

229 | 2025

# NEWS

**ROHDE & SCHWARZ**

Make ideas real



## 100年の歴史を持つ 量子研究

100年の歴史を持つ量子研究：  
ラボからスマートフォンまで

FSWX：信号およびスペクトラム  
解析の新しい地平

LANCOM Systemsの無線LAN：  
火星探査のシミュレーションに貢献

ローデ・シュワルツは、既存技術の限界を突破する最先端テクノロジーを牽引しています。当社の製品やソリューションは、産業界と政府関連のお客様に採用され、デジタルおよびテクノロジーに関する主権の確保に貢献しています。

# より安全でつながり続ける世界を実現するために。

## 発行人

### 発行元

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG  
Mühldorfstraße 15 · 81671 München  
www.rohde-schwarz.com

### 連絡先

電話番号：+49 89 4129-0  
電子メール：info@rohde-schwarz.com

### 編集者

Rohde & Schwarz  
newsmagazine@rohde-schwarz.com

### グラフィックス／レイアウト／写真

Rohde & Schwarz

### 翻訳

Rohde & Schwarz

### 印刷

株式会社 吉田印刷所

### 発行部数

300部  
第65巻  
1/2025、第229号  
発行頻度：年刊  
ISSN 0028-9108

PD 3610.1610.76

本書は、ローデ・シュワルツの代理店を通じて無償で提供されます。転載は、出典を明記し、ローデ・シュワルツにコピーを送付する場合に限り許可されます。

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。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。HDMIおよびHDMI High-Definition Multimedia Interfaceという用語、ならびにHDMIトレースドレスおよびHDMIロゴは、HDMI Licensing Administrator, Inc.の商標または登録商標です。Wi-Fiは、Wi-Fi Allianceの登録商標です。本書に記載されているその他の商標はすべて、それぞれの所有者の財産です。

# 巻頭特集

読者の皆様

スマートフォンをお使いの皆さんは、すでに量子テクノロジーの恩恵を受けています。半導体チップに搭載されたトランジスタ、ナビゲーション用のGPS信号、および内蔵フラッシュのLEDはすべて量子研究で得られた知見に基づいて開発されたものです。ユネスコはこうした功績を称え、現在の研究開発活動を支援するため、2025年を「国際量子科学技術年」に決めました。

ローデ・シュワルツはテクノロジーグループとして、量子研究用の高品質な電子計測機器を提供しており、このことを皆さんにも詳しく知っていただきたいと願っています。量子コンピューターの研究では、何が行われているのでしょうか。ローデ・シュワルツの子会社であるZurich Instruments社のBruno Küngが、18ページからの記事で概要紹介を行い、制御回路とアプリケーションソフトウェアの役割について説明しています。また、スタートアップ企業であるQuantumDiamonds社のMats Claussen氏とTammo Sievers氏が、半導体業界が量子磁場測定に関心を寄せている理由と、ローデ・シュワルツの信号発生器がどのように役立つかを解説しています。詳しくは、22ページ以降の寄稿記事をご覧ください。

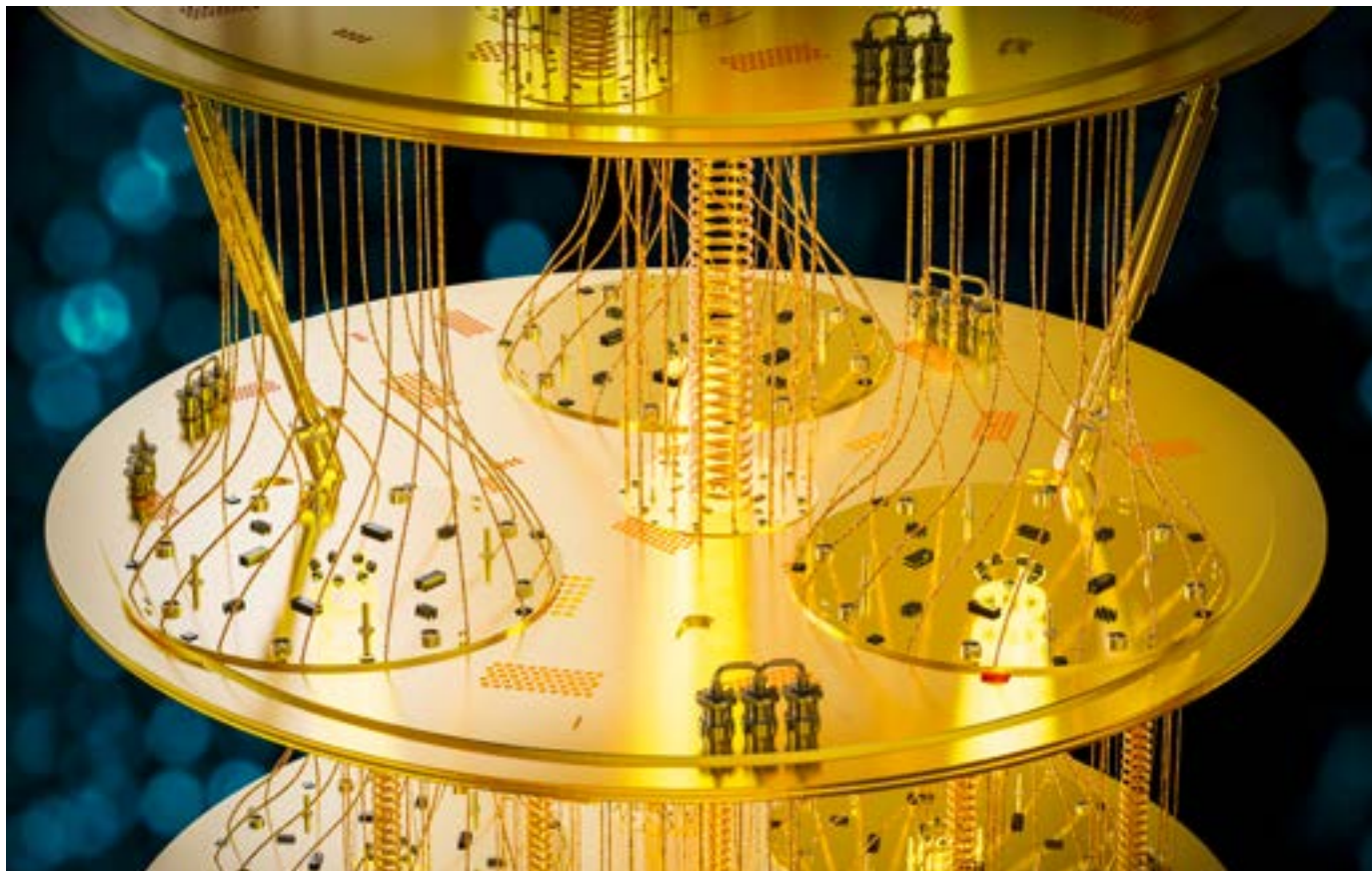
この他、AIベースのロボットによる製造工程の最新化についての解説(28ページ)や、EMC電子計測の最新情報(36ページ)および当社の最新の主力シグナル・スペクトラム・アナライザであるFSWXについての紹介記事(50ページ)なども掲載されています。

本号のNEWSマガジンをどうぞご活用ください。



コーポレートマーケティング／コミュニケーション担当バイスプレジデント  
Christian Reiter





## 14 100年の歴史を持つ量子研究

量子研究の100年の歴史を経て、今では第1世代の量子テクノロジーが日々の生活のあり方を変えつつあります。しかし、量子テクノロジーにはもっと大きなイノベーションの可能性があります。量子コンピューターと量子センサは少しずつ形になりつつありますが、これらは第2世代の量子テクノロジーの到来を告げる存在です。ローデ・シュワルツとZurich Instruments社の電子計測機器は、これらの量子テクノロジーの実現に貢献しています。



## 50 FSWX – 不可能だった測定を実現する 信号およびスペクトラム解析の新しい地平。



## 62 LANCOM SYSTEMSの無線LAN 火星探査のシミュレーション。

## 巻頭特集

### 量子テクノロジー

- 14 **100年の歴史を持つ量子研究**  
ラボからスマートフォンまで。
- 18 **量子コンピューターの構築をサポート**  
量子コンピューティングを可能にするQCCSとLabOne Qの役割。
- 22 **量子センシング：半導体業界での活用**  
量子磁界イメージングにより、室温で高分解能な3次元の電流表示をすばやく行うことが可能になります。QuantumDiamondsによる寄稿記事です。

### 研究

- 28 **AIベースのロボティクスがローデ・シュワルツの製造現場で活躍**  
KIRO研究プロジェクトでは、ミュンヘン工科大学と協力して、製造現場のロボティクスへのAIの応用をテストしています。
- 34 **ロボットによるRFケーブルの組み立て**  
ローデ・シュワルツが、RFケーブルの組み立てを行うためのロボットセルの稼働を開始しました。

### EMC

- 36 **R&S®BBA300 イミューニティーテスト用広帯域アンプ**  
R&S®BBA300 アンプファミリーには、最大300 Wの出力パワーでのEMCイミューニティーテストに必要なすべての要素が揃っています。
- 42 **小型アンテナながらも優れた性能**  
44 GHzまでに対応した最新のR&S®HF1444G14 高ゲインEMIマイクロ波アンテナ。



- 46 **EMCイミューニティーテストでの広帯域RFアンプの使用**  
EMCイミューニティーテストの基礎と適切な広帯域RFアンプの選択。

### 汎用測定器

- 50 **FSWX：信号およびスペクトラム解析の新しい地平**  
物理的限界でのRFコンポーネントの特性評価を行います。
- 54 **デバッグ：(LP)DDR5メモリインタフェース**  
R&S®RTP ハイパフォーマンス・オシロスコープには、DDR5/LPDDR5メモリインタフェース用の強力なシグナルインテグリティデバッグツールのスイートが搭載されています。
- 57 **75年の歴史：ベクトル・ネットワーク・アナライザ**  
この75年間の技術の進歩と、最新のR&S®ZNB3000モデルについて簡単に述べていきます。



### ネットワーク

- 60 **VPNネットワークング：オーストリアの電力／水道公益企業向け**  
LANCOM Systemsが、GemeindeWerke Telfsの重要インフラ向けネットワークテクノロジーを刷新しました。
- 62 **無線LAN – 火星探査シミュレーションへの応用**  
オーストリア宇宙フォーラムが、火星に似た地球上の複数の地域で探査のシミュレーションを行っています。

2 発行人

6 ニュースブリーフ

# ニュースブリーフ

## TUM Venture Labsとの協業を拡大



TUM Venture LabsのCEOであるDr. Philipp Gerbert (左)と、ローデ・シュワルツ社長兼CEOのChristian Leicherが航空宇宙分野における協業を拡大。

ローデ・シュワルツとTUM Venture Labsは、Aerospace Technology Hubを取り込む形で両社のパートナーシップを拡大しました。Aerospace Technology Hubでは、ベンチャーラボでの防衛関連トピックも扱っています。

TUM Venture Labsは、ミュンヘン工科大学 (TUM) と非営利組織であるUnternehmerTUM GmbHによる取り組みです。合計12のイノベーションセンターを通じてディープテックのスタートアップを促進し、有望な研究やアイデアの

実用化につなげられるよう意欲的な起業志望者を支援しています。Aerospace Technology Hubでは、研究機関、産業界、スタートアップ企業との間で知識移転を行うことで、欧州向けに防衛関連のイノベーションを生み出すことを計画しています。

ローデ・シュワルツは、TUM Venture Labsに当初から参画している企業の1つです。ローデ・シュワルツとTUM Venture Labsは、新たに立ち上げられたパートナーシップに加えて、6G、ロボット、人工知能の研究で長年にわたって協業を行ってきました。

また、2022年には、TUM Venture Labsの支援を受けてQuantumDiamonds社が設立されました。22ページには、同社の量子センサテクノロジーに関する寄稿記事が掲載されています。

## パワーエレクトロニクス向けの電子計測ポートフォリオの拡大

ローデ・シュワルツは、2025年の夏にZES ZIMMER Electronic Systems GmbHを買収しました。同社は約60名の従業員を擁する民間企業で、40年にわたって高精度なパワー測定機器の設計、開発、製造を行ってきました。電気自動車、産業用電子機器、再生可能エネルギー分野における業界のリーダーとして長い伝統を持つ同社が、ローデ・シュワルツグループの一員に加わります。同社の拠点はそのまま維持され、パワー測定機器用に引き続き使用される予定です。この結果、ローデ・シュワルツのパワーエレクトロニクスに関する

電子計測器の既存のポートフォリオが大幅に拡大されます。脱炭素化とさまざまな業界で進んでいる電動化という2つの大きなトレンドがもたらす成長機会が、パワーエレクトロニクスとパワー測定に対する需要を長期的に牽引していくことでしょう。



ZES ZIMMER社のマネージングパートナーであるDr. Conrad Zimmer (左)と、ローデ・シュワルツのパワーサプライ&メータ部門の信号発生器担当バイスプレジデントであるGerald Tietscher。

# R&S®M3AR 無線機ファミリーの 販売台数が1万台を突破

R&S®M3AR 無線機ファミリーの販売台数が1万台を突破しました。この高い送信電力を持つソフトウェア定義空中用無線機は、世界各地の軍隊、空軍、航空宇宙組織で広く採用されてきました。R&S®M3AR 無線機ファミリーは、ユーロファイタータイフーン、ロッキードマーティンF-16、エアバス・ヘリコプターのTigerなど、あらゆる種類の航空機プラットフォームに展開されています。

ローデ・シュワルツは、1996年の発売開始以来、顧客との密接な連携を通じてR&S®M3AR 無線機ファミリーの開発を続けてきました。ローデ・シュワルツの航空通信担当バイスプレジデントであるFrank Schindlerは、「この画期的なマイルストーンの達成を大変嬉しく思います。これは、ローデ・シュワルツの製品がお客様から信頼を得てきた証であり、今後も革新的な技術開発を継続し、日々進化するお客様のニーズに応える高品質なソリューションを提供していくことを約束いたします」と述べています。

R&S®M3AR ファミリーの無線機は、ジェット機、プロペラ機、ヘリコプター、およびドローンへの搭載が承認されています。



## ARDRONIS向けの マルチバンドジャマー

ARDRONIS Effectは、ARDRONISドローン対策システムのマルチバンドジャマー拡張機能です。セキュリティーおよび防衛産業のお客様は、ARDRONIS Effectを導入してアップグレードを行い、複数のバンドを同時に妨害することで、高度なドローンから要員、車両、インフラを保護することができます。また、このマルチバンドジャマーは、さまざまな周波数で動作する数多くのドローンを使った群攻撃を妨害することもできます。このシ

ステムは、単独で使用することも、他のARDRONISモジュールと組み合わせて使用することもできます。また、オープンアーキテクチャーに基づいているため、サードパーティーのドローン防衛システムとの統合も容易です。この数年の間にドローンの開発は急速に進みましたが、お客様はARDRONIS Effectを使うことで常に一步先を行くドローン防御を実現できます。

ARDRONIS Effectは、重要インフラなどの保護に役立ちます。



# Telesat社がローデ・シュワルツの電子計測器を使って 衛星ネットワークを最適化



Telesat社は、最も革新的で世界最大規模の衛星通信事業者の1つです。最新のLEO衛星ネットワークであるTelesat Lightspeedは、衛星接続の大幅な進歩を目指すものであり、2027年末までに世界規模でのサービス開始を見込んでいます。この衛星ネットワークは、あらゆる場所で利用可能な、手頃で大容量、かつ光ファイバー並みの性能を備えた通信リンクを提供します。Telesat社は、R&S®SMW200A ベクトル信号発生器とFSW シグナル・スペクトラム・アナライザを使用して、さまざまなメーカーの最新のRFチップセットと衛星モデムの検証を行っています。これらの測定器は、Lightspeedに必要なDVB-S2XやDVB-RCS2の波形をサポートしており、ビームホッピングやスーパーフレームなど、Lightspeedネットワークのいくつかの新機能の実現にも貢献しています。これらの高度な測定器の機能は、Telesat社とローデ・シュワルツの緊密な連携によって実現したものです。

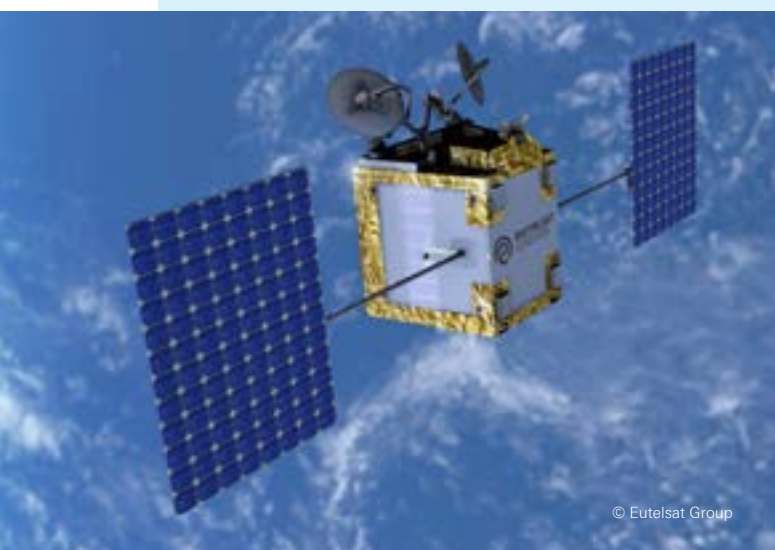
© Telesat

## 5G NTNの着実な進歩

3GPP 5G NTN (非地上系ネットワーク) 規格は、5Gモバイル通信インフラを、人工衛星、ドローン、高高度プラットフォームなどの非地上系プラットフォームにまで拡大するものです。その目的は、特に遠隔地でのモバイルネットワークのカバレッジを拡大することです。2025年の春、Eutelsat、MediaTek、およびAirbus Defence and

Spaceは、(3GPPリリース17に準拠した) 5G NTNのフィールドテストに成功しました。5Gコアネットワークと5Gユーザー端末との間で、初めて低軌道 (LEO) 衛星リンクを介してデータ伝送が行われました。このフィールドテストでは、ローデ・シュワルツの電子計測器も使用され、Kuバンド (サービスリンク) とKaバンド (フィーダーリンク) でデータ伝送が行われました。

2025年半ばには、別の研究グループが5G NTNを使って国境をまたいだデータ伝送に成功しました。2025年大阪万博で行われたライブデモンストレーションでは、無線機器でシンガポール工科大学 (SUTD) から日本国内の5G基地局まで静止衛星経由でデータ伝送が行われました。5Gコアネットワークへのアクセスのデモンストレーションには5Gコアネットワークエミュレーターが使用され、データ接続のエンドツーエンドの検証にはLEO、MEO、GEO衛星をカバーするNTNテストセットアップが使用されました。このテストセットアップは、SUTD、SKY Perfect JSAT、TMY Technologyなども参画する研究チームの一員であるVIAVI社とローデ・シュワルツが開発したものです。



© Eutelsat Group

## 洋上ATC通信システムをローデ・シュワルツがアップグレード

Collins Aerospace社は、洋上航空交通管制(ATC)通信ネットワークの維持管理を行う航空宇宙／防衛業界の最先端企業です。自社のネットワークをアップグレードするために、同社はローデ・シュワルツのCERTIUM通信システムを採用しました。このプロジェクトの最初のフェーズでは、最新のCERTIUM VCS VoIP通信システムが3つの拠点に配備される予定です。また、水冷式アンプを備えた2つのHFTトランスミッターとR&S®M3SR Series4100 HFTランシーバーも配備される予定です。その他のインフラは、この大型プロジェクトの次のフェーズで段階的にアップグレードされる予定です。ローデ・シュワルツはテクノロジーだけでなく、メリーランド州



アナポリスにある顧客の施設内で長期的な技術サポートを提供することになっています。

CERTIUM VCSを利用することで、Collins Aerospace社は、既存のアナログ無線システムとの統合が可能な、汎用的で信頼性の高い通信システムを実現できます。

## MITでのゲスト講義と客員研究員就任

米国マサチューセッツ州ケンブリッジにある名門マサチューセッツ工科大学(MIT)では、客員講師が選ばれた聴衆と定期的に専門的知見を共有しています。Ulrich L. Rohde教授(Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult.: 工学博士、教授資格取得者、複数の名誉博士)は、マイクロ波発振器の設計に関する講義を行いました。Rohde教授は、『The Design of Modern Microwave Oscillators for Wireless Applications: Theory and Optimization』や『Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and Design』などの複数の著作を出版しています。この講義で、Rohde教授は発振器の仕組みとその基礎となる数学的原理について説明し、さま

ざまな応用例を紹介しました。このイベントは、MITに属するリンカーン研究所が主催したものです。Rohde教授は、2025年4月からMITの客員研究員を務めています。

MITでのゲスト講義：  
講義ノート



客員研究員：  
MITのアナウンス



Rohde教授は、名門マサチューセッツ工科大学でゲスト講義を行いました。

## Rohde教授に バイエルン勲章



©バイエルン州首相府

2025年7月、Ulrich L. Rohde教授 (Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. : 工学博士、教授資格取得者、複数の名誉博士) に、重要な功績を残し、かつ限られた人だけに贈られるバイエルン勲章が授与されました。この勲章は終身にわたって与えられるもので、この勲章を保持している人は2,000名に及びません。バイエルン州首相であるDr. Markus Söderは、Rohde教授の生涯にわたる功績に対してバイエルン勲章を授与し、「Rohde教授は、RFおよびマイクロ波テクノロジーの代名詞的存在であり、ハイテク通信を可能にすることに貢献してきました」と述べています。バイエルン州首相は、1957年から毎年勲章を授与しています。

