

ステップバイステップの EMI トラブルシューティング

アプリケーション・ノート



すべての電子機器製品は、電磁適合性 (EMC) や関連する電磁干渉 (EMI) といった規格に適合していなければ、市場に出すことはできません。EMC や EMI への対応はプロジェクトの最後に行われることが多いため、最終局面で不具合が明らかになると大変なことになります。それは多くの場合、スケジュールの遅れや計画外のコスト、エンジニアリング・チームのストレスにつながります。適切なツールと技術を備えていれば、問題を回避し、問題が発生したときも迅速に対処することができます。

簡単に言えば、放射エミッションとは放射された電界の測定値であり、伝導エミッションとは試験対象の製品、機器、システムから発せられる伝導 EMI 電流の測定値です。これらのエミッションには、それぞれの機器の使用が想定されている環境に従って、世界レベルでさまざまな許容値が定義されています。

今日では、ワイヤレス・デバイスやモバイル・デバイスをはじめとして、数多くの家電製品が利用されているため、デバイスどうしの両立性がより重要になってきています。製品は互いに干渉してはならず (放射/伝導エミッション)、また外部のエネルギー源から影響を受けないように設計されていなければなりません。現在、ほとんどの国では何らかの形で EMC 規格が定義されているため、それに従って製品をテストしなければなりません。

本アプリケーション・ノートの概要

- 製品設計者や EMC 技術者が EMC や EMI のトラブルシューティングとデバッグの基礎を学ぶのに役立つ
- 3 ステップによる EMI のトラブルシューティングの紹介
- 放射/伝導エミッションのトラブルシューティングの概要 (セットアップのヒントなど)
- 測定データを解釈する方法
- 環境 RF の影響を考慮したテストの実施
- 時間相関のとれた波形とスペクトルを使用したトラブルシューティングの詳細と実例

アプリケーション・ノートでは、デジタル・ダウンコンバータと Spectrum View を内蔵した 4/5/6 シリーズ MSO の使用方法を具体的に示します。この特許技術では、各領域で独立したコントロールを使用して、すべてのアナログ信号のアナログ表示とスペクトラム表示を同時に観測することができます。Spectrum View は、スペクトラム・アナライザを使用するときと同じ感覚で、オシロスコープを使用して簡単に周波数領域を解析できます。従来からの周波数領域と時間領域の現象を関連付ける機能も活用していただけます。

基本定義

まずは基本的な定義から始めましょう、EMC と EMI には微妙な違いがあります。

- EMC とは、開発された機器が、想定される動作環境において期待通りに動作する性能を意味します。たとえば、軍用車両に搭載される堅牢化された衛星通信システムであれば、他の高出力の送信機やレーダが近くにあっても、期待通りに動作しなければなりません。これは、近接環境におけるエミッションと免疫性の両立を意味しています。これは通常、航空・宇宙分野の製品やシステムのほか、車載用機器などに適用されます。放射されたエミッションは、通常、1m の試験距離で測定されます。
- EMI (無線周波数干渉 / RFI と呼ばれる) は、製品が既存のラジオ、テレビ、または携帯電話などの通信システムに干渉しないようにするための対策に関連したものです。米国以外では、静電気放電や電力線の過渡現象といった、外部エネルギー源に対する耐性も含まれています。これは通常、商業用、民生機器用、産業機器用、医療用、科学製品などに適用されます。放射エミッションは、通常、3m または 10m の試験距離で測定されます。このアプリケーション・ノートでは、EMI のトラブルシューティングを中心に解説していきます。

EMI のトラブルシューティング

3 ステップによる EMI のトラブルシューティング

多くの製品設計者の中には、近接界プローブを使用して PC ボードやケーブル上の EMI の " ホットスポット " を特定する方法は熟知していても、その次に何をすればいいのかわからない、という方もおられるかもしれません。ここでは、6 シリーズ・ミックスト・シグナル・オシロスコープの Spectrum View を例に説明します。ここでは、EMI のトラブルシューティングのための簡単な 3 ステップのプロセスをご紹介します。

ステップ 1 - 近接界プローブ (磁界または電界のいずれか) を使用して、PC ボードや内部ケーブルのエネルギー源や特徴的なエミッション・プロファイルを特定します。エネルギー源としては、一般に、クロック発振器、プロセッサ、RAM、D/A または A/D コンバータ、DC-DC コンバータなどがあり、エッジ・レートの高い、高周波のデジタル信号を生成します。シールド付きの筐体を使用した製品の場合は、開口部の継ぎ目に漏れがないかどうかを調べます。エネルギー源のそれぞれについて、エミッション・プロファイルを記録します。

