信側と受信側の間のクロック周波数に偏差があると起こり得る状況）で、単純な非同期を確認します。このタイプの非同期は、周波数ドメインでのドリフトの原因にもなります。必要に応じて、さらなる処理に移る前に信号のリサンプリングによってこれを補正する必要があり、プロセスが複雑化します。その後、リサンプリングが成功したかどうかをチェックするため、整列手順が繰り返されます。

ほとんどの場合、すべての信号セグメントを同期させることができます。ただし、非常に歪んだ信号セグメント、欠落した信号セグメント、または挿入された（人為的な）信号セグメントが存在する可能性もあります。これらの信号セグメントを基準信号内のセグメントと、高い信頼性で整列させることはできません。こうしたセグメントは、正確に割り当てられたセグメント間に妥当性基準に基づいて内挿されるか、または正確に割り当てられたセグメントに追加されます。同期処理を終了すると、最も小さい受信信号セグメントでも、基準信号内の対応するセグメントに確実に割り当てることができます。この信号は、同期化されたタイムドメイン信号として再現されません。代わりに、整列は、照合信号セグメントの開始点と終点を示した対応テーブルを使用して仮想的に表されます（図3）。

この整列に基づいて、2つの信号は、重なり合うウィンドウ（FFT）に同期をとってマッピングされ、心理音響的に変換されて、聴覚に関連する時間-周波数表現が生成されます。

聴覚生理学と音声知覚

まず、聴覚生理学の基礎、すなわち音事象の内部信号への変換について概説します。これは、ITU-T P.863の音声処理モデルの主要コンポーネントとなります。

一般的に知られている聴覚現象が複数あります。周知の現象の1つは、それ以下では音を知覚できない、聴覚の絶対しきい値です。この値は周波数依存であり、音の強さに対する人間の知覚をそのまま表します。例えば、よく知られているA特性曲線は、特定の音の強さに対する周波数重み付けです。音量と音の高さの知覚（ほぼ対数）を考慮するため、強さに対してデシベルスケールを用い、周波数ドメインでオクターブまたは1/3オクターブバンドによってリストします。ただし、基礎となる聴覚の生理学は、はるかに複雑です。端的に言えば、心理音響学を取り入れたアルゴリズムの目標は、人間の脳の音声処理中枢に聴覚神経から供給される信号のような、品質評価の出発点となる信号を提供することです。

ITU-T P.863の測定アルゴリズムの基本的な考え方とは、測定可能な振幅値のレベルで元の信号（基準信号）と歪んだ送信信号との差を計算しないということです。代わりに、信号の「内部表現」の差をベースとします。内部表現とは、音声信号を聴覚生理学的に処理して、人間の脳で利用できるようにした後の、実際の信号を指します。つまり、聞き取れない信号成分がマスクによって除去された状態にあたります。

音声信号から内部刺激への変換は、どのようにモデリングされているのでしょうか。ITU-T P.863では、最初に短期間のスペクトラム解析を行います。音声信号が、長さ30 ms ~ 40 msの重なり合うウィンドウに細分され、FFTを使用してスペクトラム表示に変換されます。それによって、音圧レベルが、耳の基準ポイント（耳のレベル）にノーマライズ（音量正規化）されます。FFTの結果は、周波数ドメインにおける音エネルギーの等距離スペクトラム表現となります。内耳における音事象のスペクトラム分解能は、可聴周波数レンジにわたって一定ではありません。周波数が上がるにつれて、クリアさが低下します。生理学的に言えば、原因は、内耳の基底膜上で行われる周波数から場所への変換にあります。内耳の蝸牛に巻かれ、内耳液に浸されている基底膜が、感覚毛細胞の基部となっています。膜は、耳小骨（アブミ骨、ツチ骨、キヌタ骨）を介して刺激されます。刺激周波数に応じて、振動の最大値が、刺激点のより近くに形成されるか、またはさらに内側の膜の後方支持体近くに形成されます。このようにして、刺激周波数は、基底膜上

人間の耳の生体構造

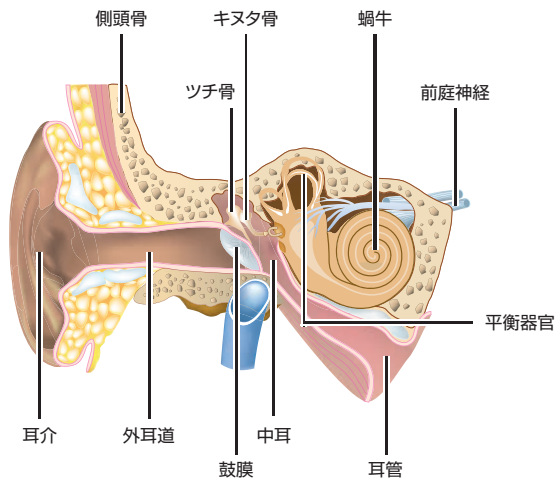


図4：人間の耳の生体構造。周波数レンジは、蝸牛で対数化されます。

の特定の場所で振動します。膜は内側に向かって狭くなるので硬化し、隣接周波数の発生が、振動最大値の間隔が膜の前端部よりも狭まる結果につながります。有毛細胞の密度はほぼ一定なので、人間の聴覚のスペクトラム分解能は、周波数が高くなると低下します。

この、鼓膜と耳小骨による気圧変動から蝸牛流体内の圧力変動への変換は、音響インピーダンス変換として解釈することができます。これは、人間の聴覚の範囲での15 μm から約1.5 cmの間の波長による音響空気振動を約7 cmの長さの液体支持膜にマッピングできる、唯一の方法です(図4)。

音響事象の、聴覚神経の刺激への変換を基本的に理解すると、聴覚に関連する多くの現象を説明できます。有毛細胞は、応答するために最小限のたわみを必要とします。これが、ノイズフロアと共に、静止しきい値を形成します。周波数と知覚される音の高さの関係がほぼ対数であるのは、徐々に狭まる基底膜上で非等価な周波数-場所変換が行われるためです。長年使用されているBarkスケールは、この状況のモデリングに役立ちます。

これまで説明した周波数-場所変換および基底膜の振動を考慮すると、単一周波数(正弦波発振)によって膜のたわみが発生する場所が、1か所でないことは明らかです。そうではなく、膜の全領域が振動し、その最大値のみが励起周波数に対応します。したがって、隣接する有毛細胞も振動し、刺激されることになります。

領域全体が刺激されることは、スペクトラムマスキングの周知の現象につながります。より強い刺激のすぐ近くの弱い刺激は、影響を受けた感覚細胞の(付加的な)知覚可能な励起を引き起こしません。弱い刺激は、より強い隣接刺激によって隠れ、知覚することがまたは、限られた程度までしか知覚することができません。人間の聴覚の能力の1つが、基底膜上の全領域が励起しても、正弦波信号を、狭帯域雑音ではなく正弦波信号として知覚できる能力です。ただし、この励起が最大となる領域では、それと引き換えに感度の低下が発生します。

スペクトラムマスキングのほかに、時間マスキングと呼ばれる別の影響があります。強い音事象の後、励起された領域では、有毛細胞の感度が短いタイムインターバルの間低下します。より弱い刺激は、数ミリ秒間、知覚されなく(またはわずかにしか知覚されなく)なります(ボックスを参照)。

コード化におけるマスキング現象

スペクトラムマスキングと時間マスキングの現象は、1950年代にZwickerによって記述されました。このモデルは、MP3オーディオコード化方法が開発されるまで広く使用されることはありませんでしたが、すぐに大きな成功を収めました。MP3は、人間の聴覚が自動的にマスクする信号成分を低減します。コード化歪みは、マスキングしきい値の下に隠れるため、知覚できないか、またはほとんど認識されません。MP3や、AAC、WMAなどのそれ以降の方法では、人の聴覚の冗長性を利用して情報の送信量を削減しており、信号劣化が最小限に抑制されます。オーディオと音声のコード化方法には違いもあります。音声コード化方法は、人間の声道によって生成された音声の冗長性を利用します。得られる音声信号は、相関性が高く、単純な予測モデルを使って、ある程度特性評価することができます。最先端のコード化方法では、声帯と声道が音声をどのように生成し、モデルパラメータを送信し、受信側で音声信号を合成するかの原則をモデリングします。この純粋なボコーダー方法は、元の音声信号に加えて、合成された信号のエラー信号を送信し、受信側で生成された人工音声信号の補正に使用するようになった時点で、商業的に存立可能となりました。このコード化手法のさらなる開発では、主として、エラー信号の確度の向上と送信の効率アップに焦点を当てています。

これらのスペクトラム／時間マスキングの影響のモデリングは、元の信号スペクトラムを知覚指向内部表現に変換する際の、次の最も重要なステップです。変換された信号は、特別な形態のスペクトログラムとして理解することができます。このスペクトログラムでは、周波数-時間表現が、実際に知覚可能な音の強さによってのみ特性評価されます（ソノグラム）。

測定手順では、この周波数-時間表現を、信号の内部表現と見なします。基準信号と送信信号の2つの「スペクトログラム」を比較することによって、実際に知覚可能な差異のみを示す差異表現が得られます。聴覚生理学に起因して知覚されない信号成分は、ここでは役割を果たさなくなります。

音声知覚と品質モデリング

一見すると、知覚可能な差異対周波数および時間を単に蓄積することが、知覚指向の外乱の評価や有効な品質評価につながるように思われます。しかし、そうではありません。

一方で、この「違い」によって特性評価できるは、両方の信号を直接比較し評価することができるという、かけ離れた前提の下での知覚可能な違いのみです。ただし、提示の遅れですら、誤差許容値の増大につながります。音響的差異によって異なる生理学的刺激が生じるとしても、そういうものとして記憶されていないためです。電話接続（このモデルの場合）の誤差許容値が高いのは、聞き手が話し言葉と比較できる材料が、話し手に関する記憶と、これまでに聞いた人間の話し言葉の自然な音声を土台とした予想のみだからです。測定可能な重要な偏差さえも無関係と見なされるため、理解しにくいエラーが、さらに隠れることになります。

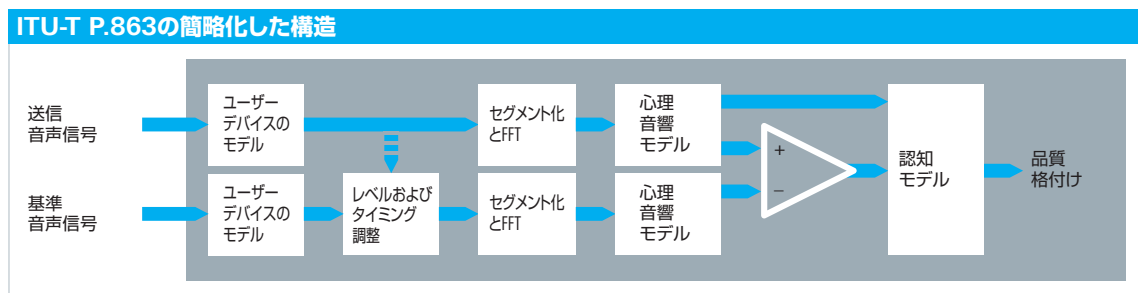
すでに説明したように、音声品質測定手順の目標は、音声信号の知覚について、自然性と外乱の影響に関する現実的な特性評価を行うことです。ただし、自然な音声として受け入れ可能なものの範囲は、かなり広い範囲に及びます。人は、さまざまな声を自然な音声として知覚することに慣れていますが、人、声に対しては、楽器に対するよりもはるかに寛容です。楽器が完璧にチューニングされていないと、聞き手は直ちに気づきます。音声知覚に許容値があることから、理論的に知覚可能な基準信号との差異が品質格付けに与える影響は、一様でないことがわかります。基本周波数とフォルマントにおけるわずかなシフトは、ノイズまたは干渉パルスによって引き起こされる付加的な歪みより、許容値が高い傾向があります。許容値が高いものとして、周波数応答におけるリップル、または帯域制限や、ゆっくりと安定したレベルの変化、あるいは信号の時間的構造での変化（すなわち時間軸上でのわずかな伸びまたは圧縮）もあげられます。

脳の解析力に基づいて、計算された知覚可能な信号差の後処理が必要です。基本的に、聴覚生理学は、有機的なハードウェアをモデリングしただけでした。ここで、聴覚ソフトウェアをモデルに追加する必要があります。実行するには、前述の聴覚生理モデルに加えて、後処理認知モデル方法を使用します。内耳の正確なアルゴリズムモデルとは対照的に、認知モデルの実装は、現在のモデルではかなりおおざっぱで、個別エラーパターンの特定の重み付けに限定されています。重み付けが次に、個々の特定の原因（周波数応答、相加性ノイズなど）に割り当てられます。

ITU-T P.863のモデルでは、知覚可能な信号の違いを以下の4つのカテゴリー（指標）に分割し、それらを独立して解析し、後で重み付けして総合評価に含めています。

- （相加性）ノイズ
- 周波数応答／音色
- 残響
- 歪み

図5：ITU-T P.863 POLQAの構造。



歪みは、解析の最も重要な分岐です。すべての音声成分にわたる基準信号とテスト信号のソノグラムの差異が、計算の基礎として使用されます。ただし、これらの差異を計算する前に、基準信号表現はテスト信号と整列されます。音色のレベルのばらつきや偏差は、このプロセスで部分的に補正されます。これらは知覚される品質にほとんど影響を与えないものの、計算される差異を大きく左右します。絶対差を累積するとき、欠落要素と追加要素が区別されます。欠けている信号の強さは、非常に低く重み付けされます。個々の周波数レンジと音声成分で累積された差が、品質格付けのベースラインとなります。

計算に先立って外乱値に対する音声信号の音色（周波数応答）の影響が低減されているため、この指標は、別の評価で考慮されます。音声信号の残響も、別々に定量化されます。音声信号の一定量の残響が、知覚品質の低下につながることはほとんどありませんが、スペクトラム表示での違いが大きくなり、知覚したものと対応しなくなります。音色と残響の両方の指標を使用して、品質の計算基底値を補正します。

この計算された品質基底値は、音声知覚の特性評価には比較的有效ですが、音声休止中は、相加性ノイズをマスクする音声信号がないので、相加性ノイズが主に知覚されることになります。このため、バックグラウンドノイズを個別に測定し、重み付けして、品質値の調整にも使用しています。品質モデルでは、最終的に、計算された品質値を1から5のMOSスケールに変換します。この変換のベースとなるのが、被験者によるリスニングテストです。MOS値は、モデルの測定値によって可能な限り正確に再現する必要があります（ボックスを参照）。

ローデ・シュワルツ製品におけるITU-T P.863

SwissQual AGは、POLQA連合のパートナーで、かつ権利の共同所有者であり、2012年からローデ・シュワルツに属しています。音声／ビデオの解析および品質モデリングの分野におけるこの会社の長年にわたる経験が、ローデ・シュワルツの製品ポートフォリオに活かされています。コア製品は、QualiPocとBenchmarkerです。どちらも、すべての関連情報をRFレベルとIPレベルで提供し、メディア信号（オーディオまたはビデオ）をリアルタイムで解析する、スマートフォンベースの測定システムです。呼の設定と解放、音声信号の供給と記録、結果構造の保存は、自動的に行われます。このシステムは、実際のネットワークでの広範なシリーズ測定用にデザインされています。

ITU-T P.863ベースのアルゴリズムが標準として承認された後、直ちにAndroidで実装されました。独自のモデル開発のおかげで、

モデル開発とテストデータ

ITU-T P.863は、電気通信ネットワークにおける音声品質評価の新基準を策定するため、ITUによって準備された複数年にわたる競争の成果です。特に、IPベースの伝送と新しいコーデックの進歩、および伝送された音声スペクトラムのHD音声への（あるいはそれを越える）拡張が引き金となり、新たな測定方法の必要性が生じました。

複雑な選択プロセスを経て、競争の勝者として選ばれたのが、OPTICOM、TNO、SwissQualによって作成されたモデルです。競争を勝ち抜いたこれら3社の利点を1つのモデルにまとめ、標準化することで、ITU-T P.863 POLQAが誕生しました。シナジー効果が発揮された新モデルは、個別の方法の確度を大幅に上回っており、2010年に公式に標準として承認されました。ITU-T P.863の選択と検証には、リスナーによって評価された10の異なる言語の45,000を超える発言と送信文が使用されています。

現在、音声品質測定の基準方法はITU-T P.863です。世界中の何千もの測定器に、品質モニターの目的でインストールされています。標準は、モデルの定期的なメンテナンスを通して最新の状態に保たれます。2018年3月に公開されたバージョン3.0では、新しいEVSコード化方法に対して特別の検証が行われました。バージョン3.0は現在、人間の可聴オーディオスペクトラム全体をサポートしています。

QualiPocは有利なスタートを切り、スマートフォンでP.863をリアルタイムで実行する最初の民生用システムとなりました（図7）。

P.863 POLQAは、拡張オーディオ解析の中核要素です。MOS値に加えて、音声およびノイズレベルのような他の技術的パラメータだけでなく、「失われた音声」（失われた、未受信の音声の割合）など、現在の電気通信チャネルで重要なパラメータも計算され、出力されます。

信号の持続時間にわたって、多くのパラメータを視覚化することができます。これにより、音声信号のエラーを正確にローカライズし、下位の伝送レイヤーと同期させることができるため、詳細なエラー解析が可能になります（図8）。



図6：車両ベースのテストキャンペーンを、包括的なモバイルカバレッジと品質マップの準備に使用可能。音声品質測定は手順の一部です。

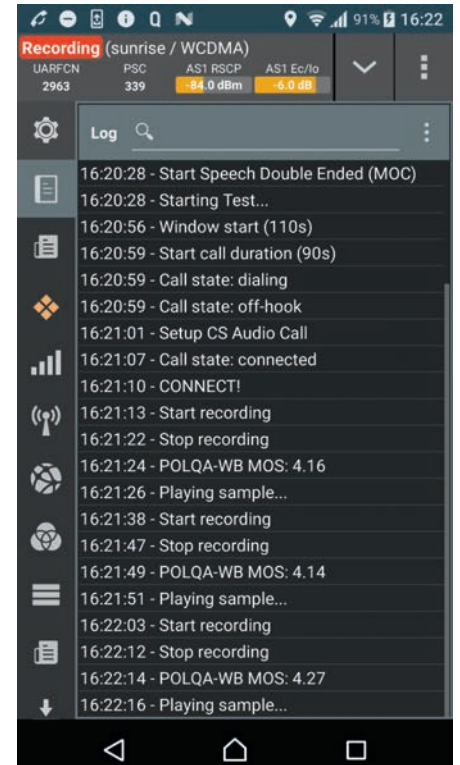


図7：QualiPoc測定システムを用いたITU-T P.863に準拠した音声信号のリアルタイム評価。

図8：P.863による音声品質解析の例。音声信号のMOS値は2.57です（総合格付け："Fair（適正）"）。スコアがかなり低い理由として、割り込みと可変遅延が示されています。このスコアは、失われた音声信号（喪失音声）3.5 %と遅延拡散99 msによって定量化されています。

Listening Quality (P.863): 2.57 Fair		Quality Code: Interruptions and Variable Delay			
POLQA®		Application: wideband (50-14000Hz) / Interface: electrical / ReferenceSystem: headset dttoc			
Speech Level (ITU-T P.56) [dB]:	-23.3	Missed Voice [%]:	3.5	Speech Activity [%]:	52
Noise Level [dB]:	-80	Front End Clipping [%]:	0	Snd/Rcv DC Offset [%]:	0 / 0
Static SNR [dB]:	56.7	Gain (total) [dB]:	2.8	Resampling [%]:	0
				Delay Deviation [ms]:	9
				Delay Spread [ms]:	99
				Effective Bandwidth:	wideband

品質値に影響を与える外乱についての情報を使用することで、音声品質の低下の根本原因に対する自動解析が行えます。このタイプの根本原因解析では、バックグラウンドノイズ、激しいコード化歪み、パケットの消失、中断などを含む、ほぼ30種類の主要な問題の原因を識別することができます。この補助情報は、伝送路上の問題点の正確な特定に非常に有効です。

現在、販売されている全測定システムの4分の3以上に、オプションでオーディオ解析が内蔵されています。これは、自動音声品質測定がいかに関与し、支持されているかを明確に示しています。ただし、ITU-T P.863の使用は、従来の携帯電話の呼の評

価だけにとどまりません。音声信号の評価に焦点を当てることで、WhatsApp CallやSkypeなどのOTTサービスの評価も可能になります。近年、ネットワークオペレーターがこれらのサービスを現場で自社の製品と比較する重要性が増しており、これが適切な測定システムに対する需要を押し上げています。

Dr. Jens Berger

5G NR用の信号の生成と解析

この将来のモバイル通信規格の急速な拡大を後押ししているのが、継続的に更新されているローデ・シュワルツの電子計測器です。

3GPPの次世代モバイル通信規格である5G New Radio (5G NR) は、LTEと比べた場合、ギガビットの接続速度、遅延の低減、信頼性の向上、接続密度の増加、エネルギー効率の改善を約束します。2017年12月、3GPPが実装可能な5G NR規格の最初のセットを完成し、これによって、業界が2019年の本格的な試用および民生用配備の開始を目指し、標準準拠のソリューションの開発を進める上での方向性が確立しました。

5G NRの主な特長

5G NRには、LTEよりも高いデータレートの実現に特に重要な主な特長が、2つあります。ミリ波周波数の使用（最大100 GHz¹⁾）と非常に広い信号帯域幅のサポートです。特に、5G NRは、6 GHz未満の搬送波周波数に対して最大100 MHz、ミリ波レンジの周波数に対して最大400 MHzの信号帯域幅をサポートします。5G NRは、LTEと同様に、広い搬送波帯域幅を効率的に利用するため、アップリンクとダウンリンクの両方でOFDMベースの波形を採用しています。ただし、サブキャリア間隔での柔軟性が高まるので、異なる周波数バンドでの配備が可能となります。最大16の搬送波を集約することにより、ギガヘルツレンジ内の帯域幅を単一のデバイスに提供できるようになることが期待されます。5G NRでは、高周波数を使用する際の減衰量の増加の影響への対策として、大規模なアンテナアレイに依存する、大規模MIMOおよびビームフォーミング技術も採用しています。

デザインとテストの主な課題

こうした野心的ともいえる特長は、開発エンジニアに新たな課題をもたらしました。必要な特性（例えば線形性）を示すパワーアンプのデザインが、新たなデザイン手法（例えば、デジタルプリディストーション）を必要とするやっかいな作業に変わる可能性もあります。ミリ波レンジで周波数を発生させるための回路を構築する場合、ミキサーと通倍器に起因する位相雑音の影響を低減するため、慎重なデザインとコンポーネントの選択が求められます。ビームフォーミングには、アクティブ・アンテナ・システムのアンテナエレメント間の非常に良好な振幅／位相同期も必要となります。

周波数が高まると、テスト方法や測定方法の課題が深刻化します。回路の波長が短く、損失が大きいため、緊密な統合が必要となるので、テストのためにコネクタポートを供給することは実際的ではありません。同時に、コネクタやテストフィクスチャの影響が無視できなくなり、実行された測定の有効性に影響を与える可能性が

あります。結果として、OTA (Over-the-Air、無線) テストが重要な役割を果たすこととなります。

継続的に更新されるローデ・シュワルツの電子計測器を使用すると、業界は、5G NRソリューションを市場に迅速に投入することができます。例えば、開発者は、適切な信号源やアナライザを緊急に必要とします。

5G NR信号の発生と解析用の新しいソフトウェア

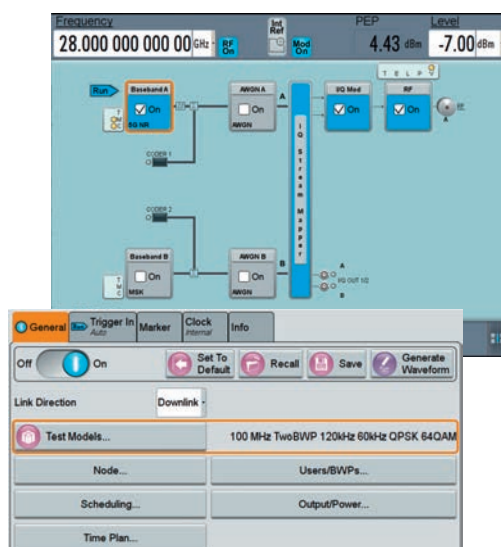
R&S®SMW200A用の**R&S®SMW-K144オプション**は、アップリンクとダウンリンクの5G NR信号の生成を簡素化し、あらゆるテストニーズに対応できるようにします。このオプションを使用すると、信号発生器は、フラットな周波数応答と、40 GHzまでの周波数で最大2 GHzの帯域幅を持つ、非常にクリーンな5G NR信号を発生させることができます。このソフトウェアは、規格で仕様化されているすべての波形（巡回プレフィックスOFDMおよびDFT-s-OFDM²⁾）、5 MHz～400 MHzのチャネル帯域幅、256QAMまでの変調方式、サブキャリア間隔（15 kHz～240 kHz）、ヌメロロジューオプションをサポートします。直感的なGUIを使って、これらのパラメータや帯域幅部分（BWP）などの他の多くのパラメータを柔軟に設定することができます。

R&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザ用の**R&S®FSW-K144オプション**には、FFTサイズ、巡回プレフィックス長などの標準準拠のパラメータを使用して、5G NRダウンリンク信号を詳細に解析する機能があります。このオプションを使用すると、測定器で直接パラメータを設定したり、信号の他のパラメータに影響を与えるセルIDなどのパラメータを自動検出することができます。

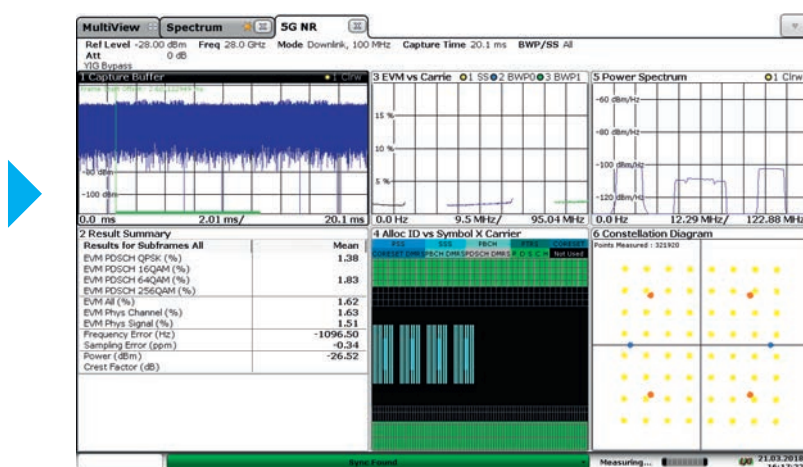
R&S®SMW200Aによる信号発生

5G NR用の信号発生器には、広い周波数レンジで優れたEVMを持つ、非常にクリーンな広帯域信号を生成できる機能が必要です。そのため、信号発生器には、優れたスペクトラム特性、位相特性、振幅特性が求められます。ミリ波周波数での高い経路損失を克服するには、非常に高いRFパワーも必要となります。R&S®SMW200A ベクトル信号発生器は、これらの要件、および3GPP Release 15³⁾で規定されたその他の要件をすべて満たします。40 GHzまでの周波数レンジで2 GHzの帯域幅を持つ信号が内部生成されるため、外部ミキサーやアップコンバーターが不要です。

5G NR用の信号の生成と解析



R&S®SMW-K144による信号構成(アップリンクとダウンリンク)



R&S®FSW-K144による信号解析(ダウンリンク)

R&S®SMW-K144およびR&S®FSW-K144ソフトウェアオプションは、6 GHz未満の周波数バンドとミリ波バンド内のすべての重要な測定値のプリセットを提供します。

自動内部振幅補正により、周波数レンジ全体にわたって非常に平坦な信号 (2 GHz帯域幅の測定で0.4 dB未満) が保証されます。最大+18 dBmの信号出力パワーを備えており、外部増幅器なしでOTAテストに使用できます。また、スペクトラム特性に優れているため、100 MHzのダウンリンク信号に対して測定EVMが0.3 %未満の5G NR信号を生成することができます。この信号発生器にオプションの統合フェージングシミュレータを搭載すると、すべての主要なMIMOシナリオのリアルタイムフェージング (市場で唯一のもう一つの機能) など、複雑なアプリケーションにも対応できるようになります。

R&S®FSWによる信号解析

5G NRでは、複数のコンポーネントの搬送波の相互作用を捕捉するため、1 GHz以上の信号解析帯域幅が必要になります。R&S®FSW-B1200オプションは、R&S®FSWシリーズの43 GHzモデルと50 GHzモデルのシグナル・スペクトラム・アナライザ用に、1200 MHzの内部解析帯域幅を提供します。固有EVMの低い14ビットA/Dコンバータにより、デザインに関する新しい洞察が得られます。この内部オプションには、ダウンコンバーターおよび独立したデジタイザで構築されたシステムと比較して、テストセットアップのサイズが小さく、測定器間のケーブル配線が減り、測定精度が上がるというメリットもあります。

新しい**R&S®FSW-B2001オプション**は、R&S®FSW43とR&S®FSW50の内部解析帯域幅を2 GHzに広げます。これにより、5G NR用パワーアンプのデザイナーは、例えば、プリディストーションシステムの開発と評価を実行できるようになります。さらに広い帯域幅が必要な場合は、R&S®FSW85をR&S®RTO2064 オシロスコープと組み合わせると、90 GHzまでの周波数に対して最大5 GHzの解析帯域幅をサポートできます (30ページの記事を参照)。

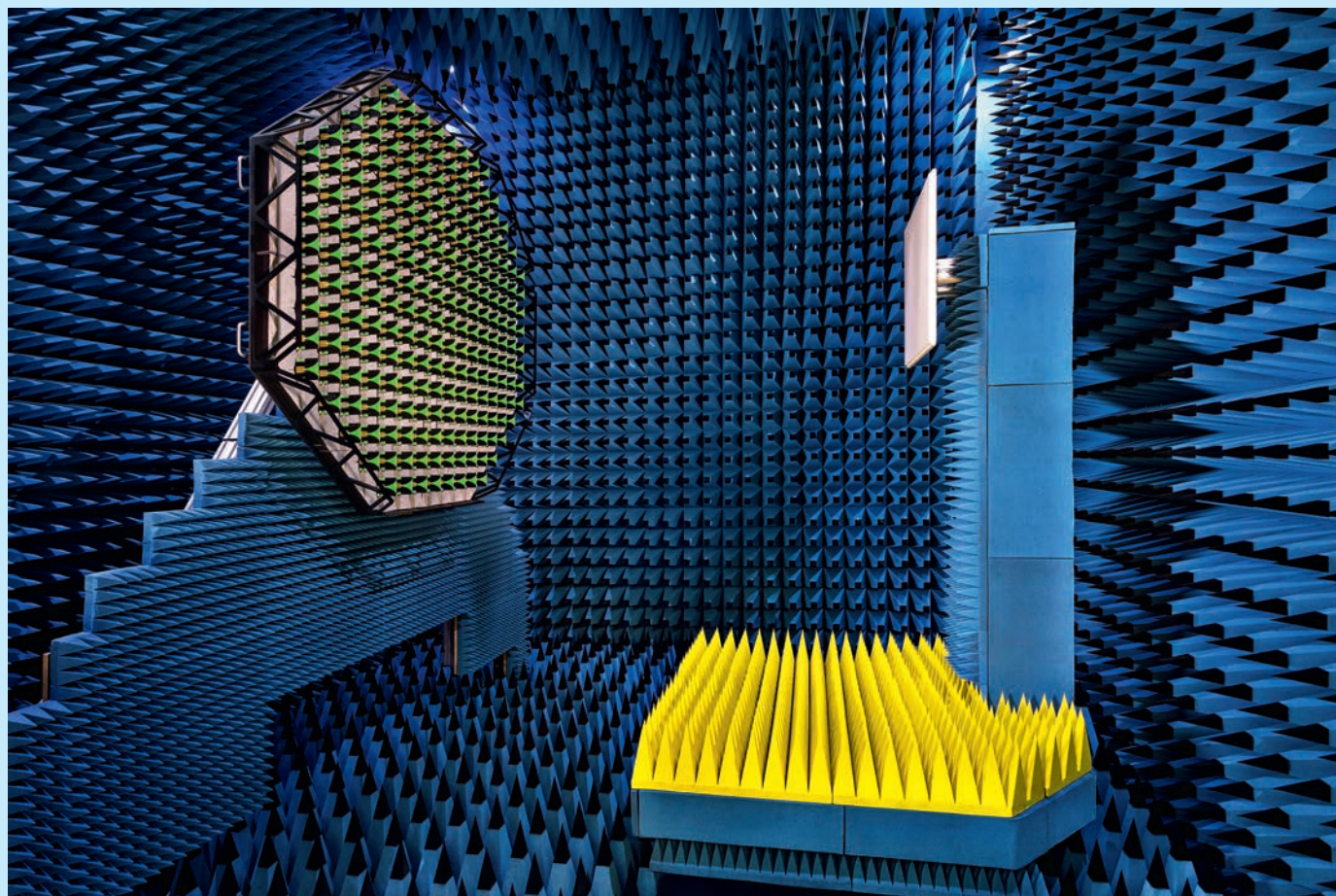
Dr. Patrick Agyapong; Johan Nilsson

- 1) Rel-15では、2つの周波数ドメイン (FR)、FR1 (450 MHz ~ 6 GHz) と FR2 (24.25 GHz ~ 52.6 GHz) を定義しています。この記事の発表時点では、3GPP TS 38.101-2 v15.0.0 (オフィシャル、ノンスタンドアロン5G NR仕様、2017年12月停止) でFR2用に、3つのバンドn257 (28 GHz)、n258 (26 GHz)、n260 (39 GHz) が仕様化されていました。
- 2) 離散フーリエ変換拡散OFDM。
- 3) オフィシャル3GPP Rel-15、凍結されたノンスタンドアロンNR仕様、日付2017年12月 (TS 38.101-1 v15.0.0およびTS 38.101-2 v15.0.0)。

コラム

5G基地局用OTAテストシステム

5G基地局は、大規模MIMOアンテナアレイを使用して、大容量化とエネルギー効率の向上を実現します。基地局アーキテクチャーには、新しい測定パラダイム、すなわちR&S®PWC200平面波コンバーターなどの電子計測器が必要です。



R&S®PWC200 平面波コンバーター（左側の8角形アレイ）は、被試験基地局が位置する平坦な波面を生成します。この場所は、ここに示されている白色の基準アンテナの位置からわずか1.50 mしか離れていません。

5G基地局のアレイ内の各アンテナは、フロントエンド (RFトランシーバー、増幅器、アップコンバーター、ダウンコンバーター) と実際のアンテナエレメントからなる、自己完結型のユニットになります。したがって、将来の基地局は、RFパラメータを測定するため、OTAテクノロジーを使用して全体として特性評価する必要があります。ただし、基地局が存在する場所の遠方界条件下か、または遠方界をシミュレートするテストセットアップを使用しないと、トランスミッターとレシーバーの最終的な測定値を取得できません。そして、R&S®PWC200 平面波コンバーターが実行するのが、まさにこのタスクです。

R&S®PWC200は、被試験デバイス（基地局、パッシブアンテナ、またはアンテナアレイ）の近傍界領域内にある156個の広帯域Vivaldiアンテナからなる、双方向フェーズドアレイです。コンバーターは、コンパクトなテストチャンバーに設置されており（ターンキー方式でも提供可能）、6 GHzまでの周波数レンジでトランスミッターとレシーバーのリアルタイムの測定（放射パターン、利得、EVM、ACLRなど）を可能にします。以前はこうした測定には、R&S®PWC200よりもはるかに大きなコンパクト・アンテナ・テスト・レンジ (CATR) が必要でした。

各アンテナには移相器とアッテネータパッドがあり、被試験デバイスが配置されている電磁界の的を絞った合成が可能です。アレイへの信号供給や、信号受信のテストの際には、コンバイナーによって、すべての信号経路を単一のポートにマージし、そのポートに測定機器を接続できます。