バイエルン勲章は、バイエルン自由州およびバイエルンの人々への顕著な貢献に対する感謝を示す名誉ある表彰です。

## モバイルデバイスのテストスクリプトに すばやくアクセス

CMX500 5Gワンボックス・シグナリング・テストのAIスクリプトアシスタントは、テストスクリプトの作成の自動化と簡素化を実現します。



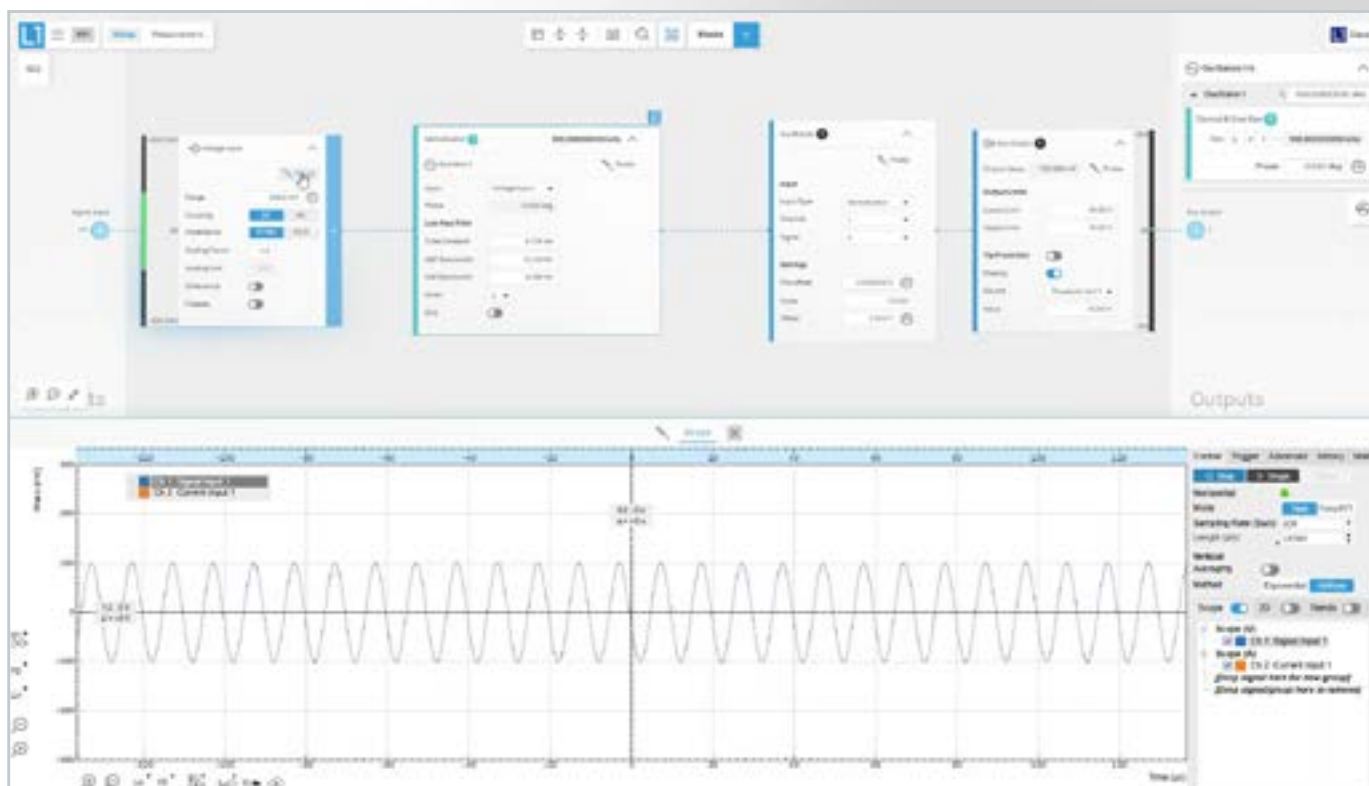
モバイルデバイステスト用のテストスクリプトのプログラミングでは、3GPP仕様、Pythonドキュメント、またはテスト機器マニュアルなどのさまざまなドキュメントから情報を収集しなければなりません。CMX500のAIスクリプトアシスタントは、このプログラミング作業を簡素化します。

関連データとローデ・シュワルツの専門知識を使ってトレーニングされた生成AIは、音声入力を使ってすばやく簡単に制御でき、研究開発用の5G NRプロトコルのテスト、アプリケーションテスト、CMXデバイス自動化など、特定の用途に合わせてカスタマイズされたXLAPIスクリプトを生成します。

このツールでは、既存のスクリプトやスクリプト上のコメントについての詳細を示すことができるため、スクリプトシーケンスをすばやく理解するのに役立ちます。これは、ユーザーが作成したものではないスクリプトの場合に特に便利です。CMX500のAIスクリプトアシスタントは、さまざまな実装方法でローデ・シュワルツから提供されます。

# LabOne®

## 直感的な測定が可能な 新しいGUI



信号入力、復調器、基準発振器、AUXチャンネルで構成されたテストセットアップが表示された測定ワークスペースビュー。オシロスコープからの測定結果は下のパネルに表示されます。

Zurich Instruments社は、LabOne計測器制御ソフトウェアのグラフィカルユーザーインタフェース(GUI)のデザインを全面的に刷新し、トレーニングがほとんど要らず、複雑なテストシーケンスを細部まで詳細に制御できる高度なグラフィカルプログラミング環境を実現しました。

LabOne®の新しいGUIでは、測定器の入力から出力までの信号経路全体が見やすく表示され、複雑なテストシーケンスも正確に表示されます。テストセットアップのワークスペースは、最初は何もない状態です。そこから、ユーザーが信号源、復調器、PIDコントローラー、その他の測定機能のセットアップを行います。これらの機能ブ

ロックは、ドロップダウン形式のメニューツリー(構造)を使って必要に応じて接続および再構成できるため、個別の要件に合わせて実験をすばやく直感的にセットアップすることができます。

測定データは別の測定ワークスペースにリアルタイムに出力され、出力先の測定ワークスペースでは、パラメータスイーパー、オシロスコープ、スペクトラム・アナライザなどのツールが利用できます。便利な機能も備えており、例えばテストセットアップを測定ワークスペースに重ねて表示したり、図に示すように別の機能ブロックとして追加したりしてパラメータの変化が測定結果にどのように影響するかを容易に追跡できます。測定の自動化を容易にするため、このソフト

ウェアには、GUIのアクションを分かりやすい形で一般的なプログラミング言語に変換するAPIログ機能も組み込まれています。

LabOne®バージョン25.07以降では、この新しいGUIを使用して、MFLIを初めとするZurich Instruments社のロックインアンプ製品全体を制御できます。このソフトウェアはダウンロードできます。QRコードをスキャンして、ダウンロードセンターにアクセスしてください。



# 協業を通じた極めてリアルなレーダーシミュレーションデータの作成



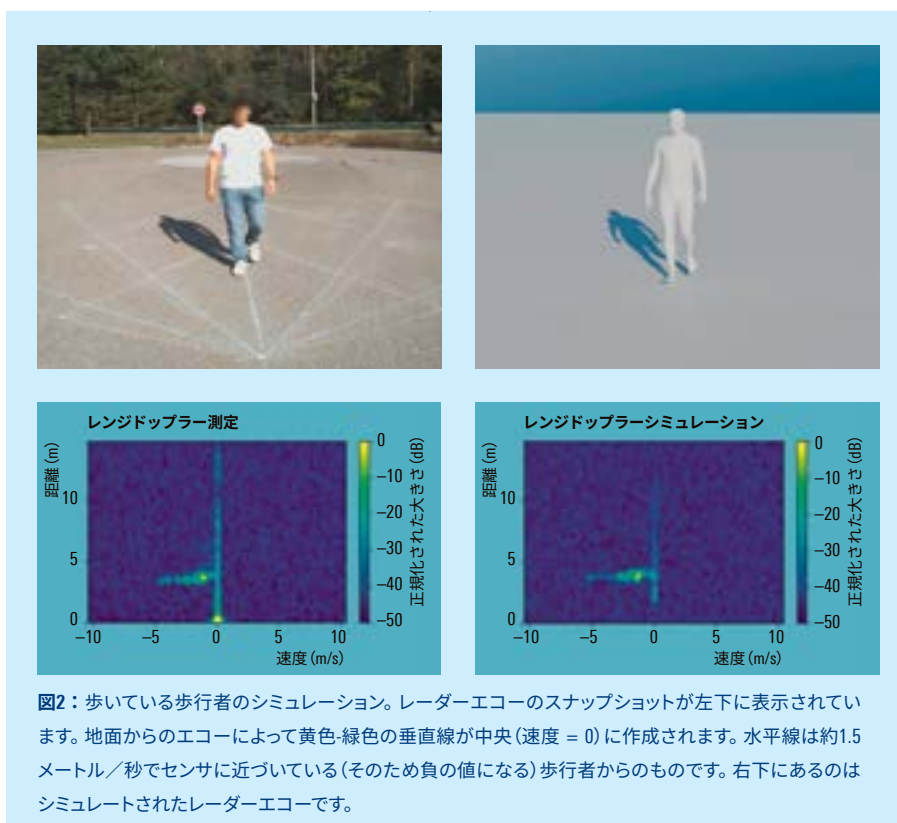
図1(左から): Andreas Pauly (ローデ・シュワルツ、社長兼CTO)、Andreas Hägele (ローデ・シュワルツ、マイクロ波イメージング担当バイスプレジデント)、Marcel Hoffmann氏(fiveD社、マネージングディレクター)、Michael Stelzig氏(fiveD社、マネージングディレクター)、Christina Geßner (ローデ・シュワルツ、電子計測担当エグゼクティブバイスプレジデント)。

ローデ・シュワルツは、2024年7月から、極めてリアルなレーダーシミュレーションを専門とするディープテックのスタートアップであるfiveD社の戦略的パートナーとして活動しています。両社は協力して、カスタマイズされたAIトレーニングデータを用いて、R&S®QPS セキュリティスキャナーの機能強化に取り組んでいます。

エルランゲン(ドイツ)に拠点を置くfiveD社のRadar Simulation Suiteでは、新たに開発されたシミュレーション方式が使用されています。Radar Simulation Suiteでは、アプリケーションやシナリオに関係なく、これまでにないリアルさで、あらゆるレーダーセンサからの生データをシミュレートできます。ローデ・シュワルツは、このデータを使って、空港、スタジアム、その他の重要インフラでの非接触セキュリティチェックとして世界中で使用されているR&S®QPS セキュリティスキャナーの機能強化を行っています。

## AI用の合成トレーニングデータ

これらのセキュリティスキャナーは、人体からのミリ波のエコーと人工知能(AI)を使用して、人が危険物や許可されていない物を所持していないかどうかを評価します。AIの訓練に使用するトレーニング用データベースが大きくなるほど、品質が向上し、セキュリティスキャナーの能力も高まります。これまで、データ収集には人間の被験者が必要であったため、このプロセスには時間を要していました。しかし、シミュレートした擬似的なレーダー信号を使うと、人間の被験者では再現できないようなシナリオも含めて、データベースをほぼ無制限に拡張することができます。その



ため、セキュリティスキャナーを変化させるセキュリティ要件に合わせてすばやく調整

でき、まったく新しいユースケースに対するトレーニングも容易に行えるようになります。

## R&S®QPS セキュリティスキャナーの2つのマイルストーン

2025年の春に、2,000基目となるQPS201 セキュリティスキャナーが設置されました。これは、日本の関西国際空港に第1ターミナルの改装の一環として納入されたものです。

一方、新型の姉妹モデルであるQPS Walk2000は、European Civil Aviation Conference (ECAC) の認証を取得しました。これにより、EU域内の空港でのセキュリティチェックにQPS Walk2000を使用できるようになります。これは、歩く速さで人々をチェックできる空港用に承認された世界初のミリ波セキュリティスキャナー（「ウォークスルー」セキュリティスキャナー）です。

R&S®QPSのアプリケーションの範囲は、単なる危険物のスクリーニングにとどまりません。例えば、データセンターの入退室チェックでは、誰かが所持しているUSBフラッシュメモリや紙片まで認識されるようにAIのトレーニングが行われています。こうすることで、マルウェアが持ち込まれたり、機密データが盗まれたりするのを防いでいます。

## fiveD社の高品質なシミュレーションデータ

シミュレーションデータでは、計算量を最小限に抑えながら、リアルさを最大限に高める必要があります。開発者はRadar Simulation Suiteを使用して、一連のエフェクト全体（レーダーセンサ、信号伝搬、環境、後続の信号処理を含むアプリケーションシナリオ）をモデル化します。リアルな信号伝搬の計算には、レーダー信号に合わせて調整されたレイトラシ

ング法が使用されます。この方式では、位相雑音などの詳細な電磁波の特性が考慮されます。

## 時間のかかるトレーニングデータのラベル付けが不要

トレーニングデータをAIシステムの学習に使用するには、トレーニングデータにラベル付けを行う必要があります。つまり、R&S®QPSの場合であれば、どの被験者と所持物がミリ波エコーの特定のデータセットに対応しているかについての情報がデータベースに含まれている必要があります。このプロセスはこれまで手動で行われてきたため、ミスが起こりがちでした。しかし、シミュレーションデータを使用する場合は、シミュレーションモデルにエコー信号を発生させた物についての情報がすでに含まれているため、ラベル付けを行う必要がありません。Radar Simulation Suiteでは、シミュレートされたデータセットに自動的にラベル付けが行われるため、時間を節約し、ミスをなくすることができます。このソフトウェアでは、信号成分（人間の目には見えないため、手動でラベル付けできない）がラベル付けプロセスに初めて追加されました。

標準的な3つの位置座標と速度情報の4つの次元に加えて、ラベル付けによってレーダーセンサデータに5つ目の次元が追加されます（fiveDという会社名はここから来ています）。

## 車載アプリケーションや産業用アプリケーションでの活用

「ローデ・シュワルツとの協業は、私たちにとってセキュリティスキャナー・アプリケーションにとどまらない完璧な戦略的相乗効果となっています」と、fiveD社のマネージングディレクターであるMarcel Hoffmann氏は述べています。Radar Simulation SuiteはfiveD社から直接購入することが可能で、車載レーダーシステムや産業用レーダーアプリケーションの開発にも活用できます。「お客様がローデ・

シュワルツの電子計測器を使って製品開発を行う場合、プロトタイプの開発段階から行うのが一般的です。fiveD社と連携することで、私たちはローデ・シュワルツの電子計測器を使ってシミュレーションモデルを最も効率的に検証する方法を、シミュレーション段階からお客様と検討することができます」と、ローデ・シュワルツのマイクロ波イメージング担当バイスプレジデントであるAndreas Hägeleは述べています。

この協業における次のステップとして、Radar Simulation Suiteとローデ・シュワルツの特定の測定器の間でデータをやり取りする方法の簡素化が行われる予定です。

編集者

## fiveD社とローデ・シュワルツ

fiveD社は、レーダーセンサデータ・シミュレーションの改良を目指して、ドイツのフリードリヒ・アレクサンダー大学エアランゲン＝ニュルンベルクで博士課程の学生たちによって2024年に設立されました。学生たちは同大学のマイクロ波フォトンクス研究所での研究を通じてローデ・シュワルツとの接点を持つようになり、ローデ・シュワルツの支援を受けてfiveD社を立ち上げました。7名の従業員でスタートしたfiveD社は、今では20名以上の従業員を擁しています。fiveD社のレーダーシミュレーションソフトウェアは、車載／産業用レーダーシステムや航空宇宙分野で使用されています。

Radar Simulation Suiteの詳細については、  
contact@five-d.aiまで  
お問い合わせください。



図3－現実からシミュレーションへ：

(a) フランクフルト空港のQPS Walk2000 セキュリティスキャナー。(b) スキャナーと架空の人による仮想モデル。ここでは、送信アンテナと受信アンテナの配置や人間と物体の反射特性などのパラメータを定義します。(c) シミュレートされたイメージの再構成。個人の権利を保護するため、このデータはエクスポートまたはセキュリティスキャナー内に保管されません。

ラボからスマートフォンまで：

# 100年の歴史を持つ 量子研究



量子研究の100年の歴史を経て、今では第1世代の量子テクノロジーが日々の生活のあり方を変えつつあります。しかし、量子テクノロジーにはもっと大きなイノベーションの可能性があります。量子コンピューターと量子センサは少しずつ形になりつつありますが、これらは第2世代の量子テクノロジーの到来を告げる存在です。ローデ・シュワルツとZurich Instruments社の電子計測機器は、これらの量子テクノロジーの実現に貢献しています。



# 100億 米ドル

2025年1～4月に世界全体で新たに発表された  
量子テクノロジーへの公的資金

# 62,241

2000年～2024年に承認された  
量子テクノロジーに関する特許数

# 460億 米ドル

2035年の量子テクノロジーの世界市場予測  
(控えめな推計)

出典：マッキンゼー、2025年

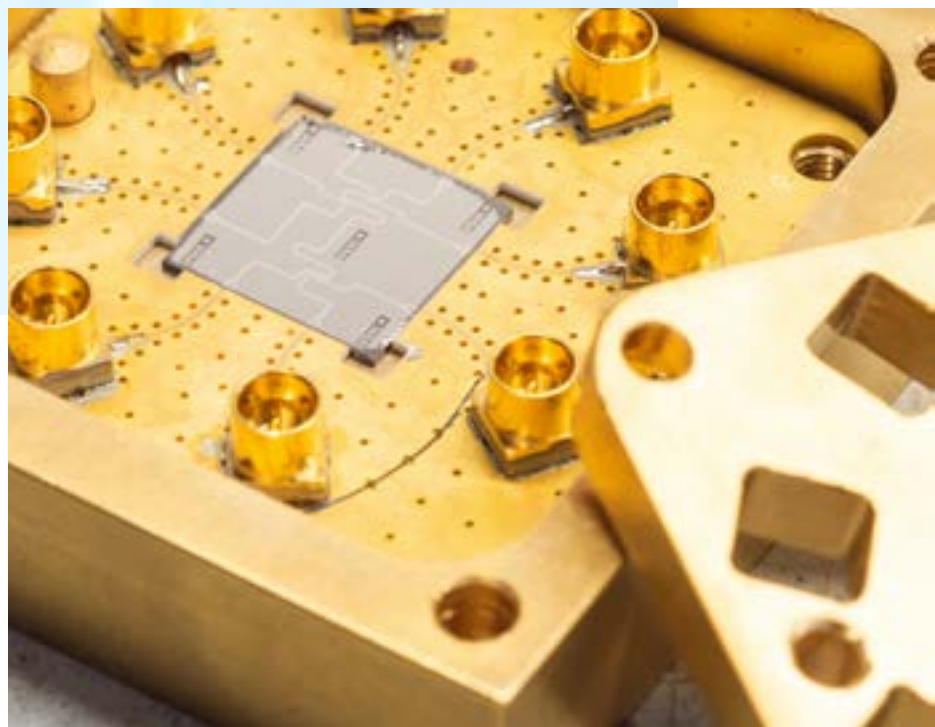


図1：量子コンピューター用RFパッケージ内の半導体チップ上の超伝導回路。このチップは、Walther-Meißner-Institutで製造および使用されています。

© BAdW/Kai Neunert

# 「量子テクノロジーは、世界中の人々の手によって 進歩を続けていきます。私たちは、その一翼を 担えることを非常に誇りに思っています。」

Zurich Instruments社CEO、Andrea Orzati氏

身の回りのテクノロジーには、量子研究の知見に基づいているものが少なくありません。これがなければ、コンピューターチップ、LED、太陽電池などの半導体テクノロジーは実現できませんでした。これは、光ファイバーデータ伝送、LIDAR センサ、バーコードリーダー、産業用レーザー切断などの幅広い用途で使用されている最新のレーザーテクノロジーの場合も同じです。1925年は量子研究において節目となる年でした。ドイツの物理学者Werner Heisenbergによって、量子力学として知られる一貫性のある理論が提唱されました。この理論は当初こそ懐疑的に見られていましたが、今では物理学の最良で最も信頼できる理論と考えられています。量子効果の技術的利用は今も増え続けています。

## 2025年は量子年

こうした功績をたたえ、身の回りにあふれていながら意識されることの少ない量子テクノロジーへの関心を高めるため、ユネスコは、2025年を「国際量子科学技術年」に制定することを宣言しました。2025年は量子力学が最初に提唱されてからちょうど100年目にあたります。2月にパリで開催されたオープニングセレモニーには1,200名を超えるゲストが参列し、その中には、ローデ・シュワルツと子会社であるZurich Instruments社の代表者も含まれていました。このイベントの参加者は誰もが、100年にわたる精力的かつ革新的な研究を経てもなお、量子研究にはまだ大きなイノベーションの可能性が残っていることを実感していました。「量子テクノロジーは世界中の人々の手によって進歩を続けていきます。私たちはその一翼を担えることを

非常に誇りに思っています」と、Zurich Instruments社のCEOであるAndrea Orzati氏は述べています。

## 電子計測のパイオニア

Zurich Instruments社は、量子研究における電子計測器のリーダーです。同社のロックイン増幅器は、量子コンピューティング、量子センシング、および量子通信(3つの主要な研究領域)に不可欠です。2018年に、同社は量子コンピューターを制御するための商用システムを初めて開発しました。この量子コンピューティング制御システム(QCCS)は、学術および産業研究向けに設計されたもので、最大100量子ビットの超伝導量子ビットまたはスピン量子ビットに対応した量子コンピューターをサポートできます。QCCSおよびLabOne Qユーザーソフトウェアについては、18ページ以降の記事で詳しく解説します。

## 第2世代の量子テクノロジー

量子コンピューターは、量子ビットの操作や読み取りなどの量子状態のアクティブな制御を行う第2世代の量子テクノロジーです。第1世代の量子テクノロジー(コンピューターチップやレーザー)では、量子状態を利用しますが、量子状態のアクティブな制御は行われません。第1世代の量子テクノロジーは技術的に成熟し、幅広い用途で使用されていますが、多くの第2世代の量子テクノロジーは現在研究中です。

量子コンピューターとともに、量子センサも第2世代のテクノロジーです。今では、センサアプリケーションに合わせて最適化された特性を持つカスタムメイド

の量子システムを人工的に作り出すこともできます。量子センサでは、加速度、温度、磁界強度を測定できます。最新の半導体チップ向けの新たなトラブルシューティング方法が使用できるようになることから、量子磁界測定は、現在、半導体業界で大きな注目を集めています。量子磁界測定には、ローデ・シュワルツの信号発生器のような高品質な信号発生器が必要です。22ページの寄稿記事では、量子磁界測定の原理と半導体業界での利用について解説しています。

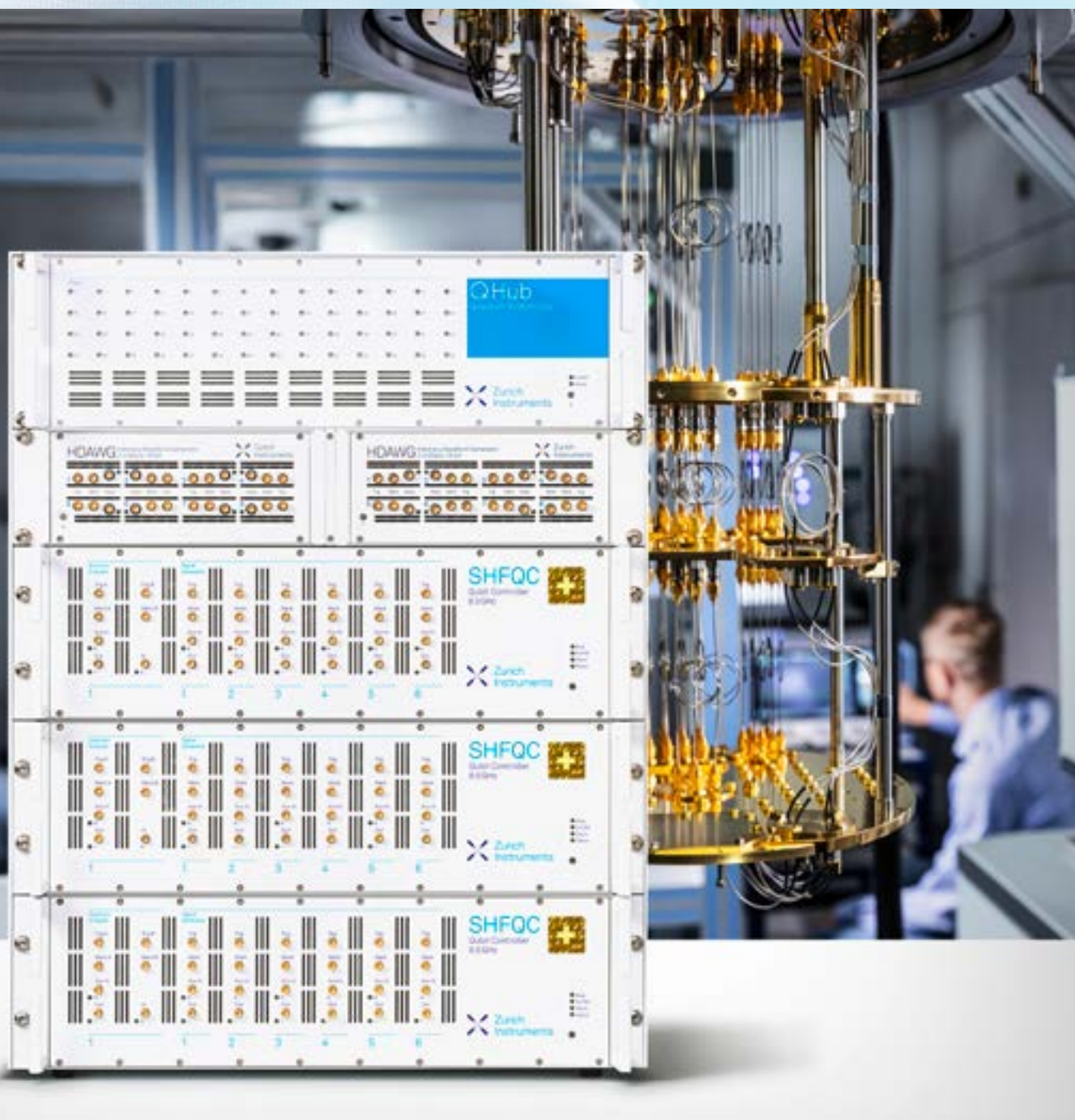
## 直感に反するが上手いく

当初の量子力学に対する見方が懐疑的だったのは、私たちの世界を構成している最も基本的な要素の振る舞いが通常の見え方と大きく異なるもので、これが量子力学の理解を難しくし、物理学者の直感と折り合わないためです。それでも、量子力学はテクノロジーの進歩にとって極めて重要な存在でしたし、今でも重要な存在です。

