

Keysight Technologies

軍事通信システムの保守および  
トラブルシューティングの効率化

Application Note

「軍事通信システム」という用語は、非常に広い意味を持っています。例えば、VHF/UHF無線機、レーダで使用されるマイクロ波バックホールと通信リンク、衛星システム、ナビゲーションシステムなどがあります。このようなシステムは、地上車両、船舶、航空機に搭載されます。

このようなアプリケーションで性能低下やシステム障害が発生した場合、トランスミッター/レシーバ(T/R)モジュール、ケーブル導波管、アンテナ、フィルター、増幅器などが故障箇所として考えられます。そのためシステムやコンポーネントのフィールド・テストと検証機能により、最大のパフォーマンスを維持することが可能になります。

トラブルシューティングには測定作業が必要になりますが、これまでは、修理デポなどの施設にあるベンチトップ測定器を複数使用する方法が一般的でした。現在では、Keysight FieldFoxハンドヘルド・アナライザを活用することにより、ベンチトップに匹敵する測定を現場で行うことができます。この方法では、現場でも高機能ベンチトップ測定に劣らない高精度の結果が得られるというメリットがあります。さらに、10種類の機器、校正機能、MIL-STD準拠の堅牢性をわずか3 kgのパッケージに凝縮することで、運用コストを削減できるメリットもあります。

このアプリケーションノートでは、軍事通信システムの最適性能を追求するために、効率的なテストとは何か、どのような方法で実行できるか、という点を中心に解説します。また、レーダシステムのフィールドテストと検証、VHF/UHF無線機のテストに関する例を紹介します。



## 問題

軍事活動では強力な通信ネットワークが重要な役割を果たし、ネットワークのほとんどはRFまたはマイクロ波テクノロジーをベースにしたものです。例えば、レーダは最もよく使用される要素であり、目標探索、追跡、ナビゲーションをサポートします。レーダシステムには、Lバンド、Sバンド、Xバンド、それ以上のバンドが存在します。

VHF/UHF無線機も重要な要素の1つです。このシステムは、司令部と最前線部隊をつなぐ通信機能を提供します。通信距離は15 ~ 50 km、1 GHz未満の動作周波数が一般的です。VHF/UHF通信の信頼性を決定する重要な要素の1つが、アンテナの性能です。

さらに、衛星地上局とマイクロ波バックホールリンクもこのようなシステムの1つです。地上局は、司令部に併設されることが多く、非常に高出力のパワーで稼働します。

バックホールリンクは非常用通信をサポートし、非常に短時間でセットアップが可能です。通常の動作周波数は26 GHz未満です。

このようなシステムのほとんどは、特定のニーズを満たす設計が採用され、それぞれ独自のテストプランが必要になります。しかし、どのシステムでも、保守とトラブルシューティングで同じような問題に直面します。例えば、ケーブル、アンテナ、ダイプレクサ、キャビティフィルター、低雑音増幅器、パワーアンプ、アッテネータなど、どのシステムでもテストが必要になる共通のコンポーネントが存在します。そのため以下に示すような幅広いRF測定が必要になります。

- ケーブル損失/障害位置検出(DTF)
- ベクトルネットワーク解析によるコンポーネントテスト
- スペクトラム解析による信号品質の評価
- パワーメータによるパワー測定
- スペクトラムモニタによる不要な信号の検出

過酷な条件では、測定の難易度も上がります。電磁波の要素には、スプリアスRF信号とハイパワー RF信号があります。環境的な要素には、温度、湿度、埃、雨、爆発物(揮発性燃料など)があります。このような条件での測定では、極端な温度変化が発生しても確度と再現性を確保することが課題になります。

## ソリューションの概要

Keysight FieldFoxアナライザは、過酷な作業条件でも優れた耐久性が得られます。タスク指向のユーザーインターフェースを備えた動作モードにより、フィールドでの保守とトラブルシューティングにかかる時間を短縮できます。マイクロ波モデルは、日常的な測定から詳細なトラブルシューティングまで幅広いタスクを実行できます。

