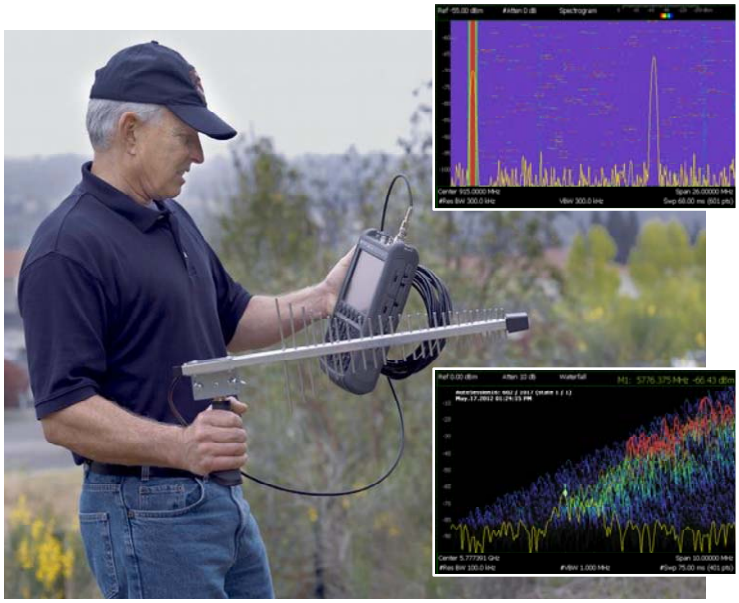
キーサイト・テクノロジー
フィールドでの正確な干渉計測技術

FieldFox シリーズ スペクトラム・アナライザの使用例

アプリケーションノート



このアプリケーションノートでは、帯域内干渉、同一チャネル干渉、帯域外干渉、隣接チャネル干渉などのさまざまな干渉について説明します。

FieldFox シリーズ スペクトラム・アナライザを用いた干渉試験の効率的、効果的な測定手法、機能を紹介します。フィールドでの測定は、屋外の温度、湿度に加え、空気中に漂う様々な微粒子など過酷な環境下で、正確かつ迅速に行う必要があり、高い汎用性と耐久性が求められるため、FieldFox シリーズの高い堅牢性と、防塵、防水性能を生かす事ができます。

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

はじめに

RF・マイクロ波通信システムは、他の無線通信システムの干渉を受けても動作する必要があります。限られた周波数帯に多くのユーザが存在すると、システム内で同一チャネル干渉や隣接チャネル干渉が発生します。免許不要の 2.4GHz 帯で動作する Wi-Fi、*Bluetooth*®、ZigBee は、干渉が増加すると、すべてのユーザのサービス品質が低下します。米国の例では、3.1～3.3 GHz 帯は多くのレーダで使用していますが、同時に3.26～3.267GHz は、免許不要なバンドとして運用されています。

周波数利用率の向上には高度な測定ツールが必要

周波数利用効率を高めるため、周波数の再割り当てが実施される事があります。米国では、モバイルおよび固定ブロードバンド・アプリケーション用に 500MHz の帯域を開放するため、1,755～1,850MHz を数年の移行期間を経て再編成しています。移転の期間中は既存システムと新規システムの間で干渉が発生する可能性があります。干渉レベルを評価、監視、管理するためには、システムの受信部付近で、丈夫で軽量、かつベンチトップ型測定器と同等の性能を持つ測定器を用いたフィールド用測定器が必要です。

このアプリケーションノートでは、さまざまな干渉の説明と、FieldFox を用いた効率的な測定方法を紹介します。

図 1a. 指向性アンテナを接続した FieldFox

図 1b. フィーダラインに直接接続した FieldFox

干渉とスペクトラム・アクセス

無線システムは、干渉の影響を受け、受信品質が低下します。干渉信号のレベルが相対的に大きいと通信品質は劣化し、場合によってはサービスが中断します。複数の無線システムが同じ周波数帯で共存しようとすると、干渉が発生する可能性があります。干渉の種類と発生源の調査は、時間、周波数、場所を考慮する必要があります。

