Application Note

Anritsu Advancing beyond

RTSA による 2.4GHz ISM バンドの干渉モニタリング

フィールドマスタ プロ MS2090A

目次

1. 2.4GHz ISM帯について 2

2. 2.4GHzでの干渉モニタリング 2

3. 2.4GHz ISMバンドにおける802.11 Wi-Fi無線の動作について 2

4. 2.4GHz ISMバンドにおける*Bluetooth*®の無線動作について 3

5. RTSAによる2.4GHz ISM帯の信号環境の解析 3

6. まとめ 8

1. 2.4GHz ISM 帯について

1940 年代以降、ITU（国際電気通信連合）は、通信、加熱、研究などの用途に使用する免許不要の電波帯域の割り当てを実施してきました。また、北米の FCC や欧州の ETSI などの地域規制当局が、それぞれの地域における電波管理を担当しています。これらの規制当局は、スペクトラムの共用や多数のデバイスの使用を促進するために、これらの帯域におけるデバイスの無線出力などに規制を設けることがあります。一方で、この帯域（2.4GHz ISM 帯など）で使用するデバイスは、世界中で使用可能な様に設計されています。

1990 年代後半、IEEE 802.11（Wi-Fi）と *Bluetooth®*という 2 つの新しい技術が、低電力接続用途で 2.4GHz ISM バンドを採用しました。これらの技術は、携帯電話、ヘッドセット、PC、クレジットカードリーダー、子供用玩具などへ採用され、急速に消費者に浸透しました。最近では、2.4GHz ISM バンドは Wi-Fi や *Bluetooth®*に対応したスマートメータやドローンなどにも利用されています。現在、世界で使用されている *Bluetooth®*および Wi-Fi 機器は 100 億台を超えており、新しい用途が確立されるにつれ、そのデバイス数は増大しています。

2. 2.4GHz での干渉モニタリング

2.4GHz 帯で、非常に多くのデバイスが流通しています。そのため、デバイス使用環境の悪化を調査するため、2.4GHz 帯のスペクトラムをモニタして、電波状況を解析することが重要になります。駅や空港、カンファレンスセンター、ショッピングモールなどの公共スペースには、2.4GHz 帯で、多くの Wi-Fi、*Bluetooth®*デバイスが存在しています。
一方で一般家庭では、近隣施設の複数の Wi-Fi アクセスポイントの電波が入り、また、家の中で電子レンジを使用すると、2.4GHz 帯域全体でかなり強力な電波が電子レンジから漏れてきます。
このような状況では、2.4GHz 帯の電波環境によってスループットが制限され、最終的にはユーザの Wi-Fi、*Bluetooth®*デバイス使用に重大な影響がでます。

3. 2.4GHz ISM バンドにおける 802.11 Wi-Fi 無線の動作について

IEEE は 1997 年に最初の Wi-Fi 規格 802.11 を発表し、続けて 1999 年には 802.11b（2.4GHz）と 802.11a（5GHz）を発表しました。802.11b は、DSSS（直接拡散方式）変調で最大 11Mbps の伝送速度を実現しました。
2003 年に登場した 802.11g では、OFDM（直交周波数分割多重方式）により、伝送速度が最大 54Gbps まで高速化しました。
その後の Wi-Fi 規格では、OFDM 変調が引き続き採用され、サブキャリアの数が増え、帯域幅が増加しました。

IEEE 802.11 規格では、2.4GHz 帯に 14 のチャネルが定義されており、各チャネル幅は約 20MHz です（図 1）。実際には、Wi-Fi は 3 個または 4 個の重複しないチャネルで運用されています。米国では、チャネル 1、6、11 をよく使用します。これらのチャネルのアクセスポイントは、ユーザがアクセスポイントを見つけて Wi-Fi 接続できるように、ビーコン信号を継続的に送信します。ビーコン信号は 102.4 ミリ秒毎に送信され、継続時間は数ミリ秒です。ビーコン信号は、2.4GHz ISM バンドでは、DBPSK または DQPSK（DSSS）で送信します。ユーザの Wi-Fi デバイスとアクセスポイント間でデータを伝送する際には、変調を OFDM に変更し、スループットを向上します。

