



# IQ キャプチャ／ストリーミングによる スペクトラムモニタリング

## 1. はじめに

5G 携帯電話、衛星通信、無線リンクなどの新たなワイヤレス通信が導入され、無線スペクトラムは以前に比べますます過密になっています。携帯電話、データ接続、ビジネス、セキュリティなど近年の社会はワイヤレス通信に強く依存しています。既知／未知の無線信号をモニタリング、追跡し、データを収集し、識別してすべてのワイヤレスネットワークのパフォーマンスを確保・管理することが課題になってきています。この課題の解決は、ワイヤレスネットワークに携わる企業、政府当局にとって極めて重要です。

この課題を解決するには無線スペクトラムのモニタリングが必要ですが、スペクトラムモニタリングはさまざまな方法があります。簡易的なデータスループットテストで十分な場合もありますが、多くの場合、ワイヤレスネットワークのパフォーマンスを担保する場合は、スペクトラムの詳細な解析が必要です。

このアプリケーションノートで紹介するスペクトラムの IQ データキャプチャ／ストリーミング解析が、今日では、以前にも増して重要になってきています。

## 2. スペクトラムモニタリングの重要性

スペクトラムは有限の資源です。その資源を最大限に活用するために、スペクトラムは慎重に割り当てられ、監視されています。ワイヤレス通信サービスを始める企業や組織は、その RF 周波数帯の権利を得るために数十億ドル（数千億円）の投資を実施します。企業や組織は、獲得した RF 周波数帯に自社以外の無許可の無線信号が無いことを主張する権利を得ます。それと同時に、自社の無線信号が近隣の周波数帯に影響を及ぼさない義務も生じます。

例えば 2017 年、T-Mobile は 5G サービスの権利を獲得するために、米国で 600MHz の周波数帯の競売に 20 億ドル以上を投資しました。競売にかけられた帯域は、以前は地元放送局がテレビに使用していました。このような無線資源への投資・管理により、T-Mobile は、自社のワイヤレスネットワークに問題を引き起こす古い信号や不要な信号をこの帯域からクリアし、自社のスペクトラム帯域を確保しています。

同じ理由で、例えば米国の FCC、韓国の KCA、フランスの ANFR のような各国の通信規制当局は、スペクトラム帯域の所有者（企業や組織）が、割り当てられた周波数帯域内でサービス運用することを管理します。通信規制当局の指示に従い、スペクトラム帯域の所有者（企業や組織）は自社の送信信号をモニタリングして不要信号の発信を抑制し、スペクトラム帯域の権利と義務を果たしています。

スペクトラムを規制する必要があるのは、商用の携帯電話通信だけではなく、公共機関や国防、情報機関にとっても、スペクトラムのモニタリングは極めて重要です。当局のミッションクリティカルな通信を中断し、セキュリティシステムの死角を突いた妨害および、暗号メッセージを送信したりするなど、不正信号は悪質な行為に使用されます。クリティカルな通信システムを維持するには、不要/不正な信号を発見・特定・排除し、スペクトラムを積極的にモニタリングすることが不可欠です。

### 3. IQデータによる信号解析の重要性

スペクトラムモニタリングは、パワーメータの単純なパワーモニタリングから、スペクトラムアナライザによる詳細なモニタリングまで、必要に合わせて実施されます。基本的には、パワーレベルと周波数リミットを設定し、それらのしきい値を超える無線信号をモニタリングします。これらの方法は、不要/不正な無線信号を発見・特定するためには有効ですが、信号の詳細な特徴まではわかりません。パワーメータは帯域が広く、測定帯域のパワーを示すだけです。また、スペクトラムアナライザの波形は掃引調整されているため、得られたスペクトラム波形には時間的ギャップが生じ、無線信号の詳細な特徴を見逃す可能性があります。