図 1a は、ノイズの多い CATV アンプの近くで FieldFox を使用している例です。指向性アンテナの利得や同軸ケーブルのロスは補正する事ができます。指向性アンテナを用いる事で、干渉源の位置を特定する事ができます。図 1b は、FieldFox を無線通信システムのフィーダラインに接続し、リターンロスが規格内であることを確認しています。ケーブルやアンテナの性能は干渉の要因となり得ます。

認可されている無線システムは、複数のユーザを時間、周波数、空間領域で分離することにより、干渉を最小化するように設計されています。免許不要のシステムは、干渉が存在することを前提に設計され、IEEE802.11 で見られる「Listen Before Talk」プロトコルなどのように、送信前にチャネルパワーをモニタする機能が採用される事が多くなっています。

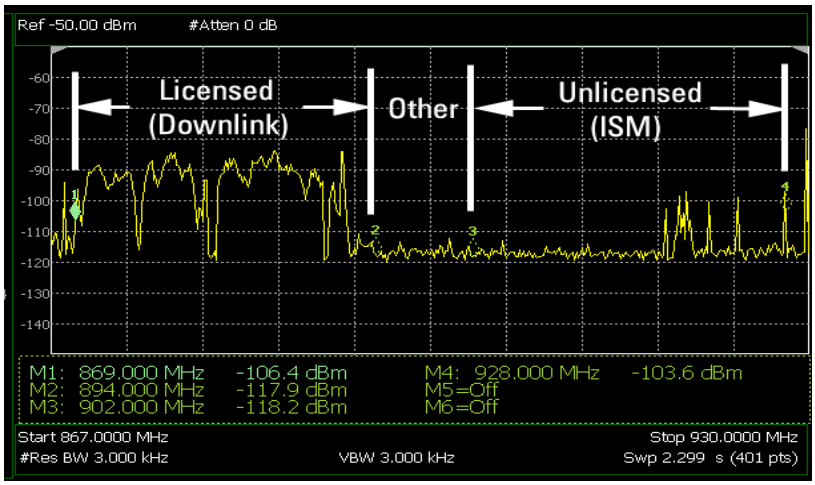


図 2. FieldFox を使用した UHF 帯の無線測定

図 2 は、無指向性アンテナを使用して測定した "Over-the-Air"測定例です。下側の帯域は、米国のセルラのダウンリンク部で、上側は、免許不要な ISM 帯です。測定感度を向上させるため、内蔵アッテネータを小さくし、プリアンプを使用する事で、ノイズフロアを下げます。

マーカテーブルは、各バンドの周波数割り当て範囲を示すために使用しています。ミニ SD カードや USB メモリにはスクリーンキャプチャを保存できます。また、レコーディング機能を用いて、チャネルパワー、占有帯域幅、隣接チャネルパワー、その他の干渉分析などの後解析が可能です。
図 2 では 2 つのバンドが、互いに干渉しないように設計されている事が判ります。しかし、ひっ迫する周波数資源を有効活用するために、図中「Other」と表示している周波数帯は、民間航空や陸上移動無線システムなど他の無線システムに割り当てられています。

空港や港湾付近など、干渉が無線通信や衛星信号の受信に影響があるような場所では、干渉テストは特に重要です。また、無線通信は国境を越えて干渉する可能性があります。国により規制が異なるため、国境付近の無線ユーザは特に注意を払う必要があります。
行政機関は悪意をもって無線通信サービスを妨害する「ジャマー」を記録し、違法送信機の位置特定を迅速に行う際にFieldFoxが便利です。

携帯電話、ラジオ・テレビ放送、レーダ、衛星などでは、システム性能の評価や規制遵守の一環として、周波数スペクトルの継続的な監視が必要になることがあります。この時に観測される干渉の特定と低減が、無線システムの適切な運用に欠かせません。

干渉波の分類

十分な信号強度が得られているにもかかわらず、パフォーマンスが低下している場合は、何らかの無線干渉が発生している可能性があります。スペクトラム・アナライザを用い、目的のチャネル付近の全ての信号の振幅を調べ、以下を確認します。

無線システムの性能低下は、動作チャネル内または隣接チャネルでの干渉です。干渉は、以下の様に分類されます。干渉の影響は、限られたユーザのみの事もあるし、システムの全ての通信に及ぼす事もあります。