ステップ 2 - 電流プローブ を使用して、ケーブルを流れる高周波電流を測定します。ケーブルは、RF エネルギーを放射する可能性が最も高い構造であることを覚えておいてください。プローブをケーブルに沿って前後に動かし、高調波電流が最も高くなるポイントを探します。それぞれのケーブルについて、エミッション・プロファイルを記録します。

ステップ 3 - 近接測定用アンテナ (通常は 1m の試験距離) を使用して、実際に放射されている高調波信号を特定します。これらの高調波を記録し、近接界プローブによる測定値や電流プローブによるケーブルの測定値と比較します。これにより、ケーブルや継ぎ目に結合され、測定用アンテナに向けて放射されている可能性の高いエネルギー源を特定することができます。

ステップ 1 - 近接界プローブ - ほとんどの近接界プローブ・キットには、電界と磁界の両方のプローブが付属しています。磁界プローブと電界プローブのどちらを選択するかは、電流、つまり高い di/dt (回路トレース、ケーブルなど) をプローブするのか、あるいは電圧つまり dV/dt (スイッチング電源など) をプローブするのかわによって異なります。通常は、高周波/高調波電流のトレースが焦点となるため、ほとんどのトラブルシューティングは磁界プローブを使用して行われます。小口径のプローブほど分解能は高くなりますが、プリアンプを使用して信号をブーストしなければならない場合があります。ただし、磁界プローブと電界プローブはどちらも、シールドされたエンクロージャの漏れのある継ぎ目や隙間の位置を特定するのに役立ちます。

大きめの磁界プローブを使用して、製品の筐体、回路基板、接続されているケーブルの周りを調査します。この作業の目的は、EMI の主な発生源と主要な狭帯域/広帯域の周波数を特定することにあります。観測された場所や周波数特性を記録します。発生源を特定するには、中型 (1cm) の磁界プローブ (図 1) に変更すると、より高い分解能が得られます (ただし、感度は若干低下)。多くの場合、ほとんどの検査において、このプローブが使用されることにお気づきになるはずです。

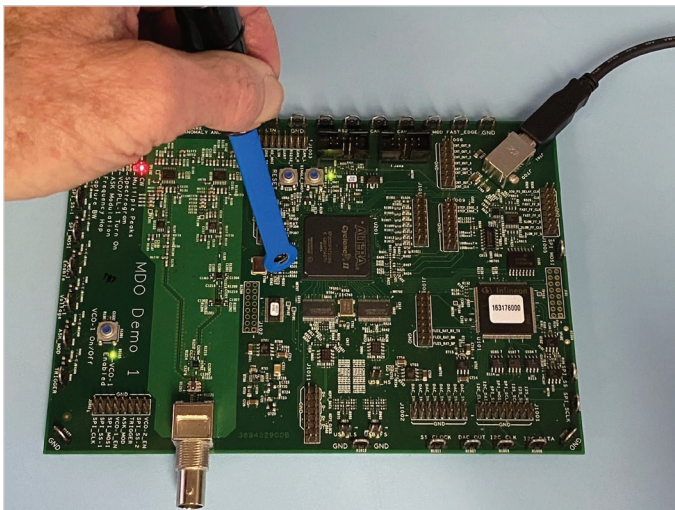


図 1. 近接界プローブを使用して、潜在的なエミッションの発生源を特定する

また、磁界プローブの場合、プローブのループ面に沿うようにトレースまたはケーブルがあるときに最も感度が高くなる (最も多くの磁束を結合する) ことにも注意してください。また、PC ボードの面に対して 90 度の角度になるようにプローブを配置するのがベストです。図 2 を参照してください。