FieldFoxは、最大10種類の機器の機能を1つのポータブルパッケージに凝縮した構成が可能です。内蔵機能には、ケーブル/アンテナ・アナライザ、タイムドメイン解析機能搭載のフル2ポート・ベクトル・ネットワーク・アナライザ(VNA)、トラッキングジェネレータ付きスペクトラム・アナライザ、パワーメータ、干渉アナライザ、ベクトル電圧計、周波数カウンタ、独立した信号発生器、可変DC電源と電流モニタ、内蔵GPSレシーバがあります。この1つのパッケージを学習、校正、携帯するだけでよいので、コスト効率も非常に優れています(図1)。



図1. FieldFoxは、持ち運びや操作が簡単で、現場で交換可能なバッテリーで約4時間操作できます。

また、耐久性と信頼性に優れたFieldFoxには、極端な条件、フィールドアプリケーション、厳しいユーザーニーズに対応できる設計が採用されています。以下に示すように、過酷な動作仕様を満たしています。

- MIL-PRF-28800F Class 2：保護/制御なしの極端な条件での使用が可能です。
- MIL-STD-801G, Test Method 511.5, Procedure 1：爆発の危険がある環境での使用に関する規格です。
- IEC/EN 60529 IP 53型式試験済み：IPは防塵/防滴保護等級を表しています。FieldFoxは、防塵/防滴テストに合格しています。

FieldFoxには、フィールドでの測定の確度と再現性を実現する機能が内蔵されています。その1つであるCalReadyとQuickCallは、ケーブル、アンテナ、ネットワークの測定を向上させる機能です。

CalReadyは、FieldFoxの製造時に工場で行われるフル2ポート校正です。この校正により、アナライザに電源を入れ、被試験デバイス(DUT)に接続するだけで、高精度の2ポートVNA測定をすぐに実行できます。CalReadyの確度が最も高くなるのは、DUTをテストポートに直結した場合です。

QuickCallは、基準面をケーブル/アダプタの終端まで延長する機能です。これにより、外部校正キットを使用しなくても、ケーブルやアダプタの影響を測定から除外できます。テストポートに接続したケーブルとアダプタに関連するシステム誤差を除去することにより、Sパラメータを正確に測定できます。また、どのコネクタタイプにも対応しているので、さまざまな種類のアダプタを現場に持ち出す必要がなくなります。

スペクトラム解析とパワー測定では、InstAlignが環境変化に合わせて内部で振幅調整を自動実行します。電源投入時に優れた振幅確度( $\pm 0.5$  dB)を実現し、ウォームアップは不要です。

## ケーブルとアンテナのテスト

ケーブルとアンテナは、あらゆる通信システムに不可欠な要素ですが、その性能のテスト/検証には幅広い測定機能が必要です。基本的なテストで必要になるのは、アンテナを含む伝送ラインのテストです。

どのような接続、不完全性、アンテナであっても、いくらかのパワーが反射されて信号源に戻ります。この反射特性は、入射波と反射波の振幅の比と位相差を測定することによって求められます。この評価には、リターンロスと電圧定在波比(VSWR)のいずれかを使用します。いずれも、伝送チェーン(ケーブル、コネクタ、アンテナなどのデバイス)内の特定ポイントで発生する反射の大きさを表します。この2つの測定は、相互に逆の関係を持っています。つまり、リターンロスは値が大きいほど理想的であり、VSWRは値が小さいほど(1.0に近い値)理想的です。

### 測定の簡素化

CalReadyとQuickCalは、ケーブルおよびアンテナの測定を簡素化する機能です。CalReadyは、FieldFoxに直結するケーブルやアンテナの反射測定に理想的な機能です。また、テストポート1と2の接続が可能な場合には、同軸ケーブルの伝送性能と反射性能を測定する際にも役立ちます。

1ポートDUTでQuickCalを使用する場合、開放端のケーブルまたはアダプタで掃引測定を行うだけで、手順は終了です。信号源の不整合を改善したい場合、オプションで負荷を含めることも可能です。2ポートDUTの場合、必要な手順は2つです。開放端のテスト・ケーブルを測定し、両端を接続した状態で掃引測定を行います。いずれの場合も、測定が完了すれば、基準面がケーブルまたはアダプタの終端までシフトされ、DUTの実際の応答が測定可能になります。