R&S®PWC200とテストチャンバーは、どちらもコンパクトで取り扱いが容易なため、開発時や製造時の校正に使用できます。

OneWebコンポーネント用の電子計測機器

衛星通信会社のワンウェブ (OneWeb LLC) では、世界のどんな辺ぴな場所でもインターネットにアクセスできるよう、衛星の使用を計画しています。ローデ・シュワルツは、それに必要な電子計測機器を提供しています。



OneWebは、包括的な衛星ネットワークを経由して世界の遠隔地に高速インターネットアクセスを提供することを使命とする米国企業です。OneWebでは、インフラを現在開発中です。計画されている900基の衛星のうち、最初の1基が、年内に地球低軌道に配置される予定です。チップセットを供給するQualcomm、衛星の開発と製造を受け持つAirbus Defense and Space、地上局を供給するHughes Network Systemsなど、有名な企業がこのプロジェクトにパートナーとして参加しています。ローデ・シュワルツは、電子計測器メーカーとしてただ一社、RFコンポーネントのテスト用パッケージソリューションを提供します。

OneWebユーザーは標準無線機器を使用し、OneWebユーザー端末と呼ばれる地上の移動通信アクセスポイント経由でデータ

を転送することになります。これらの端末は衛星にリンクされており、衛星は地上局ゲートウェイを経由してインターネットと通信します。そのため、ユーザー端末と衛星間および地上局と衛星間という、2つの経路の2方向でのシミュレーションとテストが必要です。

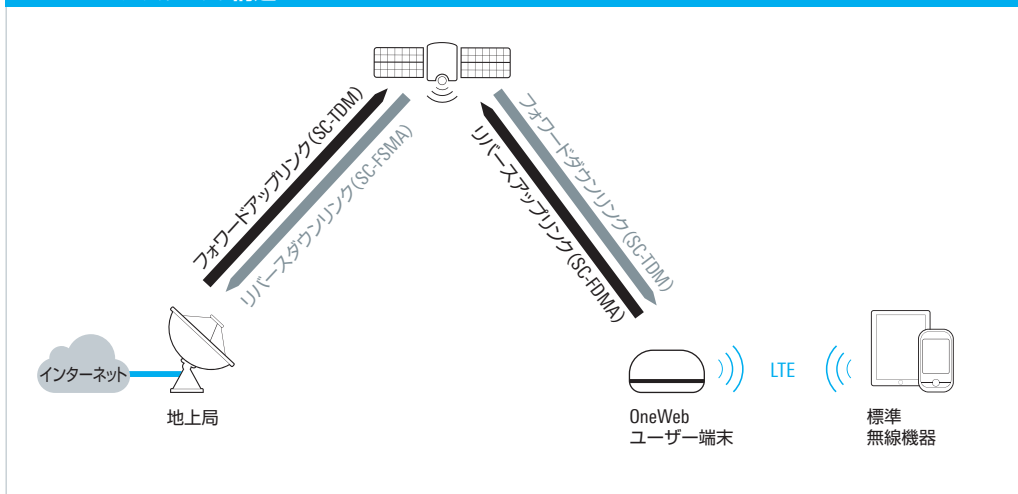
テスト信号は、R&S®SMW200A ベクトル信号発生器を使って作成します。異なる要件をサポートする、2つのソフトウェアオプションが用意されています。R&S®SMW-K355オプション (OneWeb基準信号) は、事前に計算され、すぐに使用できる、RFコンポーネントの物理層テスト用の波形を提供します。R&S®SMW-K130オプション (OneWebユーザー定義信号発生) は、フォワードリンクとリバースリンクのあらゆる関連パラメータ (サブフレーム数、リソースブロック構成、セルID、変調方式など) へのアクセスを提供します。信号発生器の設定に対する変更はすべて、RF出力に直ちに適用されます。

OneWeb信号の解析は、R&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザによって処理されます。フォワードリンクとリバースリンクのどちらをテストするかによって、使用するソフトウェアオプションが異なります。リバースリンク信号は、独自のOneWeb SC-FDMA規格に基づいています。R&S®FSW-K201オプションは、これらの信号を復調し、関連するすべての物理層パラメータを解析することができます。両方の経路のフォワードリンクのテストには、R&S®FSW-K70 ベクトル信号解析オプションを使用できます。他の測定向けにその他のオプションも用意されています。例えば、増幅器、周波数コンバーター、衛星ペイロードの特性評価にはR&S®FSW-K18、群遅延測定にはR&S®FSW-K17を使用できます。

OneWebコンソーシアムのパートナーは、両方の測定器をOneWebオプションと組み合わせて使用しており、RF測定にはこの組み合わせを推奨しています。

Volker Bach

OneWebシステムの構造



OneWebの衛星を使用し、どんな遠隔地にもインターネットアクセスを提供することを目標としています。



R&S®SMW200A ベクトル信号発生器によるPDWストリームの処理

パルス記述子ワード (PDW) は、レーダーパルスのパラメータを記述します。これらのPDWはレーダーシミュレータから信号発生器に高速でストリーミングされ、信号発生器が、PDWを解釈してレーダー受信機のテスト用の信号に変換します。新しいオプションを搭載すれば、R&S®SMW200Aにこの機能を追加することができます。

レーダー電子支援対策 (RESM) に使用されるレシーバー (レーダー警戒受信機、瞬間周波数測定 (IFM) 用レシーバーなど) は、開発ラボで、最大パルスレートをを使って性能限界までテストされています。その際、レーダー開発エンジニアは複雑で非常に長いパルスシーケンスを使用しますが、そうしたシーケンスを信号発生器で簡単に作成することはできません。そのため、パルスを一連のパルス記述子ワード (PDW) によって定義します。各PDWは、コード化された形式のパルスパラメータのセット (パルス幅、パルス繰り返し間隔、到達時間 [ToA、ボックスを参照]、信号レベルなど) からなります。PDWリストには、レーダー

シナリオがすべて、しかもデータ記録の観点から非常にコンパクトな形で記述されています。通常、リストには、何百万ものPDWが含まれます。

新しいR&S®SMW-K503 インタフェースオプションを搭載すると、R&S®SMW200A ベクトル信号発生器で、PDWストリームの解釈と、PDWストリームのレーダー信号への変換が行えるようになります。PDWストリームは、顧客提供のレーダーシミュレータが、計算して、または記録されたライブシナリオから取得して供給します。図1のセットアップでは、非常に長いテスト期間、レーダー受信機とその処理アルゴリズムをテストすることができます。

非常に高いパルスレートの必要性

実際のシナリオには、通常、複数の空間的に分散配置されたレーダー (エミッター) が含まれており、レーダー信号の受信、分離、評価を同時に実行する必要があります。アンテナが回転することと、指向性パターンを持つことにより、これらの信号は、広いダイナミックレンジを備えています。レーダーによって作成される信号は、それぞれ周波数と変調が異なり、パルスレートの範囲は数千ヘルツから100 kHzに及びます。シナリオ内のレーダー数が増えるほど、レシーバーには、より高いパルスレートに対応する能力が求められます。したがって、多数のパルスが存在して

PDWからレーダーテスト信号まで



図1：単一チャネルレーダー受信機のテストの代表的なセットアップ。

も個別エミッターを認識可能な最大パルスレートは、レーダー受信機にとって重要な性能ファクタです。R&S®SMW200AにR&S®SMW-K503 ソフトウェアオプションをインストールすると、1秒間に100万パルス (1 Mpps) を発生させることができます。これは、LAN経由でのPDWストリーミングでは、市場最高の速度です。さらに厳しいレシーバーテストが必要な場合、R&S®SMW-K504 ソフトウェアオプションが、最大2 Mppsのパルスレートをサポートします。2つのRF経路 (1経路当たり20 GHzまで可能) を持つようにR&S®SMW200Aを構成する際には、両方のソフトウェアオプションを2回インストー

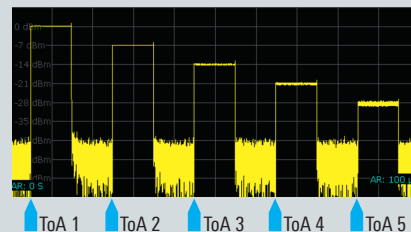
ルすれば、2つの独立したPDWストリームの処理が可能です。これらをRFコンバイナーによってマージすると、パルスレートはさらに2倍になります。

任意のパルス形状

Barker符号化パルス、非変調パルスなどの従来のレーダーパルスの使用に加えて、多くのお客様は、非線形チャープなどの複雑なパルス形状でのテストを希望しています。これを実現するには、まず目的のパルス形状を持つ任意の波形セグメントをR&S®SMW200にストアします。PDWがこのセグメントをアドレス指定し、発生

到着時間 (ToA)

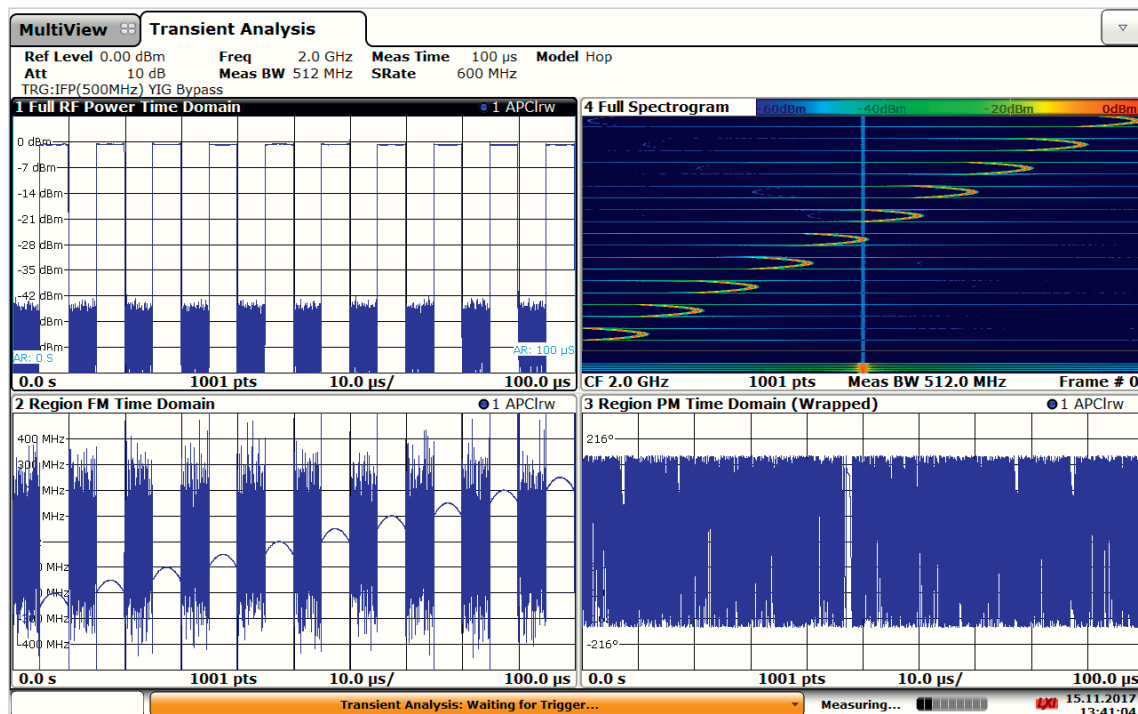
パルスドレーダー信号を受信し、分類して、保存するとき、レーダー警戒受信機が、各パルスのPDWを生成します。各パルスに到着時間 (ToA) のタイムスタンプを割り当て、これをPDWに記録します。テスト目的でパルスをシミュレートする必要がある場合、ToAは、信号発生器のスタート時間として利用されます。



器がPDWで指定された時間にパルスを生成します (図2)。R&S®Pulse Sequencer PCソフトウェアとR&S SMW-K300 発生器オプションを組み合わせると、任意の波形を作成できます。

Robert Vielhuber

図2：PDWストリーミングと任意の波形セグメントを使って生成された信号のプロット。それぞれ独自の周波数オフセットを持つ、非線形周波数変調の10個のパルス。



周波数アジャイル・レーダー・システムと超短パルスの解析

高度なレーダーシステムでは、パルスごとに信号周波数と変調を変更することができます。こうした周波数アジャイルシステムのテストには、解析帯域幅の広いテスト測定器が必要です。

周波数アジャイルレーダーとシステムのジャミング

高速周波数ホッピングは、大気外乱、標的攻撃（ジャミング）、不要信号（干渉）に対するレーダーシステムの耐性を高めます。これらのシステムでは、分解能を高めるため、さらにターゲットに応じて変調、パルス幅、パルスシーケンスを変更しています。ナノ秒レンジのパルスも珍しくなくなりました。そうしたシステムの解析には、通常、周波数ホッピングまたはパルス圧縮の変調品質の測定が含まれます。測定には、放射された信号を収集するための広い帯域幅が必要です。

ジャミングシステムは、的を絞った干渉信号を使用して、敵レーダーの感度を低下させたり、一切検知できないようにしようと試みます。この目的には、ノイズに似た広帯域信号または周波数アジャイル信号が使用されます。これらのシステムでは、周波数の頻繁な変更、受信したレーダー信号の単なる返送、周波数レンジの急速な掃引を行う場合があります。この方法により、周波数アジャイルなレーダーシステムでも混乱を引き起こすことができます。レーダーシステムまたは高度なジャミングシステムの開発および検証中、広帯域信号を収集すると、周波数ホッピングやさまざまなアルゴリズムの有効性の詳細な解析が可能になります。

大きな内部解析帯域幅

R&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザにR&S®FSW-B2001オプションを搭載すると、2 GHzの内部解析帯域幅が得られます。これにより、測定器のナノ秒レンジでの立ち上がり時間分解能を実現できます。A/Dコンバーターはアナライザに内蔵されているため、データ収集用の広帯域オシロスコープは不要です。R&S®FSW-B2001オプションを使用すると、入力信号の歪みが小さくなり、ダイナミックレンジが広がります。また、60 dBcという、優れたスプリアスフリー・ダイナミック・レンジ(SFDR)を示します。これらの特性は、信号変調品質を正確に決定するためだけでなく、内部で生成されたスプリアス信号が真の反射として解釈されないようにする（「ファントムターゲット」）ためにも重要です。

さらに、R&S®FSW シグナル・スペクトラム・アナライザには、周波数ホッピングの自動解析を可能にするR&S®FSW-K60/K60Hオプションを装備することができます。このオプションは、ホッピングの初期周波数とターゲット周波数を検出し、オフセットを決定し、1つの周波数が占有される時間またはシステムが次の周波数に

移行するまでの時間を測定します。アナライザにより、すべての周波数ホッピングおよび時間パラメータを一覧表示したテーブルが作成されます（図1）。ユーザーは、事前定義したリストを基準に偏差を表示したり、周波数ホッピング検出の許容範囲を指定することができます。

超短パルスの解析

測定帯域幅が広いと、周波数アジャイルシステムの特性評価を広い周波数レンジにわたって実行する際に便利だけではありません。超短パルスの測定やパルスの広帯域変調にも有利です。

R&S®FSW-K6オプションは、そうした測定をサポートします。特にレーダーアプリケーションの場合、詳細なパルス解析を実行します。このオプションは、パルスの振幅、周波数、位相を測定し、それらを時間に対して表示します。パルスの立ち上がり時間と立ち下がり時間、パルス繰り返しレートに加えて、その他多くのパラメータが自動的に検出され、テーブルに一覧表示されます（図2）。このオプションでは、パルス繰り返しレートなどのパラメータの傾向を長期間にわたって表示できます。これは、敵レーダーを欺くことを目的としたシナリオなどに非常に便利です。この場合、標的とされた航空機は、航空機が実際よりもレーダーアンテナに近いという印象を与えるため、同様の信号を変更した形で送信します。それにより、敵レーダーは、感度が低下し、標的を見失います。レンジゲート・プルオフ（RGPO）と呼ばれるこのタイプのシナリオをテストするには、いくつかのパラメータの傾向解析を長期間にわたって行う必要があります。これには、パルスのみを収集し、タイムスタンプを付ける、セグメント捕捉が有効です。パルス間のインターバルが無視されるため、解析のために取得して使用できるパルスの数が大幅に増加します。

R&S®FSW-K70 ベクトル信号解析オプションは、バイナリー位相シフトキーイング（BPSK）などの複雑な変調を持つパルスを対象としています。2 GHzの解析帯域幅でも使用できます。詳細なパルス解析の機能はありませんが、さまざまなデジタル変調信号の変調品質の解析が行えます。

ウルトラワイドバンド（UWB）レーダー

UWBレーダーシステムは、従来のシステムよりもはるかに広いスペクトラムを使用します。わずか数ナノ秒のパルス幅の、低パワー

のパルス进行处理します。スペクトラムは非常に広く、白色雑音に似ています。このため、他のアプリケーションとの干渉がほとんど起こりません。UWBレーダーのスペクトラム幅は、送信周波数の25 %以上です。送信周波数が8 GHzの場合、2 GHzになります。

したがって、最大10.6 GHzのUWBバンドでこれらのシステムを解析するには、2 GHz以上の解析帯域幅が必要です。キーと車両間の距離を決定するため、自動車業界のキーレス・エントリー・システムには、現在、同様のテクノロジーが用いられています。

Dr. Wolfgang Wendler

図1：左上のウィンドウに周波数アジャイル信号の2 GHzスペクトログラムを表示。その右にタイムドメインでの周波数ホッピングのプロット、下にすべての重要なパラメータのリストが表示されます。

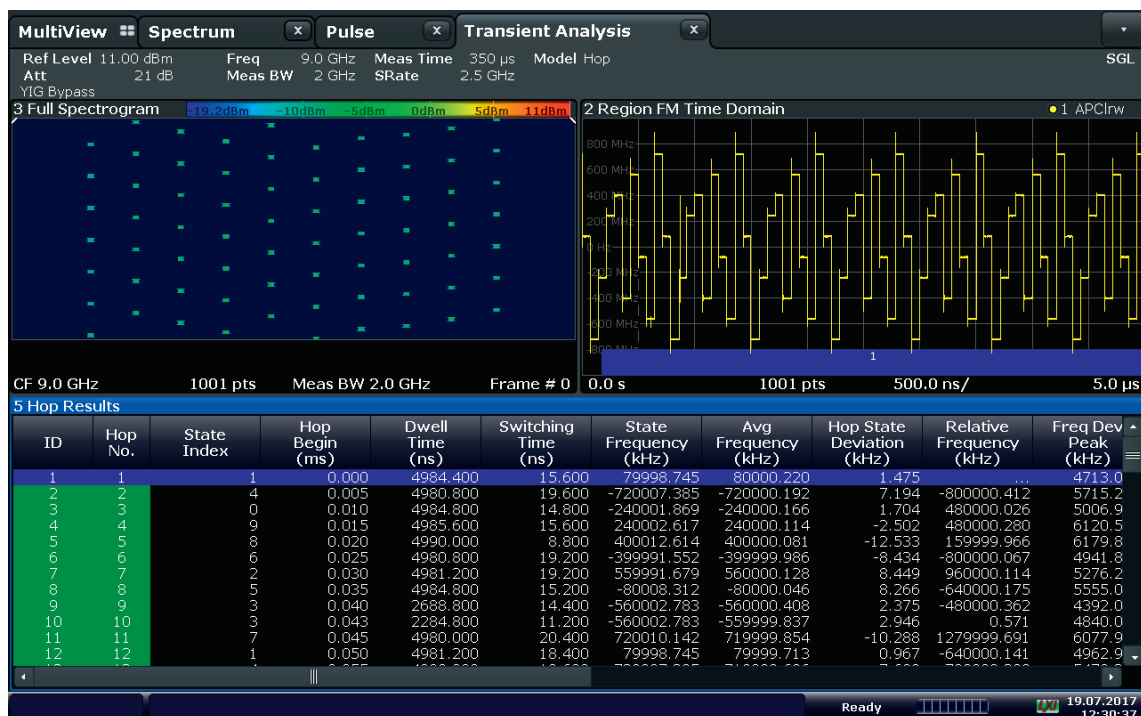
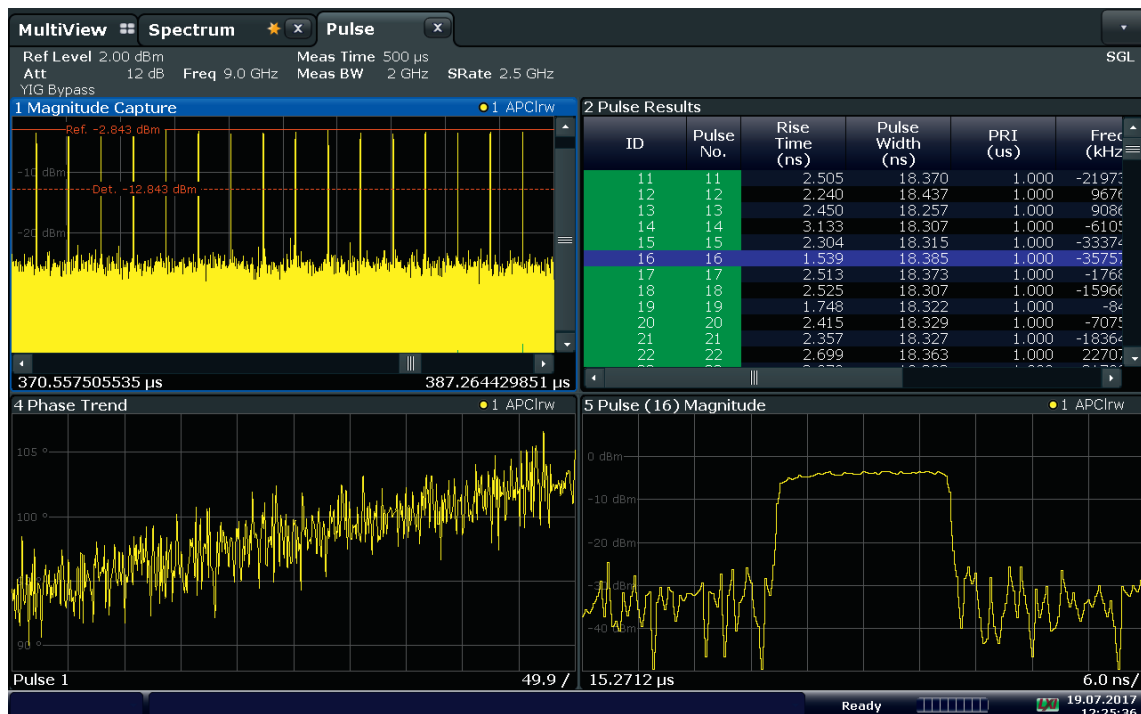


図2：超短パルス (< 20 ns) のタイムドメイン解析。取得された信号全体の拡大部分が左上に表示され、右側に主要なパラメータのリスト（立ち上がり時間、パルス幅など）が表示されます。選択したパルスの振幅が右下に表示され、位相の傾向が左に表示されます。





自律運転の実現

自律運転車は、センサを通じて世界を認識します。このコンセプト自体が、センサの信頼性を前提としているのです。ただし、レーダーセンサが必要な性能を発揮できるかどうかは、設置状況に大きく依存します。新しいテスターを使用することで、必要な理解が得られます。

運転者を支援して交通安全に寄与する先進運転支援システムは、エントリーレベルの自動車にまで普及しており、自動車業界で一般的な技術になっています。完全自律運転車（試験車両を含む）もしばしば話題になりますが、その多くは事故を起こしたというニュースです。自律運転車は複雑なシステムであり、量産までにはまだ時間がかかるでしょうが、近い将来に実用化されることは間違いありません。

自律運転には信頼できるセンサが不可欠

自律運転車の鍵となるコンポーネントは、近くの物体を検知するセンサです。カメラやライダーもセンサとして用いられますが、最も重要なのはレーダーセンサです。車載用レーダーの年間生産量は、数百万台に及びます。ハイエンドの自動車では、標準装備となっています。今日の車載用レーダーセンサは、主に運転を快適にし、事故を防ぐために用いられています。アダプティブ・クルーズ・コントロール用のレーダーセンサのほとんどは、76 GHz ~ 77 GHz の周波数レンジ（1 GHz帯域幅）で動作し、前方遠くにある他の車

両や物体を検知します。車線変更支援やブラインドスポット検出など、近くの物体の検知を必要とする高度な機能を実現するには、必要な高いレンジの分解能を達成するために、もっと大きい帯域幅が必要です。これは、77 GHz ~ 81 GHz の周波数レンジを使用することで可能になります。さらに、車載用レーダーの周波数バンドを81 GHzまで拡張すれば、無線干渉の軽減に役立ちます。

機能というよりは外観上の理由で、車載用レーダーは、RF信号を透過する材料で作られたレーダードーム（レドーム）で覆われています。そのためには、フロントグリルのエンブレムが多く用いられますが、プラスチック製バンパーもレーダーの隠し場所として適しています。従来のエンブレムは主にブランドを表すだけのもので、他に重要な役割はありませんでした。現在では、このようにレドームとして用いられるため、RFコンポーネントとしての性質を持つようになっています。デザインにあたってこのことを考慮しないと、エンブレムの背後にあるレーダーの検出性能と精度に重大な悪影響が及ぶ可能性があります。

特に、ブランドのエンブレムの3次元形状は、場所によって材料の厚さが異なるため、ミリ波バンドでの動作ではRF性能の問題につながることがあります。バンパーは通常メタリック塗装が施されており、これが高周波を減衰させます。このように、レーダーの信頼性を確保するには、レドームの材料属性を確認し、レーダー信号に対する影響を調査することが不可欠です。自律運転を実現するには、車載用センサの不確かさとリスクは許容できません。センサで発生したエラーは、ポストプロセッシングによっては十分に補正できないからです。このため、自動車メーカーとそのサプライヤーは、レドームのレーダー適合性を評価するための新しい測定機能を必要としています。

レドームがレーダー性能に与える重大な影響

車載用レーダーセンサでは、主に周波数変調CW (FMCW) 信号が用いられます。伝搬遅延とドップラー周波数シフトにより、センサは複数のターゲットの距離と動径速度を測定して分解することができます。アンテナレイの特性によっては、方位角と仰角も測定して分解できる場合があります。検出とトラッキングの後、センサエレクトロニクスは信号を処理してターゲットリストを作成します。これには、物体の測定された位置および速度と、種類に関する情報（歩行者、自動車など）が記録されています。このリストは、自動車の電子制御ユニットに送られて、自動車の操縦に関するリアルタイムの決定を行うために用いられます。このデータの精度と信頼性は、自動車や搭乗者の安全にとってきわめて重要です。

レーダーの精度は、ハードウェアコンポーネント、ソフトウェア処理、レーダーエコー自体など、さまざまな要因に依存します。信号エコーのS/N比が低い場合、S/N比が高い場合に比べて測定の精度は低下します。さらに、マルチパス伝搬やレドームによる歪みといった現象も、測定精度に大きく影響します。方位角測定に誤差が生じると、ターゲットの位置が実際の位置からずれて判定されます。これを図1に示します。レーダーセンサでの角度測定誤差がわずか 1° でも、100 m離れたターゲットの位置は水平方向に1.75 mずれて測定されます。このずれにより、ターゲットが別の車線にあると判断される可能性があります。信頼できる動作を実現するには、この距離での角度測定誤差が 1° よりも大幅に小さいことが必要です。

標準車載用レーダーの問題

図2に示すのは、実際の車載用コンポーネントでの測定に基づく方位角誤差の影響です。市販の車載用レーダーを使用して、距離12.4 m、角度 11.5° に存在する静止ターゲットを測定しました。このチャートは、異なる種類のレドームによって、レーダー断面積と入射角がどのように影響されるかを示しています。

青で示した値（レドームなし）は、比較のために表示しています。これでわかるように、適切なレドーム（赤）を使用した場合、推定入射角への影響はありません。ただし、レーダー断面積は双方向の減衰（この例では約2 dB）のために減少します。不適切なレドーム（オレンジ）を使用した場合、平均レーダー断面積は比較測定に比べて約4 dB減少するため、反射が弱いターゲットは検出できない可能性があります。不適切なレドームは、入射角の検出にも影響することがわかります。角度は 11.5° で一定ではなく、 11.5° と 11.7° の間で変動しています。このため、信号処理エレクトロニクスは、あいまいさのない値を得ることができません。このレドーム

方位角測定誤差のために間違っ検出された位置

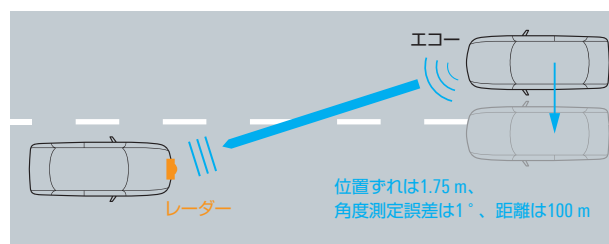


図1：方位角測定の誤差のために、ターゲットの位置が間違っ検出されます。これにより、自律運転車のコントローラーが致命的な操縦ミスを犯す可能性があります。

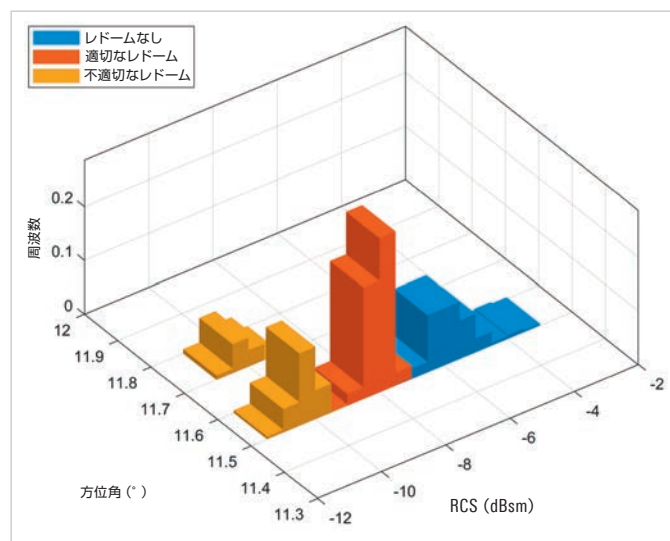


図2：レーダー断面積 (RCS) と入射角に対するさまざまなレドームの影響。不適切なレドームを使用すると、角度誤差が生じます。

ムを使用した場合、車載用レーダーは目標の精度である 0.1° を実現できません。

レーダー校正だけでは不十分

レシーバーフロントエンドにアンテナアレイを装備した最新のレーダーセンサは、フェーズド・アレイ・アンテナによるビームフォーミングから得られた位相および振幅比を測定することで、方位角（および場合によっては仰角）を判定します。最高のアジマス精度を得るには、各レーダーセンサが個別に校正されている必要があります。レーダー校正の一般的な手順を次に示します。最初に、電波暗室内のターンテーブルにセンサを取り付けます。基準ターゲットとしては、既知の距離にある遠方界のコーナーリフレクターが多く用いられます。レーダーパターンを測定し、センサのメモリに記録します。この情報は、後で検出アルゴリズムによって使用されます。補正は信号処理中に計算され、動作中に実行されます。

自動車メーカーは、校正済みのレーダーセンサを、自動車のエンブレムやバンパーの後ろなどに取り付けます。レドーム材料のRF伝送損失は、信号を2回減衰させます。信号は、ターゲットに向かうときと戻るときに2回材料を通過するからです。これにより、レーダーの検出距離は以下の分析のように減少します。

信号伝搬の法則によれば、伝送信号のパワーは距離 r の2乗に比例します。このため、減衰率は往復で $1/r^4$ となります。77 GHzのレーダーで、出力パワーが3 W、アンテナ利得が25 dBi、ターゲットのレーダー断面積が 10 m^2 で、信号検出しきい値が -90 dBm の場合、この構成での最大距離はこの式より109.4 mとなります。レドームの双方向減衰が3 dBの場合、同じレーダーの最大距離は16 %減少して92.1 mになります。

ただし、レーダーの性能に影響する要因は、材料による減衰だけではなく、レドーム材料の反射率と一様性も重要です。塗料内の金属粒子などによる反射や、ベース材料のRF不整合により、レドーム内、すなわちセンサのすぐ近くで干渉信号が発生します。このような干渉信号はレシーバーチェーンで受信されてダウンコンバートされ、レーダーの検出感度が下がる原因となります。多くの自動車メーカーでは、この影響を軽減するために、レドームを傾けて、レーダー信号の反射がレシーバーフロントエンドに直接戻るのではなく、別の方向に向かうようにしています。この解決法は、その性質上デザインによる制約を受けるとともに、RFエネルギーの損失につながる寄生反射をなくすことはできません。

もう1つの問題として、含有物や密度の変動による材料の不均一性により、出て行く波と入ってくる波の波面が乱れます。波面が歪むと、角度測定の精度が低下します。レーダーセンサの校正では、この

従来の測定方法

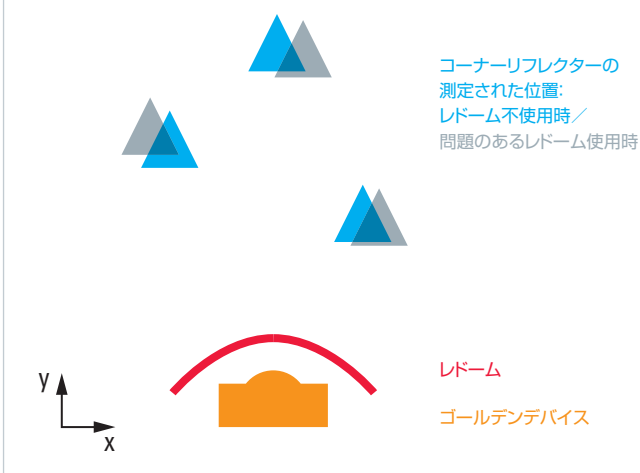


図3: ゴールデンデバイスを使用した代表的なテストセットアップ。

影響を補正できません。校正済みのレーダーは、さまざまなメーカーのレドームの背後に取り付けられる可能性があるからです。

従来のレドームテスト

レドームのメーカーは、一般的に基準レーダー（ゴールデンデバイス）を使用して製品をテストしています。このテストでは、レーダーの前方の決められた距離と方位角に、コーナーリフレクターを取り付けます（図3）。レドームがある状態とない状態での差測定を実行して、結果を比較します。レーダーによって判定された距離および方位角とエコー信号レベルが仕様限界内にあれば、レドームはテストに合格します。ただし、この方法では特定の方位角しかテストされないため、レドームの問題がある部分が見逃される可能性があります。

もう1つの測定方法は、似た方法で行われますが、必要なのはリフレクター1つだけです。この方法では、レーダーセンサとレドームをターンテーブルに取り付け、さまざまな角度で測定を繰り返します。ターンテーブルから読み取れる実際の角度（グラウンドトゥールズ）と、レーダーで測定された角度が比較されます。この方法の精度は、ターンテーブルの位置決め精度によって決まります。ただし、このテストには非常に時間がかかるため、製造ラインのテストとしては現実的ではありません。

R&S®QAR レドームテスターによるボタン1つでの決定的テスト

R&S®QAR 高品質車載用レドームテスター (図4) は、従来の方法の制限を解消しています。小型のアンテナアレイを搭載したゴールデンデバイスと異なり、このテスターには数百個の送受信アンテナを備えた大型のパネルが使用されています。これらのアンテナは、75 GHz ~ 82 GHzの広い車載レーダー周波数レンジで動作します。テスターが測定する信号は、車載用レーダーに数百個のアンテナが搭載されていた場合に測定されるものと同じです。ただし、開口面が広いため、距離、方位角、仰角の測定分解能ははるかに高くなります (ミリメートル単位)。このような高い分解能に

より、測定結果 (反射率) をX線画像として可視化できるので、テストや測定の経験が少ないオペレーターでも、品質保証の作業をすぐに実行できます。実際のレーダーによる測定と異なり、レドームの特性を求めるのに時間のかかる測定シーケンスは不要です。R&S®QARを使えば、カメラで写真を撮るように1回の操作で結果を入手できます。