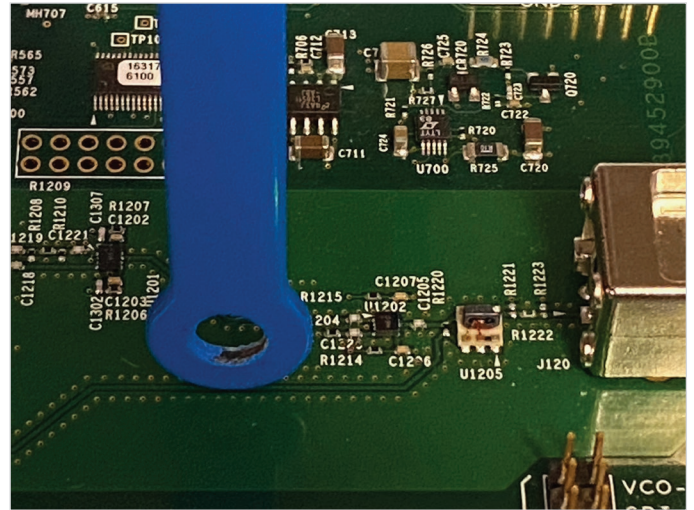


図 2. 磁界プローブはループを介して最大の磁束線を収集するため、最大の感度が得られるように、図のように回路トレースまたはケーブルとの位置関係を調整する

ボード上のすべての高周波エネルギー源から、実際に放射が行われるわけではないことに注意してください。放射は、I/O ケーブル、電源ケーブル、またはシールドされた筐体内の継ぎ目などの「アンテナのように機能する」構造物に何らかの形で結合される必要があります。

ボード・レベルで問題箇所の調査を行う場合は、プローブ・チップの物理的な位置にばらつきが生じないように、近接界プローブをテープで固定してください。プロービング・ポイントを調整するときは、相対的な変化に注目することが重要です。

ステップ 2 - 電流プローブによる測定 - 次に、Com-Power CLCE-400 などの高周波電流プローブを使用して、付属ケーブル（電源ケーブルを含む）のコモンモード電流を測定します（図 3）。高調波が検出された位置（上位の数か所）を記録し、近接界プローブによる検査結果のリストと比較します。これらの電流はアンテナ状の構造物（ケーブル）の上を流れているため、最も放射が起きやすく、試験に不合格になる原因を作ります。

FCC または CISPR クラス B のテスト・リミットでは、わずか 5 ~ 8 μ A 程度の高周波電流でも不合格になりますので注意してください。付属の伝達インピーダンス校正曲線を使用することで、プローブとアナライザによって測定された電圧から電流を計算することができます。



図 3. 電流プローブを使用して、I/O ケーブルや電源ケーブルに流れる高周波電流を測定する

電流プローブを前後にスライドさせて、高調波が最大になるポイントを見つけると良いでしょう。これは、ケーブル上の定在波により、周波数によって異なる場所で共振が起きるためです。

また、問題の周波数に対してワイヤ／ケーブルの長さが（電氣的に）短いのであれば、それらに流れる電流から、放射される電界 (V/m) を予測することも可能です。たとえば、最大 200MHz で 1m の長さのケーブルでは、正確な予測値が得られることが知られています。詳細は参考文献 1、2、5 を参照してください。

ステップ 3 - 近接アンテナのトラブルシューティング - 製品の高調波プロファイルが完全に特性化されたら、実際にどの高調波が放射されているかを確認します。それには、アンテナ（校正されていないものでも構いません）を 4/5/6 シリーズ MSO に接続して、試験対象の製品やシステムから少なくとも 1m 離れた場所に設置し、実際のエミッションを測定します（図 4）。一般的には、接続された I/O ケーブルや電源ケーブルから放射されるほか、シールドされた筐体の継ぎ目や開口部からも漏れが生じます。このデータを近接界プローブや電流プローブのデータと比較します。実際に測定されたエミッションは、それまでのプロービングで特定されたエネルギー源を示しているはずですが。

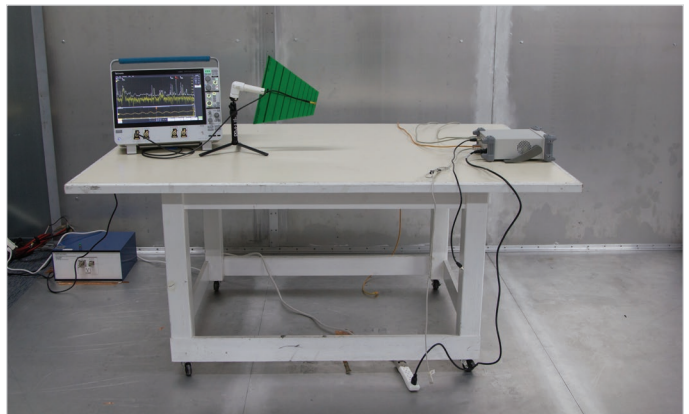


図 4. 放射エミッションのトラブルシューティングのための典型的なテスト・セットアップ。アンテナと被試験機器との距離は約 1m

ケーブルを 1 本ずつ取り外して、ケーブルによる放射が主な原因であるかどうかを確認してみます。また、試験的に 1 本以上のケーブルにフェライト・チョークを取り付けてみると良いでしょう。近接界プローブを使用して、シールドされた筐体の継ぎ目や開口部からも漏れが発生していないかを調査します。