リアルタイムスペクトラムアナライザ (RTSA) は時間的ギャップを取り除き、断続的な信号や過渡的な信号を表示可能です。RTSA は何百万もの大量のデータポイントをスペクトラム密度表示に要約しています。そのため、表示データが多すぎて信号波形の重要な特性を見落とし、変調方式を特定できない可能性もあります。

不要/不正な未知の信号について詳細な特徴を確実に調査するには、スペクトラムを高速サンプリングし、波形データを I と Q の要素に分解して解析する必要があります。

IQ データをキャプチャ後、データを再生し信号を解析します。データを周波数領域と時間領域の両方で低速再生し、データのパターンや繰り返しを発見・特定します。例えば、高機能なレーダージャマーは、レーダー信号にロックインすることが可能です。そのような場合、レーダー周波数帯域の IQ データを取得し、レーダージャマーの挙動を経時的に解析して、ジャマーを回避するためにレーダーの動作を調整する対策が可能です。

また、I と Q のデータパターンから変調方式を特定し、悪意のある信号と悪意のない信号を識別できます。前述した例では、T-Mobile のような携帯電話事業者が、一般的な TV 変調方式に対してキャプチャした IQ データを解析して、残存 TV 放送信号など不要、または違法な信号の存在を特定することができます。もう一つの例は、セキュリティを重視する情報機関は、使用する部屋に盗聴機器が仕掛けられていないことを確認するためにスペクトラムアナライザやレシーバを使用しますが、それらは信号の存在を示すだけでどのような信号であるかは識別できません。IQ データを解析すれば、信号が盗聴器からの発信か、蛍光灯からのランダムな放射電波なのかを区別可能です。

### 4. IQデータをキャプチャするためのツール

従来のアナログ方式のスペクトラムアナライザは、スペクトラム波形は機器搭載の局部発振器掃引とアナログ検出器を使用しているため、IQ データのキャプチャは不可能です。最近の主流であるベクトル信号アナライザ (VSA) は、IQ データをキャプチャすることが可能です。VSA は、高速フーリエ変換 (FFT) を実行し、アナログ-デジタルコンバータ (ADC) によって無線信号をデジタルデータに変換します。デジタルデータを使って信号の IQ データを解析します。市販の VSA は、性能、機能、フォームファクタ (筐体サイズ、携帯性) がそれぞれ異なっています。VSA を選択する際の重要なポイントは以下です。

## 4.1 RF 性能

IQ データの実際の波形に対する再現性は、IQ データをキャプチャした機器の性能に依存します。低価格のスペクトラムアナライザは、機器の製造コストを抑えるために、ダイナミックレンジ、帯域幅、振幅分解能を犠牲にしています。一方、高価格のスペクトラムアナライザは優れた RF 性能ですが、筐体が大きくなります。どのような機器を選択するかは、IQ データから抽出する情報によって異なります。変調品質、コンスタレーション、アイダイアグラムなど詳細な解析は、RF 性能が高い機器ほど、良好なデータが得られます。キャプチャタイミングと相対パワーだけがが必要な場合は、低価格の VSA でも十分です。考慮すべき RF 性能としては、振幅精度、周波数精度、測定帯域幅、位相ノイズ、ダイナミックレンジ、ノイズフロア (DANL) などがあります。RF 性能と価格の適切なバランスは、以下の具体的な機能と RF 性能を比較検討します。

## 4.2 キャプチャ帯域幅

キャプチャ帯域幅は、スペクトラムアナライザのフィルタサイズを定義し、キャプチャできる IQ データ量を決めます。解析帯域幅が広いほどサンプルレートが速くなるため、広い解析帯域幅を持っているスペクトラムアナライザでは、より広い周波数帯域、より多くのデータポイントをキャプチャできます。広いキャプチャ帯域幅は、先進のハードウェア、高度な処理能力、消費電力が必要になり、一般的に大型で高価なベンチトップ機器に限定されます。