編集者

# 量子コンピューターの 構築をサポート

量子コンピューティングを可能にするQCCSとLabOne Qの役割





100年前、量子は基礎研究だけが行われていた領域でした。特異で捉えがたい物理現象を解明しようとする好奇心にかられた奮闘から始まった活動が、今では、レーザー、コンピューターチップ、磁気共鳴イメージング(MRI)の基礎になっています。量子研究と関連性のある主要なテクノロジーははるかに膨大な数におよび、産業研究を通じてその数は日々増え続けています。

### 量子コンピューター研究の状況

最新の研究領域の1つに、量子コンピューティングがあります。Zurich Instruments社は、研究および産業界での量子コンピューター開発に対応した定評のある電子計測器メーカーとして、「量子コンピューターの構築をサポートする」という基本理念を掲げてこの領域の発展を後押ししています。

研究機関、産業界、そして政界で、量子コンピューターは暗号化セキュリティや材料研究などの数多くのアプリケーション領域でブレークスルーにつながることが期待されています。しかし、その道のりは簡単ではなく複雑な課題がいくつも存在します。特に、システムの規模

拡大には大きな課題があります。システムの規模は、量子コンピューターの基本的な要素である量子ビットの数で測るのが一般的です。図1は、Googleが公開している量子コンピューティングのロードマップです。

多くの企業が同様のロードマップを持っています。ゴールは強力な誤り訂正付き量子コンピューターです。これは、単体の製品として販売されるか、またはコンピューティング能力がクラウドモデルを介してサービスとして提供されます。これらの量子コンピューターは、百万単位の量子ビットで構成されます。

現在の最先端のシステムは数百量子ビットです。Zurich Instruments社は、量子コンピューティング制御システム(QCCS)を通じて、この開発段階に対応した優れたソリューションを提供しています。研究者はこのシステムを使って、それぞれの量子コンピューターで量子アルゴリズムをすばやく効率的に実行し、システムをテストして開発を進め、さらに大きな量子ビットを達成することができます。ところで、量子コンピューターを「プログラム」というのは、実際にはどうということなのでしょうか。

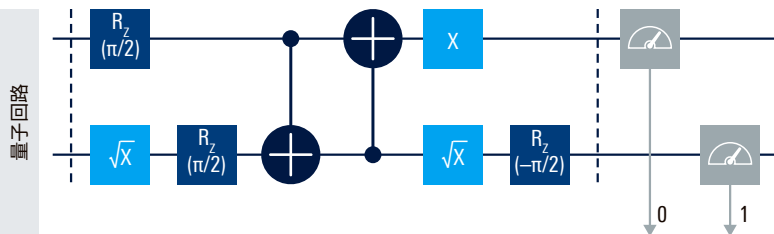
図1：Googleの量子コンピューティングロードマップ。

最終更新：2025年夏

量子アプリケーション  
ソフトウェア

従来の  
制御ハードウェア  
およびソフトウェア


量子処理ユニット



OpenQASM

```

rz(pi/2) q[0];
sx q[1];
rz(pi/2) q[1];
cx q[0], q[1];
cx q[1], q[0];
x q[0];
sx q[1];
rz(-pi/2) q[1];

meas [0] = measure q[0];
meas [1] = measure q[1];

```

**図2 (左):** 3つの機能ブロックでの量子コンピューターシステムの簡素化された表現。量子処理ユニットはクライオスタット(低温保持装置)内にあり、制御回路と制御コンピューターは室温で動作します。

**図3 (右):** 2量子ビットのシンプルな量子アルゴリズムの2つの等価な表現。上側は量子回路での1および2量子ビットゲートと測定演算のシーケンス図で、下側はOpenQASM言語の一連のプログラミングコマンドです。

### 量子コンピューターのプログラミング

量子コンピューターのプログラミングは、量子アルゴリズム(数学用語では、初期状態を別の状態に変換するユニタリー演算U)から始まります。量子コンピューターでUを実行するには、この複雑な演算をいくつかの実行可能な小さなステップに分割する必要があります。各ステップには1または2量子ビットのみが関与します。これらは量子ゲートと呼ばれます。これらの基本的な演算に基づいたアルゴリズムは、(IBM主導で開発された) OpenQASMなどの専用のプログラミング言語を使って記述できます。

実際、量子コンピューターは、多くの場合、超伝導テクノロジーに基づいています。図2は、3つの機能ブロックによる簡素化された表現です。この量子コンピューターの心臓部は、数ミリケルビンの温度でクライオスタット(低温保持装置)内に設置された量子処理ユニットです。各量子ビットは、複数の信号線で制御システムに接続されています。目標とする制御と量子ビットの測定を行うため、0 GHzからおおよ

そ10 GHzまでのさまざまな周波数レンジで、これらの信号線に沿ってRFパルスが送信されます。

### 量子ビットの計算

ここで役立つのがQCCSです。QCCSは、これらのパルスの発生と正確なタイミング調整を行い、実際の量子ゲートでのアルゴリズムの実装において重要な役割を担います。QCCSは、最先端の信号品質、ナノ秒の精度を持つ複雑なパルス列のシーケンス、システムの規模の拡大に合わせて調整可能なスケーラブルなモジュラーアーキテクチャーという、このタスクに不可欠な要件を満たしています。

パルスシーケンスは、ハードウェア関連のプログラムとして、QCCSのFPGAベースのコンポーネントでリアルタイムに実行されます。これらのプログラムは、ループ、分岐、待ち行列といった強力な制御構造を使用しますが、ハードウェアに密にリンクされており、エンドユーザーがアクセスすることは困難です。

## LabOne Q：シンプルで強力なプログラミング

ここでは、LabOne Qが役立ちます。LabOne Qは、(OpenQASMなどの)量子アルゴリズムの抽象的な記述をハードウェアと互換性のある制御情報に変換することで、ゲートレベルのプログラミングとハードウェア制御の間を橋渡しするソフトウェアフレームワークです。

また、LabOne Qには、パルスレベルのアクセス用に開発されたドメイン固有言語 (DSL) も用意されています。この言語は、校正 (チューンアップ) 時、トラブルシューティング時、または独自の制御シーケンスを実装する際に、信号レベルでの正確な介入を必要とする量子コンピューターの開発者向けに開発されたものです。

この他にも、パルスプロトコルの可視化、分析、最適化を行うためのグラフィカルユーザーインターフェイスが用意されています。また、オープン

インタフェースを介して、オシロスコープやスペクトラム・アナライザなどのローデ・シュワルツの測定器を直接統合することもできます。これらの測定器は、量子プロセッサの特性評価や測定システム全体で重要な役割を果たします。Zurich Instruments社とローデ・シュワルツは、設計から運用までの量子コンピューターの開発サイクル全体を協力してカバーしています。

### 100量子ビットから1,000量子ビットへ

QCCSとLabOne Qはハードウェアとソフトウェアの密接な連携を通じて、今日の数百量子ビット、将来的に数千量子ビットの最新の量子コンピューターを構築し運用するためのスケラブルで柔軟性に優れたプラットフォームを実現します。

Zurich Instruments社、Bruno Küng氏

**図4：量子コンピューターの開発プロセス**  
では、ローデ・シュワルツの電子計測ポートフォリオがシステム統合までのステップをカバーしています。

Zurich Instruments社の量子コンピューター制御回路と制御ソフトウェアは、ランプアップフェーズと運用向けに設計されています。

ROHDE & SCHWARZ  
Make ideas real



Zurich  
Instruments

## 量子ビット製造およびセットアップアセンブリ

## セットアップでの量子ビット配線および運用



# 量子センシング： 半導体業界での 活用

最新の半導体の性能要件に対応するため、チップメーカーは先端パッケージングなどの鍵となるテクノロジーを使用しています。このため、新しい高精度な非破壊チップ解析手法のニーズが高まっています。量子磁界イメージングは、新たな可能性を開くものです。今では、室温で高分解能な3次元の電流表示をすばやく行うことが可能になっています。このセクションは、QuantumDiamonds社による寄稿記事です。

## AIが牽引するグローバル半導体市場

スマートフォン、自動車、家電製品、データセンターなど、身の回りの無数のデバイスに人工知能 (AI) が組み込まれるようになり、最先端の半導体チップへの需要が世界的に急増しています。同時に、コンピューティングやメモリの技術的進歩を上回るペースでAIモデルの複雑化が進んでいます。

膨大なデータを使用し、莫大な電力を消費するAIモデルに対応するには、処理性能を大幅に向上させ、消費電力を抑える必要があります。こうした制約を乗り越えるため、業界では先端パッケージングの導入が進んでいます。これは、複数のチップコンポーネントを密に集積化して、信号ルーティングを最適化し、遅延を減らし、電力供給を改善する方法です。

## 先端パッケージング

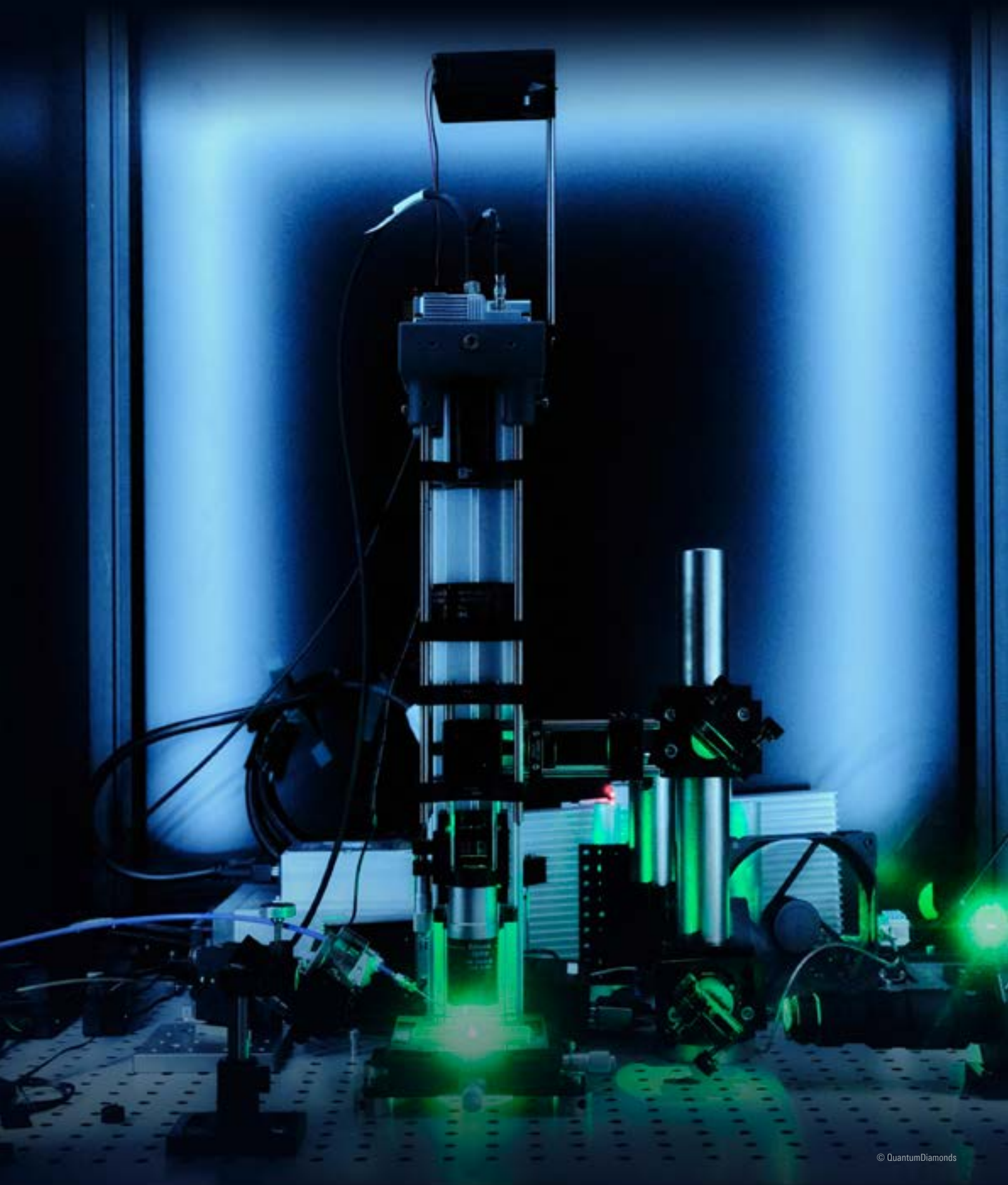
従来、半導体は、トランジスタのサイズが2年ごとに半分になり、チップの高速化とエネルギー効率の向上が進むというムーアの法則に従って進歩してきました。しかし、サイズが約2 nmになり、こうしたトランジスタの小型化は技術的および経済的な限界に達しています。そのため、半導体製造では、微細化だけでなく、システムレベルの小型化にも注目が集まるようになってきました。先端パッケージングは、チップ性能をさらに向上させる新たな可能性を開く主要なテクノロジーです。

これは、複数の半導体コンポーネント (多くの場合、特殊なダイ<sup>1)</sup>) を密に集積化して1つのパッケージにする一連のテクノロジーです。従来のパッケージングでは、基本的に個々のチップを保護しますが、先端パッケージングでは、コンピューティング、記憶領域、インタフェースコンポーネントのカスタマイズされた接続を行うことが可能です。そのため、電気性能を最適化し、遅延を減らし、熱管理を効率化することができます。

先端パッケージングの方式には、インターポーザー上で複数のダイを隣同士接続する2.5D集積と、複数のチップを立体的に積層する3D集積があります (図1)。これらのテクノロジーでは、複雑なシステムを専用の機能ユニット ( - いわゆるチップレット<sup>1)</sup>) に分割して、これらをいわゆる異種チップ集積を用いて必要に応じて組み合わせることができるため、異なる生産技術の異なる種類のチップ (ロジック、メモリ、無線モジュール) を1つのシステムにまとめることができます。

また、先端パッケージングでは、電力ルーティングの改善、電力損失を低減、および設計自由度を高めるため、バックサイドでの電力供給<sup>1)</sup>の取り組みも行われています。今では、個別のチップよりもシステムアーキテクチャーが技術革新の大きな原動力になっています。

<sup>1)</sup> 用語の定義は24ページを参照。



用語の定義	
ダイ	加工済みのウエハーを四角く切り分けて作られた個々のシリコンチップ。
チップレット	標準化された機能ブロック（例：CPU、GPU、I/O）で、他のチップレットと組み合わせてシステム・イン・パッケージを構成する。
バックサイド電力供給	電力回路と信号回路の分離。電力はチップのリアから供給され、信号はこれまで通りフロントパネルからルーティングされる。

### 電子計測の展望

先端パッケージングには、大きな性能上の利点がありますが、これまでになかったテスト上の課題もあります。従来型のチップアーキテクチャーでは、確立された手法を用いて欠陥のある場所を比較的簡単に見つけることができますが、先端パッケージングでは、コンポーネントの実装密度が高く、立体的に積層されており、欠陥がシステムの奥深いところに隠れていることがあるため、欠陥を見つけることが難しくなっています。

2.5Dおよび3D構造には、確立された検出手法のないまったく新しい種類の不良も存在します。これらは、従来のチップアーキテクチャーよりもはるかに複雑です。そのため、テストの作業量とコストが増大します。多くの新しい設計概念には適切な解析手法が存在しないため、業界では適切なテストソリューションの開発が進められています。

半導体のエキスパートであり、TSMCの元ディレクターであるDavid Su氏は、次のように指摘しています。「先端パッケージングは、新たな可能性をもたらすだけでなく、これまでになかった新しい形の欠陥が生まれます。こうした欠陥の多くは、今日の解析手法を用いて検出することが困難です。ますます複雑化するチップアーキテクチャーに対応するため、欠陥解析のイノベーションが早急に必要です」。

### 半導体チップでの欠陥解析

不良解析では、欠陥や動作不良を検出する以上のものが求められます。原因を把握して、不具合が1つのチップだけなのか、製造プロセスの系統的な問題なのか、を明らかにする必要があります。この問題に答えるための最も重要なステップは、チップの不良箇所を正確に特定することです。

しかし、微細化とコンポーネントの高密度化により、欠陥箇所の特定はますます複雑になっています。エミッション顕微鏡（PEM）、光ビーム加熱抵抗変動（OBIRCH）、熱誘導電圧改変（TIVA）などの従来の方法では、光刺激、電気測定、または光検出が使用されています。先端パッケージング構造の場合、これらの方法には限界があります。3次元構造では、重なり合う階層の下に欠陥が存在していて、信号が弱められたり、完全に吸収されたりすることが少なくありません。分解能、深度範囲、測定速度が、チップ内の深い場所にある不良を確実に見つけるのには不十分です。先端パッケージングの確実な不良解析には、これまでと物理的に異なる測定方法が必要です。

### 半導体テストワークフローでの量子センシングの活用

これには量子磁界測定が役立ちます。マイクロチップ内の電流によって測定可能な磁界が生じるため、これをダイヤモンドを用いた量子センサで正確に検出することができます。従来はアクセスできなかった深い階層の場合でも、このデータを使ってチップ内の電流分布を推測することができます。

磁界は最新の2.5Dおよび3Dアーキテクチャーの階層構造を貫通するため、チップを破壊することなく、奥深いところに隠れている欠陥を見つけ出すことができます。この量子センサは室温で動作し、高い空間分解能を持ち、開放された導体線路（完全な開放）も検出できます。これにより、先端パッケージング半導体で新たな方法による不良解析を用いて、先進的な複雑なシステムのテストソリューションに対する需要の高まりに対応することができます。

QUANTUM DIAMONDS  
SENSOR TECHNOLOGY

QuantumDiamonds社は、ダイヤモンドを用いた量子センサを使って半導体業界向けのテストシステムを開発しています。同社は2022年に、TUMベンチャーラボの支援を受けてミュンヘン工科大学からスタートアップとして設立されました。最初のデモンストラーション用測定器は、2024年にFraunhofer EMFTに提供され、産業用途で利用されるようになりました。QuantumDiamonds社は、TSMC、Infineon、Intel、NXP、Nexperia、iSTなどの業界のリーダーと連携し、そのテクノロジーを通じて、最新のチップアーキテクチャーに対応した不良解析の新しい可能性を切り開いています。

お問い合わせ先：bartu.bisgin@qd-st.com

QRコードをスキャンすると、同社のウェブサイトアクセスできます。



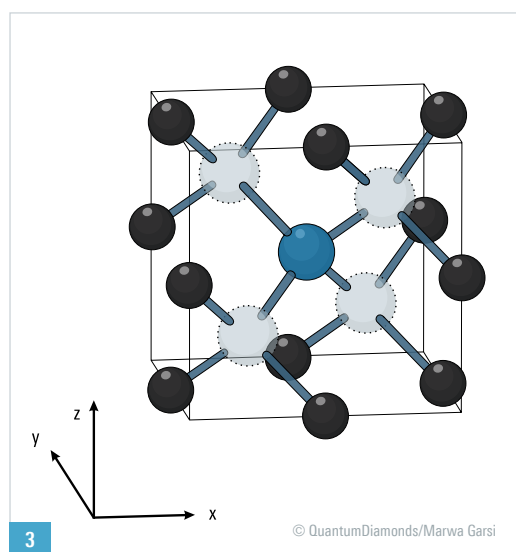
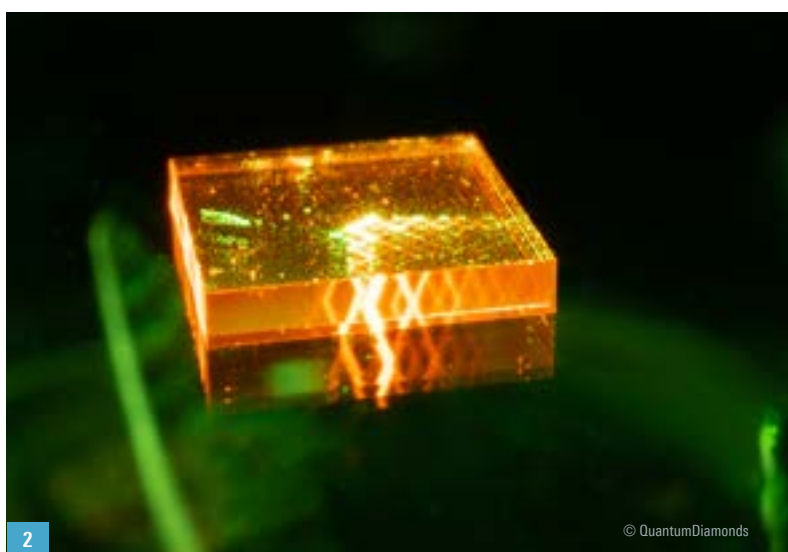
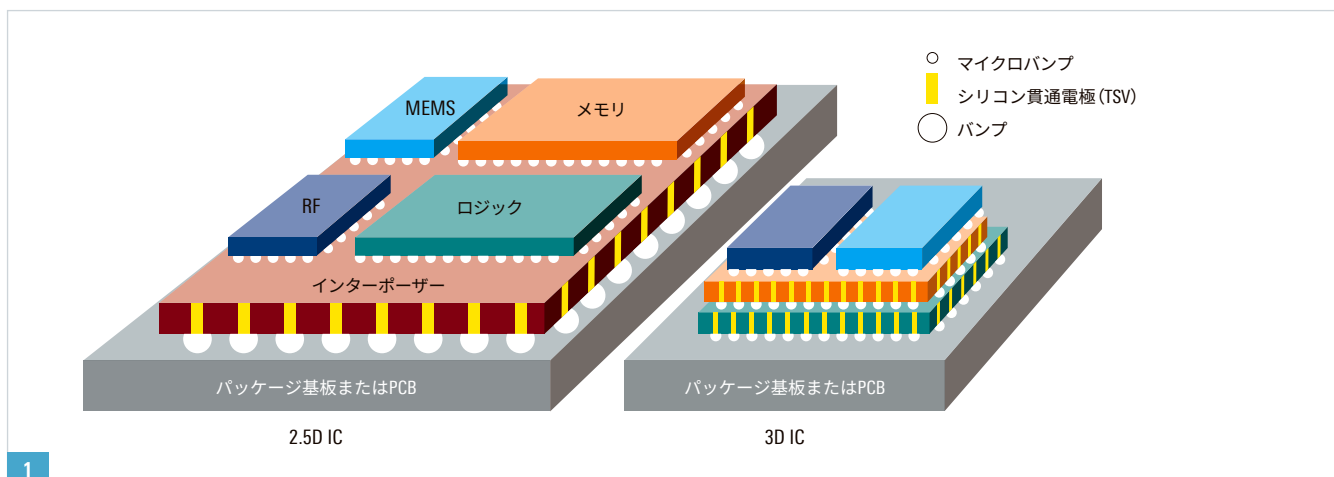