エミッションの発生源が特定されたら、フィルタリング、アース、シールドなどの知識を使って、問題となっているエミッションを軽減することができます。製品の内部から外部ケーブルまでの結合経路に着目してください。場合によっては、レイヤ・スタックアップを最適化したり、リターン・プレーンのギャップをまたぐ高速トレースを排除するなど、回路基板の再設計が必要になることもあります。アンテナをある程度離れた場所に設置し、リアルタイムに結果を観察することで、緩和のフェーズを効率的に進められます。

放射および伝導エミッションのトラブルシューティング

Spectrum View を使用した高調波の基本表示と高調波の時間相関解析は、EMI エミッション問題のトラブルシューティングに最も有用な技術です。放射エミッションと伝導エミッションのトラブルシューティングには、前述した 3 段階のプロセスを使用します。

商用/コンシューマ用製品の**放射エミッション**テストは、国際規格 CISPR 11 または 32 に従って実施されるもので、多くの製品設計・開発エンジニアにとって最も高い障壁となる試験です。

ほとんどの製品は、30 ~ 1,000MHz の範囲で放射が発生します。最初のステップは 500MHz までの範囲で初期スキャンを行うことです。なぜなら、ここが通常、デジタル高調波が最も発生しやすい帯域だからです。また、他に顕著なエミッションが見られないか、少なくとも 1 GHz (またはそれ以上) までのエミッションを記録する必要があります。一般的には、低い帯域の高調波が緩和されると、高域の高調波も緩和されます。

一般的な放射エミッションのトラブルシューティングのための 4/5/6 シリーズ MSO での SPECTRUM VIEW のセットアップ

- 近接界プローブをチャンネル 1 に接続し、チャンネル 1 バッジをダブルタップしてオンにします。次に、バッジをダブルタップして、メニュー・パネルを開きます。プローブのインピーダンスを 50Ω に設定します。
- 近接界プローブを使用して、被測定ボード上でサンプル信号を検出し、垂直、水平、トリガ・レベルを調整して、安定した波形を表示します。
- チャンネル 1 バッジが開いた状態で、Spectrum View をタップしてパネルを開き、オプションを表示します。Display を ON にして、Units を dBuV に設定します。Nomal ボックスと Max Hold ボックスをオンにします。Max Hold は、基準となる最大スペクトル振幅を指定するもので、現在測定されているスペクトルと比較するのに便利です。メニューの外側をクリックまたはタップして閉じます。
- Spectrum メニュー (画面右下) をダブルタップします。一般的なトラブルシューティングのため、スペクトラム表示の周波数を DC ~ 500MHz に設定してみましょう。それには、Center Frequency を 250MHz、Span を 500MHz に設定します。各選択ボックスをダブルタップすると、テンキー・パッドが表示されます。狭帯域高調波では、ほとんどの場合、10 ~ 20kHz の分解能帯域幅から測定を開始します。

- 垂直軸スケールをピンチして拡げることで、スペクトルの表示範囲を拡大できます。
- マーカ・スレッショルドはカスタマイズできます。また、矢印やボックス、ユーザ定義可能なテキストを使用したコールアウトを追加しておけば、セットアップ情報の文書化に役立ちます。

伝導エミッションは、電力線が適切にフィルタリングされていれば、通常は問題になりません。ただし、低価格帯の電源装置は、多くの場合、フィルタリングが不十分です。汎用のノーブランド電源の中には、フィルタリングがまったく施されていないものもあります。

商用またはコンシューマ用製品の伝導エミッション試験は、国際規格 CISPR 11 または 32 に従って実施されます。AC (または DC) 電源と被測定製品との間に、ライン・インピーダンス安定化回路網 (LISN) を配置する必要があります (図 5)。4/5/6 シリーズ ミックスド・シグナル・オシロスコープを 50Ω ポートに接続すると、伝導 RF ノイズ電圧が表示されます。AC または DC 電源電圧用にそれぞれ異なるモデルの LISN が用意されています。



図 5. 電源コードからの伝導 EMI をスペクトラム・アナライザに結合するために、通常はライン・インピーダンス安定化回路網 (LISN) が使用される (写真提供: Tekbox Digital Solutions)