用途によって必要なキャプチャ帯域幅は異なります。広いキャプチャ帯域幅は未知の信号をモニタリングする場合に最適です。例えば、様々な種類の不正な無線信号について広い帯域幅をモニタリングするセキュリティ機関は、周波数スキャンの回数を最小限に抑えるために広いキャプチャ帯域幅が必要です。一方、解析する信号の周波数が既知の場合は、キャプチャ帯域幅が狭くても十分です。

## 4.3 メモリ/ストレージ

キャプチャする周波数帯域が広く、サンプル数が多くなるにつれて、スペクトラムアナライザ内で処理するデータ量が増加します。データサンプリングが高速のため、スペクトラムアナライザでは、IQ データを RAM にキャプチャしてから記憶媒体にデータを転送します。スペクトラムアナライザがキャプチャ可能な信号の時間と帯域幅は、使用可能な RAM のサイズによって制約されます。IQ キャプチャ専用の RAM が多いほど、キャプチャできる帯域幅や時間は増加します。広帯域のキャプチャが必要な用途では、IQ データキャプチャの RAM サイズが特に重要です。



図 1 IQ キャプチャ

最新の機器では、USB メモリや PC などのストレージデバイスに直接、IQ データをストリーミングできます。機器内部の RAM のリングバッファに IQ データをバッファし、外部記憶装置に継続的にデータを転送します。IQ ストリーミングは、機器内部の RAM と外部記憶装置間のデータ転送速度に制約されますが、大量の IQ データを保存可能です。



図 2 IQ ストリーミング

#### 4.4 高度なトリガ機能

IQ データのキャプチャは、様々な方法でトリガします。最も一般的な方法は、手動トリガ（機器のボタンを押す）でキャプチャを開始します。手動トリガは、IQ データが連続的かつ既知の信号で、キャプチャタイミングが重要でない用途に使用します。しかし、断続的（散発的）な信号に対して、IQ データ解析が必要な場合や、長期間でのスペクトラムをモニタリングする場合には不向きです。手動トリガでイベントを待つ場合、イベントが発生する前に RAM またはストレージの空き容量が無くなる可能性があります。また、イベントをキャプチャしたとしても、目的のイベントを発見・特定するために何ギガバイトもの不要な IQ データを削除しなければなりません。

それに対して種々のトリガ（レベルトリガ、外部トリガ、インターバルトリガ）は、解析する IQ データを抽出するために有効です。たとえば、24 時間スペクトラムの帯域内で不要、または違法な信号が存在しないことを確認する場合、基本的にノイズフロアのすぐ上にレベルトリガを設定します。トリガラインを通過する信号はすべてキャプチャしますが、トリガラインより下の無害なデータはキャプチャされません。

一部のスペクトラムアナライザは、プリトリガ（ネガティブトリガディレイ）機能を搭載しています。このプリトリガ機能は、イベントをモニタリングするトリガが起動すると、RAM 内のリングバッファに IQ データをバッファします。イベントが発生すると、プリトリガは、事前に設定した時間にリングバッファに戻るよう指示し、そこからキャプチャを開始します。イベントの直前のスペクトラムを観察することで、未知の信号の起源や特性についてさらに多くの知見を得ることができます。

#### 4.5 フォームファクタ（筐体サイズ、携帯性）

フォームファクタは、用途それぞれに最適なスペクトラムアナライザを選択する上で大切です。既に述べたように、大きな筐体のベンチトップ機器は高性能・高機能ですが、ハンドヘルドスペクトラムアナライザよりも重く、大きく、非常に高価です。ベンチトップ機器を車両に搭載してフィールドテストを行うことも不可能ではありませんが、このようなベンチトップシステムはコスト、操作性、メンテナンス、電源などの諸問題があります。さらに、限られた空間の航空機内や、信号解析をフィールドで実行する場合など携帯性を重視する場面では、ベンチトップ機器を使うことは不可能です。ハンドヘルドスペクトラムアナライザは、このような用途での使用に最適です。