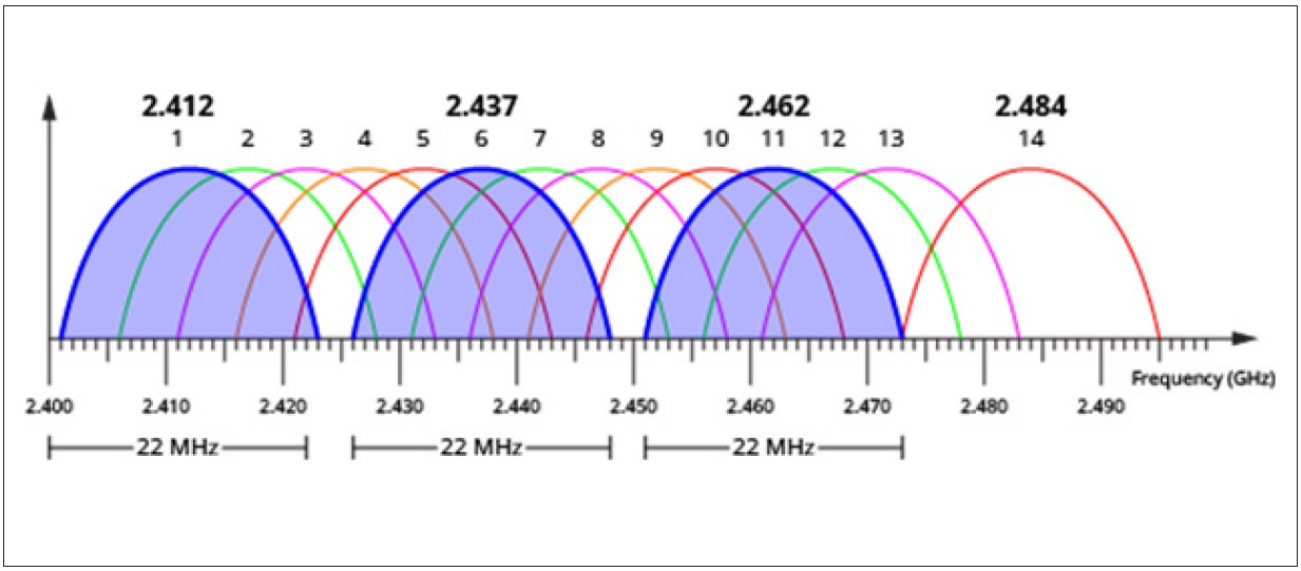

図 1. 米国における典型的な Wi-Fi アクセスポイントのチャネルマッピング。3 個の重複しないチャネルを使用

4. 2.4GHz ISM バンドにおける *Bluetooth*®の無線動作について

2001 年に Bluetooth SIG の Bluetooth Basic Rate（BR）の発表に続き、2004 年に Enhanced Data Rate（EDR）が発表されました。Bluetooth BR および EDR は、1MHz のチャネル間隔で 79 チャネルの周波数ホッピング方式を使用します。ホッピングレートは 1,600 hops/sec、ホップ間隔は 625μ s、ベーシックパケット長は 366μ s です。
2010 年に、チャネル数を減らし、パケット長を短くした低電力版の規格が発表されました。これにより、デバイスのバッテリ消費を低減し、時計や低電力ヘッドセットなどで *Bluetooth*®が使用できるようになりました。

2003 年の *Bluetooth*® Revision 1.2 では、AFH（Adaptive Frequency Hopping）と呼ばれる技術が導入されました。AFH では、干渉の多いチャネルをホッピングプランから一時的に削除します。この新技術により、Wi-Fi の使用頻度が高い場合でも、*Bluetooth*®の使用環境が向上しました。