図 6 に示すように、CISPR 11 または 32 規格に従って、テストをセットアップするのが理想的です。被測定装置 (EUT) は、高さ 80cm の木製テーブルの上に置かれており、接地面は床面にあります。LISN は接地面に接着され、EUT と Spectrum View を備えた 4/5/6 シリーズ MSO に接続されます。

伝導エミッションのトラブルシューティングについては、基本的に放射エミッションの手順と同じなので、本アプリケーション・ノートでは概要を示すにとどめます。

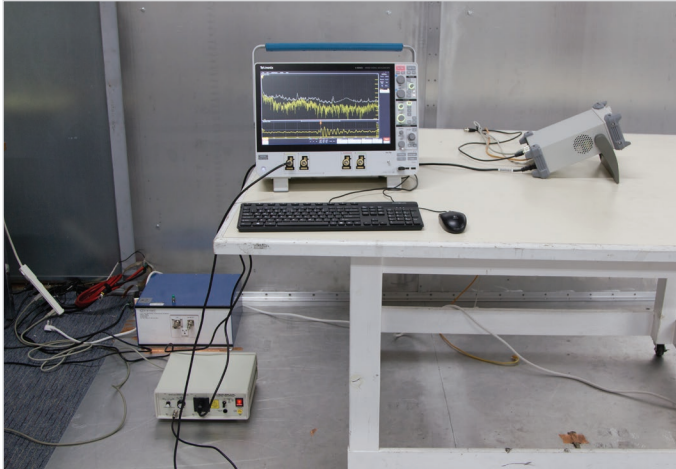


図 6. 一般的な伝導エミッション・テストのセットアップ

Tekbox TBLC08 などのライン・インピーダンス安定化回路網 (LISN) を接続し、測定対象となる製品またはシステムと 4/5/6 シリーズ MSO (Spectrum View 搭載) の間に配置します。テーブル上でトラブルシューティングを行う場合は、接地面としてアルミホイルを置いて使用します。銅テープを使用して LISN をホイルに接着します。EUT は接地面から絶縁します。必ず以下に示された通りの順序で接続してください。

注意: LISN をオシロスコープに接続する前に、EUT の電源を入れておくことが重要です。これは、電源投入時に大きなトランジェントが発生する可能性があるため、高感度なオシロスコープの入カブリアンブ段が破損してしまう恐れがあります。TekBox TBLC08 LISN には、トランジェント保護機能が内蔵されています。ただし、すべての LISN に内蔵されているとは限りませんので、注意が必要です。

一般的な放射エミッションのトラブルシューティングのための SPECTRUM VIEW のセットアップ

放射エミッションの場合と同様の手順で、Spectrum View にゼロから 30MHz までの周波数を表示するように設定します。Center Frequency は 15MHz、Span は 30MHz、分解能帯域幅は 9kHz または 10kHz を使用します。EUT の電源を入れ、LISN の 50Ω 出力ポートをオシロスコープに接続します。高調波周波数は通常、低い周波数 (kHz レベル) で非常に高く、30MHz に近づくにつれて次第に減少することに注意してください。こうした高調波周波数によって、オシロスコープがオーバードライブしないように注意してください。必要に応じて垂直スケールを調整するか、Tekbox TBLC08 LISN (図 6 の左下) でトランジェント保護機能 (10dB のアッテネータなど) を選択します。

Spectrum View は、ピーク検波された高調波を取り込み、対して EMI 試験では、平均値検波または準ピーク検波の許容値が与えられます。そのため、測定データと実際の試験許容値を直接比較することはできません。しかし、少なくとも問題のありそうな領域を絞り込むことはできるでしょう。高調波周波数のトラブルシューティングは、先程説明した放射エミッション・テストと同様のプロセスを使用します。

収集したデータの解析

すべての近接界信号が「アンテナのような」構造に結合して放射されるわけではありません。多くの場合、同じ高調波の一部 (またはすべて) が、2 つ以上の発生源によって生成されていることに注意してください。例えば、25MHz のクロックと 100MHz のクロックは、どちらも 100、200、300MHz などの高調波を発生させる可能性があります。そのため、多くの場合、単一の高調波を取り除くために、複数のソースを修正しなければなりません。Spectrum View には、ステップ 1 からステップ 3 までのデータ収集プロセスを効率化する、強力なデータ収集/文書化機能が搭載されています。

高調波が分析され、疑わしい発生源が特定されたら、次のステップは、発生源から製品の外に至るまでの結合経路を決定することです。通常、実際に放射構造が形成されるのは、I/O ケーブルや電源ケーブルです。継ぎ目や開口部 (ディスプレイやキーボードなど) から漏れている場合もあります。