図1：先端パッケージング内部の複数のコンポーネントの積層。

図2：量子磁界測定用のNV中心の薄い層を持つダイヤモンド。

図3：炭素格子(黒)と窒素原子(青)。隣接する炭素空孔(グレー)が窒素原子とともにNV中心を形成。4つの空孔のそれぞれがNV中心を形成する相手になる可能性があります。

図4：産業および研究機関向けの量子ダイヤモンド顕微鏡 (QuantumDiamonds社提供のイラスト)。





図5：NV中心のスピン状態は、マイクロ波信号を介して操作されます。QuantumDiamonds社は、R&S®SMBV100B ベクトル信号発生器を信号源として使用しています。

### QDMによる量子磁界センシング

ディープレックのスタートアップ企業であるQuantumDiamonds社は、図4に示す量子ダイヤモンド顕微鏡 (QDM) という産業および研究機関向けのターンキーラボソリューションの開発を行ってきました。ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) 中心の薄い層 (図3) が、量子磁界測定用のセンサとして機能します。高純度ダイヤモンドは、炭素原子の格子構造を持っています。NV中心では、1つの炭素原子が1つの窒素原子 (N) で置き換えられ、4つの隣接する炭素原子のうちの1つが空孔 (V) で置き換えられています。



図6：チップテスト：窒素-空孔中心を持つダイヤモンドをチップの上に配置し、微細な針を使ってチップに電氣的に接触します。これにより生じる内部の磁界をダイヤモンドで捕捉します。

© QuantumDiamonds

各NV中心には、磁界に反応する測定可能なスピン状態を持つ不対電子が存在します。高精度の信号発生器 (図5) からNV中心にGHzレンジのマイクロ波を印加して、この状態を制御します。

同時に、緑色のレーザーでNV中心を光学的に刺激して、NV中心を定義された初期状態にします。この初期状態で、NV中心は赤色に蛍光発光しはじめます。周囲の磁界が変化すると、マイクロ波周波数に応じて蛍光発光の輝度も変化します。この効果を光学的に読み取って、チップ内の磁界の正確な3次元表現を得ることができます。

図6に示すように、ダイヤモンドをチップ上に直に置いて解析を行います。チップに電流が加えられると、電流が流れる導体の周囲に磁界が発生し、ダイヤモンドのNV中心の蛍光発光特性が影響を受けます。こうして、正確な測定を行うことができます。取得したデータからチップ上の磁界分布の詳細なマップを作成して、電流経路と動作不良の可能性についての結論を導くことができます。

磁界が半導体の階層の奥深いところまで貫通することができ、下の方の階層でも不良を検出できることが大きな利点です。これは複雑な3次元構造では極めて重要です。図7は、正常に機能しているチップと欠陥のあるチップの電流密度の測定結果を表しています。

## 量子磁界イメージングに向けた展望

現在、量子ダイヤモンド顕微鏡は、個別のチップの不良解析を行うためのラボソリューションとして使用されています。QuantumDiamonds社は、ウエハー全体を解析する製造ラインで直接使用するファブ内システムの発売を計画しています。各チップの磁気特性シグネチャーを取得することが初めて可能になります。この固有の特性シグネチャーにより、プロセスパラメータとコンポーネントの電気的機能を関連付けることができるようになります。半導体メーカーは、チップアーキテクチャーがますます複雑化する中でも、プロセスを最適化して歩留まりを高めるための強力なツールを手に入れることができます。

QuantumDiamonds社  
Mats Claussen氏、Tammo Sievers氏

## 参考資料：

- [1] Garsi, M. : Optimising nitrogen-vacancy based widefield imaging for broadband applications (広帯域アプリケーションでの窒素-空孔ベースの広範囲イメージングの最適化)。シュトゥットガルト大学博士論文、2023年。
- [2] Garsi, M., Welscher, A., Schimpf, M., Bisgin, B., Hanke, M., Gieser, H., Zahn, D., Bruckmaier, F. : Quantum diamond microscopy for semiconductor failure analysis (半導体欠陥解析用の量子ダイヤモンド顕微鏡)。Electronic Device Failure Analysis, Volume 27, No. 1, pp. 18–25, 2025年。

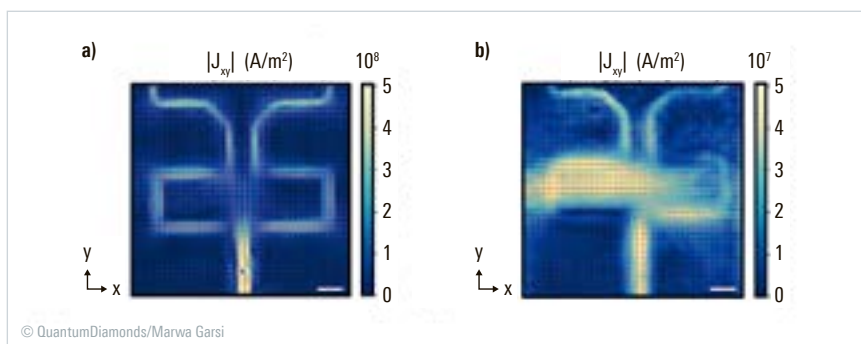
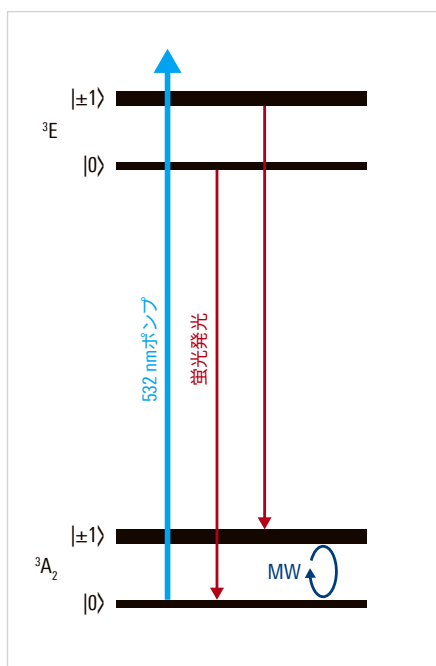
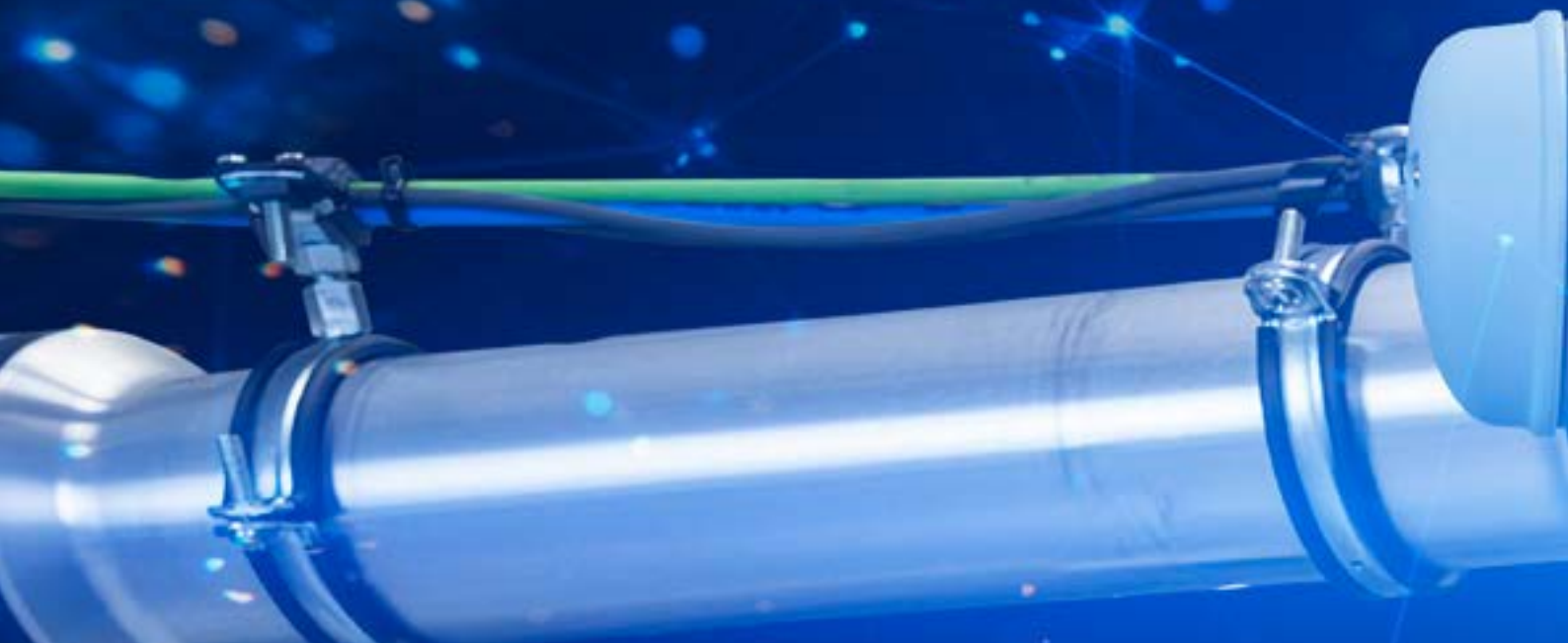


図7 (上)：(a) 正常に機能しているマイクロチップと(b) 損傷したマイクロチップの推定電流密度。

図8 (左)：窒素-空孔中心のエネルギー図：電子は、基本状態  $^3A_2$  または励起状態  $^3E$  にあります。マイクロ波(MW)は、 $|0\rangle$ のスピ状態を $|+1\rangle$ または $|-1\rangle$ に変化させてエネルギー状態をわずかに移動させます。エネルギー状態を読み取るには、緑色のレーザー光(532 nm波長)で電子を励起し、蛍光発光の輝度を観察します(図はQuantumDiamonds社のものを簡略化)。



# 研究プロジェクト： AIベースの ロボティクスが ローデ・シュワルツの製造現場で活躍

KIRO研究プロジェクトでは、社内の製造エンジニアのチームが、ミュンヘン工科大学 (TUM) と協力して、製造現場のロボティクスへの人工知能の応用をテストしています。当初の結果と過去の成功したプロジェクトから、効率の向上と納品時間の短縮が可能であることが示されています。



ローデ・シュワルツには、R&S®TH1 ラジオ送信機、CMX500 モバイル無線機テスタ、R&S®SITline ETH ネットワーク暗号化装置といった、少量生産の製品がたくさんあります。大量生産の場合には、産業用ロボットを使って特定の段階を自動化し、効率を高めたり、退屈で単調な作業を実行させたりすることが簡単にできます。一方、少量生産では経済的な理由でそれが困難です。それでも、ロボティクスを効果的に使用する可能性は残されています。ローデ・シュワルツでは、ロボティクス専門家のチームが、各地の工場で長年その課題に取り組んでいます。

### ミュンヘン工科大学との共同研究

当社はさらに、ミュンヘン工科大学の工作機械／産業経営研究所と共同で、2つの研究プロジェクトを進めています。この共同研究によって、CMX500およびCMP180 モバイル無線機テスタのモジュールのテストと校正のためのRFケーブルの取り付けに使用されているロボットセルの基盤が築かれました。これらのモバイル無線機テスタは膨大な機能を備えているため、このアセンブリーテストは数時間かかります。ロボットは、ねじ式端子を指定されたトルクで再接続する反復作業を管理し、プロセス監視のためのドキュメント作成作業の一部もこなします。

過去5年間に、ローデ・シュワルツは、量産時のテストと校正のための新しいロボティクスアプリケーションを約40種類導入しました。



図1：完成したCMP180につなげたキャップナット付きRFケーブル。

RFケーブルは、損傷しやすい内部導体と、引っかかりやすく取り扱いが困難なキャップナットを備えているので、従来のロボティクスでは技術的にも経済的にも難しい対象です。詳細については、34ページを参照してください。

### KIRO：少量生産のためのAI支援ロボティクス

人工知能は、少量生産でのロボティクスの利用を拡大するための新しい可能性を拓きます。TUMのPaul Geng氏は、日常の作業の中でこのニーズに何度も遭遇しており、次のように述べています。「よくある問い合わせとして、熟練した作業員が足りないので今後製造を自動化したいのだが、製造量が少なすぎて引き合わないというのがあります」。

Geng氏はTUMの工作機械／産業経営研究所の研究者であり、現在のKIRO研究プロジェクトをTUM側で調整する役割を果たしています。プロジェクト名は、ドイツ語で人工知能の略語である"KI"とロボティクスの2つの単語から作られました。2021年

末から、ローデ・シュワルツの製造部門とミュンヘン工科大学のロボティクス専門家たちが協力して、ロボットセルが新しいコンポーネントを扱うのを容易にするための研究を行っています。出発点として、プログラミング、グリッパーシステムの設計、ロボットセルのセットアップの3つの領域が選ばれました。ロボットアプリケーションとしては、プリント基板アSEMBリーの取り扱い(PCB処理)がテーマとなっています。

### ロボットプログラミング

Paul Geng氏は次のように語ります。「私たちは、ロボットのプログラミング時間を短縮するためのモジュラーソフトウェアアプリケーションを開発しています。これらは容易に再利用でき、新しい製品バリエーションになるべく少ない手間で適合できるように設計されています」。

### グリッパーシステムの自動設計

グリッパーシステムの設計も自動化され、コンポーネントのCAD図面からグリッパーシステムの設計を自動的に作成できるようになりました(図2)。これにより、最良のケースでは、デザイナーの作業時間を数日から数時間に短縮できます。

### ロボットセルのセットアップ

3番目のテーマは、ロボットセルのセットアップを容易にするためのスマート環境検出です。セットアップ中に、ロボットは動作環境についての情報を収集します。例えば、コンポーネントが供給される位置座標、旋回範囲内の障害物の存在、損傷を与えずにコンポーネントをつかめる点といったことです。

## 自動化困難な少量生産

現在、少量生産の企業では、経済的理由から、産業用ロボットはほとんど使われていません。大量生産の場合、ロボットのセットアップにかかる初期費用は多数のコンポーネントに分散されますが、少量生産の場合は、製造されるコンポーネントあたりの初期コストが大幅に高くなります。制御ソフトウェアのプログラム変更だけでなく、新しいグリッパーシステム(エンドエフェク

ター)の設計が常に必要になります。この設計には通常数人日の作業が必要ですが、KIROプロジェクトで開発されているようなAIサポートと自動化があれば、新しいグリッパーシステムを数時間で設計することが可能です。

# ロボティクス関連の数字

# 4,282,000

全世界で設置されている産業用ロボットの数

## 162

全世界での  
ロボット密度

(従業員10,000人あたりの  
産業用ロボットの数)

## 429

ドイツでの  
ロボット密度

(韓国、シンガポール、  
中国に次いで世界第4位)

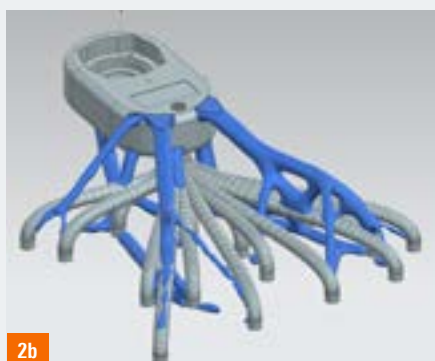
## 40

ローデ・シュワルツの  
プロセステスト向け  
ロボットアプリケーション

出典：World Robotics Industrial Report 2024/国際ロボット連盟／ローデ・シュワルツ



2a



2b

図2a：プリント基板の(匿名化された) CAD図面。

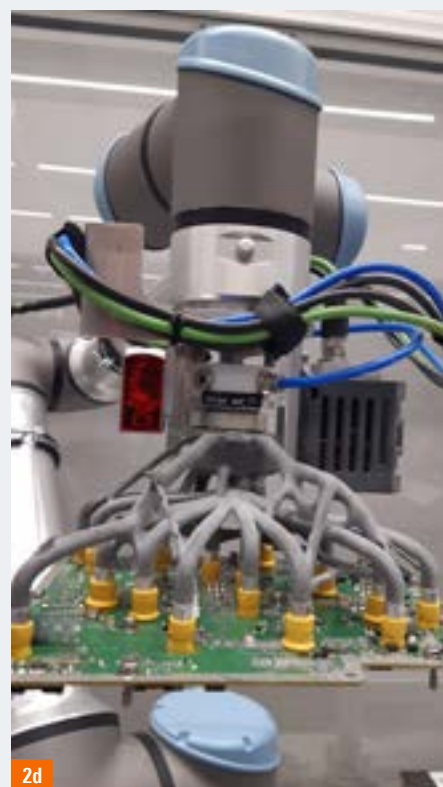
図2b：図2aのプリント基板に対して自動的に生成されたロボットグリッパースステムの設計。

図2c：比較として、同じ基板を扱うために手で設計されたロボットグリッパースステム。

図2d：3Dプリントされたロボットグリッパースystemが基板を扱っている様子。



2c



2d

KIROプロジェクトでは、2Dおよび3Dカメラを使用して、ロボットが環境を検出し、デジタル化できるようにしています。これにより、ロボットは、人間が詳細なトレーニングを行わなくても、動作経路、グリップ点、グリップ力を自分で計画できます。

AIはこのアプローチのすべてのフェーズで使用されているわけではなく、環境検出は主に従来の方法で行われています。ただし、AIモデルを使用することで、さまざまな照明条件でのグリップ点を検出し、それに向かって移動するのが容易になります。

KIROプロジェクトのローデ・シュワルツ側の責任者であるDr. Thomas Rauhは、プロセスのステップとコンポーネントに応じて、ロボットセルのトレーニング時間を最大30 %短縮できる可能性があると言っています。

### お客様にとっての付加価値

ローデ・シュワルツは、お客様向けの自動化とAIベースのロボティクスに取り組んでいます。お客様にとってのメリットは、注文のピーク時にも一貫した品質と納品時間を確保できることです。「大規模な受注が

同時に複数あった場合、ロボティクスソリューションなら、夜間シフトや週末にもスムーズに稼働させることができます」とRauhは説明します。「これにより、専門家の負荷が減り、安定した製造ターンアラウンドタイムが得られます」。

### テクノロジー主権

現在の製造業の経済環境は、サプライチェーンの変動、人口動態の変化、熟練労働者の不足といった要因により、数年前に比べてもさらに急速に変化しています。KIROのような研究プロジェクトを通じて、ミュンヘン工科大学とローデ・シュワルツは、困難な状況の下でも高品質の製造を信頼できる短い納期で稼働させるために必要な戦略的製造知識を蓄えています。自動化は、高賃金の国で垂直統合を維持するためにも役立ちます。

TUMの研究ミッションには、研究成果をあらゆる関係者と共有することが含まれます。ローデ・シュワルツは、RFケーブルアセンブリの導入の成功に見られたのと同じ野心を持って、同社の製造施設向けの産業対応ソリューションの開発を進めています。

### 今後の見通し：AIベースのロボティクスが目指すもの

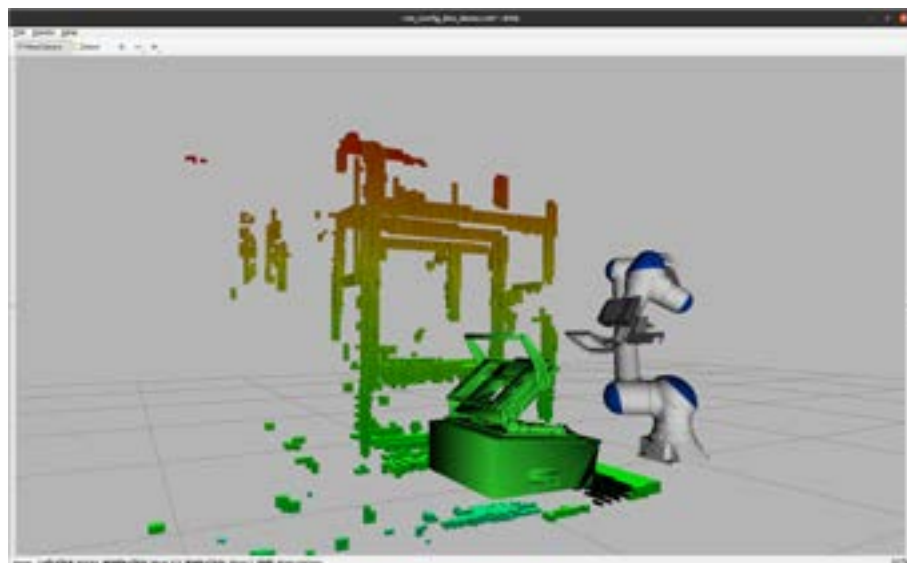
政治の世界では、ローデ・シュワルツ工場でのKIROプロジェクトの成果を、ドイツや欧州の他の場所にも広げるための取り組みが進んでいます。関連する資金提供プログラムや知識交換プラットフォームがすでに設けられています。

Paul Geng氏は、ドイツにおけるロボティクスの未来に明るい見通しを持っています。「ドイツの企業には、カメラシステムやセンサーテクノロジーからソフトウェアやAIに至るまで、従来型とAIベースのロボティクスに必要なものが豊富に揃っています」。

NVIDIAやGoogleといった大手ソフトウェアプロバイダーに加えて、AIの統合にはユーザーが主要な役割を果たすようになる、と氏は予想しています。主に、多様な種類の小規模な生産（多品種少量生産）を行う中小企業です。こういった企業にとって、自動化の導入にはまだ大きな障害がありますが、AIがその緩和に大きな役割を果たすはずです。