被試験レドームは、パネル前方の指定した領域内に配置されます。実行できる測定は、DUTの反射率と透過率の2種類です。

最初に、反射率測定が実行され、レドーム材料によって反射されるエネルギーの割合が求められます。これは、レドームを通過しないエネルギーです。これは性能低下の原因となり、すでに述べたように、正しい動作を妨げることもあります。さまざまな理由により、特定の部分の反射率が他の部分より高くなることがあります。例えば、材料の欠陥、気泡、異なる材料層の間の望ましくない相互作用、材料の特定の成分が多すぎるなどです。この測定方法では、すべての反射信号を振幅と位相に基づいてコヒーレントに結び付けることで、空間分解された測定結果が得られます。結果を可視化することで、DUTの反射動作をわかりやすく定量的に評価できます。

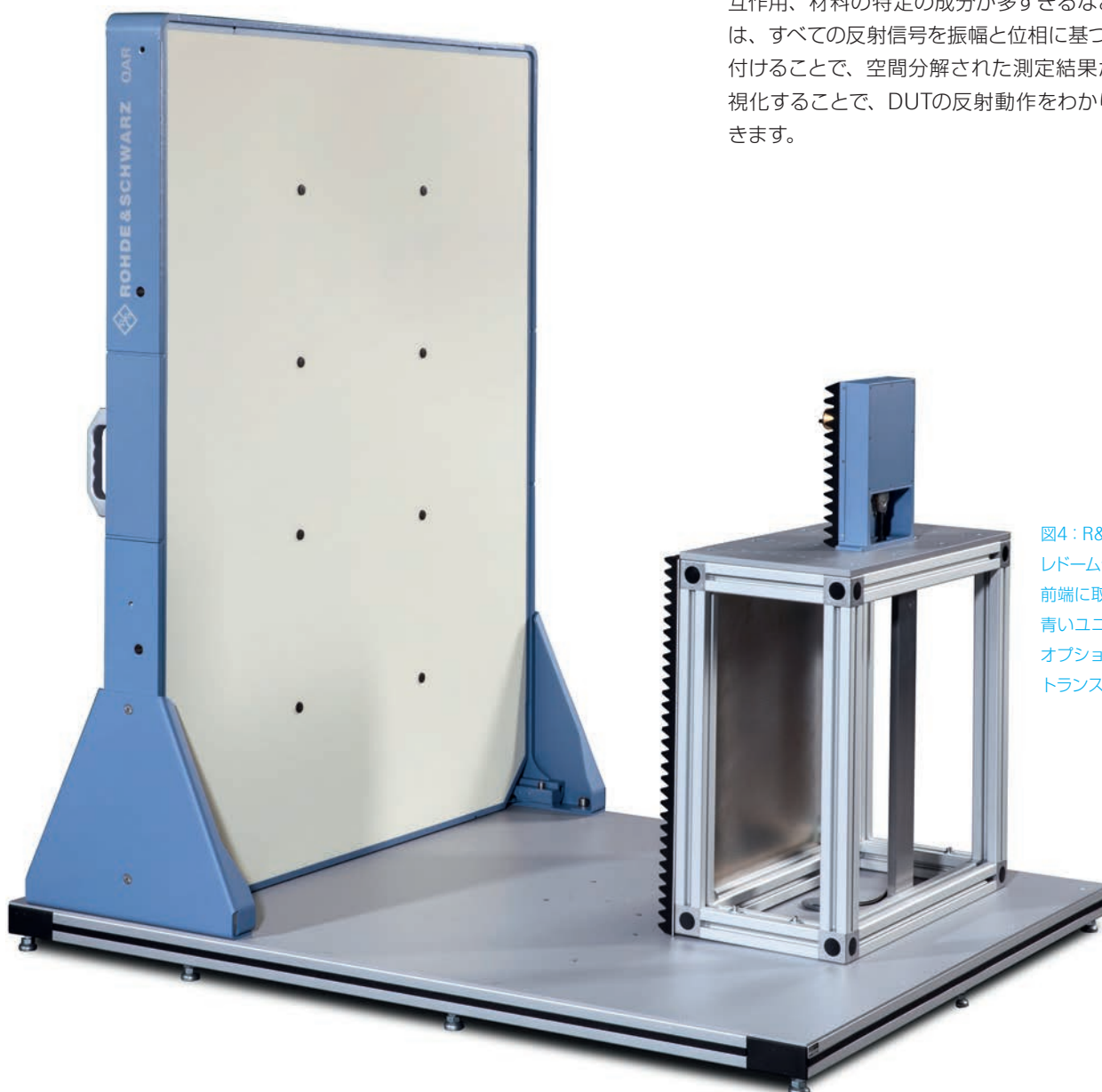


図4：R&S®QAR 高品質車載用レドームテスター。DUTは、テーブルの前端に取り付けられます。テーブル上の青いユニットには、伝送測定用にオプションで利用可能なミリ波トランスミッターが入っています。

デモンストレーション用に、ローデ・シュワルツのロゴを異なる厚さで切削加工したデモ用レドームが作成されました (図5)。

図6に示す高分解能レーダー画像は、このレドームで覆われたレーダーセンサから見える画像です。輝度レベルは、反射率を表します。明るい部分ほど、レーダー信号の反射が大きくなっています。金属物体は、白く見えます (四隅のネジ)。はっきり視認できるロゴの輪郭は、局所的に反射率の高い部分を表し、画像全体がきわめて不均一であることがわかります。このように、ロゴ部分の厚さが0.5 mm大きいだけで、路上でのレーダーの性能は大幅に低下します。

この例では、センサが通常取り付けられるレドームの中央部分の平均反射率は-11.0 dBで、標準偏差は-18.2 dBです。多くの使用条件では、この値は信頼できるレーダー動作のためには大きすぎます。実際には、予想される反射率は、レーダーユニットの感度と、カバーする最大検出距離によって異なります。

次に、レドーム材料の周波数整合と減衰を測定します。DUTの背後に位置するトランスミッターユニット (図4) が、選択した周波数スパン内を掃引します。これにより、レドームの伝送周波数応答

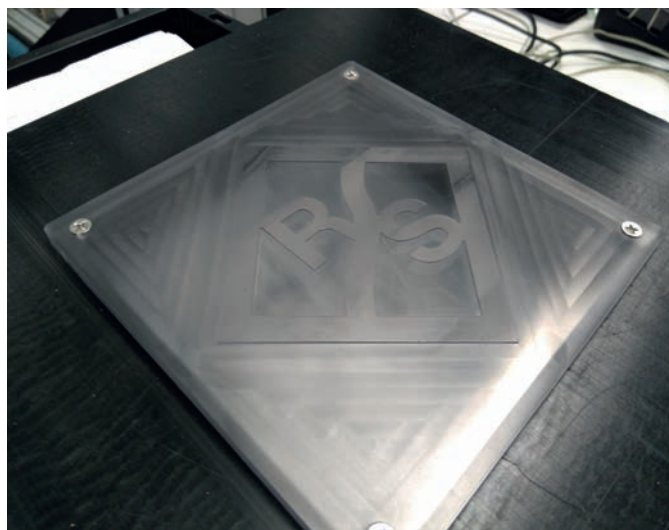


図5：デモ用レドーム。ローデ・シュワルツのロゴがレドーム本体の表面から0.5 mmだけ浮き出しています。このようなわずかな厚さの増加でも、77 GHzでの不整合を引き起こします (図6)。

を精密に評価できます。周波数応答からは、レーダーが動作する周波数でのDUTのRF整合に関する詳細な情報が得られます。こ

図6：反射率 (左) と単方向減衰 (右) の高分解能ミリ波画像。ロゴの青い輪郭線は、テストトランスミッターまたはレーダーの放射断面積を示します。この部分が評価に使用されます。

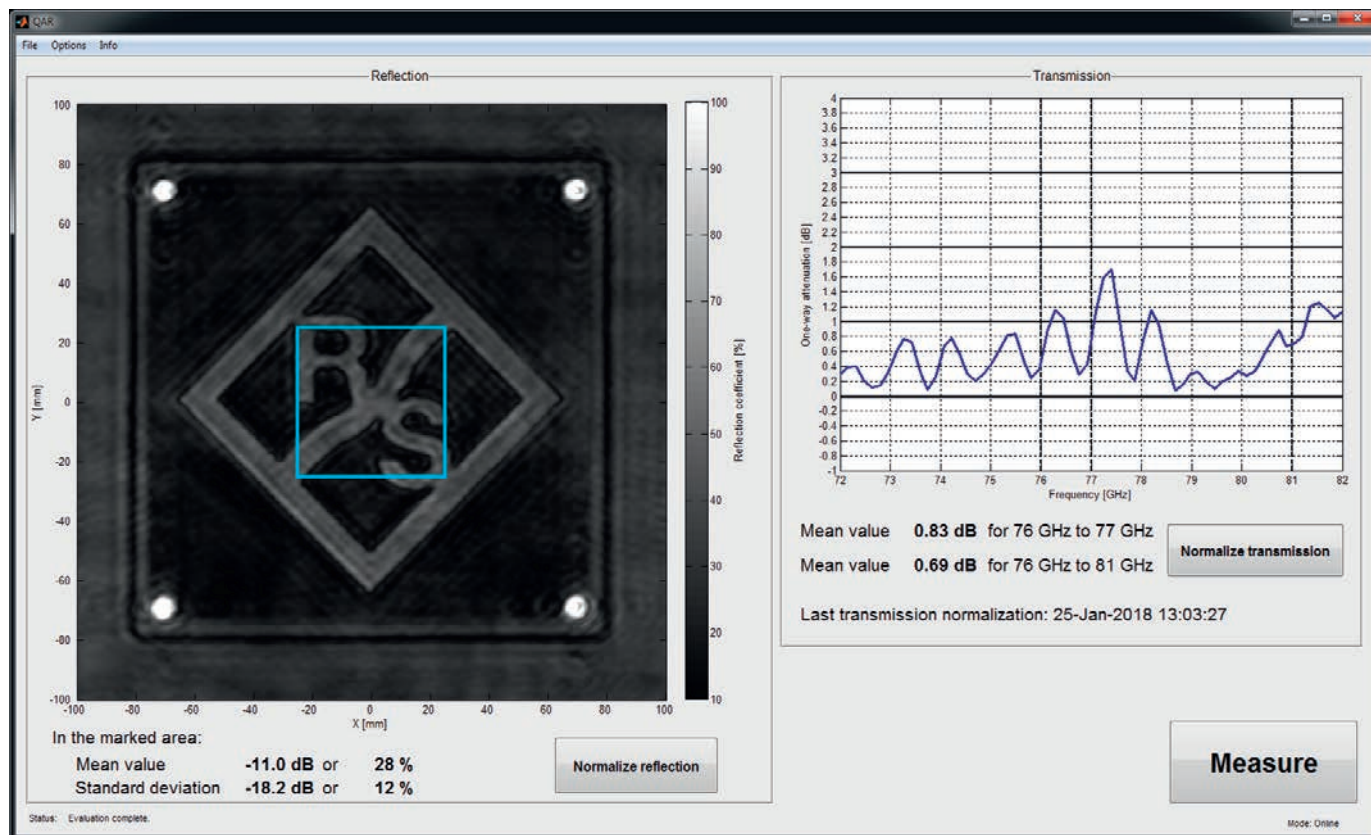
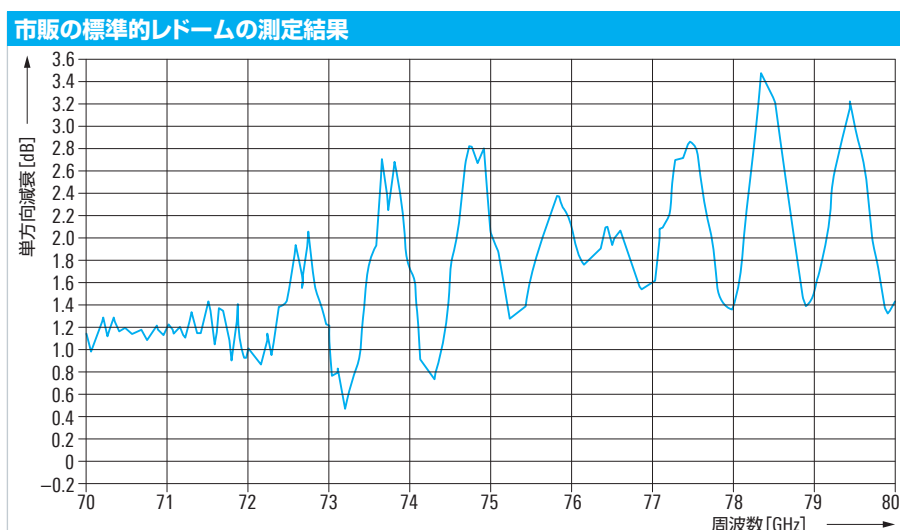


図7：複雑な3Dデザインの市販の多層レドームに対する伝送測定。



の情報は、レーダーユニットで実際に用いられる信号波形とは独立であり、レドームの背後に取り付けられるすべての種類のレーダーに対して有効です。

図6の右側のグラフは、デモ用レドームに対するこの測定の結果を示します。このレドームは、76 GHzから79 GHzまでの範囲で変動が大きいため、この周波数バンドのレーダー用には適しません。

自動車業界で実際に使用されている3Dレドームに対する伝送測定でも、図7に示すように、同様なぎざぎざの曲線が見られます。このレドームを使用すると、性能上のさまざまな問題が起きると予想されます。

- 周波数整合が、76 GHzでなく71 GHz付近にあるのは不都合です。これは、どれかのレドーム層の厚さが増えたことによって起きた可能性があります。
- 79 GHzバンドでの減衰の著しい変動は、定在波比が大幅に増加していることを示します。これは、レドーム境界での反射と強い干渉の影響を示します。
- 全体的に単方向の減衰が比較的大きいため、検出距離がかなり減少すると思われます。

まとめ

自律運転には、周囲の物体を高い信頼性で、すなわちエラーなしに検出できるレーダーが必要です。これが可能かどうかは、レーダーの品質だけでなく、その設置状況にも依存します。レーダーは多くの場合に、ブランドのエンブレムやバンパーの背後に設置されます。このような車体部品(レドーム)による信号劣化のために、物体が検出されなかったり、間違った場所に検出されたりする可能性があります。今日では、このような部品は単に従来からの目的を果たすだけでなく、指定されたRF特性を持つことが要求されます。このような特性を検証するには、正確で実用的な測定方法が必要です。R&S®QAR テスターを使用すれば、ゴールドenデバイスを使用するよりもはるかに高速かつ優れた方法で、車載用レドームの品質を評価することができます。R&S®QARは、DUTのRF透過率を測定することで、レドームデザインの基本的な適合性を明らかにします。さらに、反射率を測定して一種のX線画像で可視化できるので、専門家でも信頼性の高い合否判定を実行でき、製造ラインの最終テストに特に有効です。

Dr. Steffen Heuel, Tobias Köppel, Andreas Reil, Dr. Sherif Ahmed

5 GHzの解析帯域幅による Eバンド車載用レーダーのテスト

R&S®FSW85 シグナル・スペクトラム・アナライザは、R&S®RTO2064 オシロスコープを外部A/Dコンバーターとして使用することで、最大5 GHzの解析帯域幅をサポートするようになりました。アナライザはオシロスコープを制御して、データの転送、処理、イコライズ、解析に必要なすべての手順を処理します。

車載用FMCWレーダーは、一般的に76 GHz～77 GHzの周波数レンジで動作しますが、一部の国では77 GHz～81 GHzでの動作も承認されています。距離分解能は信号帯域幅に比例するため、コンポーネントのメーカーは、開発プロセスで最大の距離分解能を達成するために広い帯域幅を必要とします。

R&S®FSW85によるEバンドでの スペクトラム測定

R&S®FSW85 シグナル・スペクトラム・アナライザは、レーダーセンサの開発、製

造、検証中に、周波数、実効等方放射電力 (EIRP)、占有帯域幅およびスプリアスエミッションといったRFパラメータを測定するために最適です。このアナライザは、2 Hz～85 GHz (R&S®FSW-B90G オプション搭載時は90 GHzまで) の周波数レンジをスキャンして、Eバンドのレーダーセンサが発生したRF信号を解析します。外部高調波ミキサーは不要です。

8 GHz～85 GHzの周波数に関しては、アナライザにはハードウェアプリセレクション用の狭帯域YIGフィルターが装備されており、不要な変調成分を抑圧できます。

高調波ミキサーを使用するソリューションに比べて、R&S®FSW85にはいくつかの利点があります。

- 2 Hz～85/90 GHzの連続した周波数レンジ
- 内蔵YIGフィルターによる不要な変調成分の抑圧
- 内蔵RFアッテネータによる容易なレベル設定
- 追加配線のないシンプルなセットアップ
- スペクトラムエミッション測定のための広いダイナミックレンジ

アナライザの優れたS/N比は、オプションのR&S®HA-Z24E プリアンプ (1 GHz～

図1: R&S®FSW85は、R&S®FSW-B5000 ハードウェアオプションおよびR&S®RTO2064 オシロスコープ (外部A/Dコンバーターとして使用) との組み合わせで、5 GHzの解析帯域幅をサポートします。

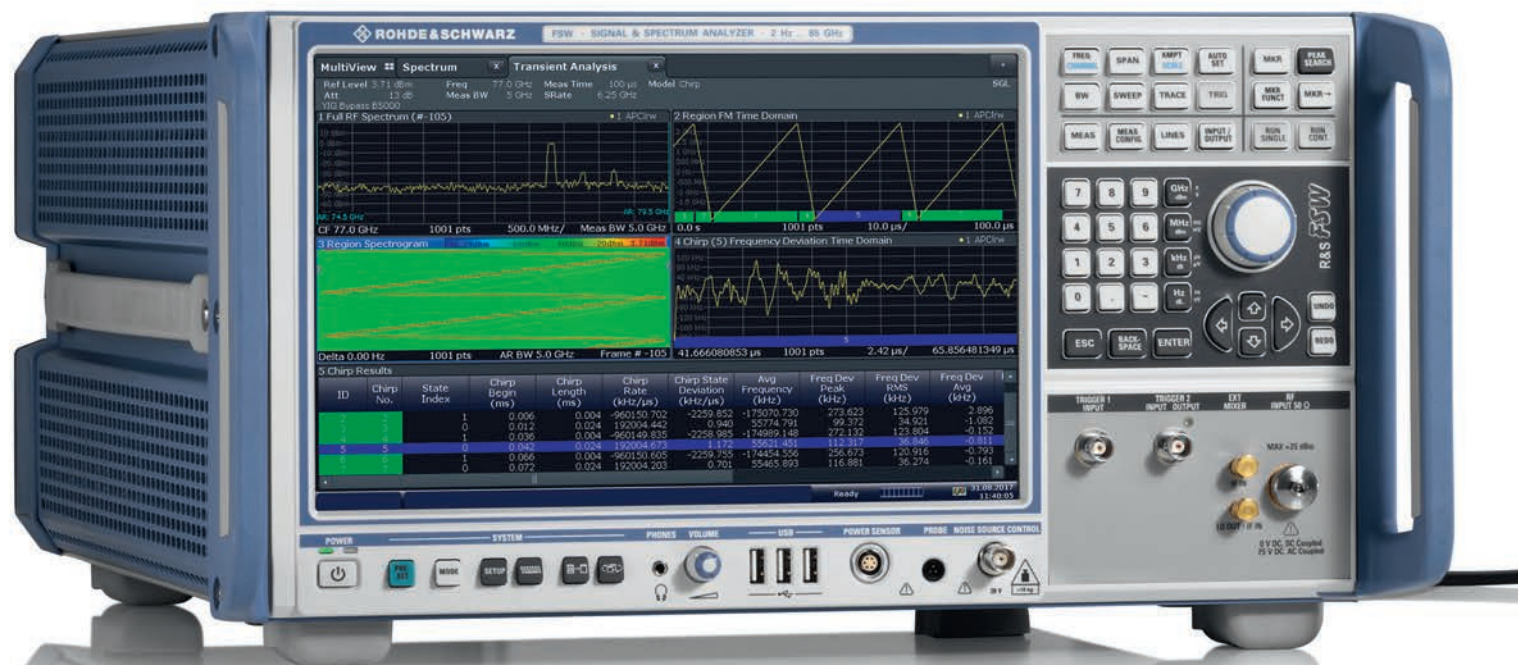




図2: R&S®HA-Z24E 外部プリアンプは、調整可能な脚によって接続に適した高さに設定できます。

85 GHz)を使用することでさらに高めることができます(図2)。これは、レーダー信号の無線測定時に使用できます。

解析帯域幅拡張: 5 GHz

Eバンドの車載用レーダー信号の復調と解析には(特に研究開発用途の場合)、最大5 GHzの解析帯域幅が必須です。

スペクトラム・アナライザとオシロスコープの相互接続

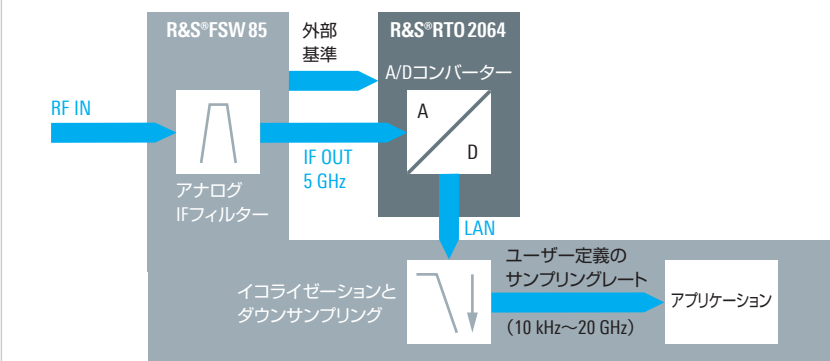


図3: R&S®FSW85 シグナル・スペクトラム・アナライザ (R&S®FSW-B5000 オプション搭載) と R&S®RTO2064 オシロスコープの接続によって5 GHzの解析帯域幅を実現するための信号経路。

R&S®RTO2064 オシロスコープを外部A/Dコンバーターとして使用することで、R&S®FSW85はこの帯域幅に対応できます(図1)。このアプリケーションでは、アナライザにR&S®B5000 ハードウェア帯域幅オプションを搭載する必要があります。R&S®FSW85は、入力信号を3.5 GHzの中間周波数(IF)にミックスダウンします。この信号はR&S®RTOでデジタルイ

され、LANを通じてアナライザに戻されます(図3)。アナライザは信号をイコライズし、デジタルベースバンドにミックスします。イコライズされたI/Qサンプルは、R&S®FSW85上の測定ソフトウェアに入力されます。アナライザ入力からオシロスコープ内のA/Dコンバーターまでの信号経路の振幅および位相応答は、完全に特性評価されています。ユーザーから見ると、これらの測定器の組み合わせは1台の測定器のように動作します。R&S®FSW85はオシロスコープを制御して、データの転送、処理、イコライズ、解析に必要なすべての手順を処理します。

FMCW信号の解析

車載用レーダーの多くは、いくつかのきわめて短いリニア周波数変調連続波(LFMCW)チャープから構成されるチャープシーケンスを使用します。レーダーの距離および速度分解能は、信号帯域幅、チャープ持続時間、チャープレート、信号リニアリティといったいくつかのパラメータに依存します。レーダー信号に不要な効果があると、レーダーシステムの精度と性能に影響します。

CWレーダー信号の解析には、R&S®FSW-K60 トランジェント測定アプリケーションが使用できます。このソフトウェアの拡張は、チャープ信号(R&S®FSW-K60C)および周波数ホッピング信号



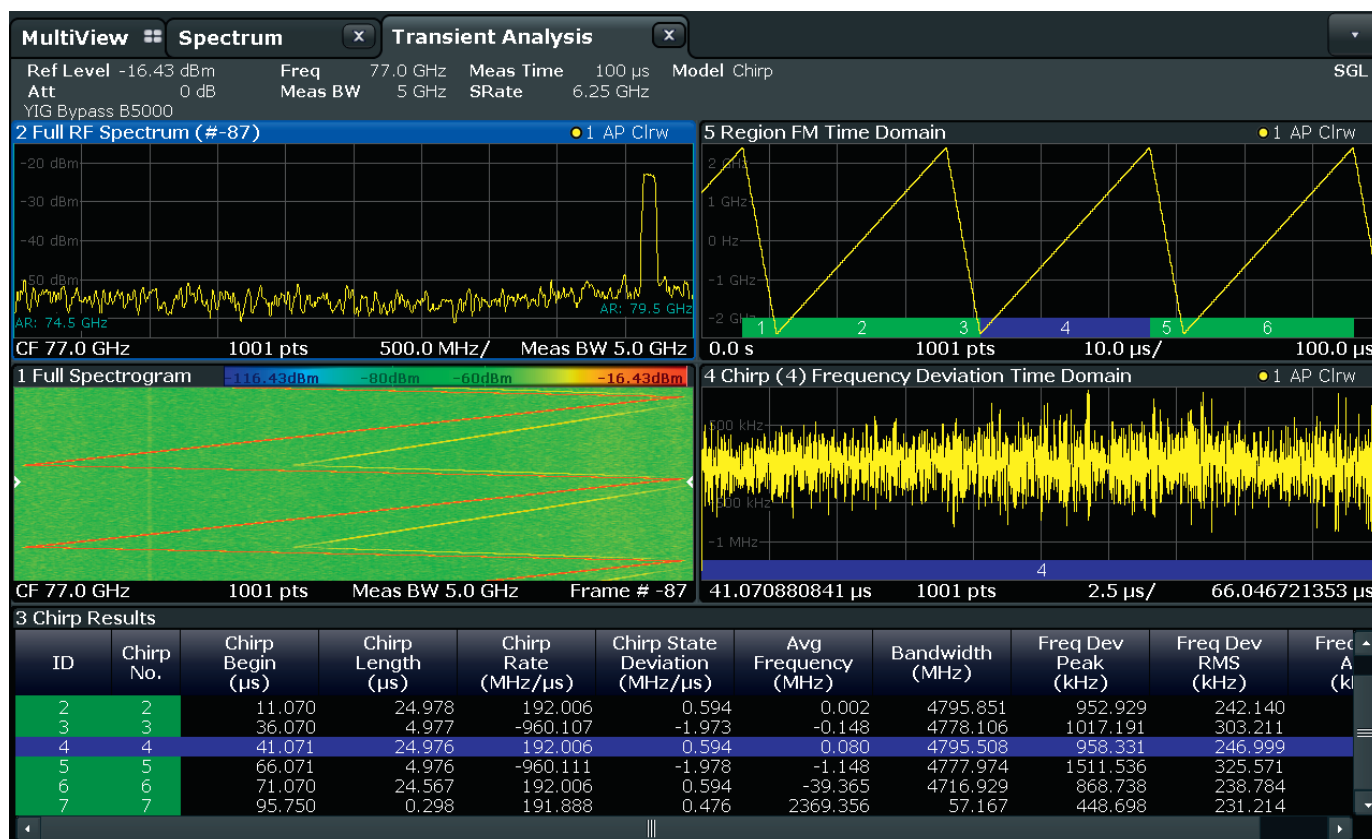


図4：R&S®FSW-K60C トランジェント測定アプリケーション：R&S®FSW-K60C 拡張によるチャープ信号の解析。

(R&S®FSW-K60H)の解析をサポートします。アプリケーションは、R&S®FSWで収集されたI/Qデータ内の個々のチャープまたは周波数ホッピング信号の先頭と末尾を判定します。ソフトウェアは、ユーザー定義の範囲（測定帯域幅および時間など）内で、すべての性能パラメータを計算します。

図4に、R&S®FSW-K60C 測定アプリケーションによるチャープ信号の解析結果を示します。ウィンドウ1（フルスペクトログラム）には、I/Q捕捉メモリの全内容が、タイムドメイン（縦方向に上から下）と周波数ドメイン（横方向）で表示されます。カラーは、パワーレベルを表します。この例では、100 μsの測定インターバルと5 GHzの帯域幅内に、6個のチャープが検出されています。

ウィンドウ2（フルRFスペクトラム）は、スペクトログラムから1本のラインを切り出して表示します。すなわち、2個の白いマーカーで示される中央のラインです。この時点では、チャープはちょうど79.4 GHzの周波数を通しています（ウィンドウの右側）。

ウィンドウ5（リージョンFMタイムドメイン）は、周波数変調（FM）対時間を示します。緑と青のバーは、検出された6個のチャープを示します。復調帯域幅の1 % (50 MHz) のビデオフィルターにより、不要信号とピークディテクターのノイズが抑圧されます。

ウィンドウ4（チャープ (4) 周波数偏移タイムドメイン）は、検出されたチャープの1つ (4)の周波数誤差対時間を示します。チャープ結果テーブルには、測定されたチャープのすべての関連パラメータが表示されます。

まとめ

R&S®FSW85 シグナル・スペクトラム・アナライザは、85/90 GHzまでのEバンドの超広帯域車載用レーダー信号を測定するための使いやすいソリューションです。このアナライザに5 GHz帯域幅オプションを搭載し、R&S®RTO オシロスコープを外部A/Dコンバーターとして使用できます。この組み合わせは、アナライザのユーザーインターフェースから完全に操作できます。

代表的なアプリケーションとしては、車載用FMCWレーダーや、その他の周波数アジャイル超短パルスレーダーの測定が挙げられます。R&S®FSW-K60C トランジェント測定オプションとそのチャープ信号用拡張 (R&S®FSW-K60C) およびR&S®FSW-K60C パルスドレーダー用パルス解析オプションには、上記のアプリケーションのための汎用的な測定機能が用意されています。

Laura Sanchez

優れたGNSSシミュレーション

R&S®SMW200Aに基づくGNSSシミュレータは、ローデ・シュワルツの衛星ナビゲーション・システム・シミュレータのポートフォリオに加わったハイエンドのソリューションです。GNSS信号に加えて、複雑な干渉環境をシミュレートできるという独自の特長を備えています。

高度なGNSSレシーバーは、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDouなどのさまざまなナビゲーションシステムからの信号を、複数の周波数バンドで、場合によっては複数のアンテナで同時に受信できます。複数の周波数バンドの測定結果を使用することで、位置精度を上げることができます。さらに、差分GNSS (DGNSS) 技術を使用することで、さらに精度を改善することもできます。これらの技術は、自律運転車などのアプリケーションに用いられ、着陸進入中の航空機の精密で信頼性の高い位置決めにも不可欠です。

干渉信号の影響下でのファンクションテストや性能試験は、レシーバーテストにおいて重要性を増しています。このようなテストには、LTEなどの通信信号の影響下でのレシーバーの性能を判定する共存テストや、意図的な干渉（ジャミング）あるいは偽の位置／時間情報を使用してレシーバーを騙そうとする試み（スプーフィング）

に対するレシーバーの動作などが含まれます。後者の例では、レシーバーがスプーフィング攻撃を検出して対応できるかどうかをテストします。

ラボテストの困難さ

ライブGNSS信号を使用したテストには、必要なテスト数の多さ、シミュレーション条件の制御の困難さ、再現性の低さといった障害があります。これは、衛星の移動、大気条件、地面による信号反射などの影響により、条件が常に変化するからです。

これに対して、GNSSシミュレータを使用すれば、シミュレーション条件を完全に制御しながら、完全な再現性を持つ包括的なテストを実行できます。また、ラボシミュレーションは大幅な費用の

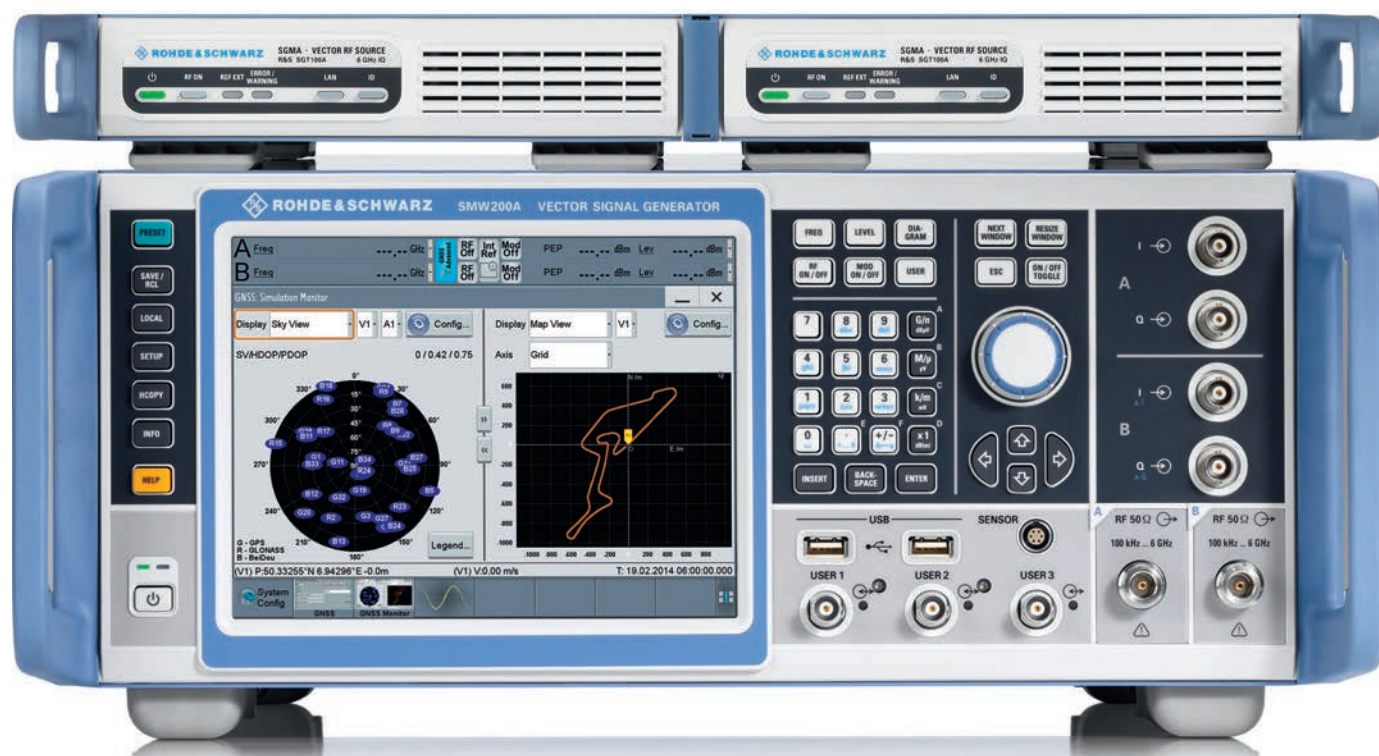


図1：R&S®SMW200A ベクトル信号発生器によるGNSSシミュレーション。マルチアンテナシステムをシミュレートするために、シミュレータに最大4つのRF出力を装備できます。そのうち2つは、R&S®SGT100A 信号発生器から提供されます。画面には、シナリオをシミュレートするさまざまな方法の1つが示されています。ここでは、ニュルブルクリンクのレーストラックの1周分がシミュレートされています。トラックの各セグメントに対して、シミュレータは、車内のGNSSレシーバーが受信するのと同じ、位置と速度に依存する信号を作成します。