結合経路には、伝導、放射、静電誘導、電磁誘導の 4 種類があります。後者の 2 つ (静電誘導と電磁誘導) はいわゆる「近接界」結合であり、発生源とノイズを受ける側との距離をわずかに変えるだけで、放射エネルギーの問題に大きな効果をもたらします。たとえば、リボン・ケーブルが電源のヒートシンクに近過ぎるために (容量結合、または dV/dt 放射エミッションを引き起こしているのであれば、リボン・ケーブルを近くのヒートシンクから遠ざけるだけで解決する場合があります。また、発生源とノイズを受けるケーブル間の誘導結合 (di/dt) に原因があるのなら、再ルーティングによって低減させることができます。これらの内部結合のメカニズム (または PC ボードの設計上の問題) はどちらも、伝導エミッション (電源ケーブルを介して発生) や放射エミッション (I/O ケーブルや電源ケーブルがアンテナとして機能するか、または筐体の継ぎ目/開口部から漏洩する) につながる可能性があります。多くの場合、シールドされた筐体のケーブル・シールドの接着不良や、I/O ポートや電源ポートでコモンモード・フィルタリングが行われていないことが、放射エミッションの原因となっています。

多くの場合、エミッションのトラブルシューティングを行う際には、すでに正式なコンプライアンス・テストが実施されていて、高調波がどの程度許容値を超えているかを把握できている状況にあると考えられます。そのため、一般に、トラブルシューティングの際に重要なポイントは、絶対的な測定ではなく、相対的な測定に重点を置いて作業を進めることです。つまり、ある特定の高調波が許容値を 5 ~ 10dB オーバーしていることを把握しているなら、少なくとも

オーバーしている分低減させるか、あるいはそれ以上のセーフ・マージンを持たせて低減させることを目標とします。したがって、あくまでも重要なのは相対的な変化ですので、校正済みのアンテナは必要ありません。また、アンテナも必ずしも高調波の周波数に合わせてチューニングされている必要はありません。EUT から発生した高調波の内容を簡単に視覚化できることが重要なのです。

環境信号の影響を考慮した測定

シールドされた部屋や半無響室の外で試験を行う際によく直面する問題の 1 つに、FM やテレビ放送の送信機、携帯電話、双方向ラジオなどのソースから放射される環境信号の数が多いことが挙げられます。これは、電流プローブや外部アンテナを使用する場合に特に問題となります。

問題となっている高調波がごく限られた数なら、スペクトラム・アナライザの周波数スパンを狭めて、特定の高調波周波数に "ズーム・イン" するのが簡単なやり方です。その結果、環境信号のほとんどを除去することができます。一般的な例としては、100MHz のクロック高調波と 99.9MHz の FM 放送帯域チャンネルの識別が挙げられます。また、狭帯域の連続波 (CW) であれば、高調波が変調周波数の中に部分的に隠れているため、分解能帯域幅 (RBW) を小さくすることも、高調波の分離に役立つ場合があります。もちろん、RBW を小さくするだけで、高調波の振幅が減少するわけではありません。

多くの場合、問題となっている帯域全体の環境信号の「全体像」を把握しておく効率的に作業を進められます。Spectrum View を使用して環境信号の影響を観測するには、まず被測定デバイスの電源を切り、必要に応じてスペクトラムの中心周波数とスパンを設定します。この例では、中心周波数を 100MHz、スパンを 200MHz に設定します。高調波を明確に解決するためには、分解能帯域幅 (RBW) を汎用トラブルシューティングに最適な 10 kHz にすると良いでしょう。次に、File > Save As > Ch1 > SV_Normal > で、スペクトラム・プロットを環境ベースラインとして保存しておきます。ファイル名を入力して保存します (図 A)。