### 障害位置検出

DTFは、リターンロスの測定をもとに計算されます。FieldFoxには、2つの動作モード(バンドパスとローパス)があります。

バンドパスモードは、帯域制限されたシステムを扱う場合に有用です。開始/停止位置、開始/停止周波数、ケーブルタイプという5つのパラメータの入力が必要です。また、このモードではファントムピークが発生する可能性がありますが、これを回避するために特殊なアルゴリズムが用意されています。

ローパスモードは、広帯域システムやデバイス(ケーブルなど)を扱う場合に有用です。このモードでは、開始/停止位置、ケーブルタイプという3つのパラメータの入力が必要です。

いずれのモードでも、FieldFoxは対数振幅(デシベル)と距離(メートル)を表示し、ディスプレイのピークで伝送ラインの障害を示します(図2)。物理的な分解能は、選択した周波数スパンの関数です。つまり、スパンが大きくなるほど、距離測定の分解能は向上します。

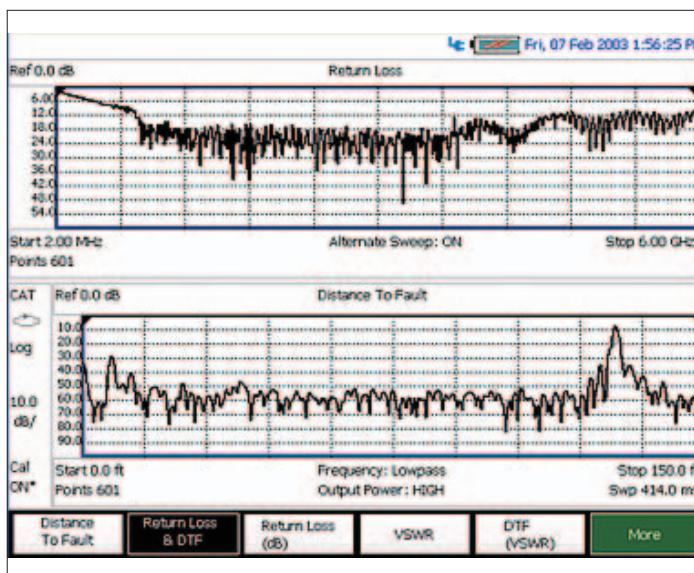


図2. リターンロスで逆FFTを実行すれば(上)、障害位置が検出されます(下)。これは、タイムドメインでのリターンロスと等価です。



## ケーブル損失の測定

損失の測定には、1ポート・ケーブル損失と2ポート挿入損失の2つの方法があります。1ポートの方法は、敷設済みの長距離同軸ケーブルの測定に使用されるのが一般的です。この方法では、CalReadyを使用することによって精度の高い結果を得ることができ、ケーブルが長い場合でも十分な精度を実現できます。ジャンパケーブルで装置を被試験ケーブルに接続する必要がある場合、QuickCalで基準面をジャンパケーブルまで延長できます。

2ポート挿入損失は、ケーブルの両端またはデバイスの両方のポートに簡単にアクセスできる場合に使用します。この方法では、2ポートのメカニカル校正が必要です。これにより、一般的に1ポートの場合よりも精度が向上します。

図3は、1ポートと2ポートの比較です。精度の違いは歴然としていますが、通信システムでケーブルの両端に簡単にアクセスできるケースは稀なので、1ポートの方がよく使用されます。