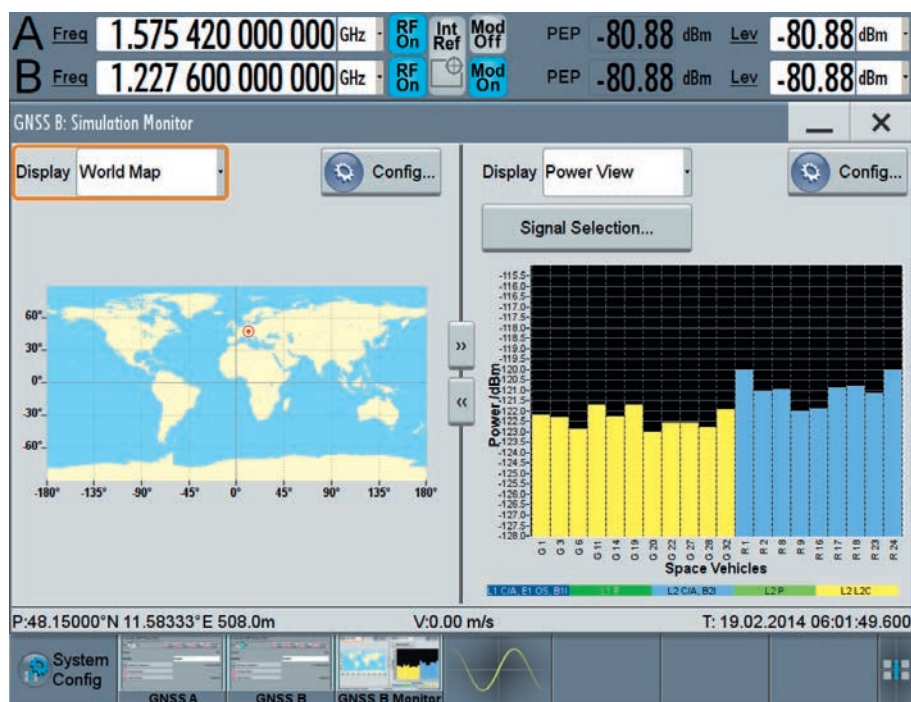


図2：数回タッチするだけで、すべての設定とステータス表示にアクセスできます。スクリーンショットには、地図上のシミュレートされたレシーバー位置と、現在視界に入っているGPS（黄色）およびGLONASS（青）衛星の瞬時信号レベルが表示されています。

節約にもつながります。これは特に、フライトテストや大気圏外など、実現が困難で時間がかかる動作条件でのテストの場合に当てはまります。

このような利点にもかかわらず、ラボテストは簡単ではありません。GNSSシミュレータは、衛星ナビゲーションシステムのすべての側面と特性を反映した複雑なシナリオを実現できる必要があります。具体的には、衛星軌道の正確なシミュレーション、信号伝搬特性の考慮、信号の反射や掩蔽を伴うレシーバー環境の現実的なモデリングなどが必要です。さらに、多くの場合には、レシーバー自体の運動もシミュレートする必要があります。システムは、これらの影響のすべてのパラメータを完全に制御できる必要があります。

GNSS受信に対する干渉信号の影響をテストする必要がある場合には、シミュレーション環境に対してさらにその他の要件が生じます（囲み部分を参照）。例えば、GNSSと干渉信号の相対レベルは、ユーザー設定可能で、シミュレーション中に変更可能であることが必要です。さまざまな干渉源に対するレシーバーの感度を調べるには、多種類の干渉信号をシミュレートする必要があります。理想的には、GNSSシミュレータは追加測定器なしに単体でこれらの信号を発生できることが望ましいと言えます。

すべての要因の完全なシミュレーション

R&S®SMW200A ベクトル信号発生器のGNSSシミュレータは、上記の要件をすべて満たします。軌道誤差、クロック誤差、大気条件、マルチパス伝搬、信号掩蔽などの特性的影響や誤差成分が

考慮されます。受信アンテナの影響がモデリングされ、車両の方向角のシミュレーションを含む車両移動の現実的なモデルが作成されます。

マルチ周波数レシーバーやマルチアンテナシステムのテスト用には、最大144のGNSSチャネルが利用でき、複数のRF出力に分配できます。R&S®SMW200Aには、2つのRF出力を装備できます。4つの出力が必要な場合には、R&S®SGT100A 信号発生器を追加することでいつでもセットアップを拡張できます（図1）。このシステムは、GPS、GLONASS、Galileo、BeiDouのGNSS信号に加えて、日本のQZSSシステムおよびSBAS (Satellite Based Augmentation System) の信号を発生でき、これらのシステムの最も重要な実装 (WAAS、EGNOS、MSAS、GAGAN) をサポートします。

GNSSシナリオに加えて、R&S®SMW200Aでは、内部生成のユーザー設定可能な干渉信号を使用することで、干渉源が複数ある複雑なシナリオを実現できます。これには、単純なCW信号、帯域幅が設定可能なノイズ、共存テスト用のLTEや無線LANなどの通信信号が含まれます。周波数掃引形式などの一般的なGNSSジャマーや、レーダー信号の影響をテストするためのパルスド信号もシミュレートできます。複雑なジャマーシナリオを実現するには、GNSSレシーバーの運動と干渉源の運動をモデリングして、干渉信号の入射角の変化をシミュレートすることが必要になる場合があります。このようなシナリオは、CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) などのアンチジャミングシステムのテストに必

要であり、R&S®SMW200Aを使えば追加の信号源なしでシミュレートできます。

ジェネレーターの操作と設定に、外部コンピュータは不要です。GNSSシナリオの設定は、わかりやすいタッチスクリーンインタフェースを通じて短時間で容易に行うことができ、シミュレーション中にも変更が可能です。便利なビジュアライゼーション機能により、状況の概要をいつでも観察できます（図2）。実行中にシミュレーションパラメータを保存して、後でデータ解析に使用できます。R&S®SMW200Aの操作は、リモート制御コマンドセットを通じて完全に自動化することもできます。

ハイエンドのシミュレータ/ジェネレーター

R&S®SMW200Aは、単なるGNSSシミュレータではありません。個別の要件に合わせて設定が可能なので、ハイエンドのベクトル信号発生器として汎用的に使用できます。干渉信号の生成に追加の測定器は不要なので、コンパクトでシンプルなテストセットアップを維持できます。追加のRF出力などのハードウェアコンポーネントによる拡張や、ソフトウェアライセンスによるシミュレーション機能の後付けも可能です。GNSSソフトウェアは、技術の進歩に合わせて常にアップデートされています。この測定器を使えば、この分野での現在と将来のすべてのイノベーションをシミュレートする能力が得られます。

Dr. Markus Irsigler

GNSS干渉の種類

干渉源としての通信信号

GNSSの受信は、LTEやその他の通信信号によって妨害されることがあります。共存テストでは、このような信号の影響下でのレシーバー性能が判定されます。

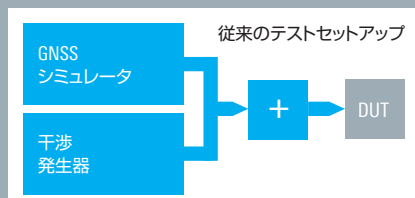
ジャミング

これは、GNSS受信に対する意図的な干渉を表します。CW信号、広帯域ノイズ、周波数掃引、パルスド信号などが干渉源として用いられます。

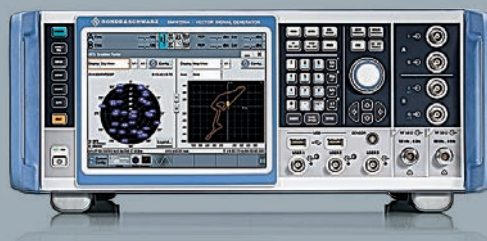
スプーフィング

このタイプの干渉の目的は、レシーバーの位置/時間情報を操作して、形式的には有効なまま正しくない内容に変更することで、信頼できるナビゲーションを不可能にすることです。

干渉のシミュレーション



R&S®SMW200Aによる複雑な干渉シナリオ



この例では、LTE信号、GNSSジャマー（L1バンドでの周波数掃引など）、レーダー信号がGNSS信号に加えてシミュレートされます。GNSS、ジャマー、レーダー信号にノイズが重ね合わせられます。LTE信号とともに、CW干渉源がシミュレートされます。

測定作業

干渉のシミュレーション

GNSS受信条件のなるべく現実的なシミュレーションを可能にするため、他の通信信号と、ジャミングまたはスプーフィング攻撃の両方の存在を考慮する必要があります。

ローデ・シュワルツのソリューション

GNSS信号と干渉信号を同じ測定器で発生

R&S®SMW200Aは、GNSS信号に加えて、複数の干渉源を同時にシミュレートできます。干渉信号としては、単純なCW干渉源、LTEなどのさまざまな通信信号、パルスド信号が使用できます。GNSS信号と干渉信号に、ノイズを重ねることができます。

利点

干渉シナリオの簡単なシミュレーション

R&S®SMW200Aを使用すると、共存テストやジャミング攻撃の影響のテストといった複雑な干渉シナリオを容易に実現できます。干渉信号の生成に、別の信号発生器を用意する必要はありません。

不可能を可能にする

従来のRFパワーメータは小型で正確ですが、感度はあまり高くなく、ダイナミックレンジは制限されています。測定レシーバーはどちらに関しても優れていますが、固有の欠点があります。ローデ・シュワルツは、これら2つのタイプの測定器の強みを兼ね備えた画期的な新しいセンサを開発しました。

フォールバックソリューションとしてのレシーバー

言うまでもなく、RF信号の精密なパワー測定が必要な場合、一般的に用いられる測定器はRFパワーメータです。パワー測定の技術としては、サーマル測定とダイオード測定の2種類が主流です。サーマル・パワー・センサは、入力信号によって終端抵抗に生じる熱に基づいてパワーを測定します。ダイオードベースのセンサは、入射RF信号をダイオード特性の2乗則領域で整流することによってパワーを測定します。ダイオード・パワー・センサにはさまざまな種類があり、マルチパスセンサや広帯域センサは重要なアプリケーションに用いられます。

RFパワー測定に使用できる測定器としては、他に測定レシーバーやスペクトラム・アナライザもありますが、これらに比べると、専用のパワーメータには、確度が高い、購入コストが安い、サイズが小さいといった特長があります。これに対して、レシーバーに基づく測定器の特長は、感度の高さとダイナミックレンジの広さです。

R&S®NRQ6 周波数選択型パワーメータ (図1) は、これら2種類の測定器の利点を兼ね備えるものとして開発されました。測定原理はレシーバーと共通ですが、ハードウェアの方式は従来の測定レシーバーやスペクトラム・アナライザと大幅に異なっています。優れた性能の鍵は、革新的なシステム方式と高度なデジタル信号処理にあります。

主要なデータの代表値を比較すると (図2)、この新しいRFパワーメータのデザインがいかに画期的であるかがわかります。代表的な測定レシーバーとしては、ミッドレンジのスペクトラム・アナライザが選ばれています。このデータからは、R&S®NRQ6がさまざまな測定方式の長所を兼ね備えることで、最高の性能を達成していることがわかります。きわめて小さいRFパワーも、高速かつ正確に測定できます。さらに、これまではトップクラスのパワーメータでしか得られなかった優れたリニアリティを実現して

図1: 従来のセンサとほとんど同じ大きさで比類のないダイナミックレンジを実現: R&S®NRQ6周波数選択型パワー・センサ。



テクノロジー	パワー測定 下限値	ダイナミック レンジ	不確かさ (CW)		インピー ダンス整合 (SWR)	立ち上がり 時間	0.1 dB以下の2 σ ノイズ成分と 0.1 sの測定時間での 最低パワーレベル
			絶対値	リニアリティ			
サーマル (R&S®NRP18T)	−35 dBm	55 dB	0.05 dB	0.01 dB	<1.13	–	−20 dBm
3パスダイオード (R&S®NRP8S)	−70 dBm	93 dB	0.06 dB	0.02 dB	<1.20	5 μ s	−48 dBm
広帯域ダイオード (R&S®NRP-Z81)	−60 dBm	80 dB	0.13 dB	0.04 dB	<1.20	13.3 ns	−26 dBm
スペクトラム・アナライザ (代表値)	−130 dBm*	160 dB	0.40 dB	0.10 dB	<1.8	該当なし	−104 dBm
R&S®NRQ6	−130 dBm	150 dB	0.08 dB	0.02 dB	<1.20	13 ns	−104 dBm

図2：さまざまなパワー・メータ・テクノロジーの主要なデータを比較することで、新しい方式の優位性がわかります。

います。センサは、さまざまなアプリケーションに合わせて設定できます。設定によって、以下のような特長を実現できます。

- 従来の専用パワーメータを数桁程度上回るきわめて広いダイナミックレンジ
- 従来はスペクトラム・アナライザと超広帯域のパワー・センサでしか実現できなかった高速な立ち上がり時間と広いビデオ帯域幅

シンプルなお操作

R&S®NRQ6は、初めて使う人にも簡単に使用できます。Power-over-Ethernet (PoE+) スイッチを通じてセンサをLANに接続するだけです。ウェブブラウザを搭載した通常のPCまたはタブレットからHTML GUIにアクセスして、連続平均、トレース、ACLR測定を実行できます (図3)。

測定周波数と信号帯域幅の設定も容易です。これは手動で行うことも、自動設定機能を使用することもできます。入力レベルに応じて、30 dBのRF入力アッテネータのオン/オフが自動的に切り替えられ、最適なパワー測定範囲を設定します。

* ミッドレンジ・スペクトラム・アナライザの100 Hz RBWでの代表値。パワー測定下限値は、アナライザのノイズフロアより約10 dB上です。

図3：ブラウザベースのGUIに表示されたトレース測定。



測定機能

最小-130 dBmの連続平均パワー測定

従来のダイオード・パワー・センサでは、測定される固有ノイズ成分が比較的大きいため、-70 dBm未満の正確な測定を高速に行うことはできません。R&S®NRQ6は、レシーバーアーキテクチャに基づいているため、この問題は生じません。さらに、センサは帯域制限測定を実行できるため、ノイズパワーを減らすことができます。これにより、-130 dBmまでの狭帯域信号のパワーを、高速に高い精度で測定できます。R&S®NRQ6は周波数選択型測定器なので、高調波などの相互変調成分の測定や、最大100 MHz帯域幅の選択した伝送チャネルの測定に最適です。隣接チャネルは、考慮されません。この機能は、マルチスタンダード基地局の測定で、1つの規格だけを測定したい場合に便利です（図4）。

トレース測定

パルス信号のパワー測定をトレースモードで実行できます。この場合、信号はタイムドメインで表示されます（図3）。R&S®NRQ6の固有立ち上がり／立ち下がり時間は、例えば分解能帯域幅が50 MHzの場合で13 nsなので、急峻なエッジのパルスも簡単に測定できます。トレースモードには自動設定機能も備わっており、時間軸とパワー軸の最適なスケーリングが可能です。トリガレベルが自動的に設定されるため、常に測定信号の安定した表示が得られます。

ACLR測定

隣接チャネル漏洩電力比（ACLR）は、モバイル通信の標準的な測定の1つです。ACLR測定は、ウェブGUIから、3GPPおよびLTE信号用の定義済みのフィルターを使用して設定できます。フィルターは、自動的に設定されます。R&S®NRQ6は、20 MHzのLTE信号（-20 dBm）に対して、-63 dBc（代表値）のACLR性能を達成します。

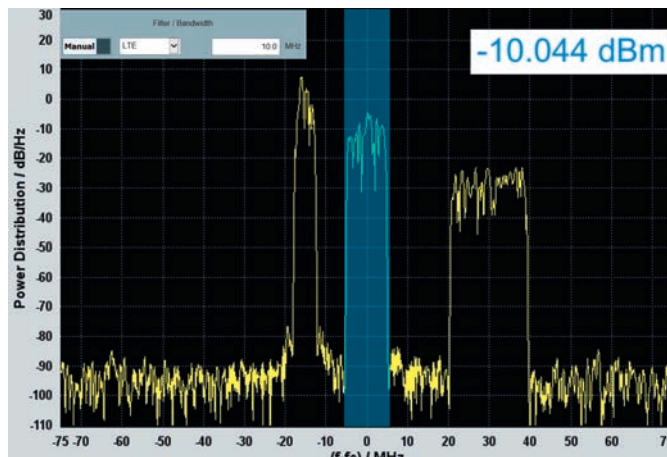


図4：マルチスタンダード基地局チャネルのセレクトティブ測定：R&S®NRQ6では簡単な作業。

速度が重要な場合：トリガ測定

トリガ測定では、ますます高い測定速度が長時間にわたって要求されるようになっていきます。このような要件を満たすため、R&S®NRQ6には強力なFPGAと大容量のメモリが搭載されています。100,000を超えるトリガ読み値を200 msでバッファーにストア（測定速度500,000回／秒に相当）し、制御PCに転送できます。

役に立つアシスタント

自動周波数トラッキング

狭帯域信号のパワーを測定する場合、中心周波数のドリフトが発生することがあります。R&S®NRQ6の基準周波数入力に信号源を接続できない場合には、周波数トラッカーを使用することで、

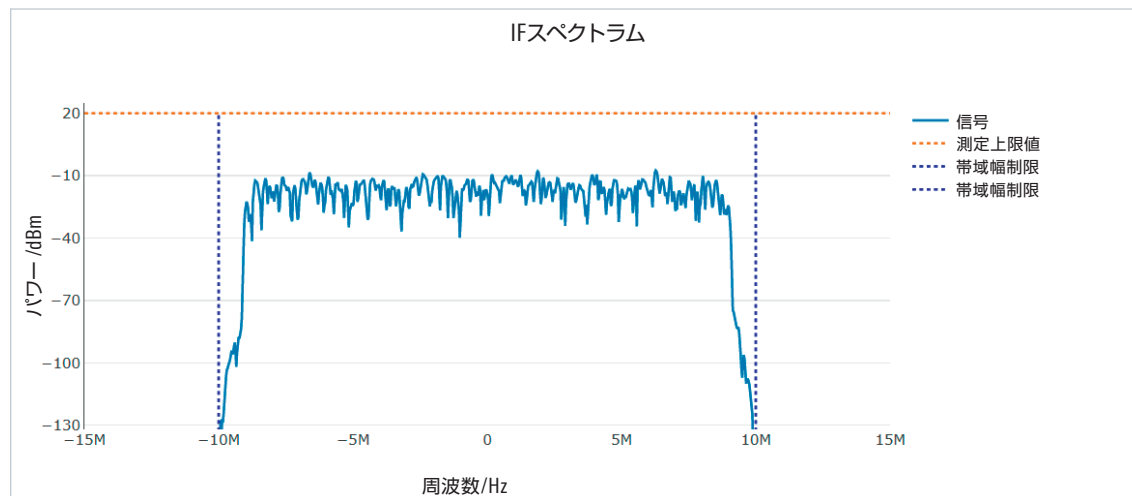


図5：信号確認機能を使用すると、測定信号が設定された周波数レンジ内にあるかどうかを一目で確認できます。

ドリフトが起きても、測定ウィンドウを自動的に調整して、信号を常に選択した帯域幅内に収めることができます。

信号確認のためのスペクトラム表示

パワー測定は設定された周波数レンジ（中心周波数と帯域幅で定義）でのみ実行されるため、設定が正しいことを確認する必要があります。信号確認機能を使用すれば、これを一目で確認できます。テスト信号、測定帯域幅、パワー測定リミットがグラフィカルに表示されるので、誤りを防ぐために役立ちます（図5）。

用途

R&S®NRQ6は、従来のセンサタイプで行われてきた6 GHzまでのすべてのパワー測定に使用できます。ただし、その利点は特定のアプリケーションでさらに顕著になります。

TXパワー校正

DUTの伝送パワーを校正するには、より高いレベルでの周波数応答を補正し、最小レベルまでのリニアリティを測定する必要があります。

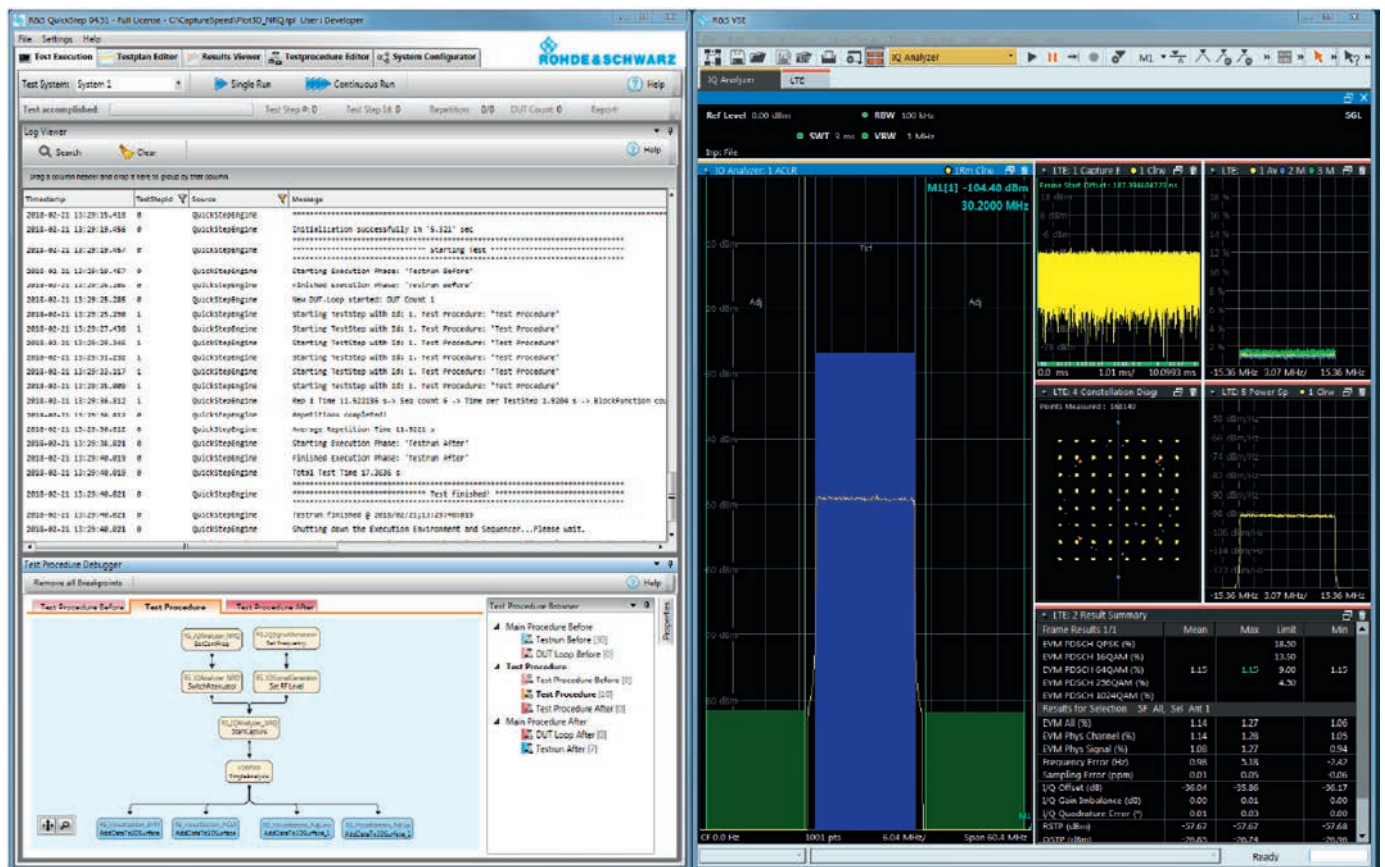
ります。このような作業にはこれまで複数の異なる測定器が必要でしたが、R&S®NRQ6なら両方の測定をコンパクトな1台の測定器で実行できます。スプリッターやスペクトラム・アナライザなど、追加の測定器やコンポーネントは不要です。センサは被試験トランスミッターに直接接続できるので、ケーブルさえも不要です。このソリューションによって、安定度の向上、不整合の低減、精度の向上を実現できます。

RFベクトル信号解析用のI/Qデータ捕捉

R&S®NRQ6は、ベクトル変調I/Q信号を捕捉するためのスタンドアロンのRFフロントエンドとして使用できます。オプションのR&S®NRQ6-K1 I/Qデータインタフェースを使用すれば、捕捉したI/QデータをSCPIコマンドで読み出すことができます。データの復調と解析には、外部ソフトウェアを使用します。R&S®Quickstep テスト・エグゼクティブ・ソフトウェアを使用すれば、自動化されたクラウドベースの信号解析が可能になります。R&S®Quickstep は、任意の解析ツールを制御して、エラーベクトル振幅（EVM）およびACLRを測定できます（図6）。

Dr. Georg Schnattinger, Michael Kaltenbach, Marcel Thränhardt

図6：R&S®NRQ6は、I/Qデータを捕捉するためのスタンドアロンのRFフロントエンドとして使用できます。データの解析には、外部ソフトウェアを使用します。R&S®Quickstep テスト・エグゼクティブ・ソフトウェアなどによる自動データ解析も可能です。



ネットワーク・
アナライザの校正

真空への挑戦

図1：宇宙産業では、熱真空チャンバー（図はNASA試験施設のものの）を使用して、衛星全体を含むコンポーネントのテストを行います。測定中には、チャンバー外からの手動での操作は不可能になります。このため、テスト機器の校正はリモート制御で行う必要があります。

これまで、ネットワーク・アナライザ測定のシステム誤差補正は面倒な作業でした。テストセットアップ内の校正ユニットを、接続したり取り外したりする必要があったからです。これは時間がかかり、誤りが起きやすいプロセスです。ローデ・シュワルツが開発した新しい校正ユニットのシリーズは、セットアップに接続したままにしておくことができます。これにより製造スループットが上がり、熱真空チャンバー内の現実的条件で宇宙機のコンポーネントの自動テストを行えるようになります。

ネットワーク・アナライザで精密なSパラメータ測定を行うには、測定開始前と、測定中に一定の時間間隔で、システム誤差補正を実行する必要があります。これまでは、テストケーブルに校正基準を接続し、校正後に取り外して、DUTを再接続する必要がありました。そのためには、ユーザーがテストケーブルの開放端にアクセスできることが必要ですが、これは常に可能とは限りません。さらに、この手順によりテスト時間が延び、コストが増加し、製造ラインの効率が低下します。

従来のソリューションと異なり、新しいR&S®ZN-Z32/-33 インライン校正ユニット（次ページの詳細を参照）は、テストケーブルの端とDUTの間に常に接続しておくことができます。多数のインライン校正ユニットと、対応する数のテストポートを、CANバスを通じて制御でき、ネットワーク・アナライザとDUTの間の長い距離をつなぐことができます。ユーザーは、R&S®ZN-Z3ASW アプリケーションソフトウェアを使用して、ネットワーク・アナライザの再校正をいつでもリモートで行うことができます。

真空チャンバー内での校正

熱真空チャンバー(TVAC) 内でのテストでは、ユーザーがテストセットにアクセスできないので、インライン校正ユニットがただ1つのソリューションとなります（図1と2）。通常的环境条件でのベース校正の後、計測コンポーネント（インライン校正ユニット、ケーブル、スプリッターなどの補助テスト機器）がTVAC内に入れられます。真空排気とチャンバー内の温度変化の後、計測コンポーネントの温度ドリフト効果のために、再校正が必要になります。新しいソリューションを使用すれば、再校正をいつでも実行できます。

製造での効率的なマルチポート校正

製造で一般的に行われるマルチポート測定では、ケーブルの位相安定度の制限により、測定確度が影響を受けます。ケーブルをDUTにネジで着脱したり、ポジショナーで動かしたりしたときに、ケーブルの移動によって位相が変化することがあります。さらに、従来の機器で校正を繰り返し実行すると、大きな手間と時間がかかり

真空チャンバー内での測定のテストセットアップ

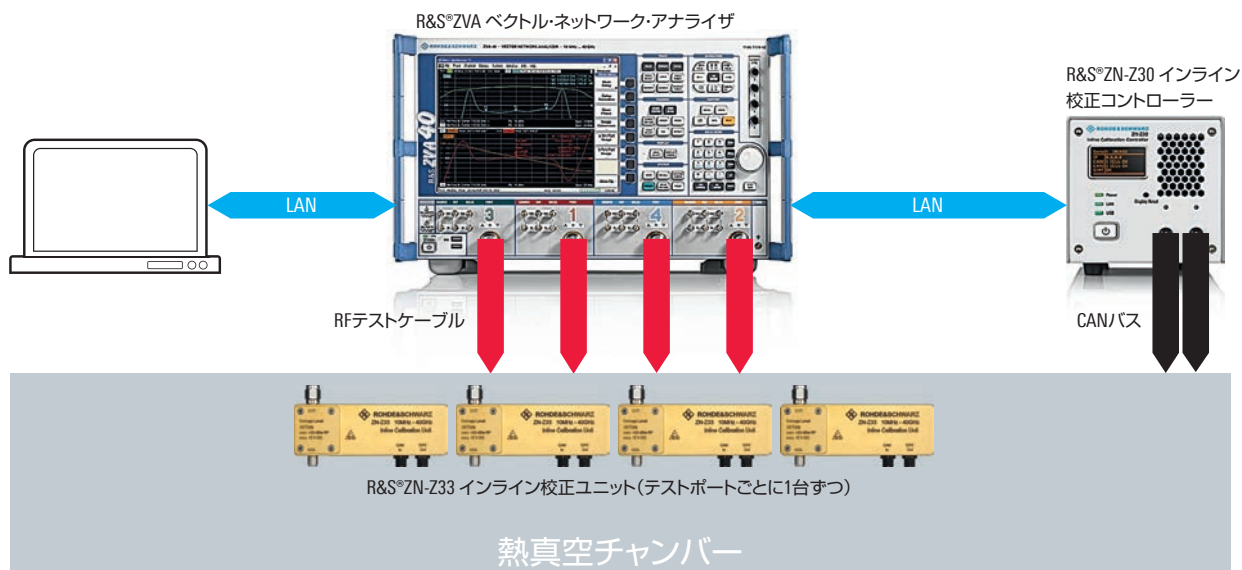


図2：制御PC、ネットワーク・アナライザ、インライン校正コントローラーは、真空チャンバーの外に配置されます。各テストポートに対して、R&S®ZN-Z33 インライン校正ユニットを、チャンバー内のテストケーブルとDUTの間に接続する必要があります。

ます。新しいインライン校正ユニットを使えば、このような問題を解決できます。多数のテストポートの校正を、R&S®ZN-Z3ASW アプリケーションソフトウェアからボタン1つで実行できます。校正時間はわずか数秒に短縮されるので、製造スループットが上がります。これらの校正ユニットを、R&S®ZNBT マルチポート・ベクトル・ネットワーク・アナライザなどと組み合わせることで、きわめて高い効率を実現できます (図4)。

コンパクトなカスタマイズされたテストセットアップ

R&S®ZN-Z32 インライン校正ユニット (図3) は、10 MHz ~ 8.5 GHzの周波数、+5 °C ~ +40 °Cの周囲温度で動作します。R&S®ZN-Z33 インライン校正ユニットには、2つのモデルがあります。1つのモデルは、10 MHz ~ 40 GHzの周波数レンジ、+5 °C ~ +40 °Cの温度で動作します。一方、TVACモデルは、-30 °C ~ +80 °Cの温度に耐えます。

R&S®ZN-Z30 インライン校正コントローラーは、最大48台のインライン校正ユニットをCANバス経由で制御できます。複数のコントローラーを使用すれば、ほぼ無制限の校正ユニットと、それに対応する数のテストポートを実現できます。ユーザーは、R&S®ZN-Z3ASW アプリケーションソフトウェアを通じてシステムの設定と校正を簡単に行うことができます。このソフトウェアは、R&S®ZNB ミッドレンジ・ネットワーク・アナライザ、R&S®ZNBT マルチポート・ネットワーク・アナライザ、R&S®ZVAまたはR&S®ZVT ハイエンド・ネットワーク・アナライザまたは外部制御PCにインストールできます。

Dr. Albert Gleissner



図3 (上から) :
インライン校正ユニット
R&S®ZN-Z32
(10 MHz ~ 8.5 GHz)
およびR&S®ZN-Z33
(10 MHz ~ 40 GHz)
(どちらも自動ポート
表示付き)、
R&S®ZN-Z33 TVAC
モデル (10 MHz ~
40 GHz) (熱真空
チャンバー用)



図4 : R&S®ZNBT20
マルチポートネットワーク
アナライザ、R&S®ZN-Z33
インライン校正ユニット、
R&S®ZN-Z30 インライン
校正コントローラーを
使用したテスト
セットアップの例。

Bクラス登場

ミッドレンジクラス信号発生器のラインナップ更新が進められています。最高6 GHzのアナログおよびベクトルモデルが登場しました。

ミッドレンジの信号発生器R&S®SMB100A (アナログ) およびR&S®SMBV100A (ベクトル) は長年市場で好評を得ていますが、優れた後継機種が新たに生まれました。型番のAがBに置き換わり、新しい名前はR&S®SMB100B (上の写真) およびR&S®SMBV100Bとなります。技術面では、全面的な再開発によって多くの点が改良されています。どちらのモデルも出力パワーが大幅に増加し、信号品質が向上するとともに、便利なタッチスクリーン操作が加わりました。さらに、それぞれの信号発生器には固有の特長があります。

R&S®SMB100Bアナログ信号発生器

R&S®SMB100Bの周波数レンジは8 kHzから1 GHz、3 GHz、6 GHz (構成によって異なる) までです。ベースバージョンの構成はCW信号用ですが、オプションで振幅/周波数/位相変調もサポートされます。その他に、単一パルスおよび複雑なパルス列を生成するためのオプションも用意されています。

ベースバージョンの高いRF品質は、必要な場合はさらに改善できます。OCXOオプションを使用すれば、基準周波数の経時変化と温度依存性を1桁以上改善でき、SSB位相雑音を20 dB以上減らして-65 dBc (1 GHz、1 Hzオフセット) まで下げることができます。出力パワーは、2段階でブーストすることもできます。キーコードでアクティブになる第1段階では、パワーが20 dBmから28 dBm (1 GHz) に増加します。超高出力パワーオプション (別途インストールが必要) を使用すると、さらに6 dBが加わって、全出力パワーが+34 dBmに増加します。これはクラス最高レベルの値です。この信号発生器は、特に古い測定システムを最先端のコンポーネントで更新するために便利です。柔軟な基準周波数入力/出力と、レガシー信号発生器のエミュレーションにより、便利なプラグ・アンド・プレイ動作が可能になります。

概要データ

- 周波数レンジ: 8 kHz ~ 1 GHz、3 GHz、または6 GHz
- 単側波帯位相雑音: <-132 dBc (代表値) (1 GHz、20 kHzオフセット)



- 広帯域ノイズ: <-153 dBc (代表値) (15 MHz < f ≤ 6 GHz、30 MHzオフセット)
- 出力パワー: 最大+34 dBm (実測値) (1 GHz)

R&S®SMBV100B ベクトル信号発生器

アナログバージョンと同様、R&S®SMBV100Bの最大の強みは、高レベルでも高い信号品質を維持できることです。モバイル通信や航空宇宙/防衛といった大きい帯域幅を必要とするアプリケーションでは、500 MHzの変調帯域幅と、きわめて小さい変調周波数応答 (<0.2 dB、実測値) が威力を発揮します。出力パワーはオプションで最大+34 dBm (1 GHz) までブーストできるので、外部増幅器が不要になり、テストセットアップがシンプルになるとともに、仕様が改善されます。さらに、自動周波数応答補正によって全体的性能を改善できます。この機能は、ネッ

トワーク解析でのディエンベディングに相当するもので、信号経路内のコンポーネントの伝送特性を動的に補正できます。新しいモデルでは、柔軟性も大幅に向上しています。多くのオプションはソフトウェアベースなので、信号発生器にあらかじめ組み込まれており、キーコードを入手するだけで使用可能にできます。もう1つの便利な特長として、期間限定ライセンスがあります。これにより、一時的に必要な機能を、多額の設備投資をせずに利用することができます。

概要データ

- 周波数レンジ: 8 kHz ~ 3 GHzまたは6 GHz
- 出力パワー: 最大+34 dBm
- 変調帯域幅: 最大500 MHz
- EVM (LTE TM 3.1): <0.4 % (+18 dBm、RMS)、ACPR: <-72 dB (WCDMA、64 DPCH、実測値)