5. RTSA による 2.4GHz ISM 帯の信号環境の解析

従来、2.4 GHz ISM バンドを解析するには、掃引型スペクトラムアナライザが使用されてきました。しかし、2.4GHz 帯の信号の多くは持続時間が短く、周波数ホッピングも速いため、掃引型スペクトラムアナライザでは帯域の全体像を把握することが困難でした。例えば、最大 3 つの Wi-Fi アクセスポイントとその接続デバイス、さらに *Bluetooth*®デバイス、その他の潜在的な 2.4GHz 帯デバイスをモニタすることは不可能です。掃引型スペクトラムアナライザの MaxHold 波形機能を使用してもリアルタイムのスペクトラムは解析困難であり、短時間に発生した信号は観察できません（図 2）。

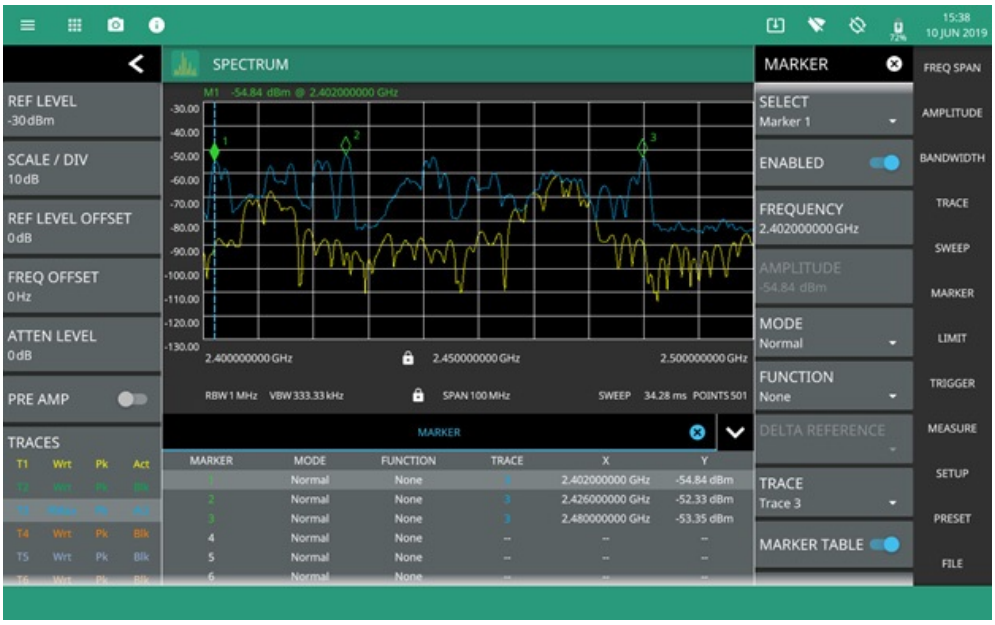

図 2. スペクトラムアナライザで 2.4GHz ISM バンドを掃引すると、多くの信号が表示されますが、個々の信号を識別できません。青色の MaxHold 波形は、BLE（Bluetooth Low Energy）のアドバタイズパケットの位置を特定できますが、Wi-Fi の動きを捉えるのは困難です

RTSA（リアルタイム スペクトラムアナライザ） MS2090A を使用すると、110 MHz の帯域幅でタイムギャップなしに FFT を連続的に実施し、2.4 GHz ISM バンド全体を一望できます。この帯域内では、継続時間 2.055μ s 以上のすべての信号が捕捉され、個々の信号振幅を完全に表示します。