USB 接続型スペクトラムアナライザ（PC の処理・表示能力を利用する）は、基本的な IQ データキャプチャが可能です。手頃な価格の小型ソリューションですが、PC では様々なソフトウェアを使用するため、ソフトウェアライセンスの管理

が必要になります。その上、PCのOS（オペレーティングシステム）とUSB接続の様々なデバイスなどのソフトウェアによって、USB接続の信頼性の問題が発生することがあります。これに対し、ハンドヘルドスペクトラムアナライザは、信号表示と信号処理（ソフトウェアとハードウェア）が一つの機器に統合された、小型でバッテリー駆動の機器です。最新のハンドヘルドスペクトラムアナライザは、従来のベンチトップ機器と同等性能を具えています。

## 5. データ解析ツール

IQデータをキャプチャした次のステップは、キャプチャデータの解析です。目的と機能がそれぞれ異なるさまざまな解析ソフトウェアツールがあります。解析ソフトウェアがよく実行するIQデータ解析には、以下があります。

- 周波数領域および時間領域でのIQデータの再生

先に挙げたレーダーの例のように、再生速度を調整してパターンや時間の経過に伴う変化を解析します。キャプチャデータは何度でも再生でき、信号の特徴を解析するには極めて有効です。

- イベントの自動検出

トリガを設定し、イベントを定義することで、掃引波形データのパワー変化を自動的に調べてデータ解析にかかる時間を短縮します。この機能は、スペクトラム帯域内で不要、または違法な信号が存在しないことを調べるときのように、大量のスペクトラムデータをキャプチャした場合に特に有効です。広帯域をキャプチャした場合は数テラバイトのデータ量になり、再生には数日かかる場合もあります。高度なトリガ機能を使用すると、解析時間を大幅に短縮できます。

- コンスタレーションダイアグラム

IおよびQの振幅ベクトルでデータを図示すると、16、64、256QAMなどの変調方式のパターンを表示できます。パターンが存在しない場合は、信号が産業機器や蛍光灯などのランダムな放射電波であることの手がかりになります。

- I、Qアイダイアグラム

変調品質を表示します。アイダイアグラムが良好な信号は、受信機によって最終的にデコードする1と0の良好なビットデータ遷移を示します。

- 変調品質解析

IQデータを使用して、変調精度（EVM）、周波数エラー、位相エラー、マグニチュードエラー、シンボルレートなどを解析します。このタイプの信号情報はフレーム構造や変調方式など、信号に関する知識が必要です。

測定器メーカーは、解析ソフトウェアを自社開発するかまたは、サードパーティと提携して解析ソフトウェアをユーザに提供します。政府などのセキュリティ機関の場合は、知的財産とセキュリティのために、独自の後処理解析ツールを自主開発します。測定器メーカーは、キャプチャしたI、Qデータのフォーマットや顧客が自主開発するあつたての必要な情報を提供しています。