図1：ドローン（この例ではR&S®EVSF1000を搭載）による測定飛行によって、到達困難な場所の地上検査が行われます（写真：Skyguide）。

航空管制のための2種類のアナライザ

衛星ナビゲーションの時代になっても、地上航空ナビゲーションシステム（ILS、VOR、マーカービーコン）の重要性は変わりません。したがって、これらのシステムが正しく動作することはますます重要になっています。このためには、定期的なテストと検証が欠かせません。地上試験用と空中試験用の2種類の新しいアナライザを使用すれば、必要な測定をすべて実行できます。

地上検査と飛行検査に基づく地上ナビゲーションシステムの定期的なチェックとメンテナンスは、ICAO Doc 8071およびICAO Annex 10に規定されている重要な要件です。この場合、システムと測定手順の安定性と信頼性を証明するために、地上測定と空中測定の結果が一致することが必要です。さらに、ICAOの規定によれば、一致のレベルによって、測定をどの程度の頻度で繰り返す必要があるかが決まります。R&S®EVSF1000 VHF/UHF Nav/Flightアナライザ（図1）とR&S®EVSG1000 VHF/

UHF Airnav/Comアナライザ（図3）は、同一の信号処理ハードウェアとソフトウェアを搭載しているため、必要な一致レベルを確認するために役立ちます。これらの専用アナライザは、コンパクトなデザインにもかかわらず、最高のラボ用機器と同等の測定確度を実現します。前モデルのR&S®EVS300と比べて、取り扱いが容易になり（便利なスペクトラムプレビューなど）、性能が向上しています（感度の大幅な向上など）。

地上測定のスペシャリスト

地上航空ナビゲーショントランスミッターシステムにはモニター機能が内蔵されていますが、独立の測定機器を使用した定期的な検査とメンテナンスは不可欠です。空港運営者、外注の飛行検査組織、政府機関など、システムのメンテナンスを担当する機関は、静的解析と動的測定（滑走路測定など）の両方を実施する必要があります。バッテリー動作のR&S®EVSG1000は、まさにそのようなアプリケーションのために開発されました。アナライザの6.5

インチ・カラー・ディスプレイは、直射日光下でも読み取りやすく、すべての設定と結果を一目で確認できます。特にスペクトラムプレビューは、フィールドでの測定に非常に有用です。測定信号のIFスペクトラムと使用したフィルター帯域幅の両方が表示されるので、測定の誤りを効果的に防ぐことができます。その他にも、すべての測定値(R&S®EVSG-K21) およびGPSデータ(R&S®EVSG-K20)の記録や、外部トリガ機能(PPS、ホイールセンサなど)といったさまざまな機能が備わっています。



図2：ローカライザーの地上検査を行う際には、特定の高さのアンテナを使用することが推奨されています。これを実現するには、適切な装備を持つ試験車両を使用するのが最適です。いずれにせよ、動的な滑走路測定を行う際には、このような車両が不可欠です。グライドスロープ測定の場合は、アンテナをさらに高い位置に配置する必要があります。

図3：R&S®EVSF1000 (左) とR&S®EVSG1000 (右) は内部機構がほぼ同一なので、比較測定に最適です。R&S®EVSG1000は、地上検査用に設計されています。





図4：2F ILS測定の結果。2つの搬送波（コースとクリアランス）のIF表示、フィルター帯域幅設定、個々の測定値（コース、クリアランス）、合計値の評価が示されています。

滑走路測定 – CAT IIIシステムの課題

ILS CAT IIIシステムでは、滑走路に沿って配置されるローカライザーの解析が最も重要な地上測定の一つですが、このためには滑走路を一時的に閉鎖することが必要です。最小の閉鎖時間で信頼できる結果を得るために、R&S®EVSG 1000は、高い測定速度（R&S®EVSG-K22使用時に100回/秒）と高速なデータストレージ（R&S®EVSG-K21）を備えています。これにより、60 km/hを超える速度でのトラブルのないドライブテストを実行でき、反射によって発生する高周波スカロップのアンダーサンプリングがなくなります。R&S®EVSG 1000にR&S®EVSG-K1 オプションを搭載すると、デュアル周波数（2F）ILSシステムのコース信号とクリアランス信号の間のレベル関係と位相関係の同時独立測定を実行できます（図4～6）。

測定飛行でも時間は重要

測定飛行はコストがかかるので、その回数と時間を最小化することが重要です（図7）。もちろんそのためには、高性能の測定機器が必要です。R&S®EVSG 1000は、2つの信号処理チャンネルを装備しており、任意の周波数での2つの独立した測定を同時に実行できます。例えば、着陸進入時のローカライザー信号とグライドスロープ信号の測定や、2つのCVOR/DVORステーションの同時チェックなどに利用できます。急峻なエッジのプリセクターフィルターにより、強力なFMトランスミッターの付近に相互変調成分が生じることを防げるので、測定が劣化しません。対象領域の境界付近を飛行しているときには、低雑音のフロントエンドにより、指定測定範囲よりはるかに下の信号を扱う場合でも安定した結果が得られます。PPS同期機能を持つGPSレシーバーを接続した場合、各測定値を対応するGPS時刻および位置に関連させることができます。

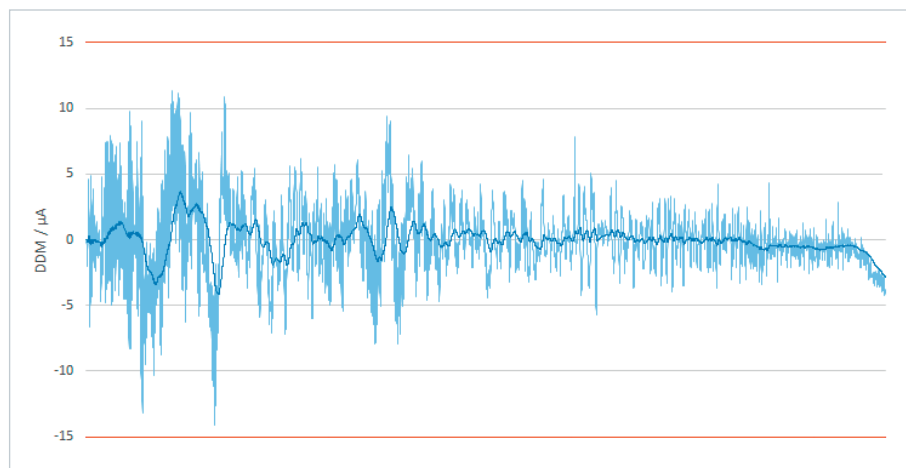


図5：滑走路中央（コース偏移0）でのローカライザー測定のフィルター前（薄い青）とICAOフィルター後のDDM曲線。生データの顕著なスカロップは高速ドライブテスト中に発生しますが、ICAOフィルターによって除去されます。フィルター適用後の曲線が、リミットラインを超えないことが要求されます。

2F ILSシステムのローカライザー

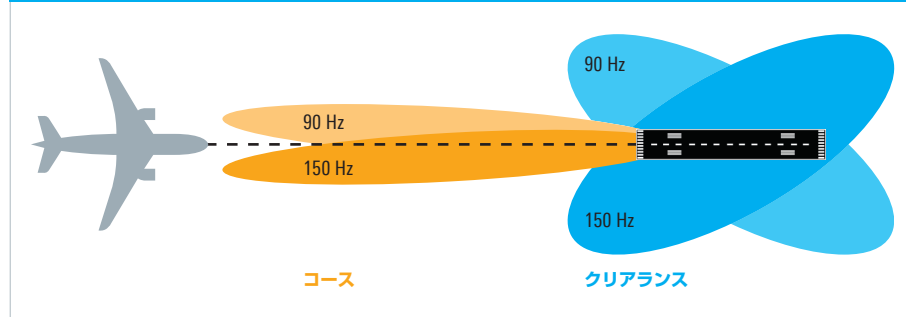


図6：中心線からのコース偏移は、受信位置での90 Hz信号と150 Hz信号の変調度差（DDM）から得られます。

マストが低すぎる場合や地形が荒い場合への対応

R&S®EVSF1000は小型軽量なので、ドローンに搭載するのに最適です(図1)。ドローンによる飛行はもちろん航空機による測定飛行の代わりにはなりませんが、車両やマストでアクセスできない場所の地上検査には有用です。当然、ドローンの現在位置は常に高精度で把握されている必要があります(RTK GPSまたはDGPSを使用)。このようなアプリケーションに使用した場合、R&S®EVSF1000は、ドローンのオンボード電圧で動作し、きわめて安定した測定が可能です。ILSグライドパスの解析は、通常この方法で行われます。ドローンを使用すると、この測定を遠方界で行うことができます。送信アンテナからの距離が大きくなるため、滑走路上のマスト測定よりもはるかに再現性の高い結果が得られます(マスト測定は、スレッシュホルドで行われます)。マストの高さは、グライドパス信号を接地点よりずっと手前で測定するのには不十分です。ドローンを使えば、この問題を解決できます。

Klaus Theißen



図7：飛行検査システムでのR&S®EVSF1000の代表的な設置例(写真：Norwegian Special Mission)。

用語集

2F ILS	コースとクリアランスにそれぞれ別の搬送波を使用するILSシステム
CAT I、II、III	ILSの進入カテゴリー
CVOR、DVOR	標準/ドップラー超短波全方向式無線標識
DDM	ローカライザー信号の90 Hzと150 Hzのトーンの変調度差(0 %のDDM [LOC]=滑走路の中央)
DGPS	差分全地球測位システム
グライドパス	着陸時に垂直偏移を判定するために用いられる信号を供給するトランスミッター
ILS	計器着陸装置
ローカライザー	着陸時に水平偏移を判定するために用いられる信号を供給するトランスミッター
マーカビーコン	接地点までの距離判定に使用(外側、中央、内側マーカビーコン)
PPS	Pulse per second (パルス/秒)の略。無線ビーコン、GPSレシーバーなどが出力する同期信号
RTK GPS	リアルタイムキネティックGPS。高さと高度の判定が可能
スカロップ	反射によって滑走路上のDDM曲線に生じる干渉
スレッシュホルド	接地点より約280 m手前(内側マーカビーコンの位置)

コンパクトなアナライザプラットフォーム

ハイエンドは、常に必要なわけではありません。多くの場合にお客様が求めているのは、しっかりしたRF性能と手ごろな価格、そして用途の広さ、特にモバイル用途への対応です。ローデ・シュワルツの2種類の新しいアナライザは、このような要件に応えています。

同じルーツを持つ2機種

R&S®ZNL ベクトル・ネットワーク・アナライザとR&S®FPL1000 スペクトラム・アナライザ (図1) は、主要なRF測定のための汎用的な測定器です。可能な測定としては、アンテナ、アッテネータ、フィルター、増幅器などのコンポーネントの特性評価や、スペクトラム測定などの信号源測定、アナログ/デジタル信号の復調、精

密パワー測定などが挙げられます。これら2種類のアナライザは、クラス最高のコンパクトさが特長です。フットプリントはわずか 408 mm×235 mmなので、DUTやアクセサリなどのためのスペースを広く取ることができます。高さわずか186 mmでありながら、10.1インチのWXGAタッチスクリーンを内蔵し、測定結果を詳細に表示できます。基本構成では6 kgと軽量なので、フィールドで

図1: 似ているのは、外観だけではなく。R&S®ZNL ベクトル・ネットワーク・アナライザとR&S®FPL1000 スペクトラム・アナライザは、同じプラットフォームに基づいています。



のモバイル用途にも最適です。モバイル用途に便利のように、専用のキャリングバッグと2個のホットスワップ可能な充電式電池が用意されています（図2と3）。車内でのアナライザの充電および動作に、オプションの12 V/24 V DC電源が利用可能です。

どちらのアナライザにも、使いやすくわかりやすいグラフィカル・ユーザー・インターフェースが備わっています。例えば、タッチしてドラッグするだけでトレースを必要な位置に移動したり、マルチタッチジェスチャーを使用して測定範囲を調整したりできます。さまざまな測定モードを、対応するタブによってアクティブにすることができます。マルチビューモードでは、アクティブな測定がすべて1つの画面に表示されます。異なる測定が短い間隔で順次実行されるため、同時に測定が行われているように見えます。どちらの測定器も、しっかりしたRF性能を備えています。R&S®FPL1000は

純粋なスペクトラム・アナライザであり、R&S®ZNLはネットワーク・アナライザで、オプションでスペクトラム・アナライザ機能を利用できます。

R&S®ZNL ベクトル・ネットワーク・アナライザ

R&S®ZNLは、4レシーバーのテストセットを備えたベクトル・ネットワーク・アナライザです。ベース構成では、5 kHz～3 GHzまたは6 GHzの周波数レンジで、Sパラメータ、波形測定値、波形測定値の比を測定できます。120 dBを超えるダイナミックレンジ、-40 dBm～0 dBmの出力パワー範囲、0.0025 dB未満（RMS）という小さいトレースノイズにより、R&S®ZNLはフィルターなどのパッシブコンポーネントの特性評価に最適です。エンベディング/ディエンベディングやトレース演算といった機能が、標準で装備さ





図2: オプションのホットスワップ可能な2個の充電式電池は、測定器のリア側に装着します (図に示すのはR&S®ZNL)。

れています。テストセットアップの校正は、手動で行うことも、自動校正ユニットで行うこともできます。オプションで、タイムドメイン解析および障害位置検出 (ケーブルの故障位置の検出など) 測定が用意されています。これらの機能は、キーコードで有効にできます。

特殊な機能として、R&S®ZNLにハードウェアボードを装着することで、完全に統合されたスペクトラム・アナライザが使用できます。これにより、R&S®ZNLは、コンパクトなユニットでネットワーク解析とスペクトラム解析の両方を実行できます。スペクトラム・アナライザはハードウェアで実現されているので、単体のスペクトラム・アナライザとほぼ同等の性能を実現します。R&S®ZNLのスペクトラム・アナライザは、操作、基本機能、性能に関して、R&S®FPL1000とおおむね共通です。ただし、被試験信号がレシーバーに到達するまでに、ネットワーク・アナライザ・テスト・セットを迂回するためのスイッチやその他のコンポーネントを経由する必要があるため、わずかな制限が存在します。R&S®NRP パワー・センサおよび精密パワー測定オプションと組み合わせることで、R&S®ZNLは3つの測定器の機能を備えた汎用測定器となり、開発、サービス、大学教育など、さまざまな用途に適合します。

図3: 専用のキャリングバックは、フィールドでの使用時に測定器を保護する役割を果たします。側面に通気孔があるため、測定器をバックに収容したままでも操作できます。透明カバーを通じてトレースをはっきりと視認でき、タッチスクリーン操作も可能です。

R&S®FPL1000 スペクトラム・アナライザ

R&S®FPL1000 スペクトラム・アナライザは、5 kHz ~ 3 GHzの周波数レンジで動作します。位相雑音の代表値は-108 dBc(10 kHz オフセット、1 GHz搬送波)、TOIの代表値は+20 dBm、表示平均雑音レベル (DANL) の代表値は、オプションのプリアンプをオンにした状態で-167 dBm (10 MHz ~ 2 GHz) です。一般的なスペクトラム解析に加えて、ベース構成では、スペクトログラム機能と、チャンネルパワー、隣接チャンネル漏洩電力比 (ACLR)、搬送波対雑音比、占有帯域幅、スペクトラム・エミッション・マスク、スプリアスエミッション、高調波歪み、3次インターセプト (TOI) など、さまざまなスペクトラム測定が可能です。ベースユニットは、パルスド信号の測定のためのゲーティッド掃引機能も備えています。オプションで、アナログ変調信号の解析、増幅器測定 (雑音指数、利得、Yファクタ)、パワー・センサによる精密パワー測定などの測定機能を追加することもできます。

さらに、R&S®FPL1000では、R&S®VSE ベクトル信号解析ソフトウェアおよびR&S®VSE-K70 オプションを使用して、最大 40 MHzの帯域幅のデジタル変調シングルキャリア信号の詳細な解析を行うこともできます。R&S®VSE-K106 オプションを使用すれば、NB-IoT (Narrowband Internet of Things) 規格に適合する信号を解析できます。これは主に、マシン間のデータ交換のための規格です。

Tanja Menzel, Klaus Theißen





© Betond Horvat / Shutterstock.com

R&S®TLU9 ギャップフィラー：ギャップ フィラー界の「ゲームチェンジャー」

地上波TVトランスミッターネットワークでは、少数のハイパワートランスミッターでエリア全域を適切にカバーできるのが理想です。残念ながら、このシンプルな方法は、多くの場合にトポロジー上の問題でうまくいきません。山地や谷間では、リピーターが必要になるのが普通です。新しいR&S®TLU9 ギャップフィラーは、このクラスのトランスミッターの常識を完全に塗り替えます。

問題が最もわかりやすいのは、フィヨルドや山間部の谷間の場合です。遠距離にあるトランスミッターからの地上波放送TV信号は谷底までは届かないので、追加の手段を取らない限りそこに住む人々には放送を届けられません。そのような場所にローパワーのトランスミッター式を設置してベースバンド信号を（データネットワークまたは衛星を通じて）供給する方法は、通常は経済的に不可能です。必要なトランスミッターの数が、非常に多くなる可能性があるからです。その代わりに用いられる標準的な方法は、リレーモードで動作するリピーターを使用することです。リピーターは高い位置に配置され、通常のTVレシーバーと同様に信号を無線で受

信して、谷底に向かって再送信します。使用される周波数が同じであるか異なるかに応じて、それぞれ以下のような特質があります。

- トランスポザー：トランスポザーは、受信した信号を異なる周波数に変換するリピーターです。
- リトランスミッター：トランスポザーと同様ですが、信号の再生成が行われます。すなわち、受信信号が復調されて再構成されます。
- ギャップフィラー：ギャップフィラーはオンチャネルリピーターとも呼ばれ、受信した信号を同じ周波数で送信します（SFNアプリケーション）。

外部からの影響に弱い現在のギャップファイラー

ギャップファイラーでは送信周波数が受信周波数と同じなので、独立した信号供給を受けるトランスミッターにはない問題が発生します。これはエコーと呼ばれ、入力への信号フィードバックによる悪影響を指します。ギャップファイラーは凹凸の多い場所に設置されることが多いので、周囲に多数の垂直反射面が存在することが問題を大きくします。もう1つの要因として、このような場所は狭いため、すべてのことが比較的小さい空間の中で起こります。トランスミッターと反射源の間の距離が短いため、発生したエコー信号はかなりの強度を保持しており、実際のソース信号に重なって悪影響を与えます。これまで、この問題を解決する万能の方法は存在しませんでした。1つの問題は、エコーが自然の障害物だけでなく、自動車などの移動する物体から生じる場合があることです。移動物体から発生するドップラーエコーは、散発的で予測不能な性質を持つため、対策がきわめて困難です。さらに、何らかの構造的変化が生じた場合、例えば道路橋や風車などが建設された場合には（当然エコー状況が変化するので）、メンテナンスチームは新しい状況を解析して、エコーキャンセル機構をその場で再構成する必要があります。しかしながら、新しい構成も、ラッシュアワーが始まったり、風車の回転速度が上がったりしたら、すぐに古くなってしまいう可能性があります。ドップラーエコー性能が低かったり、信号処理による雑音寄与が一般的に高かったりすると、信号の劣化や伝送の失敗といった問題が生じます。このような場合、従来は2つの妥協のうちいずれかを強いられていました。連続した伝送を維持するために厳格なエコーキャンセルを採用して、信号品質の永続的な低下を受け入れるか、高い品質を選んで、ときおり放送が中断することを許容するかです。

ギャップファイラーは外部からの影響を受けやすいため、特定のトランスミッター設置場所でどのような挙動を示すかが予測困難です。このため、信頼できるネットワークプランニングの作成に支障が生じていました。例えば、ある場所でメーカー A のギャップファイラーは何度試してもうまく動作しなかったのに、メーカー B のモデルでは問題が起きないといったことが起こりえます。一方、別の場所では逆のことが起きるかもしれません。このような複雑な試行錯誤のプロセスのために、設置とメンテナンスのコストが上昇し、単純な再放送方式の採用によるコスト削減効果が打ち消されてしまう可

静的エコーのキャンセル

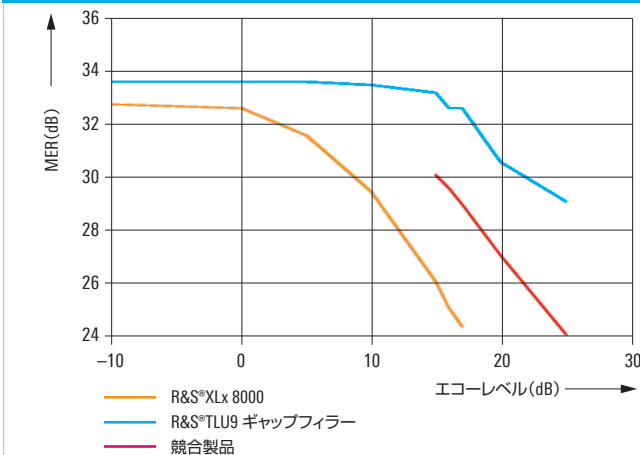


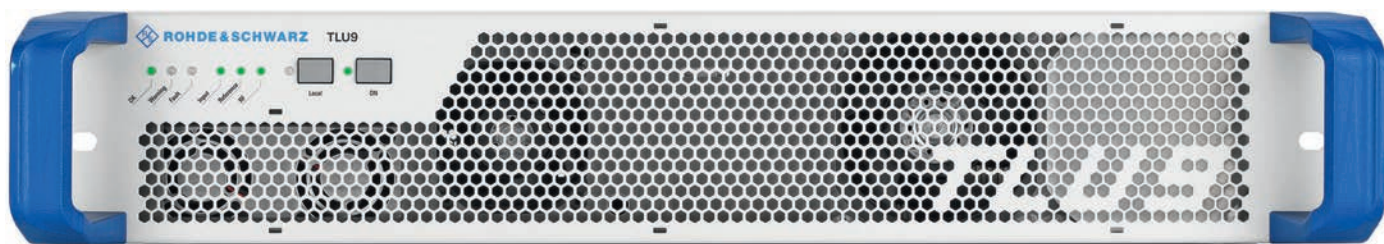
図2：静的エコー：R&S®TLU9 ギャップファイラーは、すべての代替製品を上回るMER値を実現します。

能性があります。大型トランスミッターのきわめて高い信頼性と長期的な安定性を考えると、なぜこれほど違いがあるのかと、放送ネットワークプロバイダーは納得のいかない思いを抱えてきました。ローデ・シュワルツはこれまで、歴史の長いR&S®XLx8000 ファミリーのギャップファイラーを何千台も販売してきました。これらはネットワークプロバイダーのお客様に好評をもって迎えられてきましたが、新しいR&S®TLU9 ギャップファイラー（図1）は、この分野にまだ大きな改善の余地があったことを示しています。

初めての実装：エコーの変化に対する連続的最適化

最大の特長は、技術の進歩によって可能となった新しいアダプティブ自己最適化機能により、これまでの手作業による静的なエコーキャンセル機構の設定を補完できることです。新しいR&S®smartEC機能は、現在のエコー状況を解析し、ある時点での最適なエコーキャンセル設定を自動的に判定します。この作業が継続的に行われます。これにより、常にその時点の状況での最高の信号品質が得られます。重大なエコーが発生していない場合は、エコーキャンセルは不要であり、ギャップファイラーは信号品質

図1：R&S®TLU9 ギャップファイラーは、エコーキャンセルと信号品質の新しい基準を打ち立てます。



ドブラーエコーのキャンセル

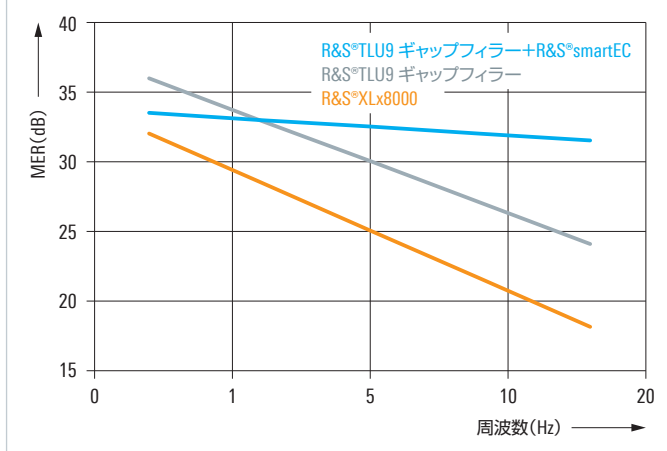


図3：ドブラーエコー：R&S®TLU9 ギャップフィルターは、前モデルのR&S®XL8000に比べて全般的に性能が改善されています。R&S®smartECを使用すると、最適なエコーキャンセルによる優れた信号品質を常に継続的に実現できます。

の最大化を目的として動作します。一方、一時的なエコーが発生した場合には、R&S®TLU9 ギャップフィルターがただちに対策を取ることで、カバレッジの中断を防ぐことができます。

データを見れば一目瞭然で、R&S®TLU9 ギャップフィルターを使用すれば、R&S®smartECオプションが不要な静的なエコー状況であっても、常に高い信号品質が得られます。この方法では、25 dBまでのエコーレベルが最も確実にキャンセルされます* (図2)。もう1つの重要な特長は入力感度で、-80 dBmとさきわめて高くなっています。エコーウィンドウは17 μ sで、R&S®XL8000に比べて3倍広がっています。これは、キャンセル機構が遠くの反射源からのエコーも処理できることを示します。急峻なエッジのフィルターにより、隣接チャンネルの信号が ± 4.115 MHzで80 dB減衰されるので、他のDTV信号やモバイルネットワーク信号による影響をほとんどなくすることができます。

ただし、最終的に重要なことは1つです。すなわち、測定可能な目に見える信号品質です。品質指標の1つとして、変調誤差比(MER)があります。静的エコーの場合、R&S®TLU9 ギャップフィルターのMER値は、前モデルの製品に比べて最大7 dB、定評ある他社製品に比べても5 dB高くなっています(図2)。動的(ドブラー)エコーに対しては、さらにめざましい改善が見られます(図3)。この場合、ドブラー周波数が20 Hzの場合でも、安定して30 dBを超えるMER値が得られます。これは従来製品に比べて10 dB以上の改善です。

* ギャップフィルターは遠方の地上波トランスミッターから入力信号を受け取り、パワーを大幅に増幅してローカル環境に再放送します。これによって生じるエコーのレベルは、通常の信号の受信レベルを大きく超える可能性があります。

ギャップフィルターの採用に関する不安を一掃

ネットワークプロバイダーは、顧客である番組提供者に対して、視聴者に高品質の放送を届けるという義務を負っています。一方で、高いネットワーク品質を達成し、維持するために必要な実際のコストは、できる限り低くする必要があります。これらすべての問題に対処するには、ギャップフィルターがあらゆる動作条件で高品質の信号を供給し、必要なレベルの予測可能性を維持しながら、運用コストを低く維持できることが重要です。理想的なギャップフィルターの条件を一言で言えば、設置したら後は放っておけることです。R&S®TLU9 ギャップフィルターは、この条件を満たす初めての製品です。大型トランスミッターの場合と同様に、ネットワークプロバイダーは、配備時の予測可能性に信頼を持つことができます。優れた特性と新しいR&S®smartEC機能により、メンテナンスなしに必要なカバレッジを維持し、どのような環境でも優れた信号品質を継続的に実現できます。もう1つの特長は、エネルギー効率の高さです。これにより、エネルギーコストを最大25 %節約することができます。

テクノロジーの世界では、R&S®TLU9 ギャップフィルターのようなイノベーションにぴったりの呼び方があります。それが「ゲームチェンジャー」です。

Alexandra Stückler-Wede, Maurice Uhlmann

新しいR&S®TLU9 ギャップフィルターは、お客様の困難な課題の多くを解決します。

例：高い運用コスト

原因

- 広範囲に広がった多数のギャップフィルター設置場所
- 変化するエコー特性

R&S®TLU9 ギャップフィルターの特長

- R&S®smartECによる継続的な自己最適化

お客様にとっての利点

- 技術者による作業の削減
- 運用コストの大幅な削減

例：隣接チャンネルからの干渉

原因

- 信号レベルが高い隣接チャンネル
- LTE干渉
- 隣接チャンネルからの動的な干渉

R&S®TLU9 ギャップフィルターの特長

- 信号処理のさきわめて早いステージに組み込まれた入力フィルター(A/Dコンバーターと利得制御の前)
- 直接隣接チャンネルの80 dBの抑圧

お客様にとっての利点

- 隣接チャンネルおよびチャンネル外からの影響に対する信頼性の大幅な向上
- 信号品質の改善
- 外部入力フィルターによる追加コストがない

タワーにパワーを

世界で最も強力な半導体TVトランスミッターは、
ニューヨークのOne World Trade Center(1ワールド
トレードセンター)にあります。



移動体通信に使用する周波数の逼迫を受けて、米国の規制機関FCCは、近年VHF/UHFスペクトラムの再割り当てのプロセスを進めてきました。このスペクトラム再編成の目的は、これまでテレビ放送に用いられてきた608 MHzより上のUHFバンドを解放し、影響を受けるテレビ局をこれより下のUHFおよびVHF領域に移動して、空いた周波数をモバイル・ネットワーク・プロバイダーに割り当てることにあります。このプロセスでは、何段階かの自発的な周波数オークションの後で、規制措置が行われます。この条件の変化に応じて、営業を完全に終了するテレビ局は少数です。約1,000の放送局がスペクトラムの移動を選択しましたが、これらの局はトランスミッターを改修するか、新しい機器を購入する必要があります。移行計画は10段階からなり、2020年7月までかかります。ス

ペクトラム干渉をできるだけ小さく抑えるため、FCCが緻密な調整を行っています。この変更が最初に実施される地域の1つが、ニューヨークです。この地域で営業している地上波放送局のうち6社が、新しいR&S®THU9evo トランスミッターを導入しました。これらのトランスミッターは、この都市で最もステータスの高い場所である1ワールドトレードセンター（1WTC）の90階（ビル全体は104階）に置かれています。最初に放送を開始したのは、Telemundoテレビネットワークのトランスミッターで、2017年6月のことでした。106 kWの送信パワーを持つこのトランスミッターは、これまでに製造された最も強力な半導体テレビトランスミッターです。ローデシュワルツのトランスミッターの利点が認められて、これ以外にも全国のさまざまな地域の放送局から注文をいただいています。



© f11photo / adobe.com



DOCSIS 3.1ケーブルネットワークの詳細

DOCSIS 3.1拡張規格は、ケーブルTVネットワークを通じて、高速インターネットを含む総合的なマルチメディアパッケージの提供を可能にする規格です。これにより、通信事業者や携帯電話事業者との競争が可能になります。新しいR&S® DSA リアルタイムDOCSISアナライザを使えば、伝送経路全体の包括的な解析が可能になります。

DOCSIS 3.1：性能の飛躍的向上

DOCSIS® (Data Over Cable Service Interface Specification) は、1990年代半ばに開発された技術で、HFC (Hybrid Fiber Coaxial) ケーブルTVネットワークを通じたインターネットデータの伝送を可能にするものです。バージョン3.0までは、帯域幅6 MHzまたは8 MHzのシングルキャリア信号と最大256QAMの変調が標準でしたが、DOCSIS 3.1 [1、2] で、マルチキャリア信号とOFDM変調の導入という大きな進化が成し遂げられました。最大192 MHzの帯域幅と、16QAMから4096QAMまでのコンスタレーションが使用可能です。これにより、ダウンストリーム速度が最高10 Gbit/sと、性能レベルが飛躍的に向上し、UHD TVなどの

データ量の多いアプリケーションの利用が現実的になりました。DOCSIS 3.1のもう一つの新機能は、モデムとケーブルモデム終端システム (CMTS) の間の伝送経路の品質に応じて、ネットワークポロジの個々の領域に異なる信号構成を割り当てられることです。

このテクノロジーの進歩により、ケーブル・ネットワーク・プロバイダーやケーブル・ネットワーク・コンポーネントのメーカーには、新しい計測機器が必要になります。DOCSIS 3.1の高いデータレートを実現するには、伝送経路のすべての部分が、実証された高品質で協調して動作する必要があるからです。

図1：R&S® DSA DOCSIS シグナル・アナライザでは、DOCSIS 3.0、EuroDOCSIS 3.0、DOCSIS 3.1信号の高速で正確な解析が可能です。



HFCケーブルTVネットワークによる高速インターネット

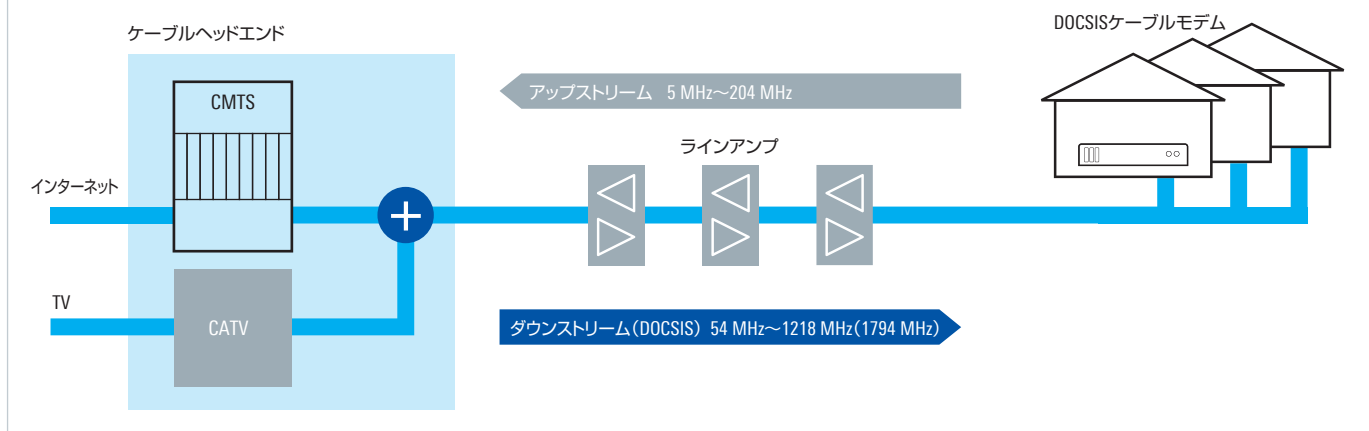


図2：DOCSIS3.1は、ケーブルヘッドエンドとケーブルモデムの間の双方向伝送をサポートします。

そのために開発されたのが、R&S®DSA DOCSISシグナル・アナライザ (図1) です。これには、アップストリームレシーバーの有無により、2つのバージョンがあります。

新しい要件に応えるトップクラスのユーザーインターフェース方式

DOCSIS3.1測定から生じる多数の信号パラメータと高度なグラフを見やすく表示するには、大きい画面が必要です。R&S®DSAは10.1インチのタッチスクリーンを備え、機械的コントロールはありません。大きいアイコンにより、人間工学に基づく快適な操作が可能です。測定結果は、構造化された形式でわかりやすく表示されます。

スループットの最大化には最高の信号品質が必要

DOCSIS規格では、CMTSとモデムの間の双方向のデータ伝送を規定しています。ダウンストリーム信号 (モデムに向かう方向) とアップストリーム信号 (CMTSに向かう方向) は、異なる周波数バンドで同時に送信されます (図2)。ダウンストリームとアップストリームの包括的なテスト用に、R&S®DSA (バージョン.03) には、信号を50 dB以上のMERで解析できる2台の独立したRFレシーバーが装備されています。ほんの数年前には、このような高品質の信号と、そのような信号の解析は、実際上不可能でした。しかし、CMTS出力の信号品質を高めることは、伝送系路上にカスケード状に存在するラインアンプによる不可避の損失に対して十分なマージンを確保するために不可欠です。2台のRFレシーバーは固有ノイズが小さいため、低レベルの信号を大きな固有誤差なしで解析することもできます。

R&S®DSAの主な特長

- 10.1インチカラー TFT LCDタッチスクリーン
- ダウンストリームでのRF周波数レンジ: 47 MHz ~ 1794 MHz
- アップストリームでのRF周波数レンジ: 5 MHz ~ 204 MHz
- 最大入力レベル: 67 dBmV
- DOCSIS3.1での600 MHzまでの固有MER: ≥ 50 dB
- DOCSIS3.0、J.83での固有MER: 59 dB
- 質量: 7.5 kg