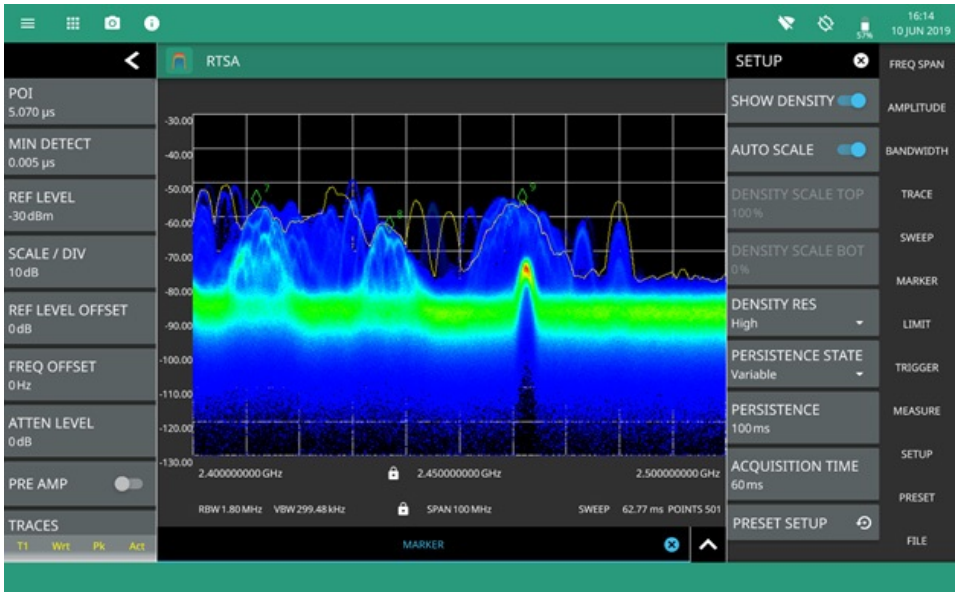

図 3. 図 2 と同じスペクトラムを RTSA で見ると、2.412 MHz、2.437 MHz、2.462MHz の 3 個の Wi-Fi アクセスポイント（マーカ 7、8、9）が明確に表示されています。その他の信号は、このエリアの *Bluetooth*®デバイスの信号です。

図 3 では、BLE（Bluetooth Low Energy）デバイスがエリア内で動作している場合、2.402 MHz、2.426 MHz、2,480 MHz の 3 つのアドバタイズチャネルが確認できます。BLE デバイスは、各チャネルで同じパケットを順次送信し、リスニングデバイスはアドバタイズパケットを監視して接続を確立します。アドバタイズパケットは、20ms～10.24 秒毎に送信され、信号持続時間は 2ms です。

2.4GHz の ISM バンド全体を一望できる RTSA は、3 個の Wi-Fi アクセスポイントを観察できます。この構成は、異なる周波数のアクセスポイントがエリア全体の Wi-Fi をカバーしている施設でよく見られる構成です。アクセスポイントが PSK 変調のビーコンを発信している場合、占有しているスペクトラムは湾曲した形状になります（図 3）。

RTSA のパワー密度表示と同時にスペクトログラムを観察すると、スペクトログラムの時間間隔で測定したすべての信号の経過がわかります。スペクトログラムの各ラインは、60ms の時間間隔で FFT の MaxHold 波形をあらわしています。アクセスポイントは 102.4ms のレートで 4ms のパケットを発信しているので、スペクトログラムとパワー密度の両方の表示で常に信号が検出されています（図 4）。

図 4. スペクトログラム（画面下部）では、3 個の Wi-Fi アクセスポイントと
3 個の BLE アドバタイズチャネルが明確に観察できます。

アクセスポイントがデータを送信する際には、OFDM 変調を使用するため、信号スペクトラムがフラットになりますが、帯域幅は 20MHz です（図 5）。*Bluetooth®*デバイスが、エリア内の他の BR/EDR デバイスを見つけるために Inquiry（問い合わせ）を実行すると、定義周波数の高速スキャンを開始します。スキャンは、スペクトログラムで観察できます（図 6）。図 6 では、この場合では *Bluetooth®*ステレオスピーカを探していました。接続が確立されると、信号は標準的な疑似ランダムホッピングパターンに戻ります。