- 帯域内干渉
- 同チャネル干渉
- 帯域外干渉
- 隣接チャネル干渉
- ダウンリンク干渉
- アップリンク干渉

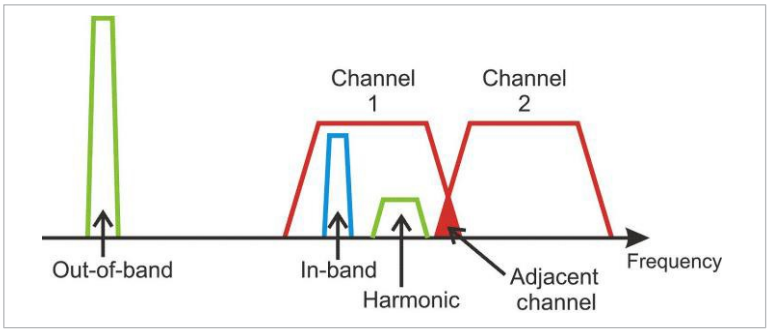


図 3. チャネル 1 での複数の信号源からの干渉

図 3 は、理想的に割り当てられた周波数のスペクトラムです。チャネル 1 の帯域内に入り込んできた高調波、隣接チャネル干渉などの全ての信号は、チャネル 1 の性能を低下させる可能性があります。

帯域内干渉

帯域内干渉とは、希望するシステムの帯域内に入り込んでくる、他の通信システムからの望ましくないスペクトラムです。この干渉は受信機の入力フィルタでは取り除けないため、振幅が相対的に高い場合は、希望波の受信品質を劣化させます。もし干渉波が希望波の近傍の場合は、干渉の観測は困難で、希望波を停止しなければ見えません。

希望波を停止できない場合は、アンテナの位置を物理的に移動させる事で、希望波に対し十分観測可能な振幅レベルになり、測定ができるようになることがあります。

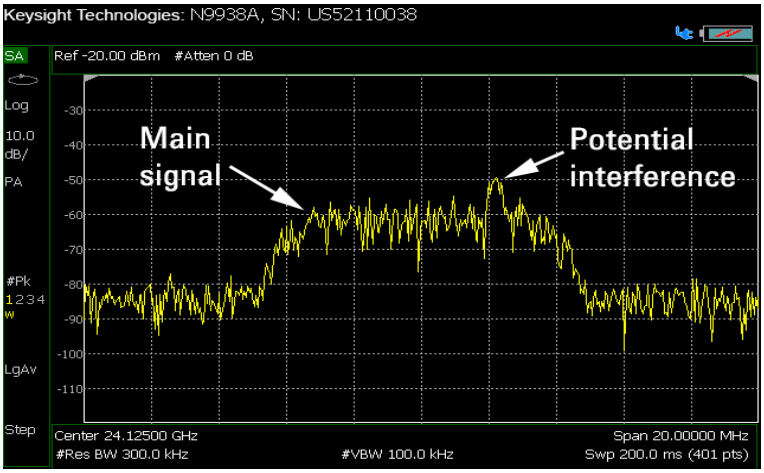


図 4. 24GHz マイクロ波通信信号の測定例

図 4 は 24.125GHz マイクロ波通信システムの測定例で、帯域内干渉の可能性があります。このシステムでは、想定していたパフォーマンスが得られていませんでした。

チャネルの中央付近に振幅が異なる信号があります。このシステムのトラブルシューティングには、希望波を停止するか、アンテナの方向を調整して干渉信号の振幅を大きくして観測する方法があります。高利得の指向性アンテナは、振幅のピークが観測される方向を探し、干渉源の物理的な位置を推定する場合にも有用です。

同一チャネル干渉

同一チャネル干渉は帯域内干渉と似ていますが、干渉源は同じ無線システム内の他の無線機器です。例えば、ある基地局からのエネルギーが隣のセルエリアにも到達し、通信を妨害するような場合です。あるいは、無線 LAN ネットワークの場合は、送信前に空きチャネルを探しますが、2 つの無線機が同じチャネルで同時に送信し、衝突する可能性があります。同チャネル干渉は、一般的な無線干渉の 1 つで、限られたチャネルで多数の無線ユーザを収納しようとするためです。同一チャネル干渉を観察する最も簡単な方法は、目的の無線機の送信機をオフにし、目的の周波数チャネルに合わせたスペクトラム・アナライザを使用して、同じシステム内で動作している他の信号を探すことです。