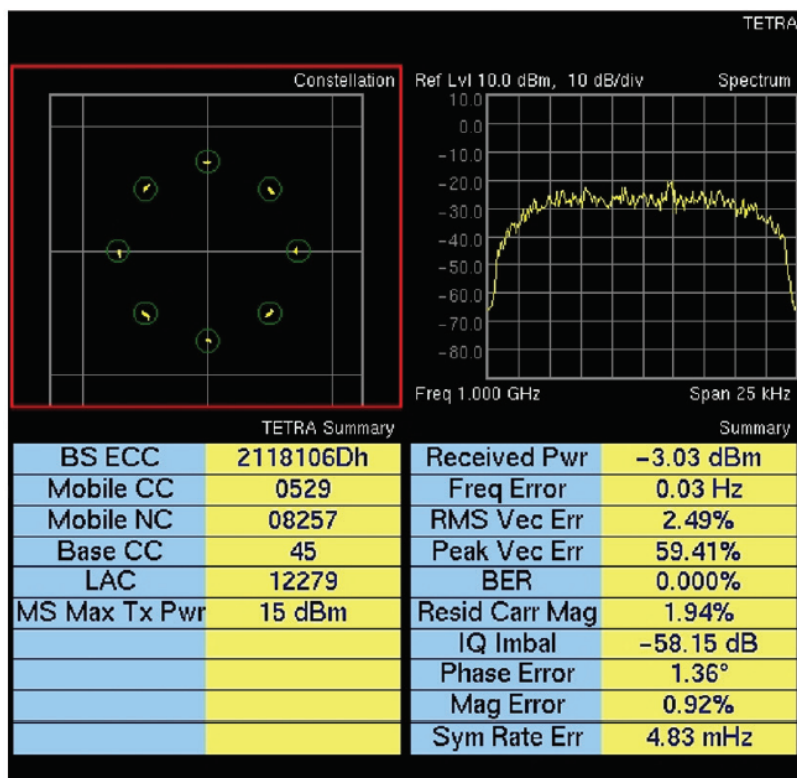


図3 データ解析ツールを使用して変調品質の確認と信号パターンを検証

## 6. MS2090AによるIQキャプチャ/ストリーミング

アンリツのフィールドマスタ プロ MS2090A リアルタイムスペクトラムアナライザ (RTSA) は、フィールドでの IQ キャプチャ/ストリーミングには最適 (性能、機能、携帯性) です。アンリツのハンドヘルドスペクトラムアナライザでの数十年にわたる、開発知見、ユーザに使用され続けた経験の上に開発された MS2090A は、最大 110 MHz のキャプチャ帯域幅を持ち、ベンチトップ機と同等の RF 性能を具えています。

MS2090A は、IQ キャプチャ/ストリーミング専用の 2GB の RAM を搭載しており、110MHz のキャプチャ帯域幅で最大 5.37 秒のキャプチャが可能です。8 ビットから最大 32 ビットまでキャプチャビットを柔軟に選択できます。8 ビットキャプチャは RAM の容量を節約し、長時間のキャプチャを可能にします。32 ビットキャプチャは狭い帯域のキャプチャに対して広ダイナミックレンジを可能にします。また、MS2090A は、IQ ストリーミング機能を具えている唯一のハンドヘルド機器です。USB、イーサネット、または IQC5000B (Bird Technologies 社) を使用して外部ストレージにデータをストリーミングできます。

フィールドでデータをキャプチャする場合、MS2090A の RTSA は、スペクトラム密度表示、スペクトログラム表示と IQ キャプチャ/ストリーミングを同時に実行可能です。これにより、後処理するために IQ データを保存しながら、その場でスペクトラムを観察して後処理解析の糸口を検討できます。

MS2090A では、後処理解析ソフトウェアについて Spectro-X ソフトウェア (Bird Technologies 社) を使用し IQ データの再生ができます。Spectro-X は、スマートなデータ検索機能やデータトリミング、IQ データ波形の再生が可能です。アンリツは、ユーザの独自開発する後処理解析ソフトウェア用に Matlab や Python 用のスタータースクリプトも提供しています。