図 5. Wi-Fi アクセスポイントのデータ送信は、ビーコン用の DSSS 変調ではなく、OFDM で送信しています。

図 6. *Bluetooth®*問い合わせスキャン: *Bluetooth®*デバイスがエリア内の他の*Bluetooth®*デバイスを検索する際に送信

2.4GHz 帯の電波状況が混雑している場合、*Bluetooth®*の AFH アルゴリズムが作動し、定期的に ACK パケットを返信していない周波数を 79 のチャネルホッピングパターンから削除します。図 7 の RTSA パワー密度表示では、*Bluetooth®* AFH アルゴリズムが、Wi-Fi アクセスポイントがアクティブになっているチャネルの使用を停止していることわかります。

図 7. スペクトログラムでは、AFH の実装により、3 個の Wi-Fi チャネルを回避する *Bluetooth®*信号を表示しています。暗いブロックは、3 個の Wi-Fi チャネル間の *Bluetooth®*信号の周波数ホッピングを表示しています（画面下部）。

同じ場所で電子レンジの電源を入れると、明らかに電子レンジから大きな干渉波が漏れていることがわかります（図 8）。この結果、*Bluetooth®*や Wi-Fi のスループットが著しく低下し、さらには完全な通信障害が発生します。

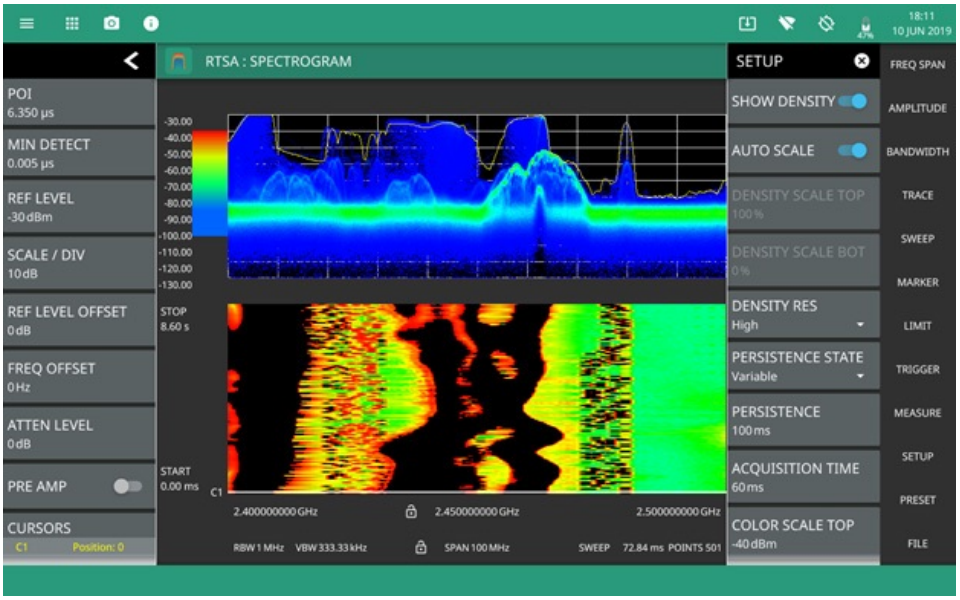

図 8. *Bluetooth®*や Wi-Fi のアクセスポイントから 5m 離れていても、電子レンジは 2.4GHz の周波数帯で強力な電波を発信します。

この例では、AFH が 2.4GHz ISM バンドの上限でクリアなスペクトラムを見つけ、*Bluetooth®*オーディオは引き続きスムーズに再生されました。一方で Wi-Fi アクセスポイントのスループットは、大幅に低下しました。