帯域外干渉

帯域外干渉によりチャネル 1 の性能が低下する可能性があります。ある無線システムが、高い周波数帯で動作している別のシステムに影響を与えないように、送信機の高調波をフィルタリングすることは規制上の要件となっています。高調波レベルを測定は、キャリア周波数の少なくとも 3 倍の周波数範囲のスペクトラム・アナライザを使用します。たとえば、6GHz で動作する送信機の性能を検証する場合、12GHz と 18GHz の第 2、第 3 高調波を測定します。FieldFox シリーズの各モデルの最大周波数は 9、14、18、26.5 GHz ですので、使用する無線システム合わせ最適なモデルを選定可能です。

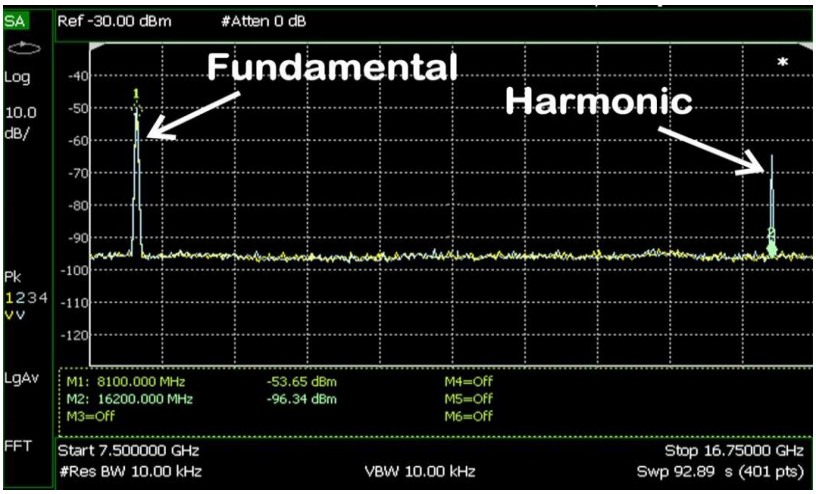


図 5. 8.1GHz 無線信号をバンドパスフィルタ処理したトレース（黄）と
フィルタを入れていないトレース（青）（16.2 GHz の第 2 高調波が 観測）

図 5 は、中心周波数 8.1GHz の無線通信の周波数スペクトラムを、出力フィルタの有無で比較したものです。２つのトレースは 16.2GHz の 2 次高調波以外は同じです。この高調波が、商業 空港レーダ航空 SAR システムなど、16GHz 帯を用いる別のシステムに干渉する可能性が十分にあります。

図 5 の測定は、最大のダイナミックレンジが得られるように設定する必要があります。RBW(Resolution Bandwidth)を絞り内蔵アッテネータをできるだけ小さくし、プリアンプをオンにします。ノイズフロア（DANL：Displayed Average Noise Level）は、RBW を狭くすると低くなります。しかし、RBW を狭くすると掃引時間が長くなるので、キャリア信号と高調波を個別に測定することで、トータル測定時間を短縮することができます。
図 6 では、8.1GHz の基本波と高調波を 2 回に分けて測定しています。