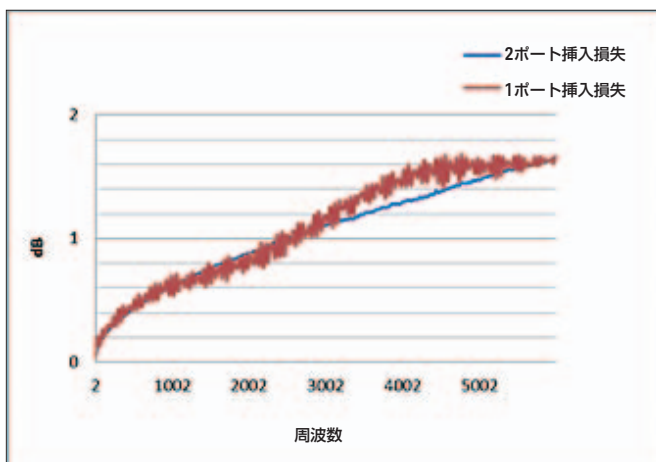


図3. 2ポート(青色)の方が精度が高くなりますが、1ポートの方がよく利用されています。

## ベクトルネットワーク解析

FieldFoxは、4つのレシーバで構成されたアーキテクチャを採用しています(図4)。このアーキテクチャでは、幅広い範囲の測定と高度な校正手法がサポートされ、精度の高い結果が得られます。サポートされる測定には、Sパラメータ(振幅と位相)、群遅延/電気遅延/ポート延長、スミスチャート/極座標チャート/インピーダンスがあります。

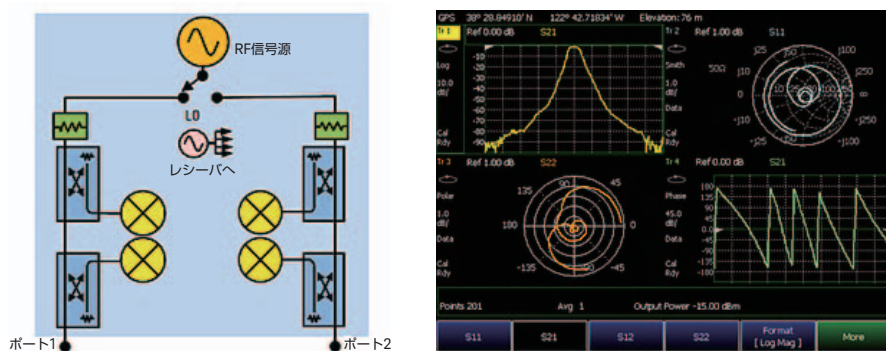


図4. ポータブル機器にレシーバ4台を搭載するアーキテクチャ(左)により、フィールドで強力なVNA測定(右)が可能になっています。

FieldFoxは、幅広い校正方法をサポートしています。具体的には、CalReadyとQuickCal、1ポート、2ポート、未知スルー、QSOLT(クイックショート、オープン、ロード、スルー)、導波管、TRL(Through-Reflection-Line)、レスポンスおよびエンハンスドレスポンス、ユーザー定義の校正があります。

最も簡単な方法は、CalReady、QuickCal、ノーマライゼーションであり、いずれも校正キットは不要です。つまり、現場用キットとして持ち出す機器が少なくなり、測定時間も短縮されます。

FieldFoxは、精度を高めたい場合にも対応でき、校正キットが必要になる高度な手法をサポートしています。サポートされる方法には、1ポートOSL(オープン、ショート、ロード)、フル2ポート、SOLT標準の測定が必要な未知スルー校正などがあります。同軸と導波管標準を含む高品質の校正キットではクリーニングなどの保守、破損からの保護、破損の目視チェックが必要になるので、作業は複雑になります。

## 信号解析

前述のように、FieldFoxでは、スペクトラム・アナライザ、パワーメータ、干渉アナライザ(スペクトラム表示機能搭載)、パルス測定を含める構成が可能です。また、フルバンドプリアンプ、タイムゲートッドスペクトラム測定、フルバンド信号源、フルバンド・トラッキング・ジェネレータがオプション機能として提供されています。また、InstAlign機能により、電源投入時に高精度のスペクトラム解析とパワー測定が可能になります。

### スペクトラム解析

一般的な測定には、高レベル信号が存在する状態で低レベル信号を検出する測定や、大きな搬送波の近接信号を捕捉する測定があります。このようなニーズに対応するために、スペクトラム・アナライザでは、優れたダイナミック・レンジ、優れた近接位相雑音、高速掃引が可能な動作モードが提供されています。スプリアス・ダイナミック・レンジ(SFDR)は105 dB以上、位相雑音は $-111$  dBc/Hz、オフセットは10 kHzです。

電界や磁界の強さを測定する場合、ケーブルの利得と損失を考慮する必要があります。FieldFoxでは、フロントパネルまたはKeysight Data Linkソフトウェアを使って、アンテナ係数とケーブル損失データをロードできます。