図 4 MS2090A は IQ5000B へのデータストリーミングに対応

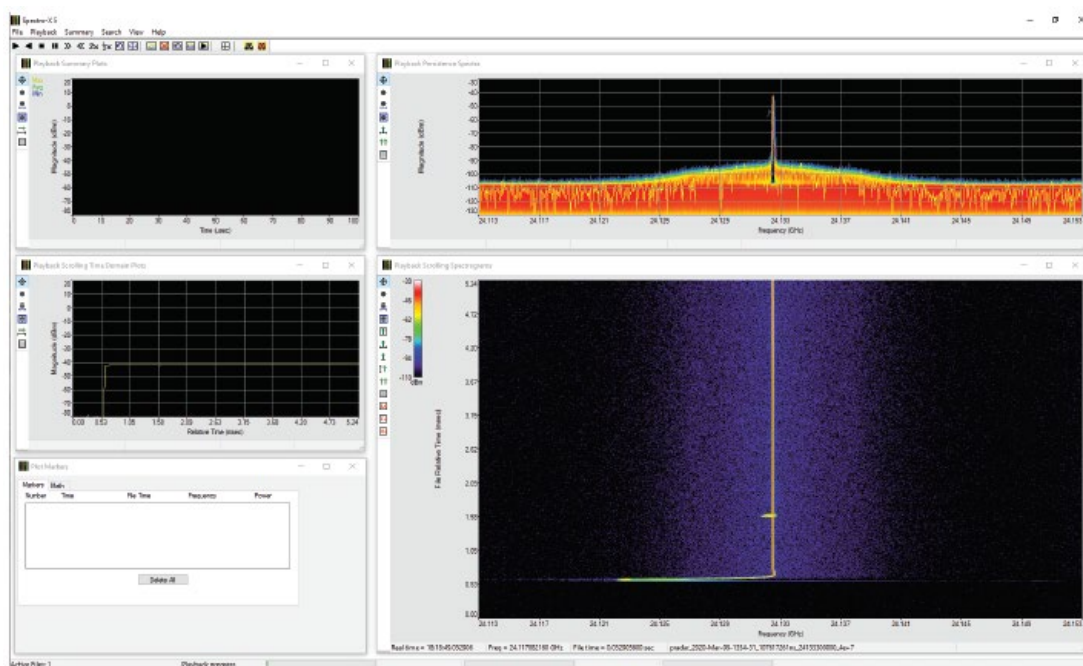


図 5 Spectro-X ソフトウェアで MS2090A の IQ ファイルの再生と検索が可能

RF 性能	<ul style="list-style-type: none"> <li>•振幅確度 0.5 dB (代表値)</li> <li>•ダイナミックレンジ： 106dB 以上</li> <li>•DANL： -164dBm</li> </ul>
キャプチャ帯域幅	<ul style="list-style-type: none"> <li>•最大 110MHz の IQ キャプチャ/ストリーミング帯域幅 (オプションによって異なります)</li> </ul>
メモリ/ストレージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>•IQ キャプチャ専用の 2GB RAM</li> <li>•USB、イーサネット、PCIe を介した外部ストレージデバイスへのストリーミング</li> <li>•IQC5000B (最大 15TB のストレージ、Bird Technologies 社) を使用可能です。</li> <li>•8 ビットの長時間キャプチャから 32 ビットの広ダイナミックレンジまで、IQ データのビット分解能を設定変更が可能</li> </ul>
高度なトリガ機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>•手動、インターバル、外部、レベル (ビデオ)</li> <li>•プリトリガ (ネガティブトリガディレイ)</li> </ul>
フォームファクタ (筐体サイズ、携帯性)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•ハンドヘルドタイプで、ベンチトップと同等の性能</li> <li>•様々な解析機能が統合されたハードウェア、ソフトウェア、表示機能</li> <li>•重さ：6 キロ以下</li> <li>•バッテリー：2 時間</li> </ul>
解析ソフトウェアツール	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Spectro-X 解析ソフトウェア (Bird Technologies 社) が使用可能。</li> <li>•ユーザの独自開発ツール用に Raw IQ データフォーマットの情報や Matlab および Python スタータースクリプトを提供</li> </ul>

## 7. まとめ

スペクトラム帯域内の干渉信号や違法信号を発見・特定することは、今後、ますます重要になります。ワイヤレス通信ネットワークでは、スペクトラムは貴重で過密になっており、不要/不正な信号を排除するためにスペクトラムをモニタリングする必要があります。そのために、解析する信号を含む帯域をキャプチャして解析し、干渉信号や違法信号を発見・特定します。

フィールドマスタ プロ MS2090A スペクトラムアナライザと後処理ソフトウェアのソリューションで、IQ データをキャプチャ/ストリーミングし、IQ データを解析することが、今後このような状況を解決するための最良・最速の方法になります。