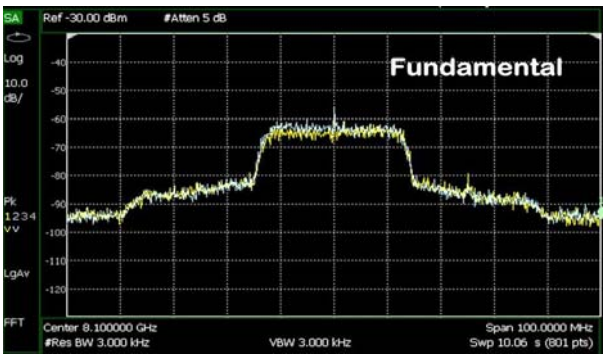


図 6a. 8.1GHz の基本波の周波数特性

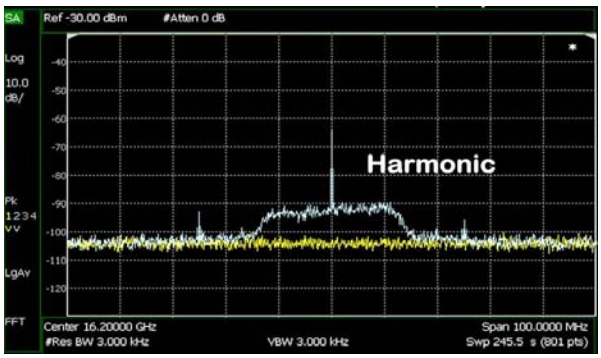


図 6b. 16.2GHz の高調波の応答

（図 6a）と 16.2 GHz の高調波（図 6b）は基本波と高次波を一度に観測するよりも狭いスパンで測定できます。FieldFox の「CF Step」（中心周波数のステップサイズ）を基本波の値に設定する事で、矢印キーまたはノブで簡単に中心周波数を基本波と高調波に設定する事ができます。

隣接チャネル干渉

図 7a. チャネルパワー測定

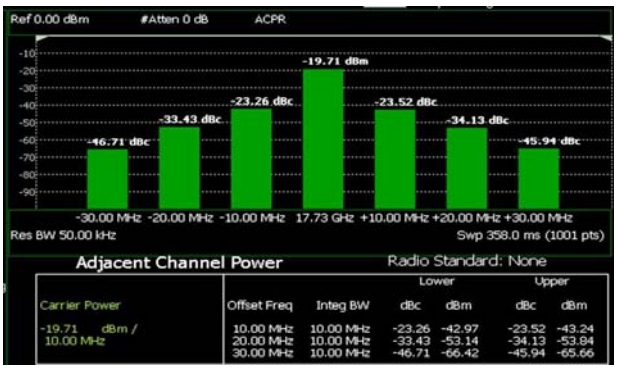


図 7b. 隣接チャネル電力

隣接チャネル干渉は、隣り合うチャネルに不要なエネルギーが生じることです。この干渉は、変調、スイッチング過渡現象、相互変調歪みにより発生します。

図 7 は、17.725GHz 変調信号のチャネルパワーと隣接チャネルパワー測定例です。17.725GHz は 17.7～19.7GHz の CARS（Cable Television Relay Services。チャネル間隔 10MHz）と同じ帯域です。図 7a は、10MHz 帯域幅のチャネルパワーが-19.6dBm と測定されています。図 7b は、主信号に対する隣接チャネルパワーを dBc で示しています。メイン・チャネルの上下にある 2 つのチャネルの隣接チャネルのパワーは約-23dBc です。図 7a からも明らかですが、この信号は周囲のチャネルに干渉を与えています。

ダウンリンク干渉

ダウンリンク干渉は、基地局と端末間のダウンリンク通信を妨害します。端末のチャネルは比較的広い周波数に分散されるため、ダウンリンク干渉の影響を受けるのは限られたユーザです。ダウンリンク干渉は、同一チャネル干渉として通信品質を劣化させます。

アップリンク干渉

アップリンク干渉（リバースリンク干渉）は、端末からの基地局の通信に影響します。アップリンク干渉は、そのセル全体のパフォーマンスに影響するため、セルの容量を制約します。

干渉測定技術

システムが干渉の影響を受けている場合は、スペクトラム・アナライザを用いて確認をします。送信時間、発生回数、周波数、帯域幅、干渉源の位置などを確認し、信号の種類を明らかにすることが必要です。システムが全二重モードで動作している場合は、アップリンクとダウンリンクの両方のチャネルで観測します。

無線干渉の測定は、低いノイズフロア（DANL）を持つスペクトラム・アナライザが必要です。DANL は、分解能帯域幅（RBW）が小さいほど低くなります。RBW を 10 分の 1 にすると、ノイズフロアは 10dB 改善されます。しかし測定掃引時間は RBW を小さくすると長くなります。

入力アッテネータを小さくすると感度が向上します。入力アッテネータを小さくする事で RBW を広く設定できるため掃引時間を短縮できます。また、プリアンプを使用すると感度が向上します。

入力アッテネータを小さくしすぎると、内部で発生する歪みが大きくなります、大信号の場合は、機器の損傷につながることがあります。内部で発生した歪みは、あたかも測定対象の信号に存在しているかのように表示されます。アッテネータの設定は、ダイナミックレンジが最大になるように細かく設定します。FieldFox は 5dB ステップで設定が可能です。