干渉の解析には、スペクトログラムとウォーターフォール表示を使って、短いインターバルまたは長いインターバルで間欠的な信号を識別できます。信号トレースは内部メモリまたは外部フラッシュドライブに記録されます。このトレースを再生し、オフラインでの解析も可能です。

### パワーの測定

内蔵パワーメータでは、チャンネルパワー測定をユーザーが柔軟に定義できます。測定は、最大 $\pm 0.5$  dBの精度で実行できます。幅広いチャンネル帯域幅を選択すれば、FieldFoxでアベレージパワー測定のシミュレーションが可能です。

### パルスの測定

このオプション機能は、USBピーク・パワー・センサで使用され、パルスドRF信号の特性評価が効率的に行えます。ピークパワー、PAR(ピーク対アベレージ比)、パルスパラメータ(立ち上がり時間、立ち下がり時間、パルス繰り返し周波数など)の測定が可能です。

## 測定例

フィールドで使用する製品はすべて、性能が保証されたものでなければなりません。FieldFoxは、最も有用なフィールドキットとなることを目指して開発されました。ここでは、レーダとVHF/UHF無線機という2つの例を使って、要求の厳しいアプリケーションでのFieldFoxの利点について説明します。

### レーダシステムのテスト／検証

レーダシステムでは、複数のRFコンポーネントがシステム全体の性能に影響を与えます。これには、アンテナ、同軸ケーブル、導波管、デュプレクサ、ダイプレクサ、パワーアンプ、低雑音増幅器、パルスジェネレータ、STALO(安定化ローカル発振器)があります。有効なテストを行うには、さまざまな基本測定が必要です(右を参照)。

レーダシステムのテストと検証では、パルス測定が特に重要な役割を果たします。パルスプロファイル特性は重要な性能指標の1つであり、パルスシーケンスをタイミングとパワーレベルで検証する必要があります。ここで重要になる値として、ピークパワー、平均パワー、PARがあり、重要なパラメータには、パルス幅、立ち上がり時間と立ち下がり時間、PRF、PRI(パルス繰り返し周波数)があります。

また、このような測定を行うには、スペクトラム・アナライザ・モードとタイム・ゲーティング・オプションを使用する方法もあります。タイム／周波数ドメインで同時解析を行い、ゲート幅を調整することで単一パルスの解析が可能になります。基本的なトリガ機能に加えて、バーストトリガ、トリガ遅延、プリトリガなどの高度な機能も用意されているので、特定パルスの立ち上がりエッジを正確に捕捉できます。

### VHF/UHF無線機のテストと検証

ウェアラブルや車載のVHF/UHF無線機は、ローカル通信機能を提供します。干渉やフィードラインの障害が原因でRFリンクのブレイクダウンが発生しやすく、アンテナの性能が通信の信頼性に大きな影響を与えます。

RFリンクを正常状態に維持することが非常に重要であり、これにはサイト機器とエアインタフェースの信号が含まれます。図5は、簡素化したブロック図です。無線では、フィルターの性能、増幅器の性能、トランスミッタパワー、同軸ケーブル、アンテナなどの測定が重要です。エアインタフェースでは、信号品質と干渉が主な問題になります。