リアルタイム信号処理によりあらゆる現象を検出

両方の伝送方向で最大のデータレートを実現するには、CMTSのパワー出力段、ラインアンプ、光電気コンバーター、ケーブルモデムといったすべてのコンポーネントが、仕様に定められた狭い範囲内で動作する必要があります。ネットワーク上のすべてのポイントで、コンポーネントをオーバードライブせずに十分なS/N比を確保すると同時に、安全マージンをできるだけ小さく維持する必要があります。

安全マージンはネットワークプロバイダーにとって、追加コストの要因となるからです。それでも、マージンをなくすことはできません。ケーブルネットワークのほとんどの部分は外部からの干渉にさらされるからです。干渉の原因としては、地上波放送局からの放射性エミッション、無線/移動体通信サービス、RFI抑圧が不十分な家庭用機器などが挙げられます。

外部からの影響や仕様の範囲外で動作するコンポーネントが存在すると、干渉が発生して性能が低下する可能性があります。このような現象は、短時間で間欠的に起きることが多いのです。このような干渉を高い信頼性で検出するには、アナライザにリアルタイム信号処理が必要です。

DOCSIS 3.1では、プロアクティブ・ネットワーク・メンテナンス (PNM) が採用されています。これは、モデムのチップセットによってリモート解析用の測定パラメータのセットが提供される機能です。ただし実際には、送信される測定結果は比較的許容範囲が広く、性能に関しては制限されています。

多くのDOCSIS測定機器がこれらのケーブル・モデム・チップセットを利用しているのとは異なり、R&S®DSAは、高速で高性能のFPGAを使用して復調と信号解析を行うことで、上記の問題を回避しています。サポートする規格はDOCSIS 3.1で、オプションでDOCSIS 3.0規格 (R&S®DSA-K1501) EuroDOCSIS 3.0規格、DVB-CおよびJ.83/A/B/CデジタルTV規格もサポートします。

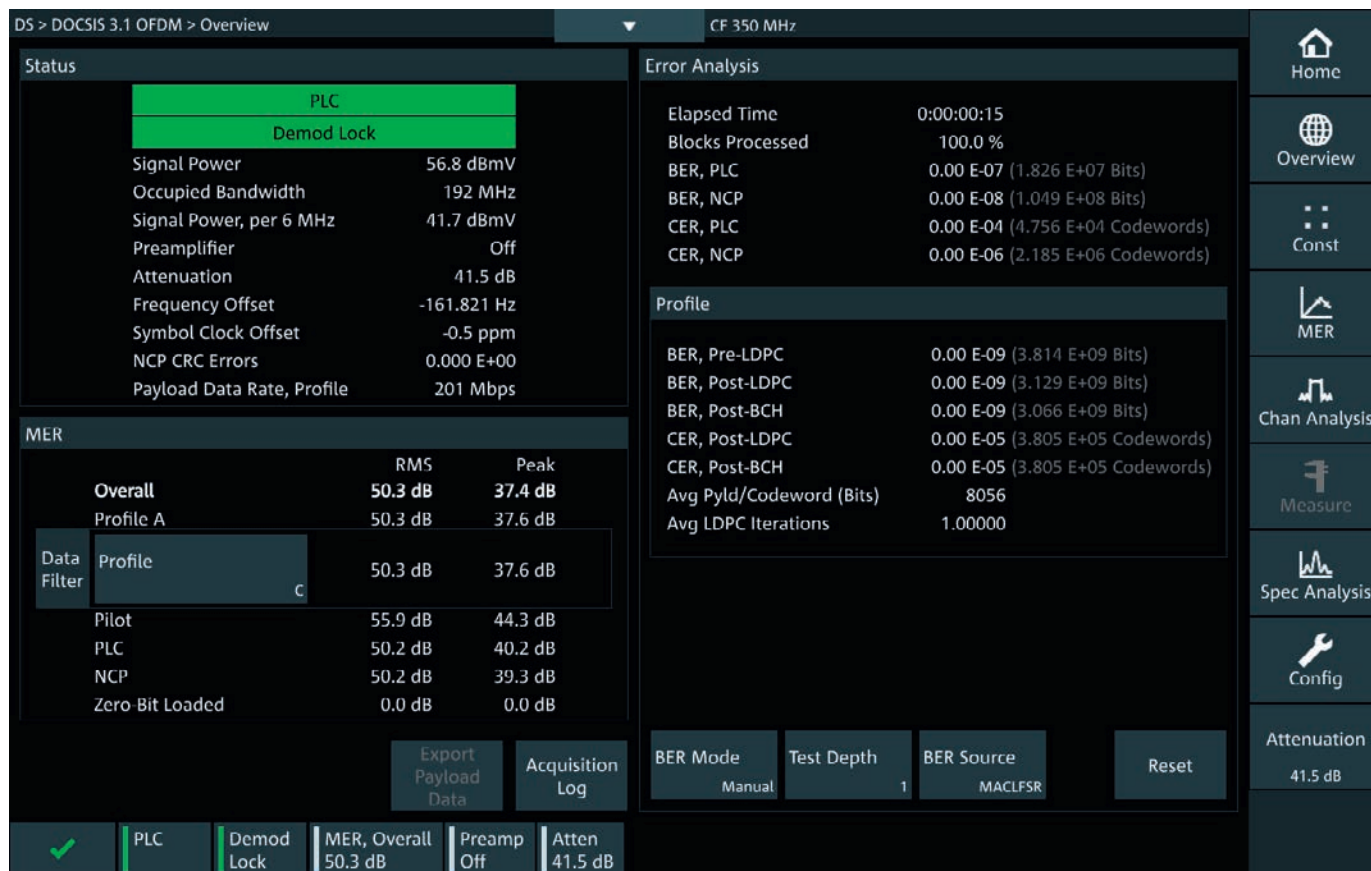
R&S®DSAの高い処理速度により、高速な信号解析と、測定値およびトレースの高い更新レートが得られます。このような特長は、コードワードおよびビットレベルでの信頼性の高い詳細なエラー解析や、短時間の間欠的なエラーの検出に不可欠です。この点で、R&S®DSAは、コードワードレベルの解析に制限されているチップセットベースの測定器よりも優れています。PNM仕様では、ビットレベルの解析が定義されていないからです。

物理伝送レベルの解析

DOCSISデータ伝送の品質は、主にケーブルTVネットワークの条件に依存します。一般的なエラーの原因としては、コネクタの障害、増幅器や光電気コンバーターの発振またはオーバードライブ、不十分なシールド、不正確な信号レベルなどが挙げられます。

このようなエラーの原因を検出するため、R&S®DSAには、ダウンストリームおよびアップストリーム用の測定セットが用意されており (R&S®DSA-K1500)、明確に構造化されたメニューベースのユー

図3：DOCSIS 3.1ダウンストリームの主要なパラメータを示す概要ウィンドウ。



ザーインタフェースによって高い信頼性で選択できます。これにより、伝送経路とそのコンポーネントの品質に関して、確実な情報が得られます。

概要ウィンドウ (図3) には、信号ステータスと変調品質 (MERで定量化) に関する主要なデータと、伝送エラーに関する詳細な解析のセクションが表示されます。異常が発見された場合、さらに詳細な測定 (エコーパターン、振幅、群遅延、位相、コンスタレーション) によって役に立つ手がかりが得られます。DOCSIS 3.1信号に対しては、MER対サブキャリア測定により、チャンネル内の個別の干渉信号を検出できます (図4)。

動作モードには、FFTベースのスペクトラム解析も含まれます。マーカー、マスク、周波数/レベル基準ラインを簡単に表示して、タッチ操作で変更できるので、周波数スペクトラム全体を容易に観察できます。

ラボでも製造でも活躍

R&S®DSAは、そのRF特性と豊富な解析機能により、リアルタイム機能が必要とされる製造環境やラボ環境にも最適です。DOCSIS 3.1で定義されたオプションの拡張にも対応しています。例えば、内蔵のRFレシーバーは1794 MHzまでのダウンストリーム周波数をカバーし、16384QAMまでのコンスタレーションを解析できます。R&S®SFD DOCSIS信号発生器との組み合わせで、戻りチャンネル経路の測定やケーブルモデムのRF特性の確認といったその他の動作モードが計画されています。

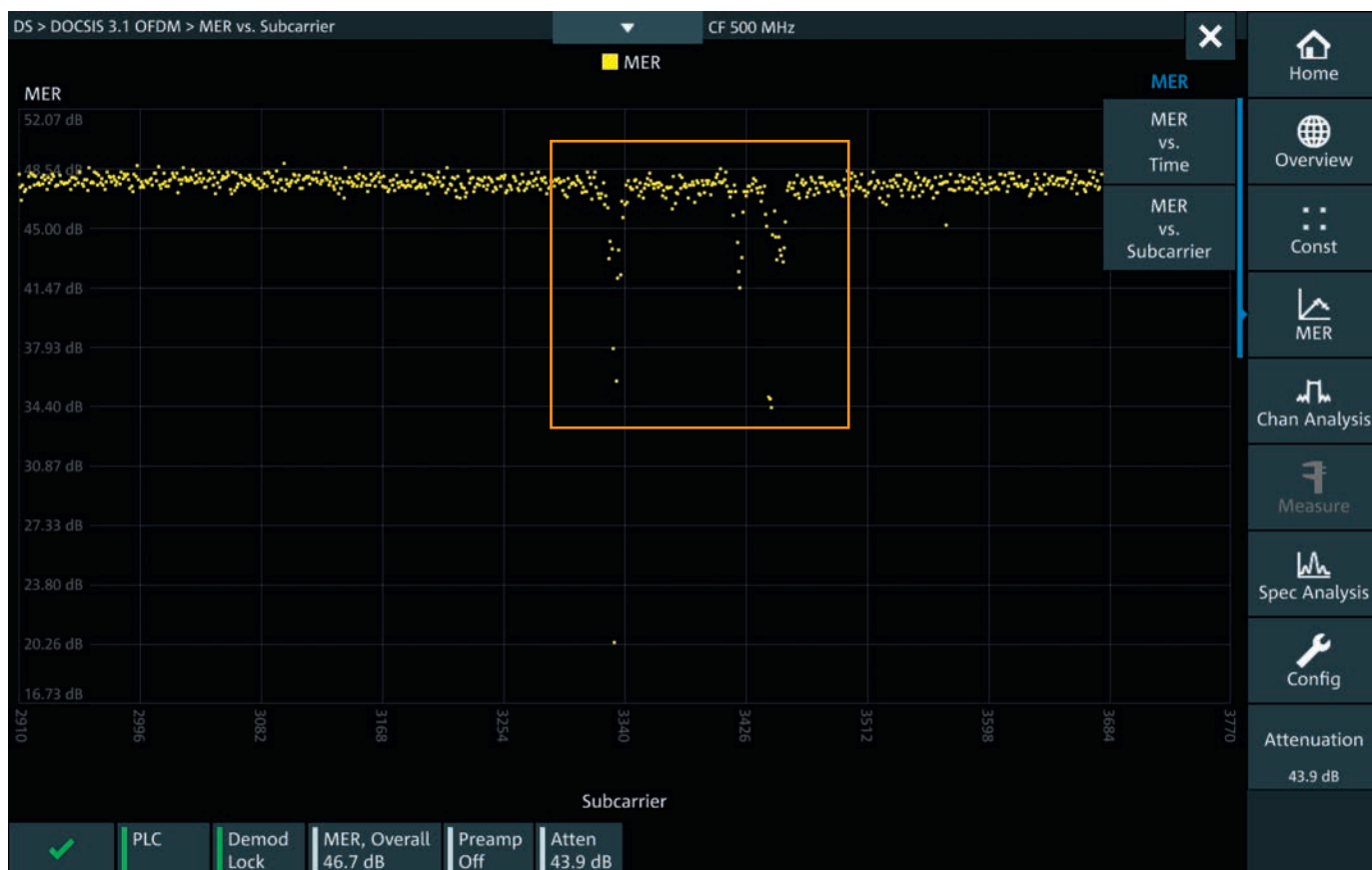
こういった特長により、R&S®DSAを使えば投資を迅速に回収できます。

Werner Dürport

参考資料

- [1] DOCSIS 3.1 – the game changer for cable TV and Internet. NEWS (2015) No. 213, pp. 40–45
- [2] DOCSIS 3.1. ローデ・シュワルツのアプリケーションノート (ダウンロード検索語: 7MH89)

図4：個別の干渉信号 (オレンジ色のボックス) の検出のためのMER対サブキャリア測定。



真空管より高性能：衛星アップリンク用の半導体増幅器

真空管か半導体か？この問いは、KuバンドのRFパワーアンプに関してはもう無意味になりました。新しい増幅器モデルは、両方の技術の利点を兼ね備えています。

衛星リンクの特長は、地上のインフラから独立していることと、大陸間の通信が可能なこと。海上での無線リンクなど、現実的な代替手段が存在しないアプリケーションもあります。それ以外にも、衛星リンクが非常に有効なアプリケーションが多数存在します。このため、衛星サービスに対する需要は増加し続けています。

衛星通信では、信号はアップリンク局（地上局）から衛星に送信され（図1）、別の周波数への変換後に再送信されて、地上または他の衛星で受信されます。

さまざまな周波数バンドが、国際的に衛星通信に割り当てられています。現在、通信の約25 %が12 GHzから18 GHzまでのKuバンドで行われています。衛星伝送リンクの可用性や信号品質といったQoSパラメー

衛星リンクの例(DTH)

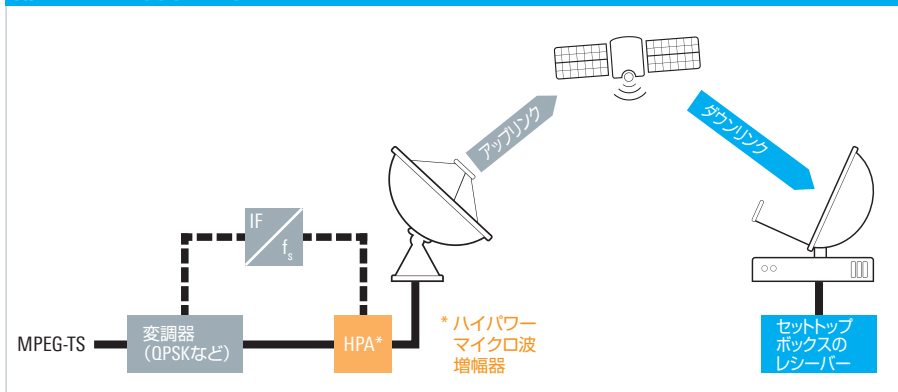


図1：例えば、搬送波の消費電力が大きくて帯域幅の消費が小さい場合、搬送波のスペクトル効率を多少下げること、一定のデータレートでの帯域幅を増やし、送信パワーを下げることができます。

タの要件は通常きわめて厳しいため、伝送システムは非常に高い信頼性を持つ必要があります。もちろん、これはRFパワーアンプにも当てはまります。

真空管か半導体か？

半導体テクノロジーの進歩により、これまで真空管増幅器（主に進行波管増幅器、略してTWTA）が主体だったアプリケーション

図2：R&S®PKU100の屋内用モデル（400 W出力パワー）。



ンに、半導体増幅器が用いられる例が増えました。現時点では、Kuバンドの高いパワーレベルの発生には、まだ真空管増幅器が広く用いられています。従来の半導体増幅器に比べると、効率の高さ、すなわち消費電力の少なさが特長です。

ただし、TWTAにも欠点があります。RF性能を安定させるためには真空管のウォームアップが必要であり、これには数分間がかかります。このため、メインの増幅器の故障に備えて用意するバックアップシステムは、即座に機能を引き継げるように、常にホットスタンバイ状態で動作している必要があります。これには、かなりのエネルギーコストがかかります。

真空管が故障すると、動作が完全に停止します。増幅器はRFパワーを発生しなくなり、真空管の交換には費用がかかります。さらに、真空管テクノロジーは比較的不安定です。動作モード(周波数など)が変化すると、信号品質に望ましくない影響が生じる可能性があります。周囲温度の変動も、出力パワーに影響します。

真空管増幅器の雑音指数の高さも、信号品質にとって不利です。高品質のパワー出力を得るには、指定された動作点でリニアライザーを使用して非線形歪みを補正する

必要があります。出力パワーを調整した場合、リニアライザーの再最適化が必要になります。真空管増幅器は、メンテナンスにも手間がかかります。動作電圧が高いため、熟練した技術者が作業を行う必要があります。

半導体増幅器には、さまざまな利点があります。現在主に用いられているのは、窒化ガリウム(GaN) およびガリウム砒素(GaAs) トランジスタです。その最大の利点は、故障に対する安全性が高いことです。複数のトランジスタからのパワーが、完全にアイソレートされた結合回路を通じて結合されることで全出力パワーが得られるため、どれかのトランジスタが故障した場合でも、パワーが低下するだけで動作は継続できます。トランジスタにもエレクトロマイグレーションによる寿命はありますが、故障までの時間は一般的に100年以上です。

半導体パワーアンプは即座に動作を開始でき、ウォームアップ時間が不要です。温度補正された制御回路により、広い温度範囲で出力パワーを一定(± 0.1 dB)に保つことができます。

従来の半導体パワーアンプの弱点は、質量とサイズが大きいことです。これは、トランジスタの相互接続に必要なコンバイナー

が原因です。このため、出力パワーが同等の真空管増幅器に比べて、かなり大きく、重くなるのが普通です。さらに、消費電力も現時点ではかなり大きくなります。

R&S®PKU100 : 2つの技術の利点を統合

R&S®PKU100 ハイパワー RF増幅器の開発目標は、両方の技術の利点を統合し、かつ弱点を軽減することでした。新しい増幅器は、真空管増幅器のコンパクトさやその他の利点と、半導体テクノロジーの特長を兼ね備えています。高い出力パワーを得るために、最終段は相互接続されたマイクロ波集積回路(MIC)を使用して構築されています。1つのMICが故障しても、R&S®PKU100は動作を継続できます。パワーは低下しますが、それでも多くの場合にアップリンクを維持するのに十分です。

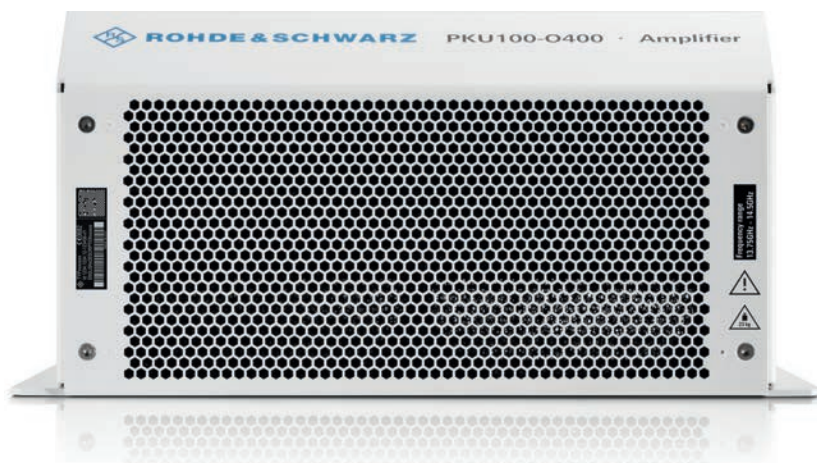
増幅器には屋内用と屋外用があり、ピークパワーは400 Wまたは750 Wです。周波数レンジとしては、12.75 GHz ~ 13.25 GHzと13.75 GHz ~ 14.5 GHzが使用可能です(図2、3)。屋内用バージョンは高さわずか3 HUで、400 Wモデルの質量はわずか18 kgです。この形状は半導体増幅器としては画期的で、同じ出力パワーの真空管増幅器に匹敵します。効率に関しても、R&S®PKU100はTWTAにかなり近づいており、ピークパワーを基準として20 %以上の値を示します。

RF出力信号の品質は、きわめて重要です。これは主に、増幅器のリニアリティによって決まります。ここでは、バンド内とバンド外の信号品質を区別します(図4)。

バンド内の信号品質

増幅器の出力信号は、変調誤差比(MER)などのパラメータで定義される一定レベルの品質を備えている必要があります。MERは、デジタル無線伝送中に必要信号の品質を低下させるすべての要因の合計を表します。これには、バンド内のスペクトル成分を生じるノイズとノンリニア歪みが含まれます。送信信号のMERが優れているほど、レシーバーでエラーなしに信号をデコード

図3 : R&S®PKU100の屋外用モデル(400 W出力パワー)。



できる許容S/N比は低くなります。バンド内の信号品質を評価するために用いられるもう一つのパラメータは、エラーベクトル振幅 (EVM) です。EVMは、送信シンボルの理想的なコンスタレーションからのずれを表します。EVMが小さいほど、信号品質は高くなります。

バンド外の信号品質

隣接チャンネルの信号の信号純度は、増幅器を選択する際のもう一つの重要な要因です。このためには、必要信号のショルダー減衰が適切な基準です。この値が大きいほど、隣接チャンネルに影響する干渉は小さくなります。衛星アップリンクに用いられる増幅器では、3次バンド外相互変調成分が -25 dBcを超えないことが一般的に要求されます。このリミットを満たすDVB-S QPSK信号は、基本的にスペクトラムマスクに適合します。ただし、衛星プロバイダーによってはもっと厳しい要件を設けている場合もあります。

高次の変調方式 (64APSKなど) を定義しているDVB-S2などの新しいTV規格では、高い信号品質が必要となります。

アダプティブリニアリゼーションによる最高品質の信号

R&S®PKU100では、さらに高品質の出力信号を得るために、自動アダプティブリニアリゼーションが利用できます。入力信号を変更して、増幅器でのノンリニアリティーの最適な補正を可能にすることで、ショルダー減衰を大幅に高めることができます (図5)。ネットワークプロバイダーによって一般的に要求されている値は -35 dB程度ですが、R&S®PKU100でこのオプションを使用すればこの値を容易に達成できます。従来の増幅器では、線形領域での動作を保証し、必要なショルダー減衰を得るためには、出力パワーを大幅に下げる必要がありました。

リニアリゼーションによって、MERも改善されます。リニアリゼーションなしで達成

できる値は25 dBですが、リニアリゼーションを使用すれば35 dB近くまで上がります。これはアダプティブリニアリゼーションの付加的な利点であり、アップリンクの信号

品質の大幅な向上につながります。これにより、伝送経路のパワーの余裕をさらに増やすことができます。出力パワーまたは周波数を変更した場合は、リニアリゼーション

代表的なDVB-S2信号のスペクトラムマスク

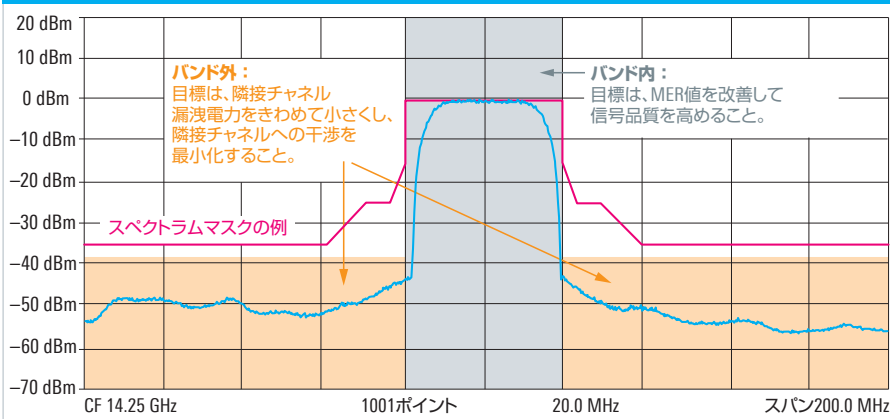
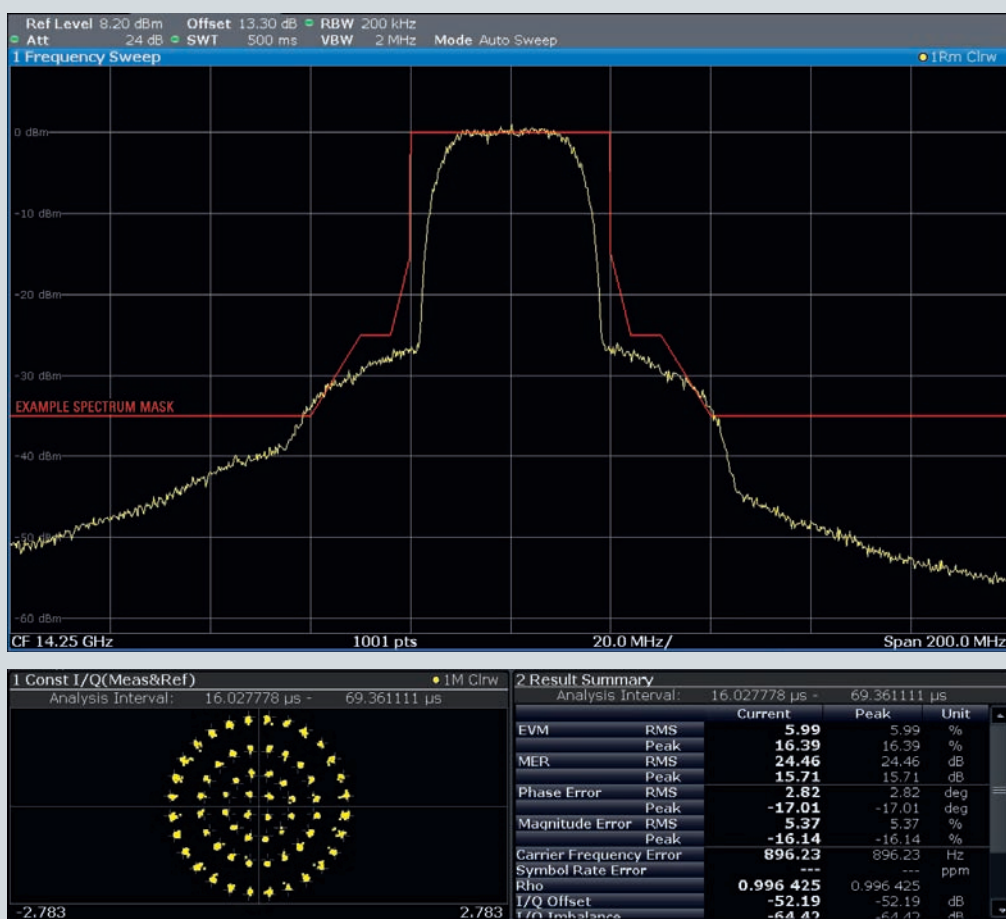


図4: ショルダー減衰が大きいほど、干渉による隣接チャンネルへの影響が少なくなります。

図5: アダプティブリニアリゼーションにより、信号品質が向上します。64APSK変調のスペクトラムとEVM (またはMER)、リニアリゼーションなし (左) とありの場合。



ンは自動的に適合されます。このオプションは、利用可能な信号帯域幅が100 MHz未満の場合に適しています。

統合されたブロックアップ コンバーター

Kuバンドでは、周波数が高いため、ケーブル損失がかなり大きくなります。このため、一般的に、信号は損失が小さいLバンドで

増幅器に供給されます。R&S®PKU100ファミリ-のすべての増幅器は、これに対応して内蔵ブロックアップコンバーター（BUC）をオプションで用意しています。

冗長性と便利さ

電源の冗長性を利用するため、増幅器には2系統の電力回路を接続できます。どちらかの電力回路または電源ユニットが故障しても、アップリンクは影響されません。オプションのDC電源（48 V）は、モバイルアプリケーションや、バックアップ電源の一時的なつなぎとして充電式電池を使用しているアプリケーションで使用できます。

増幅器の操作は、わかりやすいウェブインタフェース（図6）またはデバイスのユーザーインタフェースを通じて行います。上位レベルの管理システムに容易に統合できるように、SNMPインタフェースが用意されており、LAN、シリアルRS-232/485インタフェース、またはフローティング・パラレル・インタフェースを通じてアクセスできます。

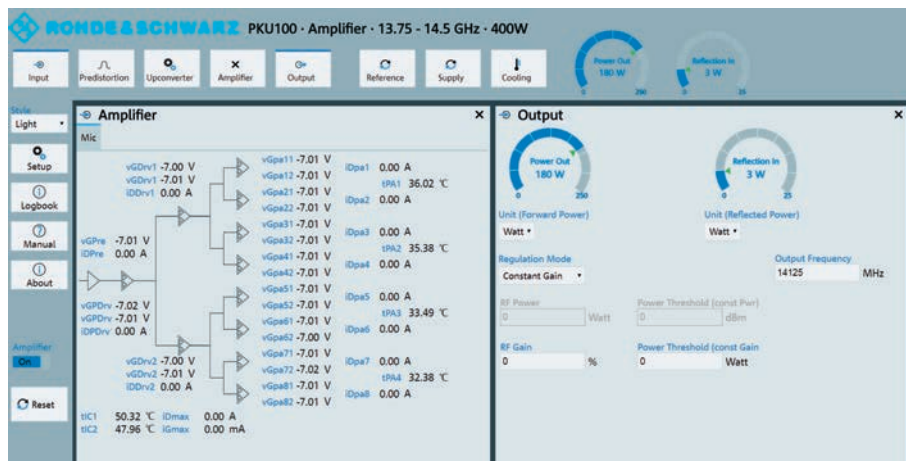
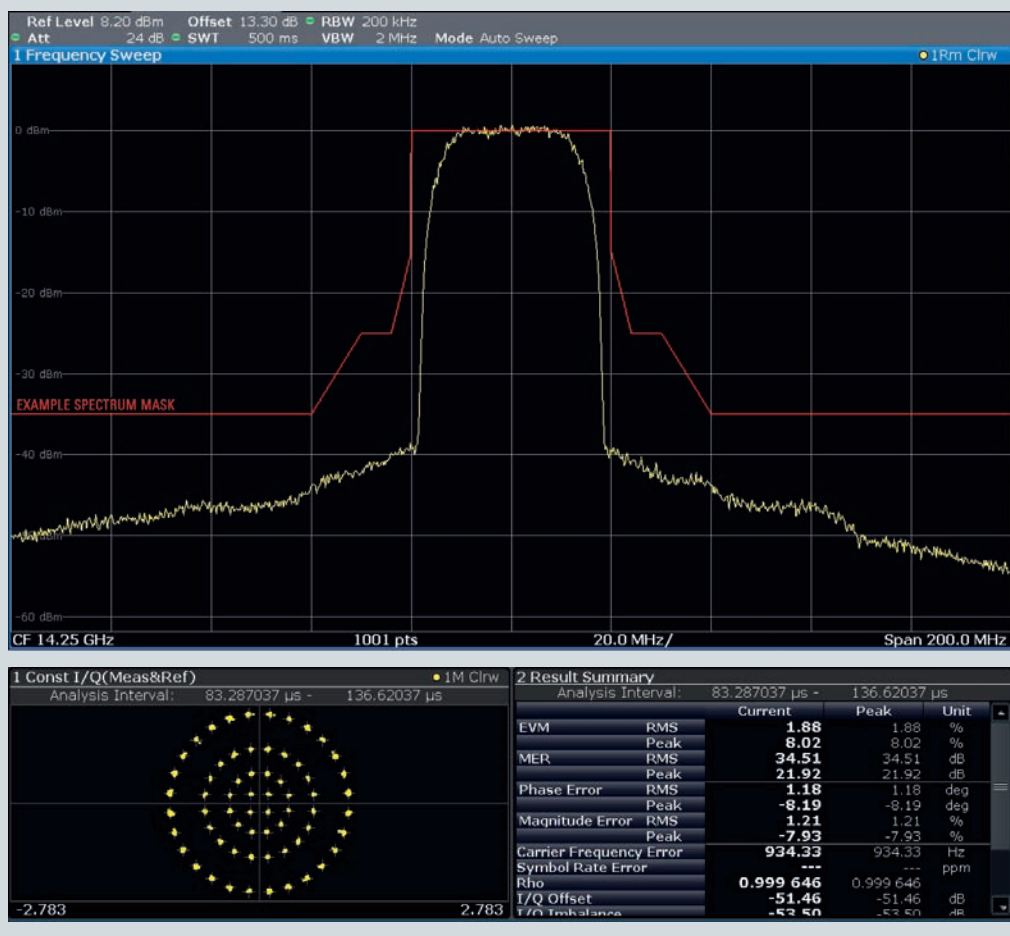


図6：R&S®PKU100は、任意のウェブブラウザから操作できます。

まとめ

R&S®PKU100ファミリ-のKuバンド用RFパワーアンプは、真空管増幅器と半導体増幅器の利点を兼ね備えています。小型軽量で、屋内用と屋外用のモデルがあります。自動アダプティブリニアリゼーションを使用することで、きわめて高品質の信号を発生でき、DVB-S2規格で定義された高次変調方式での使用に最適です。

Dr. Wolfram Titze, Christian Baier,
Lothar Schenk



動物の インターネット

科学者は、国際宇宙ステーション(ISS)を利用して、世界中の渡り鳥やその他の動物を監視しようとしています。ICARUS は、その目的のための「動物のインターネット」を実現するものです。無線テクノロジーは、ローデ・シュワルツの子会社である INRADIOS が提供しています。

プロジェクト

それは、地球上で最も大規模な集団移動です。毎年秋になると、何十億羽もの渡り鳥が、北半球から南半球へと渡っていくのです。しかし、その移動経路や移動中の行動の調査は、適切な手段がないために困難でした。宇宙に置かれたICARUS観測システムが、その状況を変えようとしています。これにより、個々の動物がたどる経路をGPSの精度で追跡できるようになるのです。それだけではありません。動物の消費エネルギーや加速度に関する情報を利用することで、その生活史、行動、コミュニティに関する理解を得ることができるのです。

ICARUSは、Max Planck Society、ドイツ航空宇宙センター(DLR)、およびロシアの国営宇宙企業Roscosmosの共同プロジェクトです。このプロジェクトは、ラードルフツェル(ドイツ)にあるMax Planck Institute for Ornithology (MPIO) が開始し、指揮を執っています。

MPIOでは、これを行動研究の新時代と呼んでいます。このビッグデータプロジェクトでは、鳥以外にも、コウモリ、カメ、その他さまざまな種の行動を観測する計画であり、鳥類学者だけが関心を持つ研究ではありません。これはグローバルなネットワークの形成

を目指しており、いわば動物のインターネットと言えます。可能性のある用途としては、絶滅の危険がある野生動物の保護から、イナゴ被害の予防まで、さまざまなものが考えられます。動物の行動から、自然災害の予兆をつかむことすら可能と言われています。動物に取り付けられた超小型トランスミッターからのデータは、国際宇宙ステーション (ISS) ¹に搭載されたコンピューターで処理され、無線リンクを通じて地球に送信されます²。信号は、地上の移動または固定レシーバーで直接受信することもできます。



ICARUSは、世界で初めての衛星を使用したIoTシステムとなります。このテクノロジーは、遠隔地域にあるセンサのリモート監視についての新しい可能性を開きます。ドレスデンにあるローデ・シュワルツの子会社INRADIOSが、無線方式の実現、オンボードコンピュータのファームウェアの実装、動物に取り付けるトランスミッターの開発を担当しています。ローデ・シュワルツはまた、地上無線機の開発も担当しており、すべてのコンポーネントを製造しています。

ICARUSのオンボード機器は、2017年10月と2018年2月の2回の補給ミッションによってISSに運ばれました。FPGAボードのほかに、システムは3個の受信アンテナと1個の送信アンテナから構成されます。アンテナは2018年8月に設置予定で、送信エリアは進行方向の前方に当たる地球上の地域（および後方のわずかな延長部分）をカバーし、受信エリアは多少後方よりの狭い地域をカバーします（図4を参照）。