図 8 画面上部のパワー密度表示では、Wi-Fi アクセスポイントからの信号は電子レンジからの信号よりもかなり低いレベルであるにもかかわらず、表示されています。これは、「信号の中の信号」を表示する RTSA の特長です。この機能は、同じ周波数のレベルが低い干渉信号を見つけるための重要なツールになります。このような「信号の中の信号」は、掃引型スペクトラムアナライザではほとんど観察できません。

6. まとめ

このアプリケーションノートでは、混雑した周波数帯を詳細に解析可能な RTSA パワー密度表示の特長を紹介しました。フィールドマスタ プロ MS2090A RTSA は、POI が 2.055μ s で、ISM バンドの短い信号パケットを捕捉できます。スペクトログラム表示では、スペクトラムの状況を時系列で表示します。パワー密度表示では、信号の中の信号（干渉信号など）を識別できます。

関連する Web は下記です

Web ページ：エリアには無数の電波―ローカル 5G のネットワークで直面する課題とは？
https://pages.anritsu-jpresponse.com/local5g-lp1.html

Web ページ：無線 LAN に代表される 2.4 GHz ISM バンドの干渉波探索
https://pages.anritsu-jpresponse.com/RSM_kanshoha_Solution.html

ホワイトペーパー：リアルタイム スペクトラムアナライザ(RTSA)の基本構成、特性の理解
https://www.anritsu.com/ja-JP/test-measurement/support/downloads/technical-notes/dwl19762

Bluetooth®のワードマークおよびロゴは、Bluetooth SIG, Inc.が所有する登録商標であり、アンリツはこれらのマークをライセンスに基づいて使用しています。

Anritsu Advancing beyond

お見積り、ご注文、修理などは、下記までお問い合わせください。
記載事項は、おことわりなしに変更することがあります。

アンリツ株式会社

https://www.anritsu.com

本社　〒243-8555 神奈川県厚木市恩名5-1-1　TEL 046-223-1111

厚木　〒243-0016 神奈川県厚木市田村町8-5
通信計測営業本部　TEL 046-296-1244　FAX 046-296-1239
通信計測営業本部 営業推進部　TEL 046-296-1208　FAX 046-296-1248

仙台　〒980-6015 宮城県仙台市青葉区中央4-6-1　ＳＳ３０
通信計測営業本部　TEL 022-266-6134　FAX 022-266-1529

名古屋 〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南2-14-19　住友生命名古屋ビル
通信計測営業本部　TEL 052-582-7283　FAX 052-569-1485

大阪　〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101　大同生命江坂ビル
通信計測営業本部　TEL 06-6338-2800 FAX 06-6338-8118

福岡　〒812-0004 福岡県福岡市博多区榎田1-8-28　ツインスクエア
通信計測営業本部　TEL 092-471-7656　FAX 092-471-7699

■カタログのご請求､価格･納期のお問い合わせは､下記または営業担当までお問い合わせください。

通信計測営業本部 営業推進部
TEL: 0120-133-099 (046-296-1208)　FAX : 046-296-1248
受付時間／9 : 00～12 : 00、13 : 00～17 : 00、月～金曜日 (当社休業日を除く)
E-mail : SJPost@zy.anritsu.co.jp

■計測器の使用方法 、その他については､下記までお問い合わせください。

計測サポートセンター
TEL: 0120-827-221 (046-296-6640)
受付時間／9 : 00～12 : 00、13 : 00～17 : 00、月～金曜日 (当社休業日を除く)
E-mail: MDVPOST@anritsu.com

ご使用の前に取扱説明書をよくお読みのうえ、正しくお使いください。　2104

■本製品を国外に持ち出すときは、外国為替および外国貿易法の規定により、日本国政府の輸出許可または役務取引許可が必要となる場合があります。
また、米国の輸出管理規則により、日本からの再輸出には米国商務省の許可が必要となる場合がありますので、必ず弊社の営業担当までご連絡ください。

■このアプリケーションノートの記載内容は2021年 11月 12日現在のものです。

2021-11 WJP No. 11410-01137, Rev. A