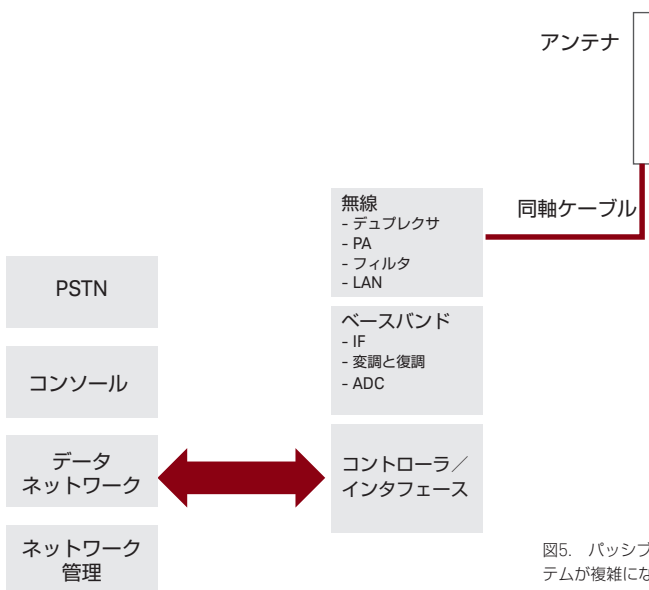


図5. パッシブ/アクティブコンポーネントや新型無線システムが複雑になるほど、フィールドでの測定も複雑になります。

### レーダシステムのテスト／検証で重要な測定

- ケーブル／アンテナテスト
- パルス測定
- フェーズド・アレイ・アンテナの測定
  - VNAによる $S_{21}$ 振幅／位相
  - ベクトル電圧計(VVM)によるA/B測定
- RFテスト対象出力システムでのチャンネル調整
  - VNAまたはVVMでの振幅と位相
- ダイプレクサの検証
- VNAまたはVVMによるSTALOの信号位相調整
- アンテナポート位相調整(シグマおよびデルタ)
  - VVMによるA/B測定
- アッテネータ測定
  - VNAによる $S_{21}$ または $S_{11}$
- 導波管テスト

## VHF/UHF無線機のテスト/検証(続き)

フィールドでのテスト/検証には、測定上の問題がいくつか存在します。例えば、PA(パワーアンプ)やTMA(タワーマウント型増幅器)などのアクティブコンポーネントには、チャンネル間またはシステム間で相互変調信号が発生する可能性があります。

また、システム雑音や干渉も問題の1つであり、ネットワーク接続、システム容量、音声品質、データスループットに影響を与えます。これが原因で、同一チャンネル、隣接チャンネル、相互変調の干渉、アップリンク/ダウンリンク干渉、外部干渉が発生することがあります。

ケーブルおよびアンテナシステムでは、送信経路で大きなリターンロスが発生するとアップリンクのS/N比が低下し、受信経路で大きなリターンロスが発生するとダウンリンクのS/N比が低下します。さらに、ケーブル/アンテナのパワーレベルが高いと、パッシブ相互変調の原因になります。

FieldFoxには、測定プロセスを簡素化したり、向上させる機能として、特定のRF信号に対する標準設定、チューン・アンド・リスン、記録/再生の3つの機能が用意されています。

FieldFoxの【無線規格】メニューには、各規格に適した周波数とチャンネル設定が用意され、カンマ区切り(.CSV)ファイルを使ってカスタム規格をインポートすることも可能です。これに基づいて適切な中心周波数が自動設定され、アップリンク/ダウンリンク周波数を含むスペンが選択されます。ユーザーは、周波数ではなくチャンネルを選択することにより、測定を制御できます。内蔵の測定機能として、チャンネルパワー、占有帯域幅、隣接チャンネル漏洩電力(ACPR)があります。

チューン・アンド・リスン機能は、干渉している信号の特定に役立ち、AM(35 kHz帯域幅)、FM狭帯域(12 kHz帯域幅)、FM広帯域(150 kHz帯域幅)をカバーしています。復調された信号は内部スピーカまたはヘッドフォン(3.5 mmジャック)で再生できます。チューナはスペクトラム・アナライザ・ディスプレイとは別になっているので、1つの周波数を再生しながら別の周波数範囲を表示することが可能です。

キャプチャ/プレイバックモードは、間欠的または時間に関連する信号の検出で特に威力を発揮します。目的のスペクトラムまたは信号を記録し、再生することによって詳細な解析が行えます。この操作はリアルタイムでも、後から実行することもできます。キャプチャしたデータは、内蔵メモリまたは外部メモリ(USBやSDフラッシュメモリ)に保存できます。

## まとめ

軍事通信システムのほとんどは、特定のニーズを満たす設計が採用され、それぞれ独自のテストプランが必要になります。ただし、どのシステムでも、保守とトラブルシューティングでは同じような問題に直面します。耐久性に優れたKeysight FieldFoxアナライザは、日常的な測定から詳細なトラブルシューティングまで幅広いタスクを実行できます。ベンチトップ測定器に匹敵する高精度の結果を得ることができ、フィールドでも信頼性の高い測定が可能です。