ISSの軌道はほぼ円形で、高度は350 km ~ 460 km（高度はこの範囲内で長期的にしか変化しません）、赤道に対する角度は51.6°です。ISSは、1日に16回地球を周回します。宇宙ステーションの軌道は、地球上を周回するたびに左に2,500 km移動します。24時間の間に、ICARUSのオンボードアンテナの受信エリアは、北緯58°と南緯58°の間の地表面の90 %以上をカバーします。

コンポーネント

センサデータ転送用の双方向衛星通信無線システム

INRADIOSは、動物に取り付けられたトランスミッター（タグと呼ばれます）から無線によってデータをISSに送信するための方法を、SpaceTech GmbHと協力して開発しました。チャンネルアクセス方法としては、CDMAといくつかのPSK変調モードの組み合わせが選ばれました。最大の課題は、ISSに搭載されたレシーバーが

処理する信号のパワーがきわめて小さいことでした。データレートが低い（アップリンクで約1800 bps）ことから、利用可能な容量を最大限に活用した効率的なエラー訂正方法を開発する必要がありました。これに関しては、DLRのInstitute for Communications and Navigation (ICN) の専門知識が役立ちました。

個々の動物からの信号（同時に送信されたものは、CDMAコード化によって識別さ

れます。レシーバーは、同時に到着した最大120個の信号を分離できます。1回の伝送の時間はわずか3秒程度なので、上空通過中のある時点での受信エリア（幅わずか100 km程度）内のさらに多くの動物からのデータ伝送を受信できる可能性があります。ただし、これを可能にするには、タグがすべて同時に送信を開始しないようにする必要があります（タグは、ISSがアクセス可能な時刻を秒単位で把握しています）。

ICARUSの概要

ICARUSの動作の仕組み

- 超小型のデータ処理センサおよび無線モジュール（タグ）による個々の動物の移動データの収集
- 毎日個別にアクセス可能
- データ圧縮と伝送管理を含むタグ上での予備データ処理
- 上空通過時のISSまたはLEO衛星への小さいデータパケットの送信（このためのタイムスロットは1つの軌道につきわずか15秒程度）
- サポートする軌道高度は350 km ~ 600 km
- センサデータの種類と量、および伝送の頻度は、各タグに対して個別に設定可能
- アダプティブ・スリープ・モードによるタグのエネルギー管理
- 地上受信局への代替伝送
- 120個の動物用送信機からの信号を軌道上のステーションで同時に受信可能
- 上空通過時に軌道上のステーションからメイン地上局に新規データをすべてまとめて送信
- 地上局からこのプロジェクト用のユーザー・データ・センターにデータを伝送（データセンターの運用はMPIOが出資した会社であるI-GOSが担当）
- 科学者ユーザーはwww.movebank.orgでデータにアクセス可能

ICARUSの任務と利点

動物集団の行動から、例えば環境条件とその変化に関する理解を得ることが可能：

- 未知の移動行動の発見
- 環境変化（生息環境の移動、砂漠化、氷の溶解など）の監視
- 生態系に関する理解の深化（受粉、伝染病管理）
- 感染症の管理（鳥インフルエンザ、口蹄疫、エボラ）
- 個々の動物を常時監視することによる絶滅危惧種の保護
- 群の異常な行動に基づく自然災害（洪水、火山噴火、地震）の高度な警告

伝送テクノロジー

- アップリンク
 - 周波数レンジ：401 MHz ~ 406 MHz（ICARUS用に許諾）
 - 帯域幅：1.5 MHz
 - 正味データレート：520 bps
 - 1回の上空通過時の伝送データ量：1784ビット
 - 同時受信可能な対象領域：約100 km（進行方向）×1200 km
- ダウンリンク
 - 周波数レンジ：467.5 MHz ~ 469.5 MHz（ICARUS用に許諾）
 - 帯域幅：50 kHz
 - 正味データレート：656 bps
 - 同時通信可能な対象領域：1200 km×1300 km
- チャンネルアクセス：CDMA
- 変調：何種類かのPSKモード

動物用トランスミッター（タグ）

- 質量：5 g未満
- 体積：約2 cm³
- アンテナ長さ：約150 mm
- センサ：GPS、磁界（コンパス）、加速度、温度、湿度、圧力、電気伝導率（塩分測定用）
- データストレージ：microSD（4 Gビット）
- プロセッサ：ハードウェアレベルでプログラミング可能なマイクロコントローラー
- バッテリー容量：70 mAh
- 太陽電池面積：約2 cm²
- 送信パワー：約6 mW

このためには、乱数を使って受信タイムスロット内の送信時刻を割り当てます。

ISSに搭載されたコンピューターは、個々のタグへのコマンドをダウンリンクで送信します。すべてのタグはIDコードによって一意に識別され、アドレス指定されます。これにより、ICARUSのユーザーは、個別の動作パターンをタグに送信したり（センサーデータの記録の種類と頻度など）、動物をグループにまとめたりすることができます。ダウンリンクの656 bpsという正味データレートは、高度な伝送システムとしては非常に低い値です。これは許可された帯域が非常に狭いことが原因ですが、ICARUSの用途には十分です。タグ構成の変更はまれにしか行われず、時間は重要ではないので、データがその後のいずれかの上空通過の際にしか提供できないとしても問題にはなりません。

宇宙ステーションのコンピューターの信号処理ボード

信号処理用のFPGAボードは、ISSのロシアモジュールに搭載されています。デジタル信号処理のアルゴリズムが、INRADIOSによってXilinxのFPGAプラットフォームに実装されました。このプラットフォームは、基本的に2個のVirtex 5 FPGAから構成されます。ISSとタグの間の無線チャンネルは、一般的な無線チャンネルに似ています。直接の見通し線信号成分と、広範囲に散乱した成分（見通し外）が伝送され、その組み合わせによって図1に示すような時間変動する（高速フェージング）信号レベルが形成されます。ISSのオンボードコンピューターとタグの復調器は、各タグのチャンネル条件を個別にアダプティブにイコライズすることで、強い動的挙動を示す無線チャンネルでも受信を可能にします。

動物用トランスミッター

INRADIOSが開発した動物用トランスミッター/レシーバーは、ローデ・シュワルツのメミンゲン工場で製造されています。これは、現在の製造技術の限界に挑む野心的な試みです。アンテナ、筐体、プロセッサ、メモリ、無線モジュール、センサ、太陽電池、バッテリー、埋め込み用樹脂を含むタグの

図1：タグとISSの間の無線リンクにはフェージングが生じるので、信号処理で考慮する必要があります。

ISSへのICARUS伝送チャンネル

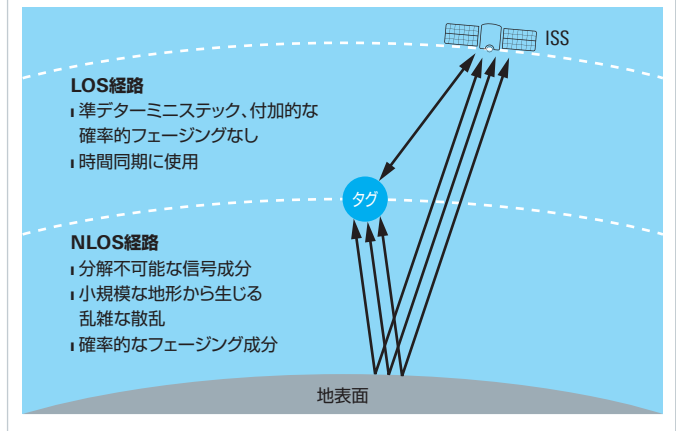


図2：クロウタドリやそれより大きい鳥なら、タグを付けても日常の活動の邪魔になりません。タグの最終バージョン(図3)はこの初期プロトタイプよりもさらに小型化されています。



© MaxCine

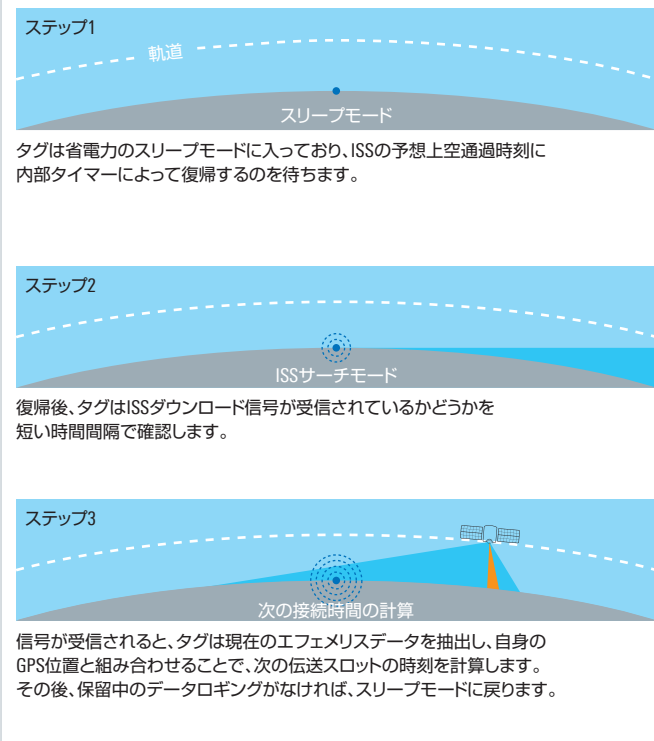
図3：ICARUSタグ（ここに示すのはほぼ量産可能なプロトタイプで、実物大）は、Max Planck Institute for OrnithologyとI-GOSが共同で開発しました。これは自律的に動作するマルチセンサデバイスで、無線モジュールを内蔵しています（センサについては左の概要を参照）。タグは、ISSや地上基地局と通信します。

全質量は、5グラムを超えてはならないからです（図2、3）。クロウタドリのような比較的小さな鳥でも、この質量であれば邪魔にならず、行動に影響を与えることもありません。

タグが限定されたリソースを無駄に消費しないように、ISSへのデータ伝送は、ステー



ISS軌道の更新



センサデータの伝送

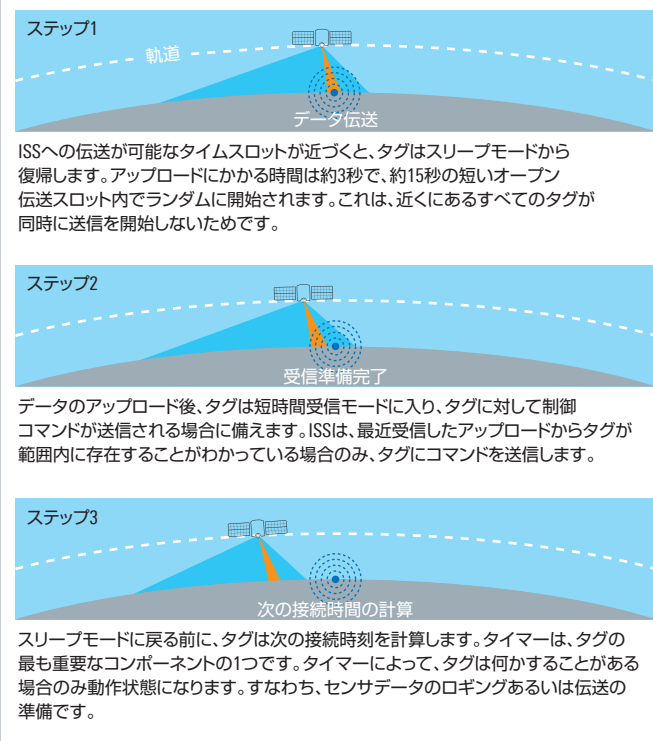


図4: ISSとタグの間のデータ伝送は、短時間のタイムスロット内で行われます。

ションがタグの上空を通過している短時間のタイムスロット内でのみ行われます。タグはこの時刻を、定期的送信されてくるISSの軌道データから計算します(図4)。

タグは防水設計であり、動作温度範囲は -10°C ～ $+50^{\circ}\text{C}$ です。陸生動物の観測用に現在用いられている同様のタグは、質量が15～20グラムで、データ伝送にモバイルネットワークを使用し、ICARUSタグのように複数のセンサを搭載することはできません。動物がネットワークのサービス範囲外に出ると、観測は不可能になります。また、モバイルネットワークは野生動物の監視には必ずしも適しているとは言えません。

ICARUSタグは、いくつかの機能上の問題を解消しています。

■ 質量: わずか5グラムの質量と非常にコンパクトな寸法により、小型の動物も観測対象にすることができます。

■ アクセスの容易さ: ISSリンクを通じて世界中のタグと通信でき、タグのほうからは、収集したデータをISSを通じて毎日観

測ネットワークにアップロードできます。さらに、地上のICARUSインフラを使用して、高データレート of 局所的収集ネットワークを構築することもできます。

■ マルチセンサテクノロジー: ICARUSタグでは、GPS座標やさまざまな環境変数(温度、向き/コンパス、加速度、地球磁場、湿度、圧力)にアクセスできます。

代替伝送経路としての地上インフラ

ISSリンクのほかに、ICARUSでは地上インフラを通じてタグを読み取ることもできます。これにより、読み取りの頻度と伝送データレートを大幅に上げることができます。地上で達成可能なデータレートは1 Mbpsで、軌道アップリンクの場合よりも約1,000倍高速です。

地上インフラは、ハンドヘルド・モバイル・デバイスまたは固定基地局によって実現できます。どちらのタイプの機器も、ローデ・シュワルツが開発し、製造しています。タグは利用可能な伝送経路を自動的に検出

し、これらの経路の1つ(通常は地上接続)に対応するデフォルト設定を選択します。地上読み取りでは、データはアプリケーションを通じてwww.movebank.orgにある中央データベースにアップロードされます。

Dr. Marco Krondorf

- 1) ICARUSは、低軌道(LEO)衛星システムで使用することを想定しています。最初のテストプラットフォームとしては、ISSが用いられます。将来的には、可用性の向上や、上空通過の間隔短縮のために、ICARUS用のLEO衛星群を運用することも考えられます。
- 2) 地上局は、ロシア連邦の公営宇宙企業であるRoscosmosによって運用されます。ここからデータはインターネットを通じてI-GOS社に送られ、同社がデータをwww.movebank.orgにアップロードします。

生物学の新時代：動物による地球観測

寄稿：Martin Wikelski
教授（博士）：ドイツの
ラードルフツェルに
所在するMax
Planck Institute
for Ornithologyの
Department of Animal
Migration and Immune
Ecologyのディレクター、
コンスタンツ大学教授、
ICARUSプロジェクト
責任者

科学者たちは、この野心的なプロジェクトに15年以上にわたって取り組んできました。ICARUS (International Cooperation for Animal Research Using Space initiative) の目的は、人類が利用できる最もインテリジェントなセンサ、すなわち野生動物のグローバルなネットワークについて研究することです。動物には、地球上で起

きる現象に関する「第六感」が備わっています。最新の研究によると、動物間の相互作用（「群知能」とも呼ばれる）は、驚くべき検知能力につながる可能性があります。その例としては、自然災害の事前警告や、コウノトリがアフリカの砂漠で移動中のイナゴの群れを発見する能力などが挙げられます。イナゴの群れは一種の生物学的な大量発生と言え、世界人口の10分の1から基本的な栄養を奪っています。

ICARUSテクノロジーの助けを借りれば、動物「探知機」から得られた情報を利用して、地球観測の新しい時代を開くことができます。同時に、これによって人類にとっての情報源としての野生動物の価値が高まるので、その保護もさらに進むと期待できます。

ザンビアでストローオコウモリを手にする著者。この種のコウモリは、生態系サービス（種の散布）を果たしており、エボラ感染の起源を突き止めるための探知機の役割を果たすため、ICARUSタグの取り付け対象として有望です。



国際的ネットワークで結ばれた今日の世界において、動物の移動や行動に関するグローバルなデータは、人間生活の防衛と野生動物の保護を両立させる方法を探るために不可欠な役割を果たします。今日まで、科学者には、小動物やさらに小さい動物を長距離の移動中に追跡する手段がありませんでした。毎年、何十億羽もの鳴禽類が大陸間を移動しています。コウモリや昆虫にも長距離を移動する種が数多くあり、大陸の境界を超えるものもあると思われます。これについては、正確にわかっていません。

しかし、この知識は重要です。例えば、病原体が宿主によってどのように拡散されるかの理解、動物の生態系サービスの維持、動物の分散型インテリジェント・センサ・システムを利用した自然災害の予知といった用途が考えられます。ICARUSプロジェクトは、このような小動物や極小動物の分布と個別の移動行動に関する世界的な知識不足を解消するため、国際的な科学者のコンソーシアムによって開始されました。

ICARUS実験システムのオンボードコンピューターは、2017年10月にソユーズロケットによって国際宇宙ステーション(ISS)のロシアモジュールに運ばれ、その後、2018年2月のソユーズミッションで、大きなICARUSアンテナモジュールが打ち上げられました。これは、ドイツ航空宇宙センター(DLR)およびロシアの国営宇宙企業Roscosmosとの協力によって行われました。コンピューターは、2018年4月に動作を開始しました。ICARUSシステム全体の起動には、約5時間の宇宙遊泳が必要です。これはロシアの2人の宇宙飛行士によって、2018年8月8日に実施される予定です。

ICARUSから生成されるデータは、地球上の動物の生活、行動、死に関する画期的な情報をもたらすと期待されています。例えば、全世界で収集されたデータを利用することで、病気(人獣共通感染症)の伝搬、気候変動、災害予測に関する結論を引き出すことができます。予想されている研究成果は、人類にとって、そして究極的には地球上の全生物にとって、比類のない重要性を持つものとなるでしょう。

ICARUS Global Observation System (I-GOS、www.i-gos.de)は、ドイツのラードルフツェルのコンスタンツ湖岸にあるMax Planck Institute for Ornithologyによって設立された会社で、ドレスデンにあるローデ・シュワルツの子会社INRADIOSとの長年にわたる協力関係を通じて、さまざまな種類の動物にトランスミッターを取り付ける最善で動物への影響が最も少ない方法を共同開発しています。鳴禽類の場合、タグは超小型のナップザックのように背中に取り付けられ、皮膚に害を与えない伸縮性のバンドによって固定されます。コウノトリ、ツル、ワシなどのもっと大形の鳥の場合、100年にわたって足環が用いられてきました。この足環にICARUS

の高度なエレクトロニクスを搭載することで、これらの鳥がその場で地球観測員の役割を果たし、世界のどんな僻地からも気象サービスのためのデータを収集してくれます。クマ、トラ、シマウマ、サイ、ゾウといったほ乳類の場合は、耳に小型のICARUSタグを取り付けられれば、一生の間その存在を意識することはほぼないでしょう。ここでの主な目的は、動物の保護です。エボラウイルスの宿主を見つけるために利用しようとしているアフリカ産の大型コウモリには、繊細な首輪の形をしたタグが取り付けられます。ウナギが大西洋や太平洋の真ん中にある繁殖地までどのように移動するかは、まだほとんどわかっていません。そこで、ウナギの背中にポップアップ式のICARUSタグを取り付け、海水の温度、海流、塩分濃度などを測定します。この測定は、深海でも可能です。あらかじめ決められた時間が経つと、タグはウナギから離れて海面まで浮上し、ISSとの接続を確立して、記録したウナギの行動データの送信を開始します。同時に、タグは海面の流れ、温度、塩分濃度の測定ブイとしても機能します。将来は、ICARUSタグを利用して、マグロやサケなどの魚集団を保護することも可能になるでしょう。また、世界中で孵化したばかりのウミガメにタグを取り付けることで、まだ知られていない子ガメの時期の移動行動について知ることができるよう。

ICARUSタグは一種のバイオデータの宝物と見なすことができ、その探索には関心を持つ一般の人々(市民科学者)も参加できます。Animal Trackerアプリを使用することで、タグが存在するすべての場所を知ることができ、例えばタグを付けた動物が死亡した場合などに役立ちます。関心のある人々は、ジオキャッシングの宝探し(GPSを利用した地球規模の宝探しゲーム)と同様に、宝物を見つけて、プロジェクトに参加している組織に送ります。保存されているデータは、個々の動物の全生活史を記録した日記のような役割を果たします。

ご自身で動物を観察したい場合には、無料のAnimal TrackerアプリがMax Planck Instituteからダウンロードできます。このアプリは、職業科学者が使用するだけでなく、市民科学者プロジェクトの一部でもあります。movebank.org(動物のGPSトラッキングデータのデータベース)に移動データが記録されている動物の写真や観察記録を寄稿すれば、データに関する情報が増え、科学者がデータを解釈する際に役立ちます。

衛星通信リンクの 信頼性の高い 計画



© Thaiview / Shutterstock.com

衛星通信のプロバイダーとユーザーは、できる限り経済的な接続を求めています。R&S®SLP 衛星リンクプランナーは、性能仕様から技術的パラメータを導き出すための正確な推奨事項を提供します。

トランスポンダーの計画と最適化

R&S®SLP 衛星リンクプランナーは、衛星通信の解析と最適化のためのソフトウェアツールです。R&S®SLPは、すべての衛星通信バンド（C、X、K、Kaなど）でのシステムデザイン、伝送計画、トランスポンダー使用の最適化に役立ちます。ソフトウェアは、リンク品質に影響するすべての要因を考慮します。これには、気象条件に加えて、大気現象や、さまざまな原因による相互変調およびパワー損失による信号劣化が含まれます。これらすべての要因が正確にモデル化され、検証されて、実際の衛星リンクの測定データに基づいて校正されます。

リンクバジェットー衛星通信接続のデザインの鍵となる要素

リンクバジェットの計算は、衛星通信接続を運用する際の重要な作業です。ここでは、衛星信号を強めたり弱めたりする伝送経路

上のすべての要因が考慮されます。これには、雲や雨による減衰といった大気現象や、気体分子による吸収が含まれます。使用される衛星の技術的パラメータ（トランスポンダーの帯域幅、利得、感度）も、リンクバジェットで考慮されます。結果は、アップリンクまたはダウンリンクに対する1つの値、すなわち搬送波対雑音比（C/N）で表されます。この値は、衛星リンク上で指定された変調方式を使用して達成できるデータレートを決定します。この値を求めることが、R&S®SLPのコア機能です。ソフトウェアは、解析に加えて、最適なリンクデザインのための特定のリンクパラメータを推奨します。最小の消費リソースでリンクを確立するために、フレームワーク条件に関して最も有利な変調方式と送信パワーが自動的に計算されます。これは、トランスポンダーでの搬送波の消費電力と、接続の消費帯域幅に基づいて決定されます。図1に、さまざまなユーザーグループがR&S®SLPから得られる利点を示します。

すでに説明したように、リンクバジェットには、リンクの環境パラメータと、伝送テクノロジーの主要なデータが反映されます。R&S®SLPでは、環境条件を考慮するためにITUから公表されている勧告が考慮されます(図2)。

地上局は、送信／受信方向のアンテナ利得、等価等方放射電力(EIRP)、出力パワーといったさまざまなパラメータによって分類されます。軌道セグメントは、既存の衛星、そのトランスポンダーおよびフットプリントの大規模なデータベースによって表されます。これにより、特にトランスポンダーの借り手にとって、リンクバジェットの計算が容易になります。

ただし、衛星と地上局の間のリンクを単独で解析した場合、近隣の衛星や地上局の信号という重要な干渉源が見逃されてしまいます。このような外部信号からリンクに結合するパワーはかなり大きい場合があるので、必ず考慮する必要があります。R&S®SLPならそれが可能です。

もう1つの制限として、ITUが要求している、周波数と場所に依存する送信パワー密度のリミットがあります。これらの仕様はソフトウェアに組み込まれているので、リンクパラメータとして提案される値は常に許容範囲内となります。

図3に、前述の要因を考慮したマルチキャリア条件でのリンクバジェット計算の例を示します。正常な衛星条件では、すべてのC/N値(濃い赤)が、指定された最小値(オレンジ色のターゲットC/N)よりも大きくなります。最終的なC/N値は、いくつかの要素から構成されます。

- 青：アップリンクのC/N値。これは地上局から衛星に向かう方向です。
- 緑：搬送波対相互変調(C/IM)比は、トランスポンダーの搬送波パワーと歪みパワーの比です。
- 黄色：ダウンリンクのC/N値。これは衛星の送信アンテナから地上局に向かう方向です。

図4はこの状況の数値的概要の全体を表し、特に搬送波基準パワー等価帯域幅(PEB)が示されています。

帯域幅と消費電力の統計解析から、さらに最適化が必要な搬送波がすぐにわかります。例えば、搬送波の消費電力が大きくて帯域幅の消費が小さい場合、搬送波のスペクトラム効率を多少下げること、一定のデータレートでの帯域幅を増やし、送信パワーを下げるができます。これは、信号帯域幅が達成可能なデータレートに常に線形に影響するのに対し、送信パワーは対数的にしか影響しないからです(シャノンによるチャネル容量の定義)。

ターゲットグループ	R&S®SLPのアプリケーションシナリオ
衛星プロバイダー	顧客に対するリンクバジェットの指定。リンクバジェットは、顧客のデータレート要件を満たすために必要な送信パワーと占有帯域幅を定義します。
トランスポンダーの借り手	トランスポンダー容量の借り手は、R&S®SLPを使用して、利用可能な衛星モデムやデータレート要件を基に、アンテナ直径や送信パワーといったリンクに必要な地上局パラメータを計画できます。
衛星企業と通信衛星の構築の意思決定者	衛星企業は、R&S®SLPを使用して、計画中の通信容量(軌道上の伝送テクノロジー)が顧客の要件(カバレッジ、データレート、リンク可用性)に関して適切かどうかを確認できます。
周波数規制機関	R&S®SLPは、衛星リンクが周波数調整基準を満たすかどうかの確認に使用できます。例えば、アップリンクとダウンリンクの放射スペクトラムパワー密度が許容範囲内かどうかを確認できます。

図1：R&S®SLP 衛星リンクプランナー・ソフトウェア・ツールは、さまざまなユーザーグループにとって便利な機能を備えています。

パラメータ/タイトル	ITU勧告
降雨量	ITU-R Rec. P. 837-6
雨域高度モデル	ITU-R Rec. P. 839-3
雨による固有減衰モデル	ITU-R Rec. P. 838-3
雨による減衰、周波数スケーリング、シンチレーション	ITU-R Rec. P. 618-10
大気ガスによる減衰/水蒸気：地表密度と全気柱含有量	ITU-R P. Rec. 676-9 およびRec. P. 836-4
雲および霧による減衰	ITU-R Rec. P. 840-4
平均地表温度	ITU-R Rec. P. 1510
地球-宇宙間伝搬モデリングのための地形図	ITU-R Rec. P. 1511

図2：環境要因を考慮するためにR&S®SLPに実装されているITU勧告。

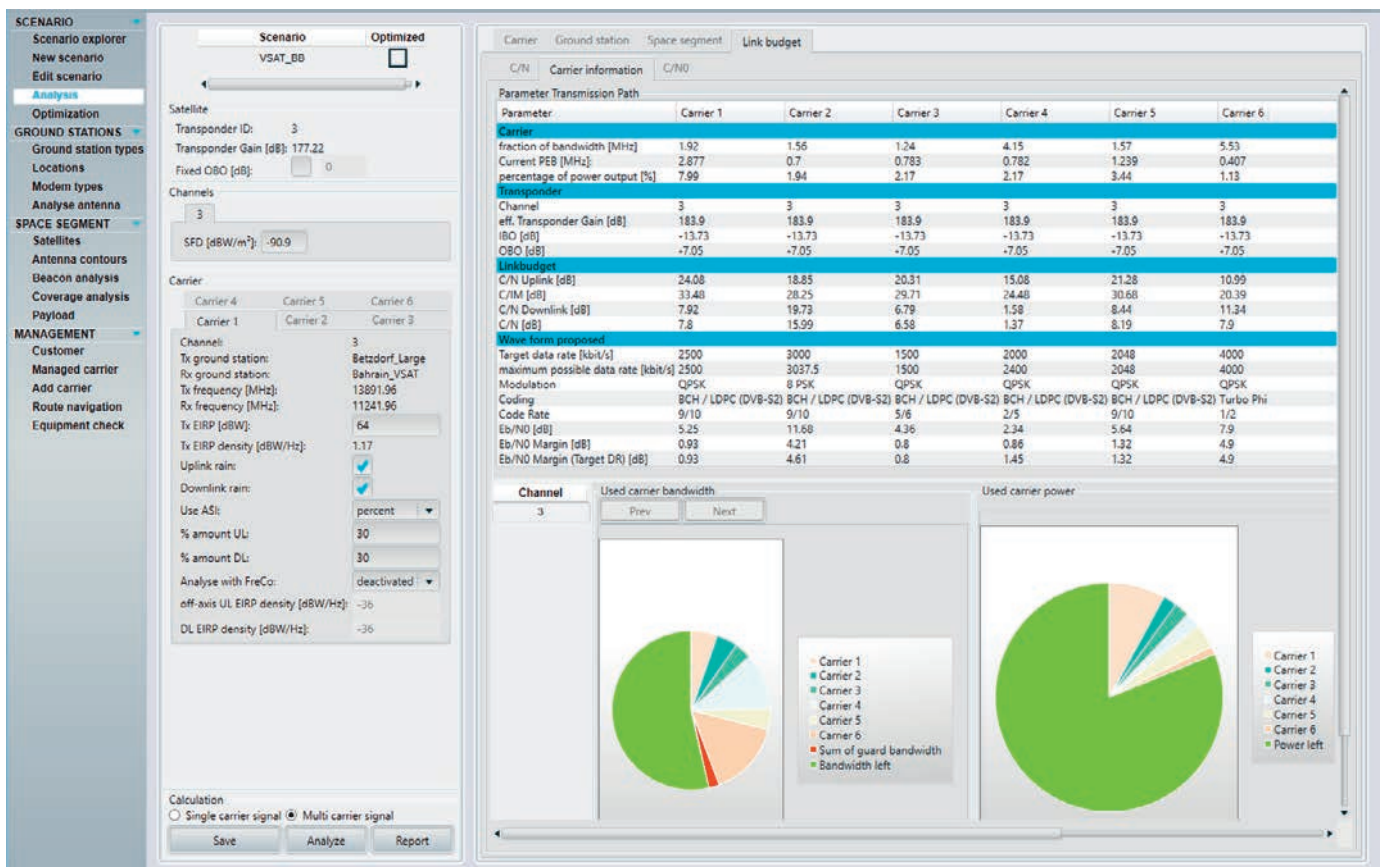
マルチキャリアシナリオへの対応

マルチキャリアシナリオを計算するR&S®SLPの機能は、衛星通信プロバイダーにとって不可欠です(図5)。これは、搬送波密度が高いトランスポンダーの搬送波は、パワーロビングや相互変調といった寄生効果のために、互いに悪影響を与えるからです。R&S®SLPのシナリオ最適化を使用することで、帯域幅と信号パワーの消費を最小にしなが、できるだけ多くの搬送波が必要なデータレートを達成できるように、各搬送波のパラメータを設定できます。計算量は搬送波の数とともに指数関数的に増加しますが、マルチキャリアシナリオでも最適化は標準的なPCハードウェア上で実行できます。



図3：マルチキャリアシナリオの解析後の関連するすべてのC/N値の計算。

図4：詳細な搬送波基準解析。



信頼性の高い受信の重要性

必要なリンク品質の保証は、伝送パラメータの選択において不可欠です。すでに述べたように、気象条件は重要な役割を果たし、特にパワーマージンの設定に大きく影響します。

図6に、カバレッジエリアに対する降水の影響を示します。カバレッジエリア内の雨による信号減衰が、フレームワーク条件（周波数、アンテナ直径、必要な可用性など）を考慮して、カラーコード化された強調表示によって示されています。カバレッジマップに基づい

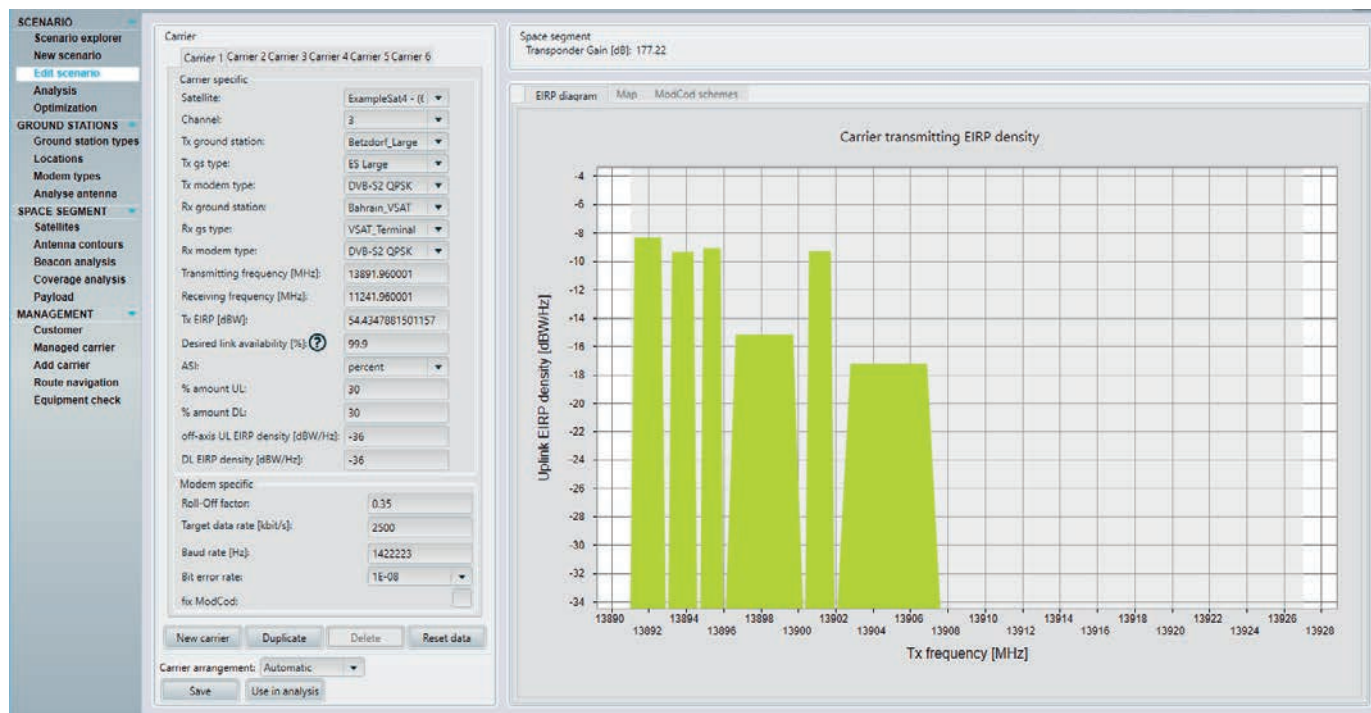
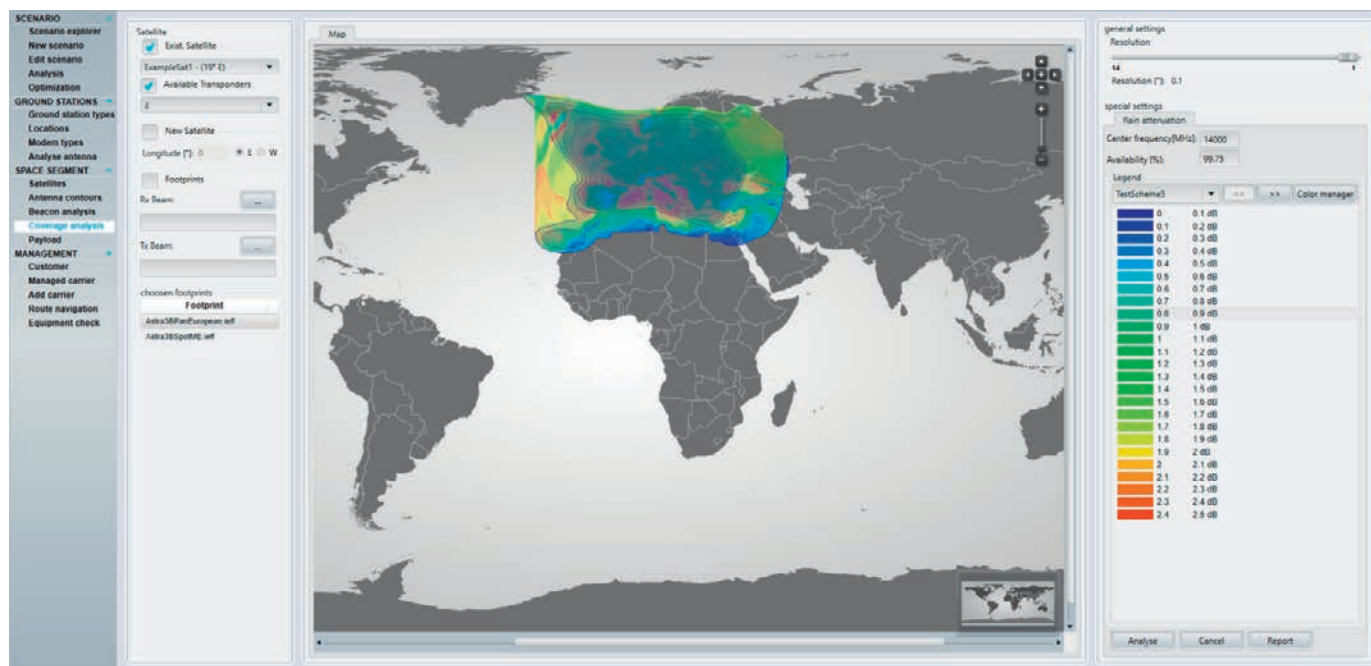