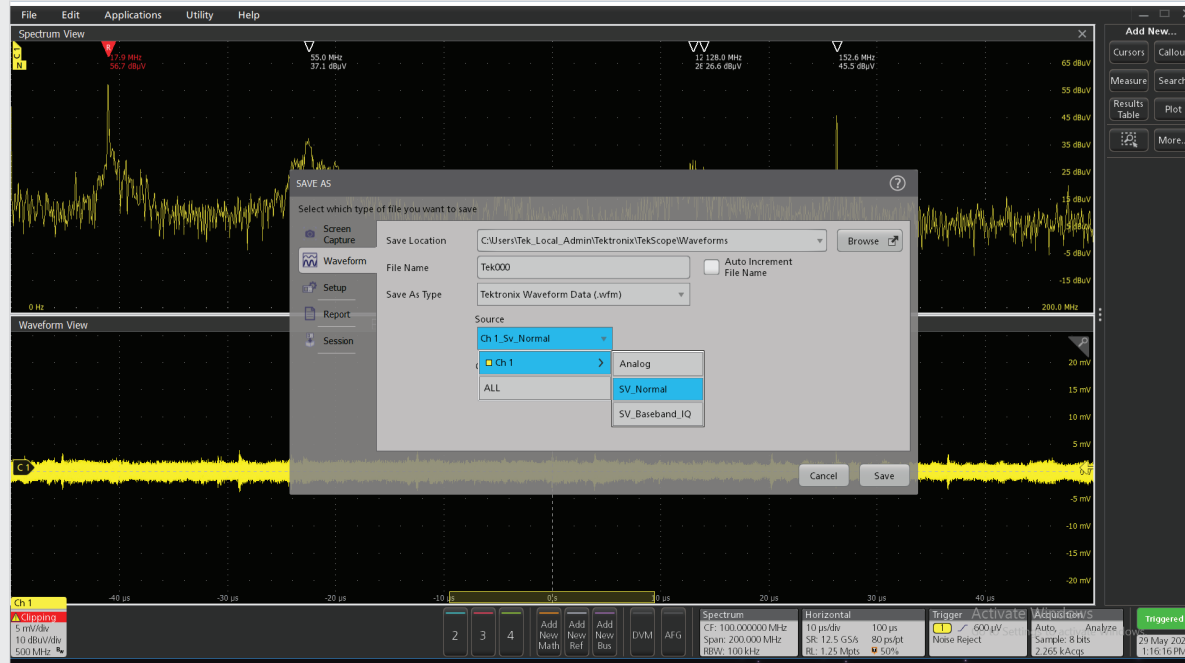


図 A. 被測定デバイスをオフにした状態で、"SV_Normal" を使用して環境スペクトラムを保存する

このファイルには、各種の放送局、双方向ラジオ、デジタル・テレビ、携帯電話の信号が記録されています。Recall > Waveform > Filename > Recall (図 B) を選択して、保存した波形を呼び出します。その後、EUT をオンにした測定結果を保存し、環境信号と EUT 信号の両方を記録します。図 C のような画面が表示されます。