編集者

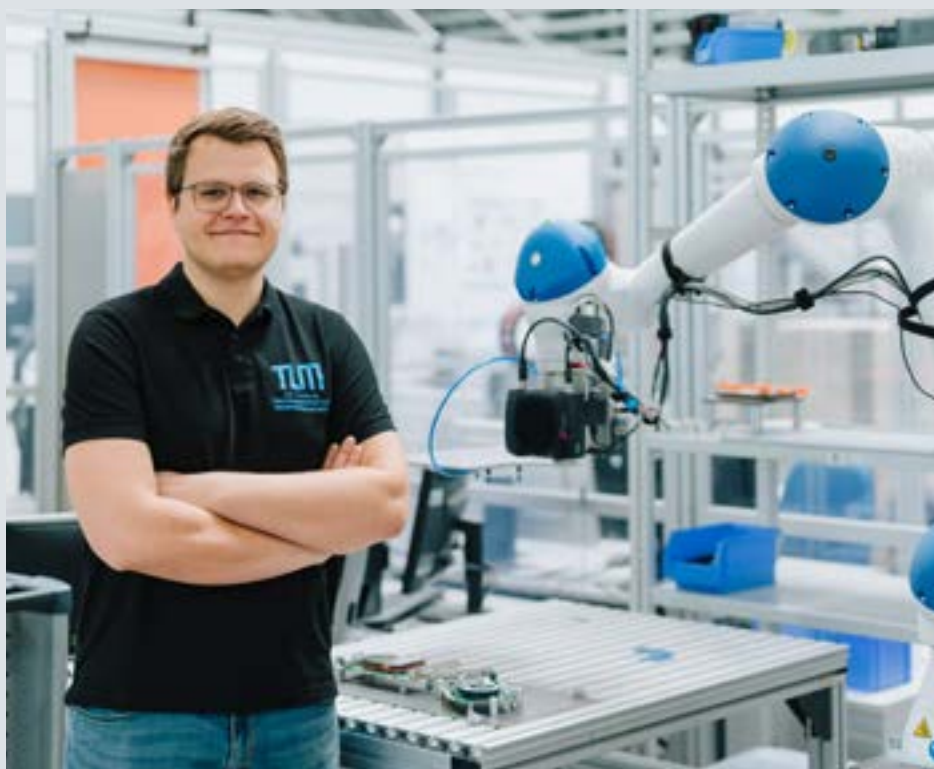
図3：セルのセットアップ過程で、ロボットは自身の環境のデジタルモデルを作成することで、経路計画を自動化します。3Dスキャンプロセスは、KIROプロジェクトの過程で開発されました。





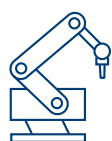
「当社の製造部門では、効率と柔軟性を高め、信頼できるターンアラウンドタイムを確保するために、常に努力が続けられています。KIROのようなプロジェクトのおかげで、必要なテクノロジーを早期に開発できます。」

図4：社内トレードショーのブースでのプレゼンテーション：Dr. Thomas Rauhは、ローデ・シュワルツの全工場の自動化とロボティクスに責任を負っています。



「ローデ・シュワルツは、ロボティクスユーザーとして非常に有利な立場にあります。その大きな理由は、早い時期に導入を始めたことです。」

図5：Paul Geng氏  
(ミュンヘン工科大学工作機械／産業経営研究所の研究者)。



## AIベースのロボティクス –

QRコードをスキャンしてポッドキャストシーケンスにアクセス



研究から製造まで:

# ロボットによる RFケーブルの 組み立て



可撓性(しなやかにたわむ性質)のあるケーブルなどを扱うプロセスは自動化が困難ですが、ローデ・シュワルツでは現在、製造現場でのモバイル無線機テストモジュールの評価に用いられるRFケーブルの組み立てに、ロボットセルが使われています。ミュンヘン工科大学との共同研究により作成されたプロトタイプに基づいて、産業用途のソリューションが開発されました。

## メミンゲンの製造工場:

カメラと力センサーを備えたロボットが被試験機器にRFケーブルを接続している様子。

ローデ・シュワルツでは、数十年にわたり、製造現場での物品の運搬、取り扱い、テスト／校正などの自動化が進められてきました。運搬には標準的なソリューションが使用できますが、他の2つの分野には専用の自動化ソリューションが必要です。

### テスト／校正用のRFケーブル

テスト／校正の自動化に関する高度な社内開発の1つとして、CMX500およびCMP180 モバイル無線機テスト用のRFケーブルのねじ式接続が挙げられます。このプロセスでは、モバイル無線機テストの入力／出力ソケットに同軸ケーブルをねじ込み、指定されたトルクで締め付ける必要があります。RF接続が正常であることが確認された後、周波数レンジが測定されて校正されます。測定が完了すると、テストケーブルのねじが外され、次の測定用にケーブルが再接続されてねじ止めされます。

ブロードバンド無線機テストは膨大な機能を備えているため、テストプロトコル全体の実行には数時間かかる場合があります。

### 従来のロボティクスを超えて

「RFケーブルを取り上げて接続するまでの間には、予測できない曲がりやねじれが生じる可能性があるため、従来のデターミニスティックなロボティクスでは自動化が困難です」と、ミュンヘン工科大学のPaul Geng氏は説明します。

従来のロボティクスでは、ロボットが遭遇する可能性があるあらゆる状況を予測し、個別に対応するための命令を記憶します。このアプローチは、RFケーブルのような柔軟な物には向きません。曲がったねじ接続を緩めてまっすぐにするためにも、異なるアプローチが必要です。それを発見したのは、ローデ・シュワルツとミュンヘン工科大学によって3年間(2020～2022)にわたって行われたRoMaFo研究プロジェクトでした。

### 視覚、触覚、連続的最適化

RFケーブルアセンブリーシステムには、3つの要素があります。1つめは画像認識で、従来の方法とAIベースの方法を使用して、形状とパターンを認識する視覚をロボットセルに与える役割を果たします(図1右)。

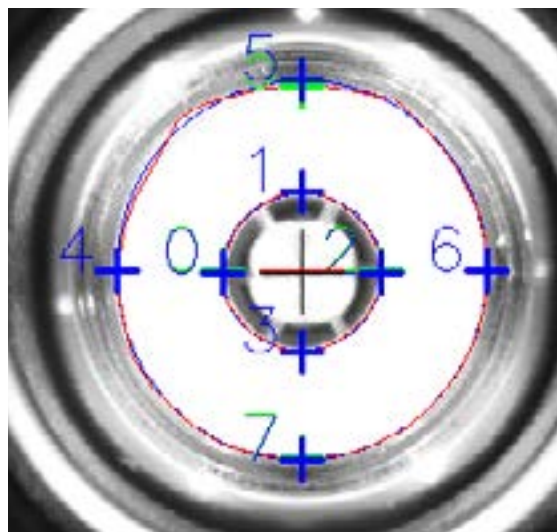
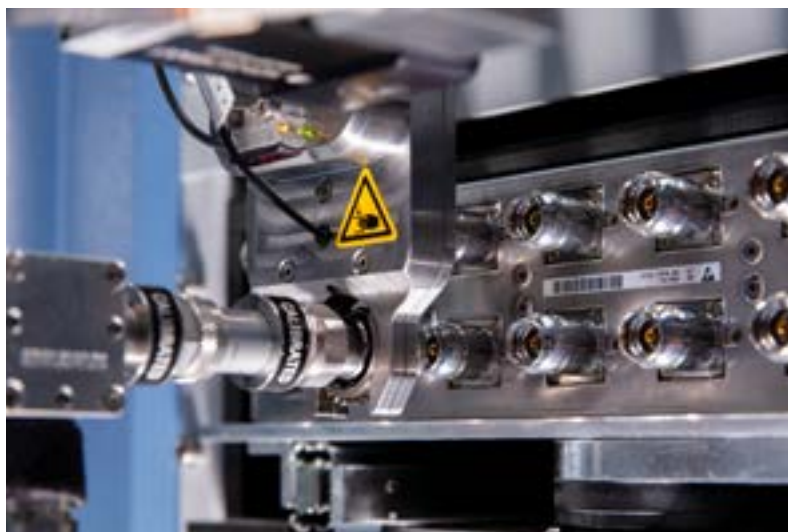
2つめは、ローデ・シュワルツが特許を有するセンサーおよびグリッピングテクノロジーであり、機械的力を伝達することで、人間の触覚に相当する役割を果たします。これは、ねじ式接続に印加されるトルクを精密に測定するとともに、RFケーブルがソケットにはまったことを判定します。

3つめの要素は連続的最適化です。「いくつかのテスト系列を通じて、あらゆる種類のパラメータが調整されました」と、ローデ・シュワルツで製造の自動化を行うロボティクス専門家のチームを率いるDr. Thomas Rauhは説明します。「ロボットはどの程度のねじ込み速度で動作する必要があるか、システムのどの部分で精密な制御が必要か、より大きい許容値が必要なのはどの部分かといったことです」。

これら3つの部分を統合した産業用システムは、ローデ・シュワルツの製造の柔軟性と堅牢性を高める役割を果たしています。Paul Geng氏とDr. Thomas Rauhはどちらも、比較できる商用ソリューションは他に存在しないと語っています。

編集者

図1：(左)ロボットのグリッパーアームがモバイル無線機テストモジュールにRFコネクタをねじ込んでいる様子。必要な空間内の向きは、画像認識によって得られます(右)。このカメラ画像は、対象のRFソケットのクローズアップです。





# R&S® BBA300

イミュニティーテスト用  
広帯域アンプ



R&S®BBA300 アンプファミリーには、今日のEMCイミュニティーテストに必要なすべてが備わっています。最大300 Wの出力パワーと高いリニアリティー、マイクロ波レンジの上のほうにまで及ぶきわめて広い連続した周波数バンド、革新的な保護方式による高い可用性を提供します。

シリーズ	周波数レンジ	最大リニア出力パワー
R&S®BBA300-CDE	380 MHz～6 GHz	300 W
R&S®BBA300-DE	1 GHz～6 GHz	300 W
R&S®BBA300-F	6 GHz～13 GHz	300 W
R&S®BBA300-FG	6 GHz～18 GHz	300 W

表1：R&S®BBA300の出力パワーと周波数レンジはモジュラー方式で選択可能です。記載されているすべてのシリーズに、低出力パワーが用意されています。

この新しいアンプは、ローデ・シュワルツの広帯域アンプの包括的なポートフォリオをさらに拡張する役割を果たします。さまざまなEMCテスト要件に柔軟に対応させることができ、コンパクトな19インチシステムに組み込み可能です。卓越したノイズパワー密度、低い雑音指数、優れた高調波特性が特長です。

#### きわめて広い周波数レンジで優れたRF性能を発揮

R&S®BBA300は、18 GHzまでの広帯域の増幅と、最大300 Wのリニア出力パワーが特長です。表には、各シリーズのきわめて広い周波数レンジが示されています。

RF信号は周波数レンジ全体を1回の掃引でカバーするので、モバイル／ワイヤレス業界でのRFコンポーネントやデバイスのテストと検証の時間を短縮できます。

単純なAM、FM、PM、またはΦM変調を伴う狭帯域CW信号と、200 MHz帯域幅の複雑なOFDM信号の両方を増幅することができます。

これらのアンプシリーズは、GSM、LTE、5G、GPRSモバイル通信周波数、無線LAN、Bluetooth®、Zigbee無線規格、および380 MHz～18 GHzのさまざまなEMC規格向けに使用できます。反射や不整合への耐性を備えているので、電磁イミュニティーテストに最適です。

高いリニアリティー、-110 dBm (1 Hz)という卓越したノイズパワー密度、10 dBのノイズファクター、および-23 dBc未満の高調波特性により、エラーベクトル振幅 (EVM) の増加なしで、低い隣接チャネル漏洩電力比 (ACLR) と優れた伝送特性を確保します。



## R&S®BBA300は、EMCイミュニティー測定、検証テスト、パワーセンサの校正など、さまざまなアプリケーションに最適です。

### 1つのアンプで多様なアプリケーションに対応

R&S®BBA300は、EMCイミュニティー測定、検証テスト、パワーセンサの校正など、さまざまなアプリケーションに最適です。医療用または科学研究用の粒子加速器や、プラズマアプリケーションにも使用できます。アプリケーションに応じて、異なるアンプ特性が必要です。

### 柔軟なバイアスポイントと動作モード

R&S®BBA300-PKソフトウェアオプションでは、2種類の方法でR&S®BBA300を作業に最適に適合させることができます。バイアスポイントは段階的に調整できます。また、出力パワーを最大化する動作モードと、高い不整合耐性が得られるモードを切り替えることができます。どちらの設定も、アンプの動作中に変更できます。

### バイアスポイントの調整

バイアスポイントはアンプの動作方法を定義するもので、信号伝送に大きな影響を与えます。バイアスポイントをトランジスタ線形領域の中央に配置すると、クラスAアンプになります。クラスAのバイアスポイントは、優れたリニアリティーとかなり良い高調波性能を備えており、被試験デバイス位置でクリーンなCW信号を発生するために適しています。ABモードは、パルスド信号をできるだけ忠実に再現するために最適で、アンプの効率を高める効果もあります。バイアスポイントは、要件に応じてクラスAとクラスABの間で10段階に設定できます。

### 最大パワーまたは高い許容値の選択

R&S®BBA300-PK1ソフトウェアオプションを使用すれば、要件に応じて、RF出力が適切に整合している

最大出力パワー（最大電圧定在波 (VSWR)  $\geq$  約2:1）を使用するか、または、パワーの低下を遅延させる高い不整合許容値 (VSWR=約6:1まで) を使用するかのどちらかでR&S®BBA300を動作させることができます。

アンプ出力でのインピーダンス整合は、一般的に、デザインや製品の検証テストで、50  $\Omega$  システムのDUTに対する適切な整合が必要な場合に適しています。これらの条件の下では、使用するアンプのパワー余力を完全に使い切ることができます。不整合が生じるのは、DUTに欠陥がある場合のみです。この場合、アンプは自身を保護するだけでよいので、アンプの出力を下げることができます。

整合が十分でないアンテナを使用するEMCアプリケーションや、入力インピーダンスが50  $\Omega$  から大きく外れているDUTの測定では、アンプを使用して、必要なパワーをできるだけ長い時間出力する必要があります。極端な不整合の場合に限り、アンプは自身を保護するために出力を下げる場合があります。

### 高い信頼性と汎用性を両立

R&S®BBA300ファミリーの特長は、高可用性と信頼性の高い動作です。RF出力に不整合負荷がある場合でも、あるいはRF出力がショートまたはオープンの状態でも、洗練されたRF設計と冷却設計により、信頼性の高い連続的な動作を確保しています。ローデ・シュワルツの広帯域アンプの高い不整合許容値は、特にEMCラボで高く評価されています。これにより、出力のVSWRが6:1の場合でも、RF順方向パワーをフルに供給することができます。

図1：ISO 11451およびISO 11452に準拠した自動車テスト用のコンパクトなクワッドバンドEMSテストシステム。9 kHz～1 GHzレンジ用のR&S®BBA150 アンプ2台と、1 GHz～18 GHzレンジ用のR&S®BBA300 アンプ2台を組み合わせ使用。

# さまざまな制御パラメータ設定と代表的なアプリケーションのためのアンプ特性

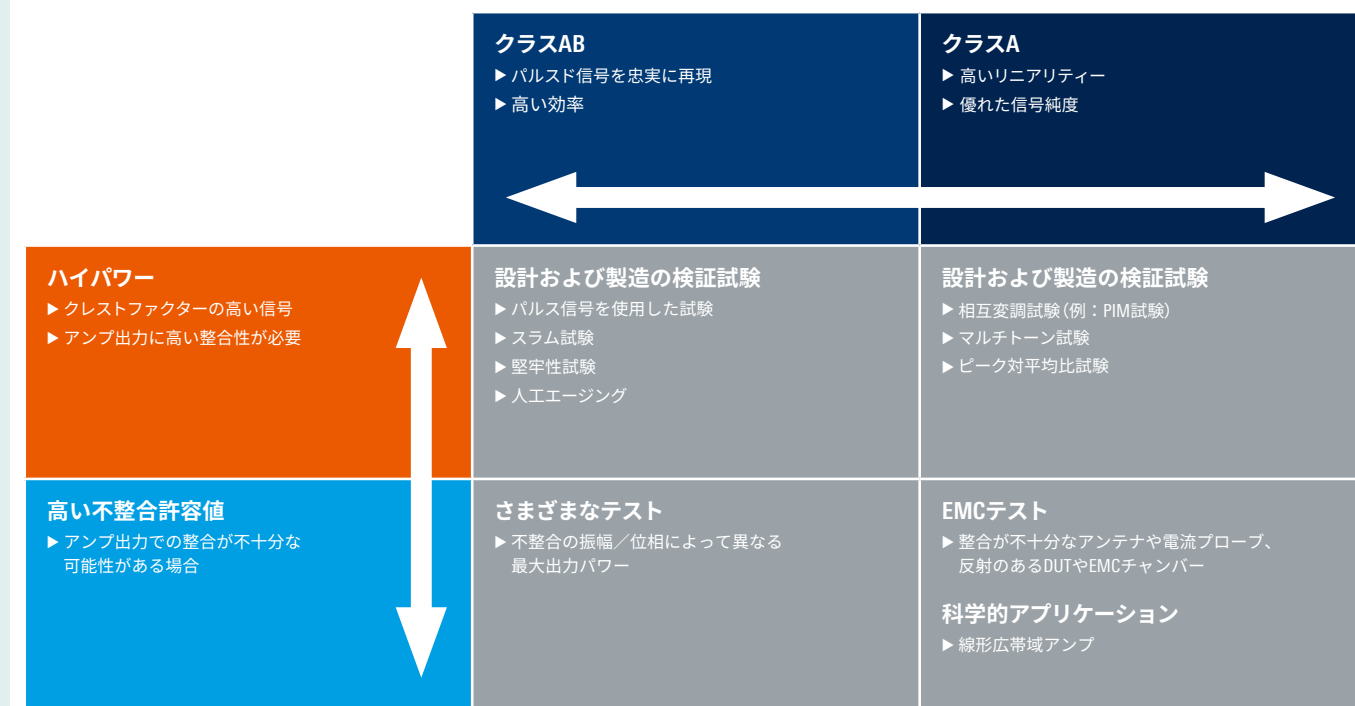


図2：さまざまな操作パラメータと代表的なアプリケーションのためのアンプ特性。

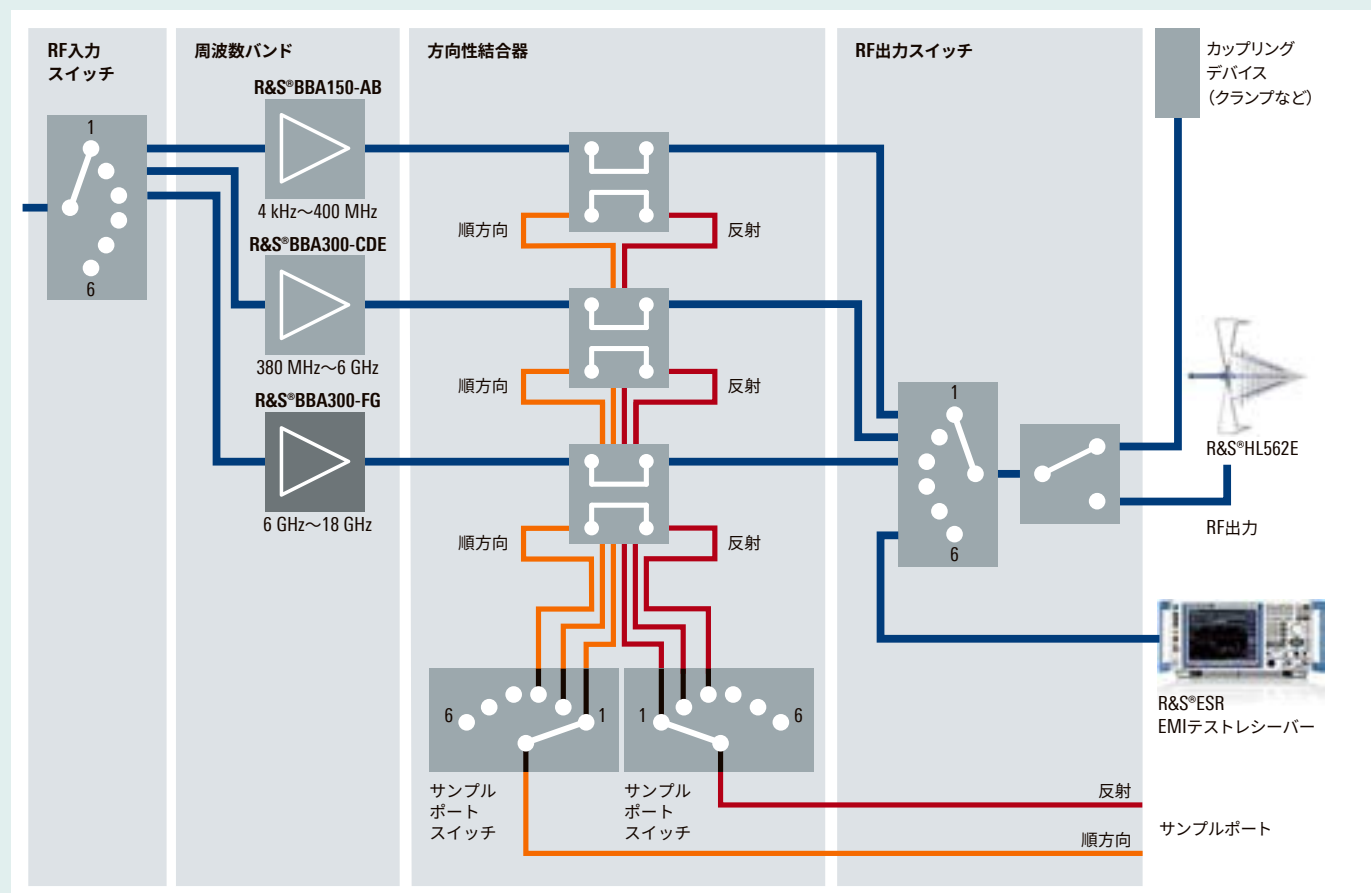


図3：複数のR&S BBA アンプを組み合わせて構成された4 kHz～18 GHzレンジ用のマルチバンドアンプシステム。

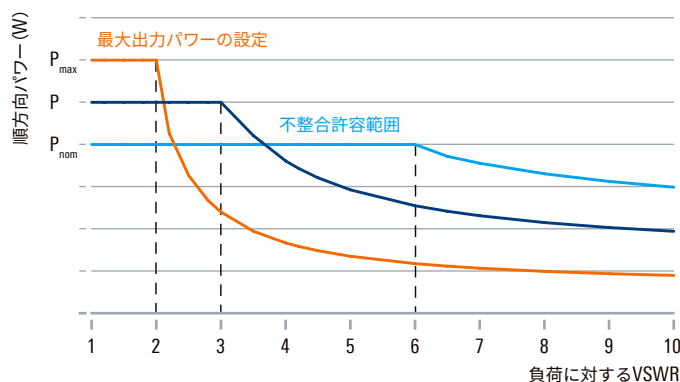


図4：順方向パワーとその結果としてのRF出力の不整合許容値の間の関係。VSWRモードの場合、アンプはVSWRが6:1でも $P_{nom}$ を供給できます。ハイパワーモードの場合、アンプはVSWRが2:1で $P_{max}$ を供給します。

R&S®BBA300の革新的で高度な保護方式により、トランジスタが故障した場合でも出力を下げた状態で動作できます。これにより、低パワーアプリケーションでの継続動作が可能で、ダウンタイムを最小限に抑えることができます。コンポーネントの経年劣化やドリフトを補正するための定期的なゼロ入力電流調整といったその他の機能により、広帯域アンプの寿命が延びます。

R&S®BBA300ファミリーの高いシステム可用性をサポートするため、ローデ・シュワルツでは、全世界での24時間年中無休のサポート、スペアパーツ／機器の在庫、オンサイトサービス、定期メンテナンスを含む、柔軟でカスタマイズ可能なサービスパッケージを提供しています。これにより、R&S®BBA300 アンプは継続

的に高い信頼性で動作可能な状態にあり、寿命の全体を通じて高い可用性を維持します。

### コンパクトなデザイン、容易な拡張

R&S®BBA300 広帯域アンプは、極めて高いRFパワーと超広帯域幅を、非常にコンパクトなパッケージで実現しています。例えば、R&S®BBA300-CDE180モデルは、わずか4Uで180 W P1dBを発生します。