図5：R&S®SLPではマルチキャリアシナリオのデザインと計算が可能です。

図6：技術的リンクパラメータを考慮した、カバレッジエリアに対する雨の影響（Astra1KR、欧州のKuバンドビーム）。



て、プロバイダーは大きいパワーマージンが必要な地域を知ることができます。特に、船舶、ドローン、航空機などに搭載された移動衛星通信端末では、中断のない通信を確保するためにこれが重要です。

トランスポンダー・シミュレーション・モジュール

実際の衛星通信リンクの数値モデリングには、トランスポンダーのパワー特性をできるだけ正確に反映する必要があります。これは、R&S®SLPのトランスポンダーモジュールによって行われます。これにより、トランスポンダーの電子回路が搬送波に与えるパワー制限の影響をシミュレートできます。この影響により、C/N比の低下と容量の損失が発生します。これには、線形と非線形の両方の効果が含まれます。線形効果は、アナログ回路コンポーネント（特にIMUXおよびOMUXフィルター）に基づくトランスポンダーの周波数応答特性に組み込むことができます。

- ゲインフラットネス [dBpp]
- ゲインスロープ [dB/MHz]
- 群遅延 [ns]
- 群遅延スロープ [ns/MHz]

ノンリニア歪みは、トランスポンダーで使用する進行波管増幅器(TWTA)から発生します。以下のパラメータが考慮されます。

- AM/AM変換
- AM/PM変換
- IBO/OBO曲線
- ノイズパワー比

R&S®SLPは、これらのパラメータを以下のように処理できます。

- IBO/OBO曲線のテキストファイルからのインポート（通常は、シングルキャリアモードでの曲線形状だけが知られています）
- 定義済みのシングルキャリアモードIBO/OBO曲線からのマルチキャリアIBO/OBO曲線の自動計算（図7）。
- 線形化および非線形化TWTAへのIBO/OBO曲線の適用とビジュアライゼーション
- 必要なIBO/OBO曲線のトランスポンダーへの割り当て
- 与えられたシナリオからのIBO/OBO値ペアの直接計算
- 与えられたゲインスロープまたは群遅延スロープからの線形干渉の計算
- 相互変調効果の計算

R&S®SLPは、利用可能なIBO/OBO曲線から、シングルキャリアおよびマルチキャリアモードのTWTAの利得を計算します（図7の

下のチャート）。マルチキャリアモードでの利得の低下は驚くべきものです。利用できるIBO/OBO曲線がない場合、R&S®SLPは線形化および非線形化TWTAに対する代表的な曲線のセットを採用します。これに加えて、必要な場合、ユーザーは必要なIBO/OBOペアを各トランスポンダーに割り当てることができます。

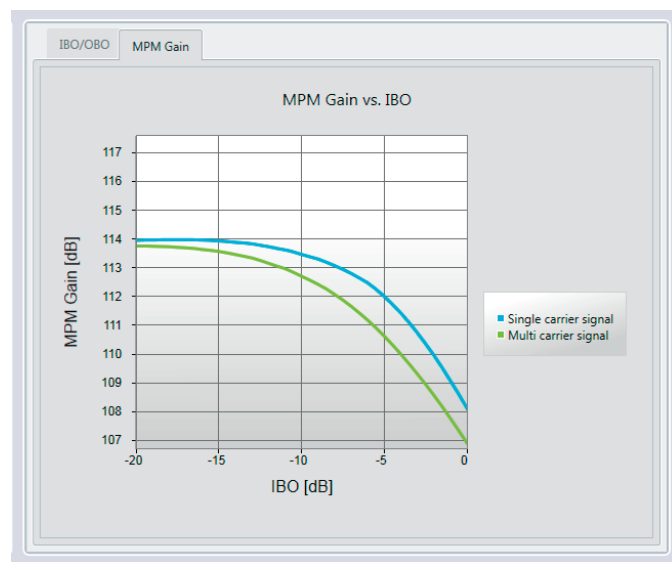
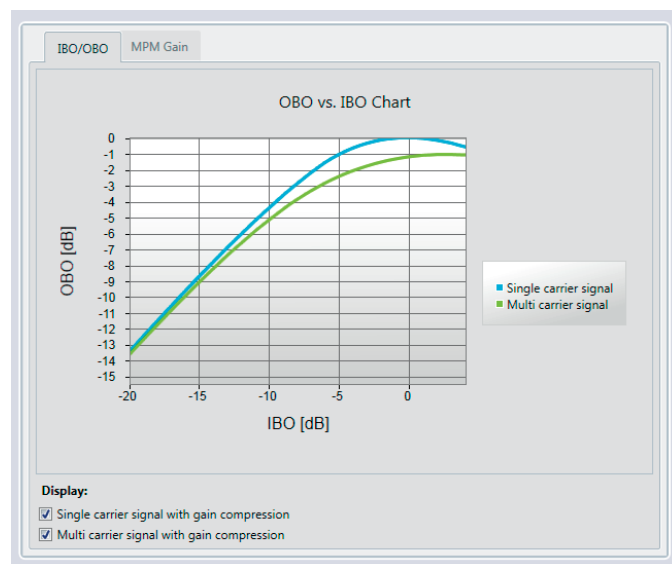


図7：シングルキャリアまたはマルチキャリアモードの非線形化TWTAのIBO/OBO比および導出利得対IBO。

R&S®SLP 衛星リンクプランナーの動作

R&S®SLPの主な機能は、トランスポンダーの最適化です。最適化ルーチンの機能を以下に示します。この通信シナリオの例では、アラビア半島をカバーするフットプリントを持つ33 MHzのKuバンドトランスポンダーの占有率を検討しています(囲み①)。

R&S®SLPでは、与えられたシナリオをさまざまな動作基準に関して最適化できます。一般的な目標はPEB消費の最小化ですが、帯域幅消費の最小化を最適化目標にすることもできます。以下の2つの例は、別の方法を示しています。1つ目の最適化(囲み②)は、消費電力が非常に小さくなりますが、必要帯域幅はきわめて大き

①通信シナリオの例

パラメータ	搬送波1	搬送波2	搬送波3
TX地上局	アンマン (57 dBi, 35 dB/K)	リヤド (50 dBi, 28 dB/K)	カタール (50 dBi, 28 dB/K)
RX地上局	クウェート (57 dBi, 35 dB/K)	シャルム・エル・シェイク (50 dBi, 28 dB/K)	クウェート (57 dBi, 35 dB/K)
変調	DVB-S2	DVB-S2	DVB-S2
データレート	5 Mbit/s	6 Mbit/s	6 Mbit/s

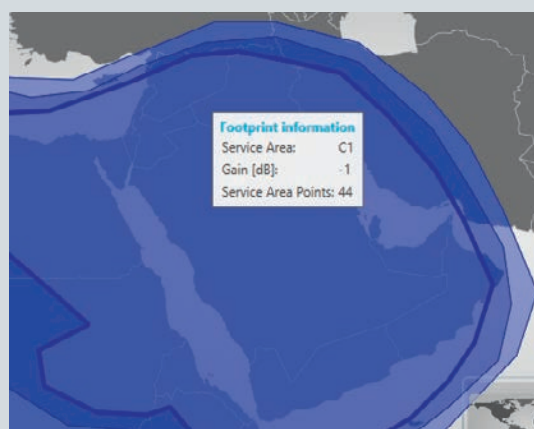


図8: サンプルシナリオのフットプリント。

②最適化1:

消費電力が最小になるトランスポンダー占有率

このトランスポンダー占有率の設定では、消費帯域幅が23.5 MHz(35 % ロールオフでの利用可能なトランスポンダー帯域幅の約71 %) *で、消費電力は約12 dBのOBOの最大EIRPを基準として6.3 %です。このシナリオレイアウトはパワー効率が非常に高く、その代償として帯域幅の消費がきわめて大きくなります。この不均衡のために、最適化ルーチンが起動される可能性があります。これは、2番目のシナリオレイアウトに明らかに見られます。

パラメータ	搬送波1	搬送波2	搬送波3
EIRP/ボーレート	48 dBW/5.12 MHz	49.7 dBW/6.14 MHz	51.5 dBW/6.14 MHz
変調	QPSK 1/2	QPSK 1/2	QPSK 1/2

図9: 最小の消費電力のターゲット仕様に対して最適化ルーチンによって提案された設定。

* ボーレートの和×1.35。係数の1.35は、搬送波のロールオフ係数から来ています。35 %のロールオフは、衛星通信での標準的な仮定です。

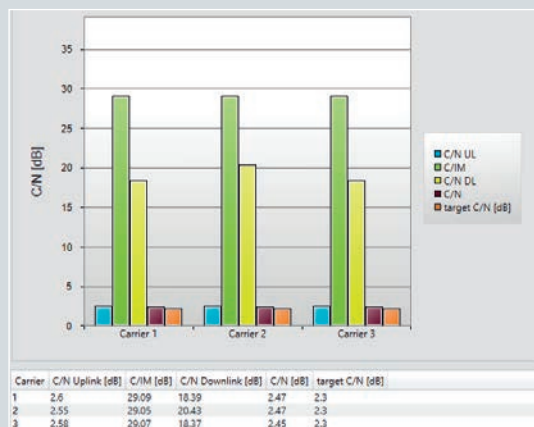


図10: 最適化とは、リソースを経済的に利用することです。最適化ルーチンが選択した設定は、指定された最小C/N値にきわめて近い値を実現しています。

くなります。最適化の例2の計算では、小さいシステムマージンと最小の消費帯域幅をルーチンの目標として指定しました（囲み④）。システムマージンは、通常は地上とトランスポンダーでのパワーマージンを指します。シナリオの帯域幅効率がきわめて高い場合、通常は代償としてシステムマージンが大きくなります。これは、8PSK、16APSK、32APSKといった高次の変調方式が必要となることが多いからです。これにより、多くの場合、特定のデータレートを実現するためにアップリンクとダウンリンクに必要な送信パワーが大きくなります。

Dr. Marco Krondorf

ASI	Adjacent Satellite Interference（隣接衛星干渉）：隣接衛星システム（隣接する軌道位置にある衛星システム）からの信号干渉
DVB-S2	Digital Video Broadcasting – Satelliteバージョン2：衛星信号の国際伝送規格（TVアプリケーション以外も対象）
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power（等価等方放射電力）：放射された信号パワーを表すパワーの指標（ワット単位）
IBO/OBO	入力／出力（パワー）バックオフ：パワーアンプの飽和パワーポイントまでのパワーまたは振幅マージン（アンプの動作点として表されることもあります）
IMUX/OMUX	入力／出力マルチプレクサー
リンク	
バジェット	信号伝送経路内のすべての増幅および減衰要因の合計
PEB	Power Equivalent Bandwidth（パワー等価帯域幅）：衛星リンクの消費パワーまたは帯域幅の指標
TWTA	Traveling Wave Tube Amplifier（進行波管増幅器）：通信衛星で多く用いられる真空管増幅器の一種

③最適化2:

スペクトラム効率を高めるトランスポンダー占有率

このトランスポンダー占有率では、R&S®SLPIは16APSK 3/4までのすべてのDVB-S2変調モードを使用できました。与えられた設定による消費帯域幅（帯域幅の消費）は7.83 MHz（約24 %）で、消費電力は約7 dB OBOの最大EIRPを基準として18.2 %です。他の変調モードを最適化に含めれば*、帯域幅とパワーの間のトレードオフをさらに追求できます。この例では、最初の例に比べて帯域幅の消費量が約47 %減少しています。一方、消費電力の増加は約12 %に留まっています。

パラメータ	搬送波1	搬送波2	搬送波3
EIRP/ ボーレート	55.2 dBW/2.3 MHz	56.9 dBW/2.76 MHz	58.6 dBW/2.76 MHz
変調	16APSK 3/4	16APSK 3/4	16APSK 3/4

図11: ターゲット仕様が低いスペクトラム効率の場合は、高次の変調モードが使用されます。

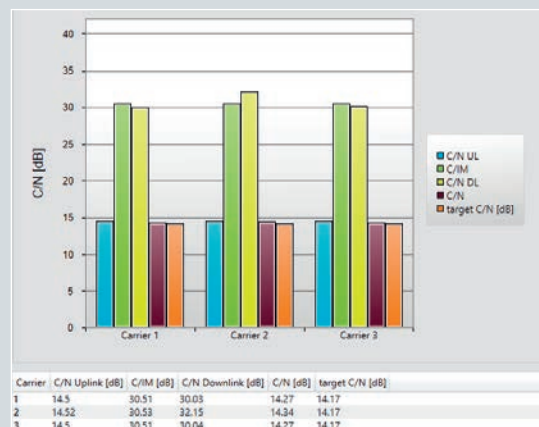


図12: 高次の変調モードには高いC/N値が必要なので、より多くのパワーが要求されます。

* R&S®SLPIには、さまざまなDVB-S2モデムタイプが組み込まれています。すべての変調モードをサポートするものも、サブセットのみをサポートするものもあります。ライセンスコストを節約するため、衛星通信プロバイダーは、QPSKや8PSKなど、限られた数の変調モードだけをサポートするモデムを購入する場合があります。R&S®SLPIは、このような市場の状況に対応する適切なオプションを提供しています。

航空機の安全性を高める 新しい無線方向探知機



図1:
このマストには、耐候性
外装内に収容された
R&S®DF-ATC-S 方向探知
システムと、R&S®ADD095
DFアンテナが取り付けられて
います。

無線方向探知機は、航空交通管制官が利用できる情報を増やす役割を果たします。無線通信の次元を追加することで、状況認識を改善します。これは、レーダーからは得られない情報です。新しいR&S®DF-ATC-Sファミリー方向探知システムは、運営会社やATC組織にとって便利な特長を備えています。すべての機器が、アンテナマストの基部に取り付け可能なのです。必要なインフラは、電力とネットワーク接続だけです。

航空交通管制 (ATC) ワークステーションの一般的なイメージは、管制官がスクリーンの前に座り、そこにレーダーシステムから得られた情報に基づく航空機の動きが映し出されるというものでしょう(図2)。管制空域内の航空機は、レーダートランスポンダーを使用してコードを送信します。これは、レーダースクリーン上の適切な位置にフライトナンバーまたは航空機の登録識別子で表示されます。ただし、現在通信中の航空機を管制官が視覚的に識別する手がかりはありません。アナログ航空無線では、バックグラウンドでシグネチャーが送信されません。これが送信されていれば、トランスポンダーのデータと無線のデータを相関させることができるはずです。すなわち、識別プロセスは別の方法で行う必要があります。送信中の航空機を短時間で高い信頼性で識別するには、無線方向探知機でその方向または位置を特定する方法があります。得られたデータは航空交通管理システムに供給され、レーダーコンソール上に表示されます。使用する方向探知機が1つだけの場合はビームで示され、クロス方位法によって位置が精密に求められる場合は、対応する飛行物体の周りに円が表示されます(図4)。管制官は一度に1機の航空機からの通信しか受信できないので、空域内に多数の航空機が存在したとして

ローデ・シュワルツは、60年以上にわたって無線方向探知システムを製造しています。最も初期のものの1つがNP4で、ここに示すのは1960年代初めから使われ始めた設備です。



図2:ユーロコントロールのMUACの航空管制官(81ページの囲み部分を参照)が、レーダースクリーンに重ね表示されたDF情報を参照しています。

も、スクリーン上で強調表示される(クロス方位法を使用する場合)のは1機だけです。これにより、管制官は通信相手の航空機を即座に特定できます。

空域の管理に音声無線が用いられていることを考えると、この情報は全体的な安全性にとってきわめて重要です。無線方向探知機から得られる情報がなくて、管制官が通信中の航空機を誤認した場合、ただちに危険な状況が生じることが考えられます。これは、雑音が多いためにコールサインを誤って聞き取った場合などに起きる可能性があります。例えば、管制官が不適切なフライトレベル変更指示を出した場合、最悪の状況では重大事故が生じるおそれがあります。

一方で、無線方向探知機は、大空港での発着時の支援だけでなく、ユーロコントロールなどの国際的ATC組織での航空路管制にも利用されています(81ページの囲み部分を参照)。レーダーシステムがない小規模な飛行場では、ATC方向探知機が方向情報の唯一の独立した情報源です。方向探知機がなければ、航空管制はパイロットからの位置報告だけを頼りに状況を把握する必要があります。



図3：タッチパネル付きのフラットなシステムPCは、設定とDF表示用に使用されます。小規模な飛行場（通常はレーダーが装備されていません）の航空管制では、現在通信中の航空機を極座標ダイアグラムに表示できます。

最大32チャンネルの同時方向探知

新しいR&S®DF-ATC-S 方向探知システム（図1）は、すべての航空無線周波数に対応します。最大28のVHFチャンネルと4つのバンド

外チャンネル（最高450 MHz、406 MHzの遭難無線ビーコンを含む）の方向を同時に判定できます。チャンネルはソフトウェアで容易に選択でき、オペレーターに管理者権限があればいつでも変更できます。

R&S®ADD095 DFアンテナは、すべてのチャンネルで同じ精度と感度で動作します。小型で低価格のR&S®ADD317は、半静止アプリケーションにも使用できます。

方向探知機をレーダーコンソールとの組み合わせでなくスタンドアロンのシステムとして運用する場合（小規模な飛行場など）、付属のタッチパネル付きシステムPCをDFディスプレイとして使用します（図3）。アンチグレアディスプレイ上のユーザーインターフェースは、操作をわかりやすくするために基本情報だけに絞られています。ディスプレイは、夜間でも映り込みの少ないアンチグレア型です。方向探知機を航空交通管理システムに統合する場合、オープンインターフェースによりスムーズな統合が可能です。

新しいR&S®DF-ATC-Sファミリーの最大の特長は、コンパクトな耐候性外装です。DFプロセッサを備えた受信ユニットに加えて、DFサーバー、加熱／冷却ユニット、GPSレシーバー、IPスイッチも外装内に収容されます。方向探知機は（オプションで利用可能な）マストの基部に簡単に取り付けることができ、送電網とデータネットワークに接続されます。軍用／民間飛行場、大空港、空路管制設備のニーズに応えるため、4種類の標準構成が用意されています。

Herbert Stärker

管制空域内の責任

管制空域内では、パイロットは現在その航空機を担当しているATCセンターから発せられる指示に従う義務があります。ただし、実際に誰が責任を負うかは、飛行の段階と高度によって異なります。各ATCセンターでの実際の構造と指示は国ごとに異なりますが、規則は国際的に標準化されています。

航空機は、民間または軍用の飛行場や空港から離陸します。この際に、パイロットは管制塔から情報、指示、許可を受信します。管制塔は、離陸と着陸を監視し、責任範囲内のすべての航空交通を管理します。航空機が空港から離れるか、巡航高度から降下したときには、ターミナル管制所がその調整を引き継ぎます。進入と離陸に対して、また空港に対する方向の違いに応じて、異なる周波数、責任範囲、指示が用いられることがあります。

最後に、航空路管制センターは、上部空域の指定されたルートを飛行中の航空機を誘導します。航空機は通常、複数の航空路管制センターによって管理される空域を通過するため、ルート上で1つのATCセンターから次のセンターへと引き継がれます。

このプロセスに関わる複数の航空交通管制官は、音声無線を使用して交通を調整します。通常、空港近くの航空機の位置は進入レーダーで、もっと遠くの場合は航空路レーダーで知ることができます。飛行の各段階で、管制官は、該当する最小水平／垂直距離に従って、航空機の間隔を管理する必要があります。無線方向探知機は、このために役立つ追加情報を提供します。

管制空域

管制塔	管制塔 (離陸)	航空路 管制所	ターミナル 管制所 (進入)	管制塔	
					上部 空域
					下部 空域

空路の安全性向上のために



ユーロコントロールは、欧州の41か国が加盟する航空交通安全のための機関です。ここでは、ローデ・シュワルツの無線方向探知機が7台使用されています。ユーロコントロールのマーストリヒト高高度管制センター（MUAC: Maastricht Upper Area Control Centre）の航空交通管制官は、2017年からこのテクノロジーを

利用して、現在の飛行状況の把握を改善するために役立てています。MUACは、4か国を対象に業務を行っています。監視対象の上部空域（24,500フィートすなわち約7,500メートル以上）は、ベルギー、ルクセンブルク、オランダ、およびドイツ北西部にまたがっています。MUACが担当する空域を通過する航空機は年間177万便を超え、欧州で3番目に多い交通量となっています。

方向探知機は、ドイツ北西部、ベルギー、オランダに分散配置されています。マルチチャネルデザインにより、使用されているすべての周波数を同時にカバーして、DFデータを継続的にMUACに提供できます。MUACでは、三角測量ソフトウェアを使用して、送信中の航空機の位置を判定します。結果は、レーダーシステムからのデータと組み合わせて、スクリーン上の円形のマークで担当管制官に示されます（図4）。

方向探知機の設置場所を決定する際には、R&S®PCT 伝搬計算ツールが使用されました（図5）。このシミュレーションソフトウェアは、

必要なカバレッジと伝搬条件を考慮して、方向探知機の最適な設置場所を計算します。信頼性の高い位置決定を行うには、担当空域内の各航空機を、少なくとも2台の方向探知機が高い信頼性で同時に受信できることが必要です。

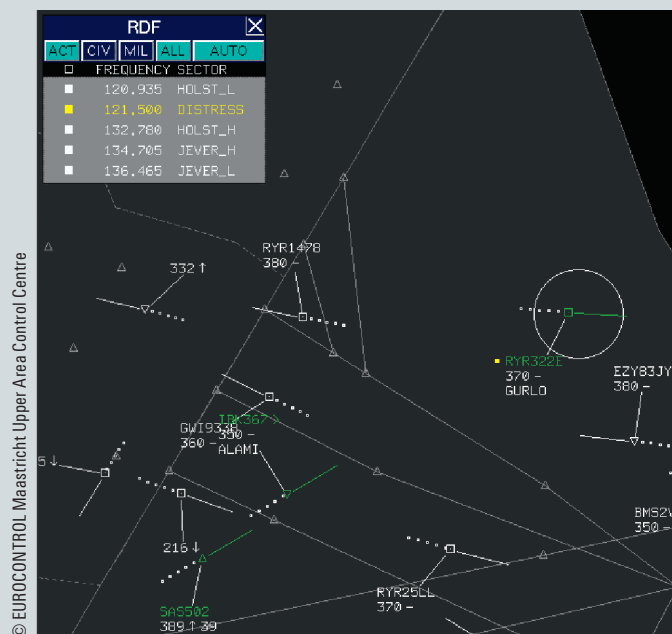
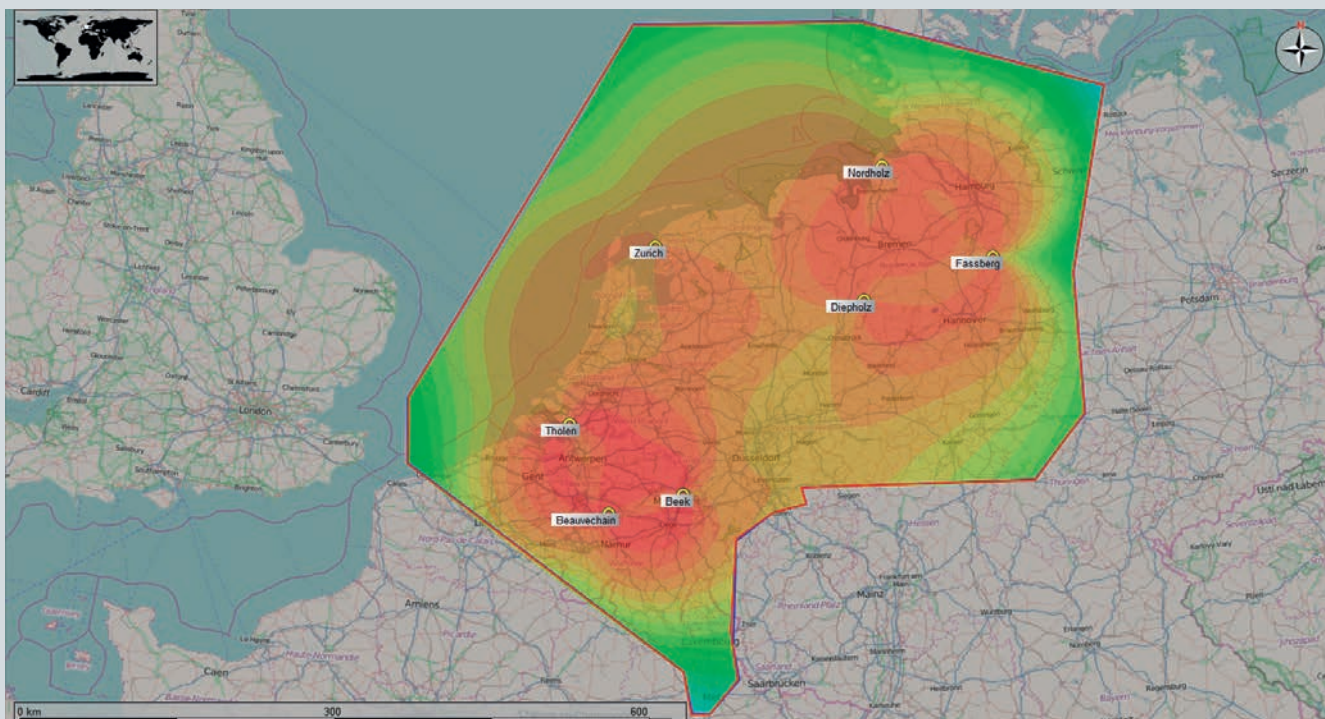
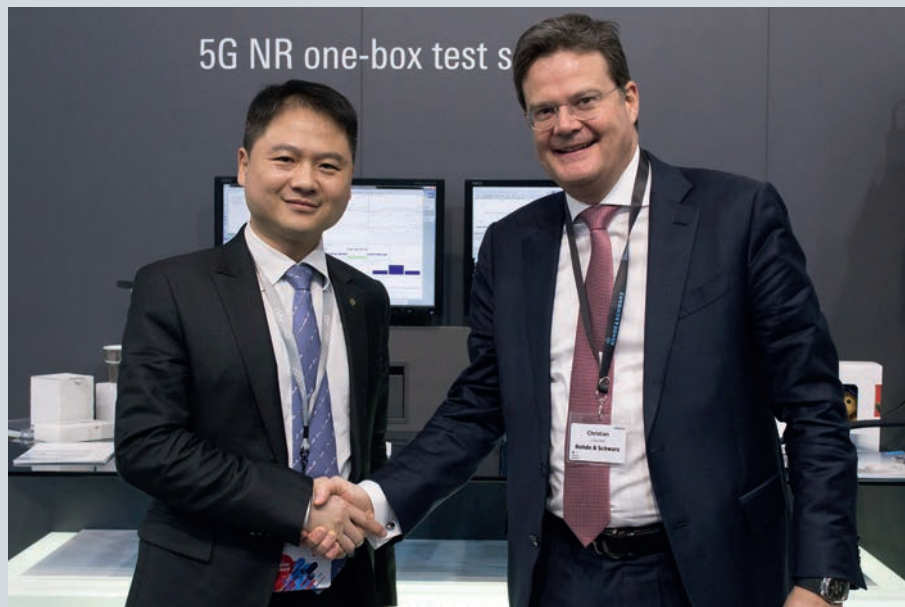


図4：現在通信中の航空機がレーダースクリーン上の円によって示されるので、信頼性の高い識別が可能です。

図5：R&S®PCT 伝搬計算ツールを使用することで、方向探知機の設置に適した場所を判定できます。



ローデ・シュワルツとUnigroup Spreadtrum & RDA が連携を強化



Unigroup Spreadtrum & RDAのCEO、Adam Zeng氏（左）とローデ・シュワルツの社長兼CEO、Christian Leicherが、新たな提携契約を承認しました。

ローデ・シュワルツと、移動体通信およびIoT向けの先進テクノロジーを持つ大手ファブレス半導体企業Unigroup Spreadtrum & RDAは、5G通信、ネットワーク・プロバイダー・テスト、車載用エレクトロニクス製品、配信製品、IoTアプリケーションの5つの主要分野での提携に向けたMoU（合意書）に署名しました。この合意には、中国にオペレーターテストの共同ラボを設置する計画も含まれます。

Unigroup Spreadtrum & RDAは、これまでローデ・シュワルツを2G、3G、4Gのパートナーに選んでおり、両社は、現行の主要テクノロジーにおいても連携強化を進めています。具体例として、ローデ・シュワルツが、5Gモバイル通信の6 GHz未満バンドとミリ波バンド用のチップセットのデザイン業務でSpreadtrumをサポートすること、および5Gテストプラットフォームの開発を加速するためそのテストソリューションを採用することがあげられます。

Rohde & Schwarz Italiaがローマにテストラボを開設

特別な要件に対応するための独自のテストラボや電子計測器を、ローデ・シュワルツのすべてのお客様が保有しているわけではありません。Rohde & Schwarz Italiaはそうしたお客様を支援するため、設立したラボをお客様にも開放しています。ラボでは、スペクトラム、ネットワーク、タイムドメインの解析のほか、パワー測定や信号の作成が行えます。オンラインで登録し、要件を指定すれば、測定を開始することができます。ローデ・シュワルツの技術者によるサポートも受けられます。ラボは学生にも公開されており、さまざまなタイプの電子計測器に触れることができます。



5Gネットワーク経由の TV伝送の研究プロジェクト



Wendelsteinトランスミッターは、5G配信モードFeMBMS用のテストトランスミッターです。

Bavarian 5G Todayプロジェクトの一環として、放送コンテンツの経済的な大規模伝送の実現を目指し、今後、5Gテクノロジーをどう活用していけばよいかを決定するための研究が行われています。オーバーバイエルンでは現在、5Gテストレンジをセットアップ中です。ドイツ、オーストリア、スイスの公共放送機関の研究機関であるInstitut für Rundfunktechnik (IRT) の指導の下、プロジェクトパートナーのローデ・シュワルツとKathreinは、5G FeMBMS (further evolved multimedia broadcast multicast service) モードでの大規模TV送信の研究に取り組んでいるところです。両社は、アソシエイトパートナーであるTelefónica DeutschlandとBayerischer Rundfunk（バイエルン放送）の支援を受けています。バイエルン放送は、5G FeMBMSトランスミッターネットワークをトランスミッターサイトでテストレンジとして運用しています。研究プロジェクトの実施期間は28か月です。Wendelstein送信局およびその他のサイトからの最初の送信は、2018年後半となる見込みです。

衛星オペレーター Arabsat 向けのDTHプラットフォーム

アラブ世界を対象とする大手衛星オペレーターのArabsatとローデ・シュワルツは、チュニジアの放送事業者のONT（光加入者線終端装置）のIPベースのブロードキャストプラットフォームを共同で実装しました。R&S®AVHE100 ヘッドエンドソリューションをベースとしてエンコードと多重通信を実現するこのプラットフォームは、当初、標準画質（SD）の10のTVチャンネル、HDの2つのTVチャンネル、および24のラジオ局向けに信号を提供します。信号は、BADR-4衛星によって中継され、北アフリカ全域、中東地域、西ヨーロッパで受信可能となる予定です。後からUHD TVに採算性のある方法でアップグレードすることが可能です。ローデ・シュワルツが選ばれた理由は、技術的に優れた製品と、システムデザイン、プロジェクト管理、設置、試運転、トレーニングを含めた幅広いサービスの提供にあります。



新しいDTHプラットフォームは、BADR-4衛星を
経由してEMEA領域全体にサービスを提供します。

SwisscomがFIFAワールドカップの送信にローデ・シュワルツの IPTV UHDコード化ソリューションを使用

スイスの電気通信プロバイダー Swisscomは、さまざまな製品を幅広く調査／テストした結果、2018年にロシアで開催されるFIFAワールドカップのUHDコード化ソリューションのサプライヤーとして、ローデ・シュワルツを選びました。冗長構成のR&S®AVHE100システムにより、3つのIPTVチャンネルでライブ番組を送信するほか、スイス放送局SRGの録画放送をUHD解像度で送信します。ローデ・シュワルツは、4週間のトー

ナメント期間、技術面および運用面でのサポートを担当します。

「ローデ・シュワルツを選んだ理由は、優れた画像品質だけではなく、ビットレートの低さも決め手となりました。運用上、大きな利点があるからです。」とSwisscomのTV Developmentの統括責任者であるBruno Haug氏は述べ、次のように付け加えています。「この効率の高さが、より多くの視聴者にUHDプログラムを届けることを可能にしています。」

Wireless Innovation ForumでSVFuAとProfessor Rohdeが賞を受賞

Wireless Innovation Forumで、SVFuA（ドイツ軍向けに共同開発されたソフトウェア無線（SDR）システム）がTechnology of the Year Awardの優勝者として選ばれました。この賞は、ソフトウェア無線およびコグニティブ無線の分野における画期的な製品やテクノロジーに贈られるものです。ローデ・シュワルツは、SVFuAプロジェクトの主要業界パートナーであり、この方法を波形開発環境によって実現しました。

Leadership Awardは、Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Ulrich L. Rohdeが獲得しました。この賞は、Wireless Innovation Forumのグローバルミッションを推進する上で特に顕著な功績のあった個人または団体を表彰するものです。WIFでは、Professor Rohdeが立案者、エンジニア、実業家として、学術と技術の両面で大きな貢献を果たしたことを受賞理由にあげています。

人気の空中用無線機

2018年春、ローデ・シュワルツは、6,000番目のR&S®XK516空中用無線機の出荷という、大きな節目を迎えました。短波無線機は、50以上の航空会社で配備され、旅客機で長距離飛行中のデータ通信と音声通信に使用されています。

大洋横断飛行の場合、短波無線機は、唯一の独立したワイドレンジメディアとして、標準機の地位を維持しています。したがって、すべての航空機には短波無線機が搭載されており、主に採用されているのが、市場をリードするR&S®XK516です。パッチの注文が増えているので、このモデルのサクセスストーリーは今後も続くことが予想されます。



R&S®XK516（右）とR&S®FK516 アンテナカップラー。

新しいR&S®VENICE

ライブ、スタジオ、および チャンネル・プレイアウト・ アプリケーションの中核的拠点

仮想化を利用した新しいR&S®VENICEメディア・ワークフロー・プラットフォームは、限界を押し広げ
現在および将来のニーズにも対応できる、将来を見据えたソリューションを提供します。

www.rohde-schwarz.com/ad/venice



優れた汎用性



高い信頼性



高度に
スケーラブル



将来の変化にも
対応



ROHDE & SCHWARZ