機材の要件

フィールドテストは、屋外のタワーのような高所や、船舶、航空機、車両などの狭い場所などで使用するため、測定確度、掃引速度、携帯性、堅牢性、電池寿命、簡単な電池交換などが機種選択の重要な要件となります。FieldFox は，GPS，DC ブロック，DC 電圧源や、スタンバイ状態からの素早い起動も可能にしています。DC 電圧源は、衛星向け LNB（Low Noise Block）ダウンコンバータの電源として外部バイアス・ティーと共に使用します。

FieldFox は、*InstAlign* 機能により、広い測定周波数範囲全体において、-10～+55℃の温度範囲で高い測定確度を得る事ができます。*InstAlign* 機能は、内蔵の高安定 CW 信号をリファレンスにし、機器内部の温度が 2℃以上変化した場合は、自動アライメントが実行されます。そのため、ウォームアップ時間なしに、-10～+55℃の範囲で 26.5 GHz までの絶対振幅精度を±0.6 dB 未満に抑えています。
RF ケーブルは、高品質なものを用い、コネクタの保護や清掃など、適切なメンテナンスをします。RF ケーブルの「最小曲げ半径」よりも曲げると破断しますので注意します。
アンテナは、対象周波数範囲をカバーする、ポータブルで軽量なものを選択します。システムが偏波をもつ場合は、用意するアンテナもそれに合わせます。

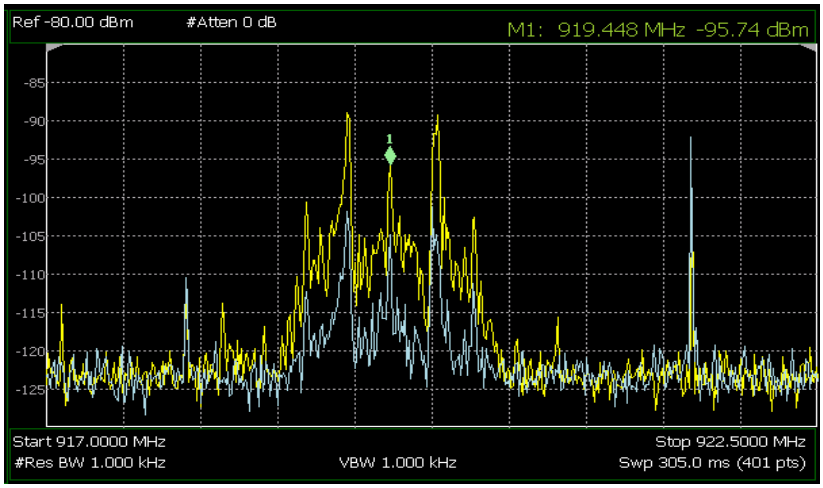


図 8. 無指向性アンテナ（青）と高利得アンテナ（黄）を用いた比較

図 8 は、ゲインが低い無指向性アンテナ（青トレース）と、利得 9dBi の八木アンテナ（黄色トレース）を用いた場合の比較です。高ゲイン指向性アンテナを用いる事で、電波発信源の特定が容易になります。

スペクトラム・アナライザのモードと表示

間欠的な干渉は、測定が困難です。干渉がパルス状、間欠的、あるいは周波数がホッピングしている場合は、以下の様に設定します。

MaxHold モード

MaxHold モードは、トレースの最大値を保持します。図 9 は、周波数ホッピングするキャリアを測定しています。トレース 1（黄色）は MaxHold で、トレース 2（青色）は Clear/Write です。Clear/Write のトレースはキャリア周波数が常に変化します。左側のキャリア周波数は固定です。