設計は、小さいフットプリントで柔軟性を実現するように最適化されています。アンプのステージやその他のコンポーネントは、19インチラックのプラグインユニットとして設計されています。これらのプラグインユニットの周波数レンジとパワーは柔軟に設定可能で、後からの拡張も容易です。

また、必要に応じて、スイッチオプションを使用して複数のアンプを結合することもできます。例えば、CDEとFG (380 MHz～18 GHz) のような2つの周波数レンジを1つの4 RUデスクトップモデルに統合して90 W/50 Wのリニアパワーを出力したり、複数の周波数レンジをラック内の1つのシステムにまとめたりすることができます。

ローデ・シュワルツ、Michael Hempel

## まとめ

R&S®BBA300 広帯域アンプの主な特長は、以下の4つです。

1. 最大300 W P1dBのリニア出力パワーと、380 MHz～6 GHzおよび6 GHz～18 GHzの広い周波数レンジでの優れたRF性能。
2. 高い信頼性と堅牢性による高可用性。
3. お客様の要件にアンプ特性を適合させることが可能。
4. 周波数とパワーに関する高い柔軟性、スケーラビリティ、拡張性。

図1：R&S®HF1444G14 高ゲイン  
EMIマイクロ波アンテナ。



# 小型アンテナながらも 優れた性能

R&S®HF1444G14 高ゲインEMIマイクロ波アンテナは、ローデ・シュワルツのEMC測定アンテナの周波数レンジを44 GHzにまで拡張します。この新しいアンテナを使えば、14.9 GHz～44 GHzというきわめて広い周波数レンジでのEMI測定が可能なので、高い周波数へのトレンドに対応するとともに、テストセットアップのコストパフォーマンスを高めることができます。

すべての電子機器は動作中に電磁干渉を発生するため、市場に出す前にEMCテストを行って、動作の信頼性を確認し、無線サービスを保護する必要があります。テストの際には、被試験機器(EUT)の電磁放射を、EMCチャンバー内でEMCアンテナとEMIテストレシーバーを使用して測定します。

### 高い周波数へのトレンド

電子機器の動作周波数はますます高い領域に移りつつあるため、EMCテストに必要な周波数レンジも広がっています。このことは規格化にも反映されています。今後のCISPR 16-1-4 (テストサイト検証) およびCISPR 16-2-3 (測定方法) では、EMCアンテナの周波数レンジが18 GHzから40 GHzに拡大され、必要最小ビーム半値幅は28°になります。

### 測定の高速化とテストチャンバーの小型化

R&S®HF1444G14 高ゲインEMIマイクロ波アンテナは、上記の要件を満たし、高いアンテナ利得と十分なビーム半値幅を備えているので、大きい物体をコンパクトなEMCチャンバー内でテストできます。このアンテナは、直径1.5 m、高さ1.5 mの円筒形EUTを、3 mの距離から1回の測定で完全に照射できます。

このセットアップにより、測定時間を短縮してスループットを上げるとともに、アンテナをEUTの近くに配置することで、電界測定のS/N比を向上させることができます。より小型でコストパフォーマンスの高いEMCチャンバーをテストに使用できます。

Ku、K、Kaバンド(衛星通信)、FR2レンジ(モバイル通信)、および40 GHzより上のマイクロ波レンジで動作する電子機器からのエミッションを検出できます。R&S®HF1444G14は、これら最新機器の開発に威力を発揮します。

### アンテナの設計と性能

このデュアルリッジホーンアンテナは、同軸から円形への導波管変換、放射器、ホルダーから構成されます(図3)。オンアクシス変換によりRFテストシステムの損失を最小化でき、外部低雑音増幅器の統合が容易になります。同軸RFコネクタから円形導波管への変換においては、きわめて優れた広帯域反射係数が実現されており、不要な放射モードによる重大な励振を防ぐことができます。

### EUTの照射

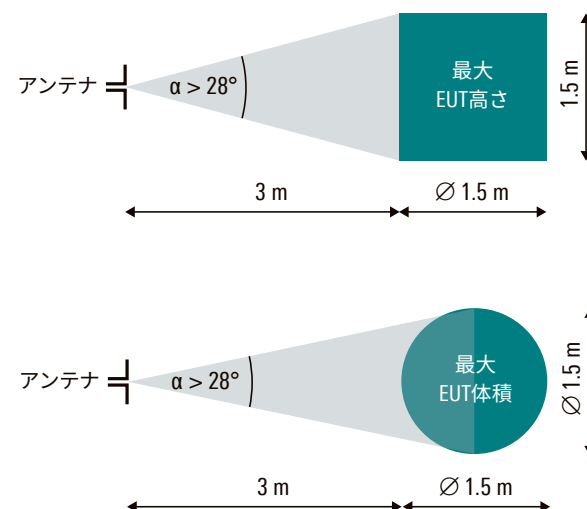


図2：DUTの照射の側面図(上)および鳥瞰図(下)。

優れたインピーダンス整合を実現するため、変換部には複数の種類の伝送ラインが使用されています。放射器は楕円形で、テーパ状のフレアを備えているので、開口面の横断面内で対称的な電界分布が得られます。これにより、EプレーンとHプレーンのビーム半値幅が同程度になり、周波数レンジ全体にわたって対称的な放射パターンが得られます。

アンテナは電波吸収体を使用してホルダーに取り付けられているので、アンテナのレーダー断面積が減少し、アンテナと反射性のEUTの間の定在波を減らすことができます。

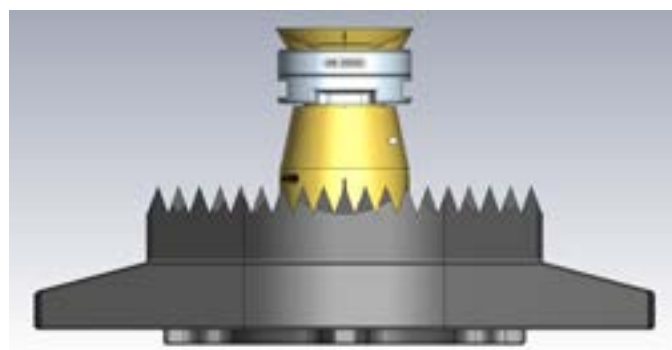
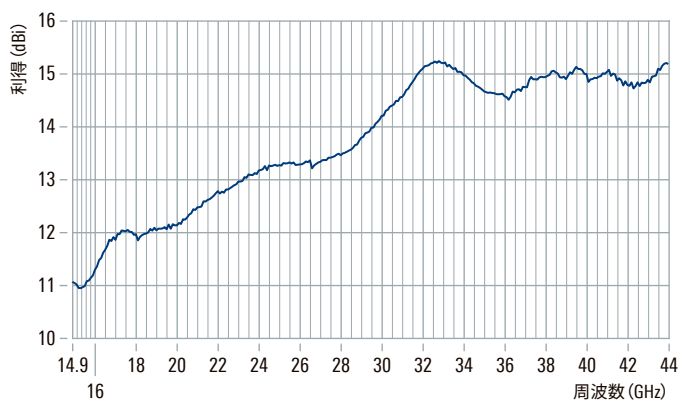


図3：R&S®HF1444G14 高ゲインEMIマイクロ波アンテナの構造。



図4：EMCチャンバー内のR&S®HF1444G14 高ゲインEMIマイクロ波アンテナとR&S®ESW44 EMIテストレシーバーの組み合わせ。

### 実測アンテナ利得



### 実測ビーム半値幅

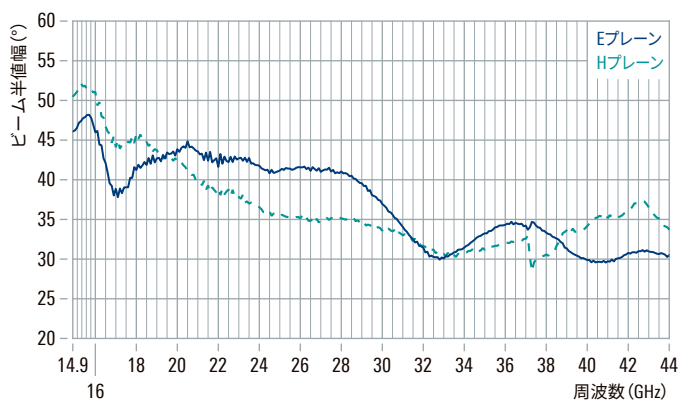
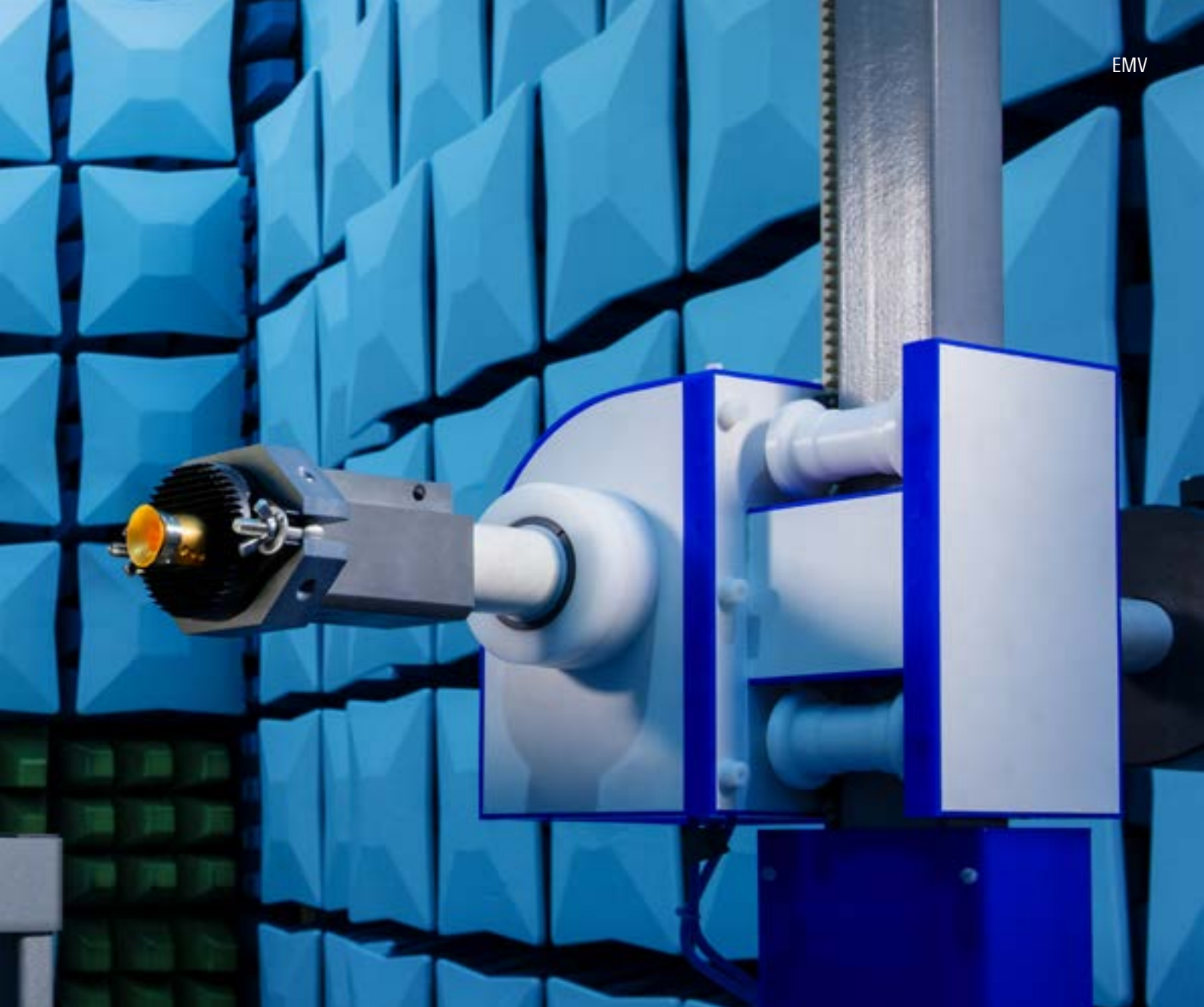


図5：R&S®HF1444G14のアンテナ利得(左)とビーム半値幅(右)の測定結果。



ホルダーには、マストに取り付けるための2つの穴があります。プリアンプなどの外部機器を取り付けるためのねじ穴も用意されています。アンテナのRF入力には、2.92 mmコネクタが使用されています。

R&S®HF1444G14は、きわめて優れた電気性能と高いアンテナ利得(中心周波数で約14 dBi)に加えて、28°を超えるビーム半値幅を備えています。

#### まとめ

R&S®HF1444G14 高ゲインEMIマイクロ波アンテナは、ローデ・シュワルツのEMC測定アンテナポートフォリオの周波数レンジを44 GHzまで拡大します。

R&S®ESW44 EMIテストレーサーと組み合わせることで、FCC part 15およびMIL-STD-461G規格に準拠した最高40 GHzの完

全なコンプライアンステストに最適です。拡大された周波数レンジにより、37 GHz~43.5 GHzのITUバンド全体で測定を行うことができます。

精密な機械的構造と、ANSI C63.5、今後のCISPR 16-1-6、SAE ARP958Eに準拠した個別校正(オプション)により、電磁波障害の測定に最適です。認定校正は、要望に応じて利用できます。

R&S®HF1444G14は、EMCテストラボや、EMIテストを必要とする複雑な製品や電子機器のメーカーにとって、将来を見据えた投資となります。

ローデ・シュワルツ

Dr. Adam Tankielun, Maximilian Weinzierl

# EMCイミュニティーテストでの広帯域RFアンプの使用

電子機器の数が増えるほど、EMCイミュニティーテストの重要性も増していきます。この記事では、広帯域RFアンプを選択する際に役立ついくつかの基本概念と重要なパラメータについて説明します。

## 電子化する社会

電子機器の重要性は、日常生活のほぼすべての分野でますます高まっています。2018年に、米国の一般的な家庭にある電子機器の数は10台前後でした。しかし、5年後にはその数は17台にまではね上がっています<sup>1)</sup>。しかも、これらの数は無線電子機器（モバイル通信、Wi-Fi、Bluetooth®）だけを対象にしているので、実際の家庭内の電子機器はもっと多くなります。このような電子化のトレンドは、日常生活だけでなく、産業、航空、医療、教育といった分野のシステムにも起きています。

## 産業と社会にとってのEMCテストの重要性

すべての電子機器は、他の電子機器との間で、干渉したりされたりする可能性を持っています。ただし、放射エミッション（空気を伝播）と伝送エミッション（ケーブル内を伝播）の間には違いがあります。電磁妨害の影響は、かすかな雑音や画面のちらつきから、機器の故障や場合によっては永久的な損傷にまで及びます。複数の電子機器が互いに近い場所に存在する状況では、デバイス間の妨害を検出して測定する手

段がますます必要とされます。その目的は、電磁妨害を完全に排除するか、あるいは少なくとも制限することです。電磁両立性（EMC）とは、電子機器が、特定の電磁環境内で、干渉したりされたりせずに正しく動作する能力のことです。特に、複雑でつながり合った多数の電子製品が存在する今日の世界では、妨害なしに共存できることは必須と言えます。

## 規制上の義務と規格

EMCの重要性が増すにつれて、さまざまなEMC規格や規制が登場してきました。これらのEMC規格は、政府、軍事、産業の各領域に分類されます。これらは、CISPR、IEEE、ISO、MILといった関連する規格化団体の委員会によって定義されます。世界の多くの地域で、電子製品のマーケティングや販売には、関連するEMC規格へのコンプライアンス証明が要求されます。そのため、多くの企業は、EMCテストを製品の開発サイクルに組み込んでいます。

## エミッションテストとイミュニティーテスト

EMCテストは、エミッションテストとイミュニティーテストの2つの一般的カテゴリに分けられます。

エミッションテスト（妨害波測定）は、被試験機器（EUT）から放射される電磁信号を測定します。これにより、これらのエミッションが許容限界を超え、近隣の他のデバイスに問題を引き起こす可能性があるかどうかを判定できます。これに対して、イミュニティーテストの目的は、デバイスが無線周波数エネルギー（多くの場合はかなり大きなもの）にさらされた場合でも正しく動作を続けられるかどうかを検証するものです。

高いRFエネルギーレベルで起きる電子機器の誤動作や故障の例は数多く知られており、誤動作が怪我や死亡につながる場合さえあります。この記事の後半と36ページの記事で扱っている広帯域アンプは、基本的に高エネルギーの妨害電磁界を発生するために用いられます。したがって、この記事の残りの部分では、主にイミュニティーテストについて扱います。

<sup>1)</sup> 出典：Consumer Electronics Dashboard, Parks Associates, 2024年

## イミュニティーテストの概要

イミュニティーテストでは、デバイスや車両などの電子製品を、広い周波数レンジにわたる指定されたレベルの無線周波数エネルギーにさらし、その状態でも製品が正しく動作するかどうかを判定します。この無線周波数エネルギーは、接続されたケーブルを通じて妨害信号として直接EUTに伝送される場合（伝導イミュニティーテスト）と、空中を通じて電磁界としてEUTに放射される場合（放射イミュニティーテスト）があります。

伝導イミュニティーテストの場合、ケーブルを取り囲む電流プローブを通じて妨害電流が注入されることで、EUTの電子入出力回路の堅牢性がテストされます。放射イミュニティーテストの場合、使用するテスト周波数の指定された電磁界（1.5 m×1.5 mの均一な電磁界をカバー）が、アンテナ先端まで3 mの距離にあるアンテナから発生されます。EUTはこの電磁界の中に置かれます。規格で指定された周波数レンジ内でテスト周波数を徐々に上げていく（掃引）ことにより、妨害周波数に対するEUTのイミュニティーをテストできます。製品と規格に応じて、9 kHz～18 GHzの特定の周波数レンジで、3 V/m～200 V/m



図2：イミュニティーテストシステムの例：この19インチラックには、9 kHz～18 GHzの4つの周波数レンジに対応する広帯域RFアンプ（R&S®BBA300ユニット2台とR&S®BBA150ユニット2台）が収容されています。

の電界強度が必要とされます。自動車業界の場合、強度は最大600 V/mに達することもあります。

## イミュニティーテスト用のテストセットアップ

イミュニティーテストは、遮蔽されたEMCテストチャンバー内で行われるのが普通です。信号源としては、信号発生器が用いられます。広帯域RFアンプシステムによって増幅された信号は、広帯域RFアンテナによってEUTに送信されます。伝導テストの場合、電流プローブがアンテナの役割を果たします。方向性結合器とパワーメータを使用して、指定されたRFパワーが発生されるようにします。測定プローブと測定レシーバーにより、EMC規格で要求され

ている電界強度がEUT位置に実際に存在することを確認します。制御ソフトウェアが、使用されるすべての機器を管理し、必要なテスト手順を実行します。

必要なRFパワーは、EUTをはじめ多数の要因に依存しますが、数百あるいは数千ワットに及ぶことも珍しくありません。そのような大きいパワーは信号発生器では発生できないので、広帯域RFアンプシステムが下流に接続されます。

## 広帯域RFアンプの要件

EMCテストラボは、多数のEMC規格を扱い、きわめて多様な周波数／パワーレンジでテストを実行するのが普通です。多数の狭帯域RFアンプから構成される複雑なRFアンプシステムの代わりに、スケーラブルな出力パワーを持つ超広帯域RFアンプを使用することができます。モジュラー構造の製品であれば、固有のニーズに合ったシステムを柔軟に実現できるので理想的です。広帯域アンプに求められる他のさまざまな要件の1つとして、RF出力の不整合に対する堅牢性が挙げられます。

## 不整合とVSWR

EUTの経路上にあるコンポーネント（プラグ、ケーブル、アンテナ）は、インターフェースでのインピーダンスが50 Ωではないため、最適な整合を実現できません。そのため、発生したRFパワーが反射され、アンプに戻ります。反射はEUTでも起こります。これによってシステム内で失われたエネルギーは、RFアンプによって補償される必要



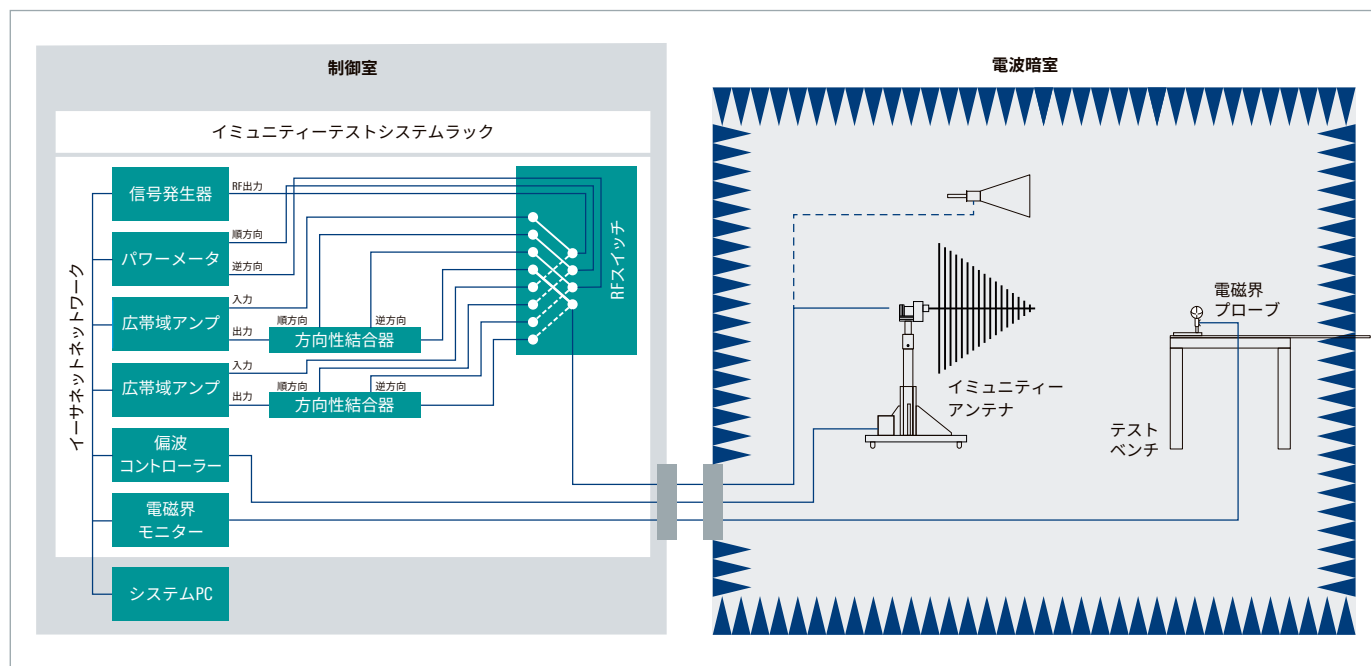


図3：イミュニティーテストシステムの代表的なセットアップ。テスト／測定機器のほとんどは制御室に置かれています。測定は遮蔽されたEMCチャンバー内で行われます。

があり、必要な公称パワーを達成するためにもっと大きなRFパワーが必要になります。同時に、反射されたエネルギーに耐えられる堅牢性も必要です。

RFエンジニアリングの分野では、その指標として電圧定在波比 (VSWR) が用いられます。これは、公称パワーの順方向波と、反射エネルギーの反射波の間の定在波比を定義します。例えば、VSWRが6:1のシステムではエネルギーの半分が反射される (不整合が大きい) のに対し、VSWRが2:1のシステムではエネルギーの11%が反射されます (不整合が小さい)。VSWRが大きいシステムでも公称パワーを供給できるRFアンプは、品質が高く、十分な余裕があるトランジスタを組み込んでいることがわかります。