フィールドテストでの最優先事項は、作業者を危険にさらさないことです。技術が複雑になるほど、システムの即応性の保証は困難になります。キーサイトは、お客様が取り組む困難なミッションの成功を支援します。測定技術とテストプロセスでの豊富な経験に基づいて、お客様がミッションを遂行および管理するプロセスをサポートします。優れた即応性を発揮するキーサイトのソリューションは、お客様が重要な作業に集中できる作業環境を実現します。

### 一般的なトラブルシューティング

FieldFoxは、多彩な付属機能により、無線、レーダ、電子戦、衛星システムの一般的なトラブルシューティングが可能です。次のようなテストを実行できます。

- 受信信号レベル
- パワー測定
- 経路損失の検証
- 干渉解析
- アンテナ、導波管、ケーブルの掃引
- フィルター/コンバイナの検証
- トランスミッタ/レシーバの検証とチューニング

FieldFoxは、日常的な保守作業から詳細なトラブルシューティングまで幅広いタスクを実行し、高精度測定を目指す作業員やフィールド・エンジニアをサポートします。



## 関連情報

- アプリケーションノート：『ハンドヘルド・アナライザとベンチトップ・アナライザのマイクロ波測定の相関』 (5991-0422JAJP)
- アプリケーションノート：『フィールドでレーダ・システムを正確に検証する手法』 (5991-4107JAJP)
- アプリケーションノート：『Techniques for Precise Cable and Antenna Measurements in the Field』 (5991-0419EN)
- アプリケーションノート：『Techniques for Precise Measurement Calibrations in the Field』 (5991-0421EN)
- アプリケーションノート：『Techniques for Precise Power Measurements in the Field』 (5991-0423EN)
- アプリケーションノート：『Techniques for Precise Interference Measurements in the Field』 (5991-0418EN)
- 製品カタログ：『Keysight FieldFoxハンドヘルド・アナライザ』 (5990-9779JAJP)
- データシート：『Keysight FieldFox Handheld Analyzers』 (5990-9783EN)
- Technical Overview：『Keysight FieldFoxコンビネーション・アナライザ』 (5990-9780JAJP)
- Technical Overview：『Keysight FieldFoxスペクトラム・アナライザ』 (5990-9782JAJP)

## myKeysight



[www.keysight.co.jp/find/mykeysight](http://www.keysight.co.jp/find/mykeysight)  
ご使用製品の管理に必要な情報を即座に手に入れることができます。



## [www.axiestandard.org](http://www.axiestandard.org)

AXIe (AdvancedTCA<sup>®</sup> Extensions for Instrumentation and Test) は、AdvancedTCA<sup>®</sup> を汎用テストおよび半導体テスト向けに拡張したオープン規格です。Keysight は、AXIe コンソーシアムの設立メンバーです。



## [www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LXI は、Web へのアクセスを可能にするイーサネットベースのテストシステム用インタフェースです。Keysight は、LXI コンソーシアムの設立メンバーです。



## [www.pxisa.org](http://www.pxisa.org)

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) モジュラ測定システムは、PC ベースの堅牢な高性能測定 / 自動化システムを実現します。



## [www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Keysight Technologies, Inc.  
DEKRA Certified ISO 9001:2008  
Quality Management System

## 契約販売店

[www.keysight.co.jp/find/channelpartners](http://www.keysight.co.jp/find/channelpartners)  
キーサイト契約販売店からもご購入頂けます。  
お気軽にお問い合わせください。

[www.keysight.co.jp/find/ad](http://www.keysight.co.jp/find/ad)

## キーサイト・テクノロジー合同会社

本社 〒192-8550 東京都八王子市高倉町9-1

## 計測お客様窓口

受付時間 9:00-18:00 (土・日・祭日を除く)

TEL ☎ 0120-421-345 (042-656-7832)

FAX ☎ 0120-421-678 (042-656-7840)

Email [contact\\_japan@keysight.com](mailto:contact_japan@keysight.com)

ホームページ [www.keysight.co.jp](http://www.keysight.co.jp)

記載事項は変更になる場合があります。  
ご発注の際はご確認ください。