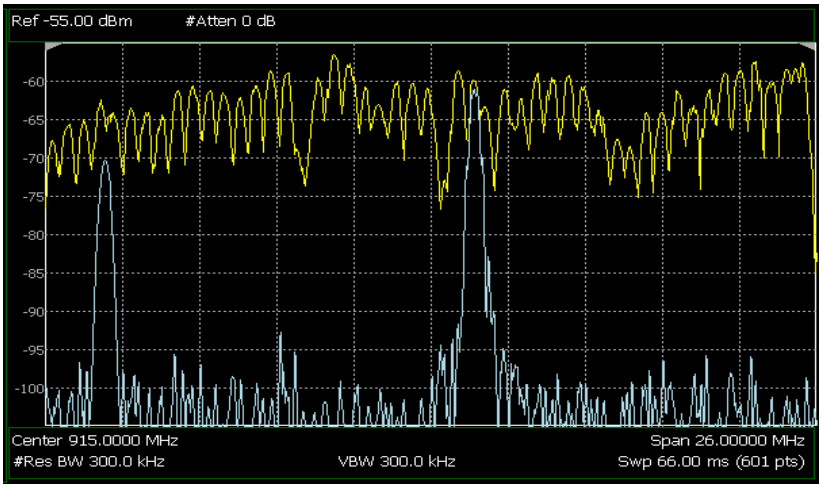


図 9. 周波数ホッピング信号の測定。
Clear/Write モード（青）、MaxHold モード（黄）

スペクトログラム測定表示

図 10 は、先程と同じ周波数ホッピング信号のスペクトログラム表示です。Clear/Write トレース（黄色）と重ねて表示しています。スペクトログラムは、周波数、時間、振幅を同じディスプレイで見ることができるユニークな手法です。カラースケールは信号の振幅にマッピングされます。掃引された毎回のトレースは、ディスプレイ上の 1 つの水平方向の線で表されます。縦軸は経過時間であり、時間の経過とともに上へスクロールします。

干渉のタイミングや信号の帯域幅が時間とともにどのように変化するかを観察できます。スペクトログラム上にタイムマーカを置き、信号のタイミングを把握することができます。図 10 のスペクトログラムは、ホッピング・キャリアがランダムに周波数が変わるパターンを示しており、左側のキャリアは一定の振幅を持つことが判ります。

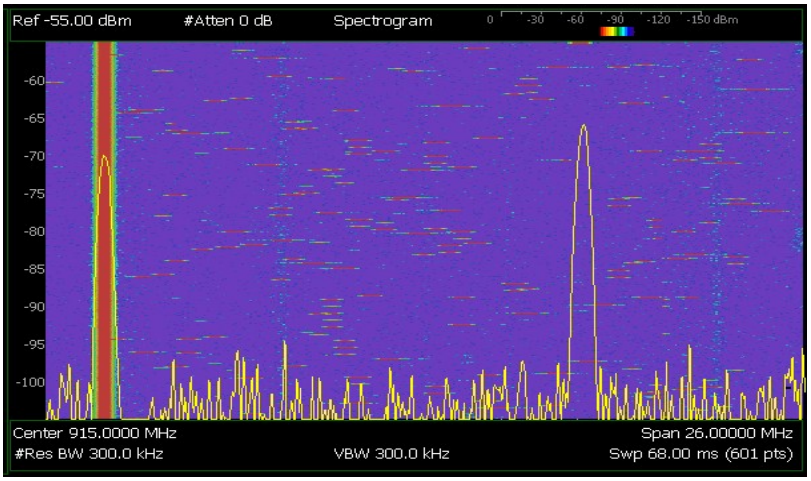


図 10. 周波数ホッピング信号のスペクトログラム表示と、Clear/Write（黄）の重ね合わせ

ゼロスパンモード

ゼロスパンでは、周波数が固定され、時間軸で掃引します。RBW は、ノイズフロアが許容できる範囲でできるだけ広くします。トリガレベルを設定することもできます。図 11 は、先程の周波数ホッピング信号のゼロスパン測定です。この図は、ホッピング・キャリアがアナライザの設定周波数に来たときの、信号の振幅の変位です。ホッピング・キャリアがこの 1 つの周波数に留まっている時間の測定を可能にしています。