### リニアリティーと圧縮ポイント

RFアンプの重要な性能パラメータとしては、この他に、リニアリティー、1 dB圧縮ポイントでの出力パワー、高調波性能の3つが挙げられます。

すべてのRFアンプには特性曲線があります。これは増幅率に対応するもので、理想的には直線です。この場合、特定の入力レベルに対してアンプはより大きい出力レベルを発生できます。RFアンプは無限大のパワーを発生することはできないので、特定の入力レベルを超えると飽和が起き、出力信号が圧縮されます。出力信号が理想的な直線レベルに比べて1 dB圧縮されるポイントのことを、1 dB圧縮ポイントと呼びます。1 dB圧縮ポイントでの出力パワーは、P1dBと呼ばれます。このポイントまではアンプはほぼリニアと言えますが、このポイントを超えると、高調波妨害のレベルが基本波に比べて急速に増加します。したがって、高調波性能は常に圧縮ポイントで指定する必要があります。

### 高調波性能

EMCテストでは、EUTの性能パラメータをできるだけ精密に検証するため、RFアンプによるテスト信号の歪みは最小限であることが期待されます。この歪みを測定する方法の1つが、高調波性能です。高調波と

は、基本波のスペクトル成分です。特に2次と3次の高調波は、レベルが高いため妨害に寄与しやすくなります。高調波と基本波のレベルの差は、特性値として記述されます。EMCテストでは、1 dB圧縮ポイントで-20 dBcというのが、アンプの最低要件の標準値として確立されています。これは、EN 61000-4-3に従って、EUT位置で-6 dBcの最大値を満たすためです。

### ノイズ

雑音指数は、低雑音増幅器の重要なパラメータの1つです。EMCテストでのアンプの雑音指数の重要性は、EUTに依存します。無線インターフェースを備えたEUTの場合、EUTへの無線リンクが妨害されたり中断されたりするおそれがあるため、アンプの雑音指数が優れていることが必要です。アンプの雑音特性は一般的に、デシベル (dB) 単位の雑音指数で記述されます。雑音指数の式には、アンプの帯域幅が含まれています。それは、雑音指数が、実際のアンプのノイズ出力と、全利得および帯域幅が等しい理想アンプのノイズ出力の間

の差だからです。そのため、アンプの帯域幅に依存しないように、正規化された帯域幅でノイズパワーを定義するほうがよいのです。dBm/Hz単位のノイズパワー密度は、搬送波周波数の前後1 Hzの帯域幅でのノイズパワーを示します。

### 定エンベロープか可変エンベロープか

適切な出力パワーを持つRFアンプを選択するには、テスト信号のエンベロープ、時間応答、帯域幅といったその他の基準も考慮する必要があります。テスト信号は、定エンベロープ信号と可変エンベロープ信号の2種類に分けられます。定エンベロープ信号としては、CW信号やFM、PM、PSK変調信号などが挙げられます。可変エンベロープ信号としては、AM変調信号、複雑なマルチキャリア信号（高次位相／振幅変調のOFDMなど）、帯域幅制限されたホワイトノイズなどが挙げられます。

テスト信号のエンベロープによって、信号ピークに対する余裕がアンプに必要なかが決まります。これはクレストファクター（信号のピーク値と実効平均値の比）に反映されます。定エンベロープの信号の場合、パワーの余裕を増やす必要はありません。クレストファクターは0 dBです。

### クレストファクターとエンベロープ

可変エンベロープのテスト信号の場合、クレストファクターは最大15 dBに達するこ

とがあります。例えば、変調度が80 %のAM信号の場合、クレストファクターは5.1 dBです。3トーンの信号のクレストファクターは14.6 dBで、パルスドCW信号のクレストファクターは3 dBです。こういったクレストファクターに対しては、パワー余力の追加が必要なので、アンプに必要なP1dBパワーの計算で考慮する必要があります。歪みのない増幅を行うには、信号のピークパワーがアンプのP1dBパワーを超えないようにする必要があります。

### テスト信号の帯域幅の考慮

テスト信号の必要帯域幅は、必要なP1dBパワーの決定に影響を与えます。RFアンプが発生できるエネルギーには上限がありますが、このエネルギーは1つのトーンに集中している場合も、広帯域信号のように特定の帯域幅に分布している場合もあります。この場合、アンプの1 Hzあたりの平均パワー出力は、シングルトーン信号の平均パワーよりも、帯域幅の対数の10倍だけ小さくなります。例えば、100 MHz帯域幅のノイズ信号の平均パワーは、全パワーが等しい純正弦波信号に比べて80 dB低くなります。

### まとめ：RFアンプの要件

膨大な数のEMC規格の中から、イミュニティーテスト用のRFアンプの要件として最も重要なものを挙げれば、以下のようになります。

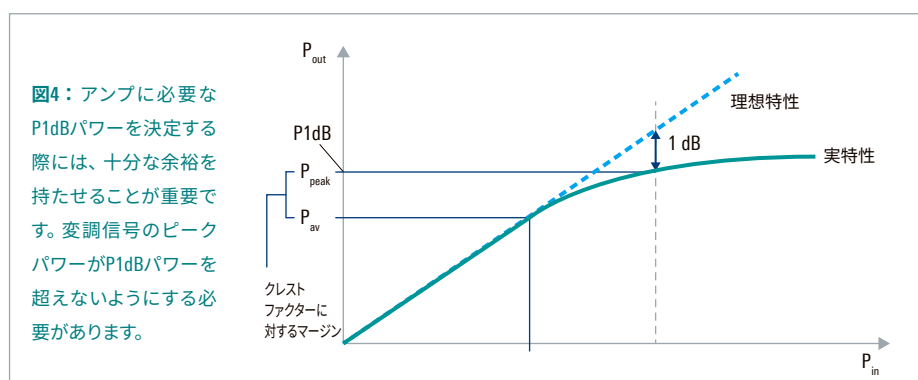
**周波数レンジとパワー：**すべての周波数ポイントに必要な電界強度を達成できるように、アンプはきわめて広い周波数レンジにわたって十分なパワーを供給できる必要があります。規格やアプリケーションによっては、これは最大600 V/mに達することがあります。

**リニアリティーと低歪み：**ほとんどのEMCテストでは、周波数レンジ全体にわたって高いリニアリティーが要求されます。これは、信号歪みによるテスト結果への影響を最小限に抑えるためです。高調波歪みの一般的な制限値は、1 dB圧縮ポイントで-20 dBc程度です。

**高い不整合許容値：**負荷（車両やEUTなど）は理想的に整合しているとは限らないので、アンプは反射に対してきわめて高い耐性を持ち、VSWR値が大きい（最大6:1の）システムでも安定して動作する必要があります。

**変調方式：**アンプは、CW、AM、PM、あるいはOFDMのような可変エンベロープの複雑な信号など、さまざまな種類の変調を増幅できる必要があります。可変エンベロープ信号の場合、ピークパワーに対応するために追加のパワー余力が必要です。

ローデ・シュワルツ、Michael Hempel





# FSWX : 信号およびスペクトラム解析の 新しい地平

モバイル通信や無線分野の高度なアプリケーションでは、RFコンポーネントが物理的限界近くまで酷使されます。FSWX シグナル・スペクトラム・アナライザは、困難な条件でのコンポーネントの特性評価のために開発されました。このアナライザは、2つの入力ポート、プリフィルタ用のフィルタバンク、ノイズ抑制のための相互相関機能を備えた初めてのモデルです。これらの機能は従来、高品質の位相雑音テスタにしかなかったものです。

データレート的高速化に対するニーズにより、現在の無線およびモバイル通信テクノロジーでは、広い変調帯域幅と大きい変調次数が用いられています。そのため、無線システムは優れたS/N比を備える必要があります。重要なRFコンポーネントは物理的限界近くでの動作を強いられます。今日のシグナル・スペクトラム・アナライザは、このような困難な条件でコンポーネントを特性評価する場合、レベルと周波数のダイナミックレンジが不足しています。相互相関は効果的ですが、測定セットアップが大規模化し、測定の作業負荷も増えます。

### FSWX：新しいクラスのシグナル・スペクトラム・アナライザ

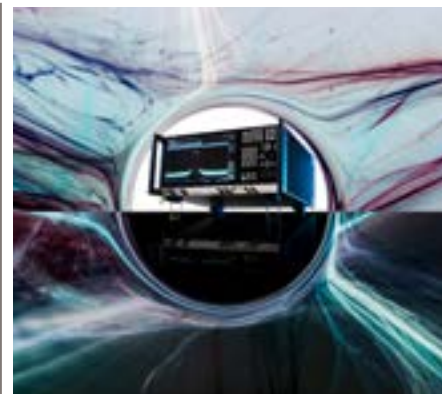
FSWXは、こういった要因を考慮して開発されました。これは、2つの入力ポートを備えた初めてのシグナル・スペクトラム・アナライザです。内蔵の相互相関モードを使えば、2台目のシグナル・アナライザを用意しなくても、従来のシグナル・スペクトラム・アナライザの能力を超える測定確度を実現できます。3つめの重要なイノベーションは、マイクロ波レンジでの従来のYIGプリフィルターの代わりにフィルタバンクを使用することです。この新しいアーキテクチャーにより、ダイナミックレンジが拡大し、測定セットアップがシンプルになり、測定時間が短縮されます。

### 2つの入力ポート

FSWXには、複数の信号源（同一周波数または異なる周波数で動作するもの）を同時に接続できるので、さまざまな新しい測定シナリオの可能性が拓けます。2つの同期入力ポートは、それぞれが4 GHzという広い解析帯域幅を備え、さまざまな信号の間の相互作用の解析に役立ちます。

複数のFSWX入力ポートを使用して、最新の通信アプリケーションのMIMO信号をデコードしたり、無線通信や航空／自動車用レーダーセンサーのビームフォーミングに用いられるアンテナアレイの位相コヒーレント測定を行ったりできます。この場合、個々のチャンネルの位相を比較することで、精密な解析を実行できます。この測定には従来のベクトル・ネットワーク・アナライザ（VNA）も使用できますが、FSWXの利点は、変調された広帯域信号の解析を、規格に完全に準拠した方法で行えることです。

また、信号をその場で基準信号と比較することもできます。例えば、パワーアンプの出力と入力と比較が可能です（図1）。



## FSWX – 不可能だった測定を実現する

FSWXの詳細情報については、QRコードをスキャンしてください。



アンプから生じる周波数応答やノンリニアリティーといった歪みを、その場で可視化できます。基準信号に関する事前の知識は、いっさい必要ありません。FSWXは、追加のVNAと外部カップラーを統合することで、従来の信号解析とVNAの利点を兼ね備えており、周波数変換コンポーネントの特性評価を簡素化するために役立ちます。電磁戦でのレーダー信号の操作に用いられるデジタル無線周波数メモリ（DRFM）の特性評価も可能です。

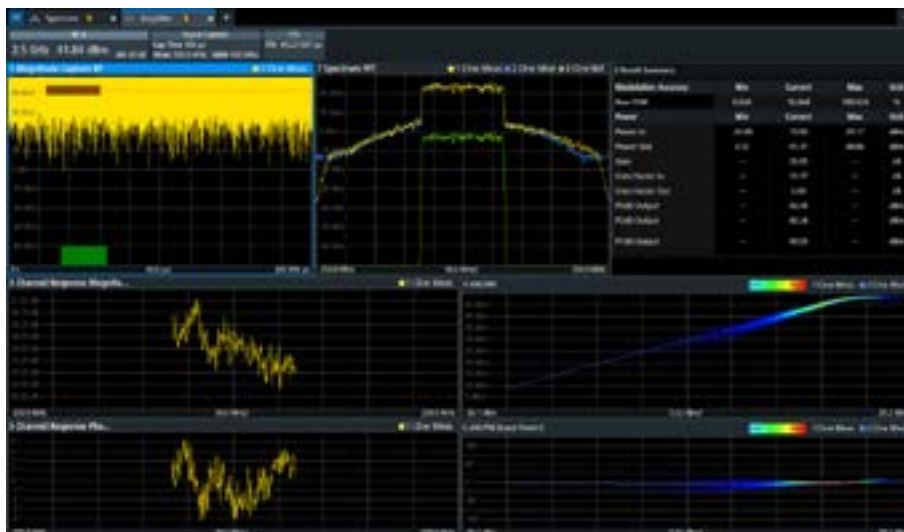


図1：アンプ測定：出力信号と入力信号を直接比較することで、残留EVM、1 dB圧縮ポイント（AM/AM）、群遅延などのすべての関連データが得られます。

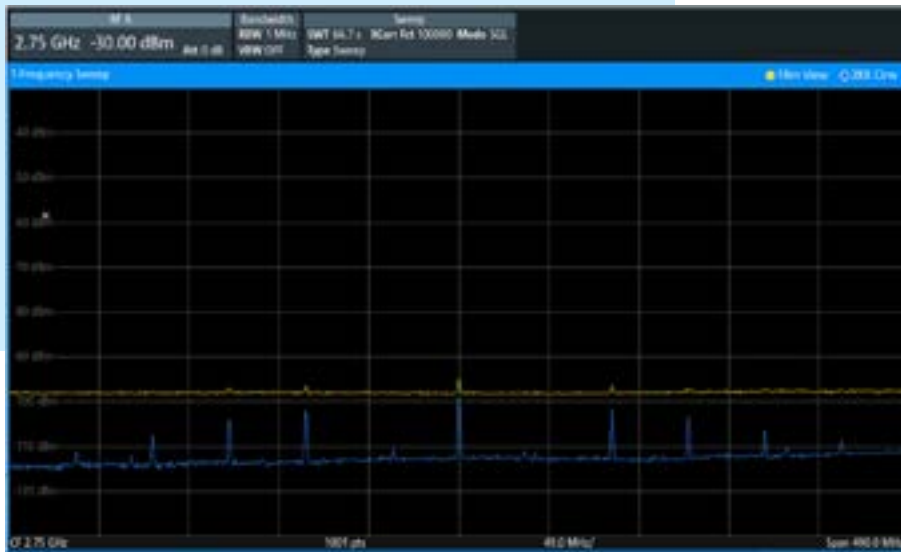


図2：相互相関モードを使用した測定（青）と使用しない測定（黄）。ノイズリダクションのおかげで、検出困難だった二次放射が見えるようになります。

### 相互相関モード

内蔵の相互相関モードは、新しいマルチパスアーキテクチャーに基づいています。内蔵されたスプリッターにより、単一信号入力が2つの独立した信号経路に分割されます。これらの信号経路は、それぞれ独立した局部発振器とA/Dコンバーターを備えています。デジタルバックエンドの高度な相互相関アルゴリズムによって、固有ノイズがきわめて効果的に抑制されるため、ほとんどのシグナル・スペクトラム・アナライザよりはるかに優れた測定確度が得られます。図2に例を示します。

相互相関は、位相雑音の測定向けに最適化された測定機器である位相雑音アナライザで実証されています。シグナル・スペクトラム・アナライザに相互相関を組み込むことで、位相雑音テストを追加せずに発振器やシンセサイザーの測定が可能になります。発振器やシンセサイザーは、今日の通信アプリケーションでの位相雑音の主要な発生源であり、実現可能なデータレートを決定する要因です。詳細については、右ページのボックス内をご覧ください。

### フィルターバンクの使用

広帯域変調解析は、モバイル通信、衛星通信、またはレーダー信号の処理において一般的な作業です。現時点では、マイク

ロ波レンジでのI/Q解析用の優れたプリセレーション機能は存在しません。マイクロ波周波数レンジのスペクトラム・アナライザではYIGフィルターが一般的に用いられていますが、これらは数dBにおよぶスペクトルリップルを伴うため、I/Q解析の際にはバイパスする必要があります。そのため、ミラー周波数のノイズや不要信号が測定結果に影響を与える可能性があります。FSWXの内蔵フィルターバンクは、動作周波数レンジ全体をフラットな周波数応答でカバーするため、I/Q解析に使用できます。また、フィルターバンクには、CW搬送波やスプリアスラインの信号レベル測定確度を向上させる効果もあります。フィルターバンクの切り替えは、(約50 MHz周波数幅の) YIGフィルターの掃引よりも高速なので、スプリアスエミッション探索の際のスペクトラム解析の速度が向上します。帯域幅の狭いYIGフィルターのほうが望ましい場合は、拡張オプションとして利用可能です。

### 革新的なファームウェアアプリケーション

クロスアプリケーション制御およびトリガ (CrossAct) 方式のファームウェアにより、異なる入力チャンネルでの異なる測定を同期させ、複数の信号を複数のツールで同時に解析できるので、レーダー信号の高次

高調波が5G信号の変調品質に影響するかどうかを短時間で確認できます。

2パス方式によって、新しいトリガオプションが可能になります。スプリッターの後の2つの受信経路に対して独立の周波数設定が可能なので、IFまたはRFパワートリガを異なる周波数で適用できます。構成可能な局部発振器も、高い柔軟性を備えています。これらは、異なる周波数で動作させることも、位相コヒーレントモードに切り替えることもできます。

### まとめ

FSWXには、ハイエンドの信号／スペクトラム解析のための多数の新機能が備わっています。全面的に刷新されたアーキテクチャーは、広帯域A/Dコンバーター、複数の入力ポート、相互相関、強力なフィルターバンクといった特長を備えています。これにより、これまで不可能だったテストシナリオが可能になります。FSWXには、モバイル通信、無線、レーダーテクノロジーの分野のニーズを将来にわたって満たし続けるプレミアム測定機器に必要なすべてが揃っています。

ローデ・シュワルツ、Dr. Wolfgang Wendler

## 位相雑音が通信システムのデータレートに与える影響

今日の通信システムでは、データ伝送用の周波数の上昇が続いており、それに伴って発振器の位相雑音も(20log(f)の割合で)増加するため、コンスタレーションダイアグラムで正しいコンスタレーションポイントを見つけるのがますます困難になっています。位相雑音が多すぎると、通信システムが低次の変調方式に切り替わり、データレートが低下する可能性があります。図3に、中心周波数140 GHzのQPSK変調信号のコンスタレーションダイアグラムが、移動雑音の増加とともにどのように変化するかを示します。

位相雑音が $-95$  dBc/Hzの状態では情報が100 kHzオフセットで伝送されている場合、 $-80$  dBc/Hzでは正しいデコードがすでに困難になります。システムはBPSK変調への切り替えを強いられ、データレートが低下します。QPSKの場合、 $-90$  dBc/Hzが位相雑音の最低要件です。中心周波数が140 GHzの場合、これはかなり困難です。この条件で発振器とシンセサイザーを最適化する場合、位相雑音測定には相互相関機能を伴う高品質の測定テクノロジーが必要です。

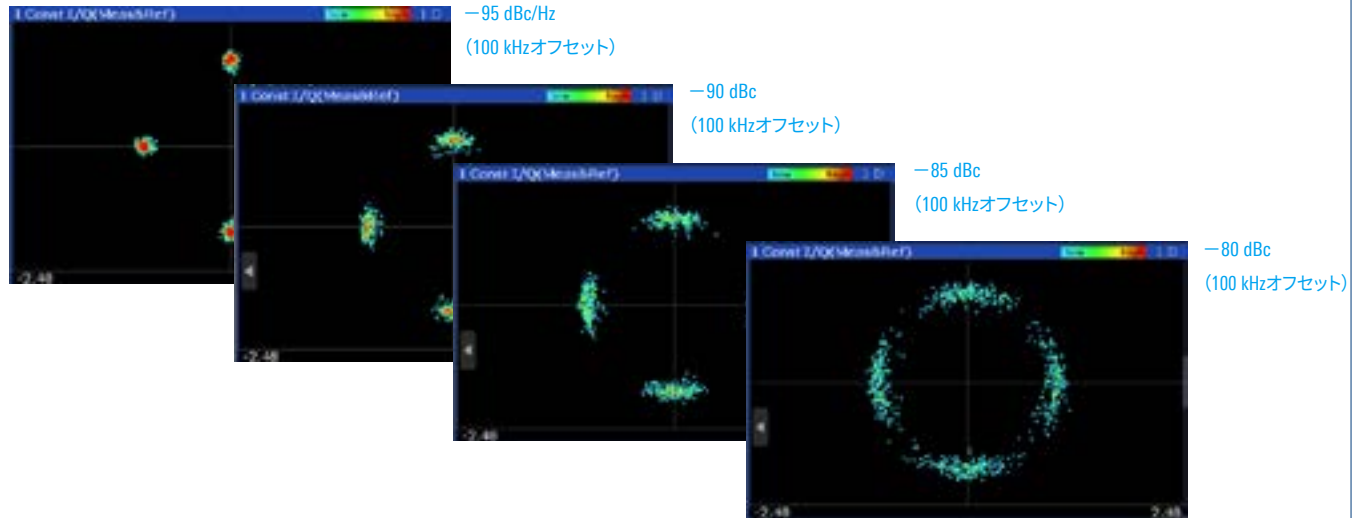


図3：QPSK変調信号のコンスタレーションダイアグラム：位相雑音が増えるほど、コンスタレーションポイントのヒット率は悪化します。

## アプリケーション例： レーダーシステムの改良

現在のレーダーアプリケーションは、ドローンなどのレーダー断面積(RCS)が小さい目標を検出するように設計されています。そのためには、レーダーシステムの局部発振器の位相雑音と、広帯域バックグラウンドノイズの改善が必要です。そうすることで、小さい目標からの反射が干渉反射によってマスクされなくなり、周波数のわずかなドップラーシフトによって目標を可視化できます。

システム内の小さい不要なスプリアスラインや攪乱要因を認識することも重要です。レーダーが小さい信号を目標と誤認識する可能性があるため、実際の目標の信頼度レベルを上げる必要があります。このようなノイズは、レーダー感度を低下させる要因となります。このような干渉の検出にはシグナル・スペクトラム・アナライザが用いられますが、ノイズフロアに近いスプリアスラインを検出するには、スペクトラム・アナライザの分解能帯域幅(RBW)を数Hzにまで下げる必要があります。その場合、フィルターのセトリング時間が増加し、掃引速度が大幅に低下するため、システムの特性能評価のための測定時間が長くなります。



そんな場合に最適なのがFSWXです。内蔵の相互相関機能により、固有ノイズの少ない高速な掃引が可能なので、干渉を短時間に高い信頼性で検出できます。相互相関によってアナライザの位相雑音が抑制されるため、レーダーシステムの局部発振器の位相雑音を改善するのも容易になります。

# デバッグ： (LP)DDR5メモリ インタフェース

DDR5/LPDDR5メモリを組み込む場合、データレート的高速化と電圧レベルの低下により、ボード設計に新しい課題が生じます。最新のDDR規格に適合するため、R&S®RTP オシロスコープには、JEDEC DDR SDRAM規格に準拠したデバッグ、シグナルインテグリティテスト、コンプライアンステストのための独自のツールボックスが備わっています。



DDRメモリは、電子機器の設計に広く用いられています。DDR5/LPDDR5仕様の最新リビジョンでは、1つのデータラインで最大8.8 Gbit/sの伝送レートが予告されています。データレートの高速化、電源電圧の低下、コンポーネント密度の上昇により、ボードの設計とテストに新しい課題が生じます。

#### DDRシステムのシグナルインテグリティに関する課題

SDRAMメモリの動作には、一般的に、8つのシングルエンドデータ信号(DQ)と1つの差動ストロークロック(DQS)が並列に用いられます。個々のDQデータビットはクロック信号の立ち上がりエッジと立ち下がりエッジで伝送されるので、このメモリはダブルデータレート(DDR)と呼ばれます。

データ信号と制御信号はシングルエンドなので、他の信号からの干渉(クロストーク)に特に弱く、ボード設計の際に特別な注意を払って、他の機能コアから十分に分離する必要があります。

高いデータレートは、PCB上の並列信号トレースのレイアウトにも課題をもたらします。伝送チャンネルには一般的に(DIMM用の)ビアとコネクタが含まれるため、インピーダンス不整合による反射や、不十分なグランドプレーンガイダンスによる伝送損失が生じる可能性があります。

#### 接触

SDRAMメモリのパッケージは、通常はボールグリッドアレイ(BGA)です。テスト対象の信号にプローブを接続するには、一般的に2つの方法が用いられます。DDRチップの下のPCB裏面が空いている場合、ビアを通じて信号を取り出すことができます(図1左)。そうでない場合、PCBとメモリデバイスの間にインターポーザーを入れる必要があります(図1右)。

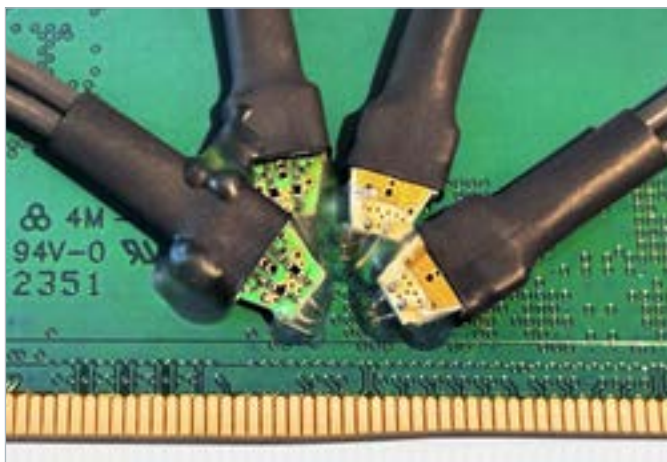
#### データアイとゾーントリガによるデバッグ

データアイダイアグラムは、最も一般的なシグナルインテグリティ解析ツールの1つです。このツールは、データ伝送の品質とエラーマージンを直観的に表現します。ただし、DDRデータ信号に対してアイダイアグラムを使用するのはそれほど簡単ではありません。DQ信号は双方向であり、WRITEデータとREADデータが、プロセッサとメモリの間の単一の信号トレース上で伝送されます。このため、アイダイアグラム解析では、READとWRITEのバーストを分離する必要があります。R&S®RTP オシロスコープのゾーントリガは、このようなアプリケーションのための強力なツールです。

#### アイダイアグラム内の適切な信号

ゾーントリガを使用すれば、ダイアグラム上の領域を指定して、波形がその領域を横切ったときに信号収集をトリガしたり、領域をトリガから除外したりすることができます。DQ信号とDQS信号の特性は、READバーストとWRITEバーストで異なるのが普通です。その違いは、信号振幅、DQSプリアンプル／ポストアンプル、またはDQ信号とDQS信号の間のエッジ位相にあります。

図1: PCB裏面のビアにはんだ付けされたプローブチップ(左)。インターポーザーにはんだ付けされたプローブチップ(右)。



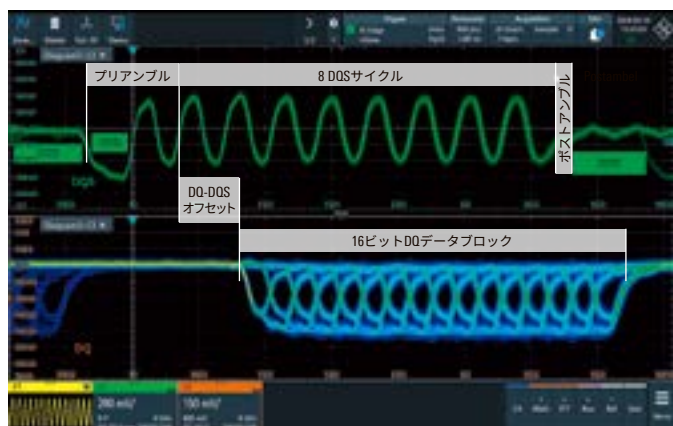


図2：DDR5 DQS信号に対するゾントリガ(緑)により、WRITEバーストだけをアイダイアグラム(青緑)用に収集できます。

図2に示すのは、WRITEバーストだけを収集するための、DQS信号プリアンプ("0010")内の除外ゾーン(ゾーン1とゾーン2)です。最後のゾーン3は、バースト長を8 DQSサイクルに制限する役割を果たします。この構成では、16のDQデータビットをデータアイとして明確に確認できます。

READ/WRITE分離のもう1つの方法は、R&S®RTPのDDRデコード機能を使用することです。これは、LPDDR5のRDQS信号(LPDDR5で新設された専用のREAD DQS信号)(図3)を使用して、WRITEバーストを識別します。アイダイアグラムツールでは、このデコード結果を使用して、個々のREAD/WRITEデータアイを構築できます(図4)。

### 自動コンプライアンステストソリューション

R&S®RTPのDDR5およびLPDDR5オプションには、JESD-79-5CおよびJESD-209-5Cに準拠した自動コンプライアンステストと、READ/WRITEデコードおよびアイダイアグラム機能が含まれてい

ます。R&S®ScopeSuite+ コンプライアンステストソフトウェアは、ユーザーによるセットアップ手順をガイドし、オシロスコープを自動的に設定し、選択されたテストを実行します。ダイアグラムとワーストケース波形を記載したテストレポートが自動作成されるので、ドキュメント作成が容易になります。

### まとめ

R&S®RTP ハイパフォーマンス・オシロスコープには、DDR5/LPDDR5メモリインタフェース用の強力なシグナルインテグリティデバッグツールのスイートが搭載されています。R&S®RTP-K19 ゾントリガオプションを使用すれば、解析に必要な信号だけを収集できます。R&S®RTP-K94 (DDR5) およびR&S®RTP-K95 (LPDDR5) オプションは、READ/WRITEデコード、アイダイアグラム機能、自動コンプライアンステストを可能にします。

ローデ・シュワルツ、Guido Schulze、Alessandro Cappelletti



図3：RDQS信号を利用したLPDDR5のREAD/WRITEデコード。

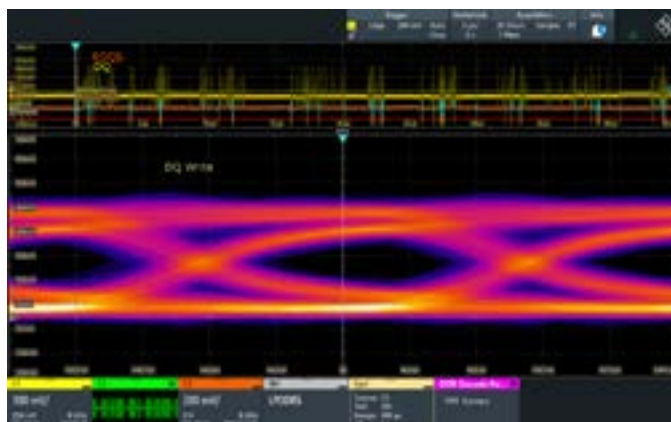


図4：READ/WRITEデコードに基づくLPDDR5のWRITEバーストのデータアイ。

# 75年の歴史： ベクトル・ネットワーク・ アナライザ

ベクトル・ネットワーク・アナライザは、最先端の通信テクノロジーの進歩に重要な役割を果たしています。この機器は1950年にローデ・シュワルツによって開発されたもので、フィルターやアンプなどのRFコンポーネントの特性評価を短時間で行うために役立ちます。ここでは、この75年間の技術の進歩と、最新のR&S®ZNB3000モデルについて簡単に見ていきます。



**図1：高精度テスト／測定機器の長い歴史：**  
1950年のZ-gダイアグラフ(左)は、世界初のベクトル・ネットワーク・アナライザでした。2019年に発売されたR&S®ZNA(右)は、4つの位相コヒーレント独立信号源と2つの内蔵局部発振器が特長です。

スマートフォン、無線機、GPS衛星といった高性能の通信システムは、RFコンポーネントの精密な特性評価なしには成り立ちません。1940年代には、この目的のための測定機器としてスロットラインが多く用いられていましたが、その操作には長い時間を要していました。一連の多数の測定と標準表に基づく手計算が必要で、スミスチャートの作成には何時間もかかっていた。

## Z-gダイアグラフ：計算不要で測定結果を読み取り

1950年に、Z-gダイアグラフ(図1)によってRF特性評価が大幅に簡素化されました。測定器から複素Sパラメータ(振幅と位相)を直接出力することが初めて可能になり、手動変換が不要になりました。すなわち、Z-gダイアグラフは、後にベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)と呼ばれるようになる新しい測定器ファミリーの最初の一員だったのです。これが測定の高速化



図2：ローデ・シュワルツのコンピュータ制御VNA：1995年発売のR&S®ZVR

に向けた最初の一步であり、次の進歩は1960年代に訪れました。

### 自動化とコンピューターテクノロジー

ベクトル電圧計により、テスト／測定分野に掃引テクノロジーが持ち込まれました。個別の周波数ステップでDUTを測定する代わりに、ベクトル・ネットワーク・アナライザは、指定された周波数レンジを自動的にスキャンできるようになったのです。コンピューターテクノロジーの到来に伴い、1970年代に自動VNAシステムが出現しました。これはその後、コンパクトな個別測定器に改良されていきました。

さらに、新しいデータ処理テクノロジーにより、系統誤差補正メカニズムの統合が可能になりました。これらの新しいシステムは、従来のものよりも大幅に高い測定確度を備えていました。コンピューターテクノロジーがテスト／測定にもたらす可能性の大きさは、すぐに明らかになりました。1980年代には、初めてのコンピューター制御VNAが市場に現れました。

### 製造現場での新しい使命

1990年代には、新しい用途が拓け始めました。それまで、VNAは主にラボで用いられる測定器でした。

しかし、モバイル通信と、少し遅れて無線通信に対する大衆市場からの要求が高まるのに伴い、大量生産でのVNAの利用が増加したため、測定時間を短縮し、製造システムへの統合を容易にするための最適化が進みました。1987年から2007年までの20年間だけで、掃引速度は100倍に向上しています。同時に、製造用のVNAは、ランプアップ時間の短縮を可能にし、特定のアプリケーション向けに拡張できるスケーラビリティを備えていたので、製造ラインを他のRFコンポーネント向けに転用する場合でも引き続き使用できました。

モバイル通信の急速な発展に伴い、表面弾性波 (SAW) フィルターの需要も増加しました。これらのフィルターは、さまざまなモバイル通信規格をサポートするフロントエンドモジュールに用いられ、複数のポートを備えていました。テスト時間をできるだけ短くするため、2000年代半ばにはマルチポートVNAの需要が高まりました。8つのテストポートを備えた初めてのVNAは、2005年のR&S®ZVTです。

2019年に、ローデ・シュワルツは新しいハイエンドのVNAであるR&S®ZNA (図1右)を発売しました。2つの内蔵局部発振器と、新しいDUT中心の動作方式により、ミキサの特性評価を容易にする効果がありました。4つの位相コヒーレント信号源により、差動アンプの非線形特性の判定がこれまでにない容易になりました。

### R&S®ZNB3000：製造のスペシャリスト

ローデ・シュワルツの最新のVNAは、R&S®ZNB3000です。これは大量生産用に設計されており、9 kHz～26.5 GHzの周波数レンジに対応し、2つまたは4つのテストポートを備えています。1 MHz掃引でわずか11.8 msというきわめて短い掃引時間(最大26.5 GHz、1601ポイント、500 kHz中間周波数)により、高いスループットが得られます。+11 dBm (26.5 GHz)という十分な出力パワーにより、テストセットアップから生じるあらゆる損失を補正できます。

容易にアクセス可能な周波数拡張により、投資の保護と柔軟性が得られます。今日のRFコンポーネントやRFモジュールは複数の周波数バンドをサポートするので、RFポートの数も増えています。R&S®ZNB3000をスイッチマトリクスと組み合わせれば、最大48テストポートのシステムを構築できます。R&S®ZNB3-K50(P)オプ

ションを使用すると、既存のテスト条件の下で測定されたSパラメータの測定の不確かさが、VNAによって計算されます。そのため、これまでのようにこの作業を計量ラボに依頼する必要がなくなります。

### 計画されている機能拡張

R&S®ZNB3000は、通信や航空宇宙／防衛などの分野のテストアプリケーション向けに開発されました。より高い周波数に向かうトレンドに合わせて、26.5 GHzより上の周波数拡張がR&S®ZNB3000用に計画されています。最新情報は、アナライザのウェブページでご覧いただけます。

編集者

VNAの  
発展に関する  
詳細情報



R&S®ZNB3000の  
詳細情報



図3：R&S®ZNB3000  
4ポートモデル。

# VPNネットワークキング： オーストリアの 電力／水道公益企業向け

2024年に、オーストリアのテルフスにある地域公益企業が、ローデ・シュワルツの子会社であるLANCOM Systemsのネットワークテクノロジーを利用して、ITインフラのオーバーホールを行いました。公益企業は重要インフラなので、セキュリティと高可用性がきわめて重要です。

図1：オーストリアのテルフスにあるWeiher水力発電所。  
この2ジェット式ペルトンタービン(白)は、毎秒最大  
600リットルの移送が可能で、700 kWの発電機(オレン  
ジ色)に接続されています。



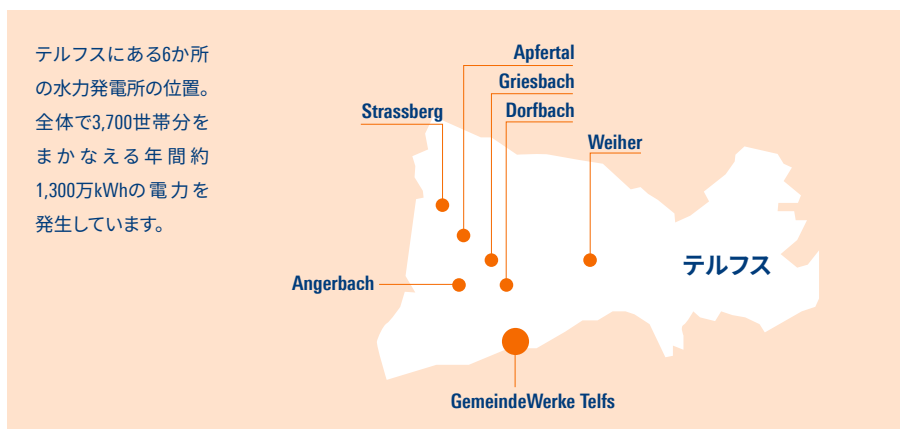


図2：この高架式水道タンクと付設のポンプ場は、テルフス中心部から数キロメートル離れた森林地帯にあります。

テルフスは、オーストリアのチロル州で、インスブルックとクーフシュタインに次いで3番目に大きい都市です。この市場都市には、周囲の山々から豊富な水が流れ込んでおり、地域公益企業のGemeindeWerke Telfsが、それを利用して電気と飲料水を供給しています。同社には6か所の水力発電所があり、それらは仮想プライベートネットワーク(VPN)でつながれています。

このVPNネットワークは、総面積45平方キロメートルの範囲内にある13か所の水道／下水処理施設もつないでいます。2024年に同社が発電所と施設のオーバーホールを決定した際に、LANCOM Systemsのネットワークテクノロジーが選ばれました。

### バックドアフリーとBSI認定

公益企業は、地域のコミュニティーに不可欠な基本的サービスを提供する重要インフラの1つです。LANCOM Systemsは、ドイツ連邦情報セキュリティ局(BSI)認定のバックドアフリールーターのメーカーであり、ITセキュリティおよびハードウェア信頼性に関する厳格な要件を満たします。この新しいVPNソリューションは、電気と水の消費量を監視するためのリアルタイム通信およびスケーラビリティオプションも備えています。

### リモートステーションへのVPN接続を備えた中央ネットワーク

各オフィスの集中化されたITインフラには、LANCOM GS-3510XP、GS-3126X、XS-5110F ネットワークスイッチが用いられています。水力発電所と高架式飲料水タンクは地域全体に分散しており、その一部は市街地を外れた森林地帯にあります(図2)。これらはLANCOM 1650E VPNルーター(図3)によって1つのネットワークに結ばれており、Gregor Bissinger氏が率いるオフィスのチームは、メンテナンス作業をリモートで実施できます。Bissinger氏はGemeindeWerke Telfsの管理責任者であり、オーバーホールの結果に大いに満足し、次のように述べています。「移行はシームレスに行われました。ネットワークはすでに1年近く稼働しており、スムーズに問題なく動作しています」。

### 包括的な概要

同社は現在、テルフスの水道全体の監視とすべてのポンプの制御を、中央の制御システムから行っています。また、同社従業員は、6か所の発電所のリモートメンテナンスを実施したり、発電所の現在の稼働データを参照したりするだけでなく、新しい発電所の場合は起動と停止もリモート制御で行うことができます。

### LMCがネットワーク管理にもたらす選択の自由

VPNルーターの管理は、LANCOMパートナーのKufgem社が行っています。同社は新しいネットワークの展開も支援しました。構成、変更、ファームウェアアップデートの作業は、すべてクーフシュタインにあるKufgem本社から、LANCOM Management Cloud (LMC) を通じたりリモートアクセスによって管理されました。「LANCOM Management Cloudを使用することで、お客様は、誰にネットワークを管理させるかを決めることができます」と、Kufgem社のITシステムエンジニアFlorian Weratschnig氏は説明します。「このケースは、リソースもネットワークに関するノウハウも少ない公益企業なので、お客様は管理作業を当社にアウトソーシングすることに決めました」。

### 一元管理による時間の節約

従来、ネットワーク機器の構成は現場に行き手動で行う必要がありましたが、LMCではすべてのデバイスが自動でアップデートされます。「LANCOM Management Cloudのようなソリューションを使えば、時間を大幅に節約できます。すべてをクラウドで管理できるのは、特に複雑な構成の場合に間違いなくメリットになります」と、Weratschnig氏は語っています。

編集者



図3：LANCOM 1650E VPNルーターには、3つの内蔵IPSec VPNチャネルと、ARFおよびVLANによるネットワークセグメント化機能が備わっています。



© ÖWF/Gernot Grömer

1



© ÖWF/Florian Voggeneder

2



© Julia-ArmSpaceForum

3



© ÖWF/Florian Voggeneder

4

**図1：** AMADEE-24 (アルメニア、2024年)：ミッション現場にあるLANCOMの屋外用アクセスポイント。

**図2：** AMADEE-24：模擬宇宙飛行士のDr. Carmen Köhlerは、AQUA.S火星宇宙服シミュレーターを着て、火星表面に似た条件を体験しています。宇宙服の無線LAN到達単位は1 km以上です。

**図3：** AMADEE-24：アララト地方の模擬ミッション現場に向かうAustrian Space ForumディレクターのDr. Gernot Grömer。

**図4：** AMADEE-20 (イスラエル、2020年)：ネゲブ砂漠にあるマクテシュ (クレーター)

ラモンは、世界最大の浸食クレーターであり、火星表面にある既知の構造と似ています。写真に写っているのはDr. Carmen Köhler (右) とその同僚のDr. Anika Mehlisです。

**図5：** モロッコ、2013年：インスブルック大学の実験を行うMagma Rover (探査車)。AQUA.X宇宙服背面の長いアンテナは、重要なパラメータとヘルメットカメラからのビデオデータを送信します。

**図6：** AMADEE-18 (オマーン、2018年)：ドファール地域にあるベースキャンプ。この地域の地形と歴史は、研究が進んでいる火星のHadriaca Patera火山地帯に似ています。



© ÖWF/Katja Zanella-Kux

5



© ÖWF/Florian Voggeneder

6

# 無線LAN - 火星探査シミュレーション への応用

Austrian Space Forumは、将来の火星でのミッションに備えて、火星に似た地形を持つ地域を定期的に訪れています。オーストリアのチロル地方にあるカウナータール氷河から、アルメニアのアラト砂漠に至るまで、さまざまな場所で模擬ミッションが行われています。音声通信とデータ伝送は、すべて無線LANによって行われます。

今から30年後に最初の有人火星ミッションが始まる際には、フェールセーフ通信が重要な役割を果たします。「通信が途絶すると、数時間以内に誰かが深刻な状況に陥ります」と、Austrian Space Forumディレクターでベテランの模擬宇宙飛行士であるDr. Gernot Grömerは説明します。これは、火星と地球の間と、宇宙飛行士とベースキャンプの間の両方の通信に当てはまると指摘しています。

## さまざまな役割を担う無線LAN

基地局と宇宙飛行士の間の通信には、屋外用無線LANシステムが使用されます。無線LAN機器はローデ・シュワルツの子会社であるLANCOM Systems製で、同社は6回の模擬ミッションにネットワークテクノロジーを提供してきました。

無線LANシステムの役割は、単に音声通信だけではなくありません。ヘルメットカメラからのビデオストリーム、火星宇宙服シミュレーター上のセンサーネットワークからの50種類以上のパラメータのデータ、火星探査車との間の制御と通信が、すべて無線LANで伝送されます。ミッション中に行

われる十数種類以上の科学実験のデータにも、同じことが当てはまります。

## 砂漠の条件に適したアクセスポイント

屋外用アクセスポイントは、簡単にセットアップして使用できます。さらに、厳しい環境条件にも耐えることができます。「模擬ミッションは、50 kgの火星宇宙服シミュレーターを着て歩き回る人々にとって過酷であるだけでなく、機器もきわめて厳しい条件にさらされます」と、Austrian Space Forumで2015年以来模擬宇宙飛行士を務めるDr. Carmen Köhlerは語ります。「屋外で使用されるアクセスポイントは、砂嵐に耐え、砂漠の極端な温度変動を乗り切らなければなりません」。1回のミッションでは、到達範囲を拡げるため、10〜20台のアクセスポイントとエクステンダーが用いられます。

## 次世代に伝える知識

火星模擬ミッションは、さまざまな分野にわたるテストの機会となります。火星探査車、火星居住区、科学機器などの技術的機器のテストと開発に加えて、ミッションでは、火星探査の身体的／心理的ストレス

を軽減する最善の方法も探求されています。こういった知識は、主に次の世代の宇宙探検者たちに伝えるためのものです。「最初に火星に降り立つ人は、おそらくすでに生まれており、世界のどこかの学校で学んでいるでしょう」と、Dr. Gernot Grömerは語ります。

LANCOM SystemsとAustrian Space Forumの協力関係は、2012年から続いています。LANCOMのハードウェアは、モロッコ(2013年)、オーストリア・チロル地方のカウナータール氷河(2015年)、そして最新のミッションであるアルメニア(2024年春)で使用されてきました。

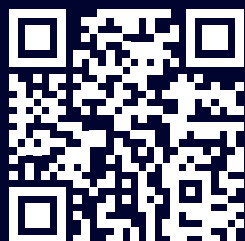
編集者



このトピックに関する  
ポッドキャストエピソード  
ローデ・シュワルツの  
ポッドキャストに  
Dr. Carmen Köhlerと  
Dr. Gernot Grömerが  
ゲスト出演

# 耳からインプット！

## Rohde & Schwarzポッドキャスト



テック系  
ポッドキャスト

スキャンして聴く



防衛系  
ポッドキャスト

スキャンして聴く