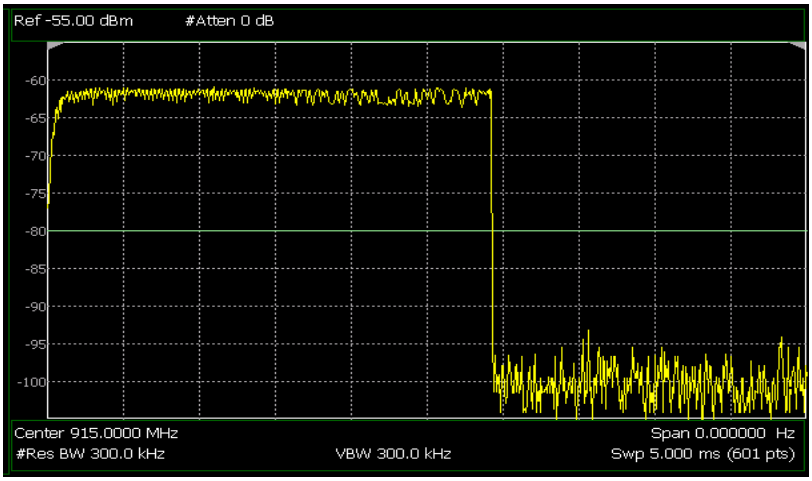


図 11. Zero Span モードを使用したホッピング・キャリアの測定

ウォータフォール表示

ウォータフォール表示もスペクトラムの時間的な変化を視覚的に表示することができます。ウォータフォール表示は、周波数、時間、振幅レベルを 3D 表示します。時間は斜め右上に移動します。図 12 は、ウォータフォール表示の例です。このトレースは、FieldFox のメモリに取り込みした記録を再生したものです。アナライザのトレース記録・再生機能により、信号のモニタリングを長時間にわたって分析することができます。トレースは、連続記録、指定したトレース数、またはユーザが指定したパワーと周波数のマスクによってトリガされたときに記録することができます。

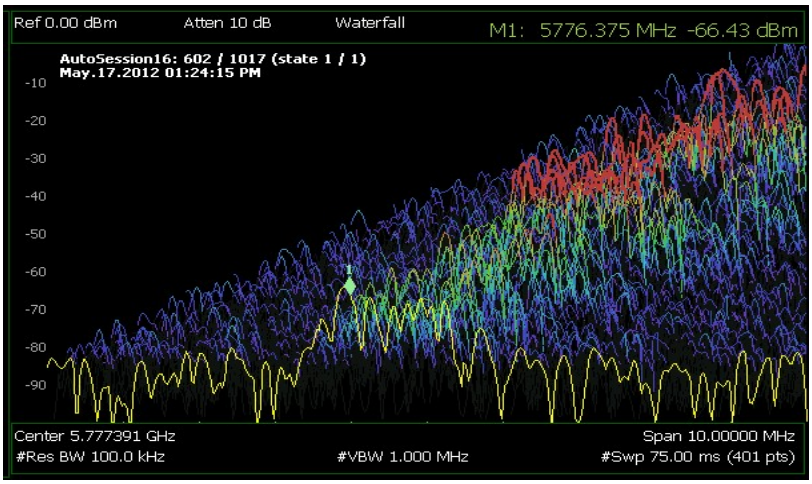


図 12. 信号のウォータフォール表示

スイープ連続収集

FieldFox には、「SwpAcquisition」機能があります。これは、低デューティサイクルのパルスまたは断続的な信号をキャプチャするためのモードで、トレースを表示せずにデータを取得し続けます。各掃引の間隔が小さくなり、パルスや断続的な干渉信号を捕える可能性が高まります。掃引の取得回数は 1～5000 回に設定でき、回数が多いほどアナライザが最終データを生成するまでの時間が長くなります。

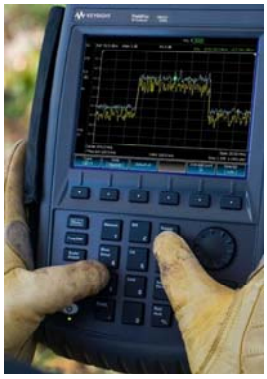
チューニングとリスニング

FieldFox の「Tune and Listen」機能は、AM、FM narrow、FM wide を復調し、干渉信号の特定を分かり易くします。復調される音声で、ユーザはその信号源が放送波である事を識別できます。

まとめ

このアプリケーションノートでは、無線環境における干渉を試験するための測定技法と測定器の要件について紹介し、帯域内干渉、同一チャネル干渉、帯域外干渉、隣接チャネル干渉など、さまざまなタイプの干渉の分類について説明しました。

FieldFox を用いて、無線干渉の発生源を特定にご活用ください。



詳細情報：www.keysight.co.jp
キーサイト・テクノロジー株式会社
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 9:00-12:00 / 13:00-17:00（土・日・祭日を除く）
TEL：0120-421-345 (042-656-7832) | Email：contact_japan@keysight.com