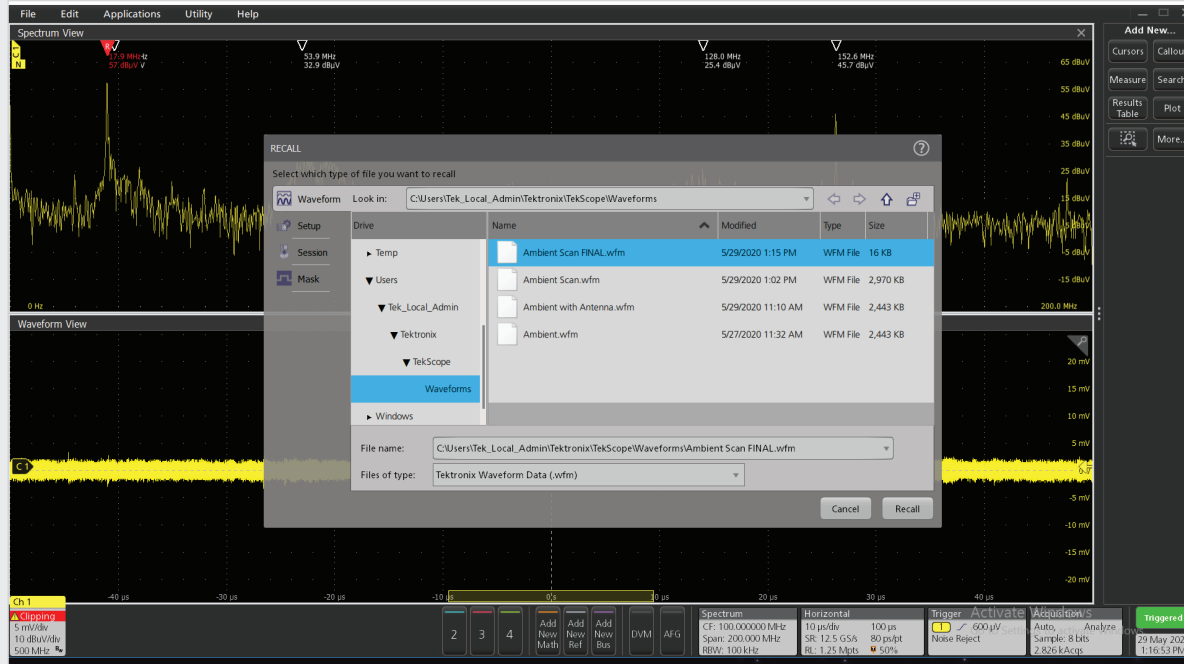


図 B. 保存された環境プロットの呼び出し

FM 放送帯 (88 ~ 108MHz)、デジタル TV 帯 (470 ~ 608MHz)、携帯電話 (通常 1,000MHz 未満の帯域では 600 ~ 850MHz) の周辺では、非常に活発な動きが見られることにお気付きになるはずですが。米国内の携帯電話の周波数帯の詳細については、参考文献 6 を参照してください。

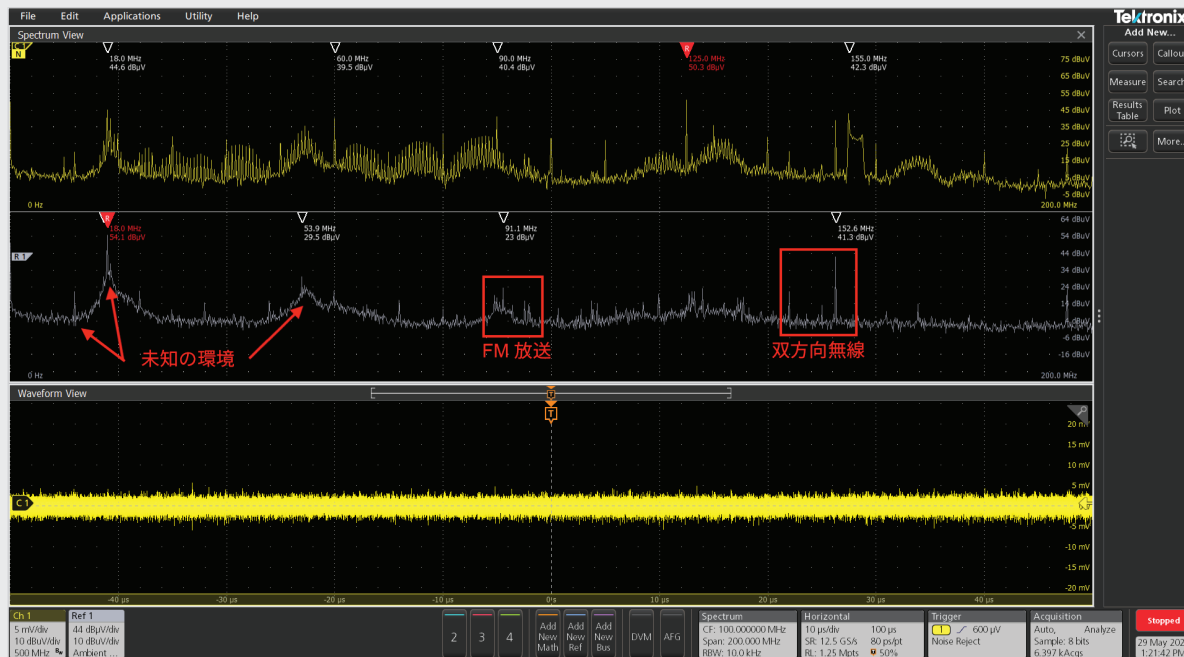


図 C - 環境信号測定 (グレー) と被測定デバイスのスキャン (黄色) この違いを目視で確認するだけで、被測定デバイスの高調波が明らかになります。

環境信号を取り込むだけでは捕捉できなかった、双方向無線による伝送が存在する可能性も考えられるため、この手法だけでは万全とは言えません。それでも、被測定デバイスから出力されている信号に関しては、十分に有益な手がかりとなるはずですが。高調波周波数が測定対象機器に由来するものかどうかを確認するためには、電源を切る必要があるかもしれません。

時間相関によるトラブルシューティング

時間領域波形を安定させることができず、信号は複雑ではあるものの、一定のバースト幅で表示されている場合（デジタル・バスや IoT/無線回路ではよく見られる現象）、バースト間の周期を測定し、トリガを安定させるためにホールドオフ時間を設定してみてください。これがうまくいかない場合には、アキュイジションを停止して、保持された波形データを解析することもできます。

安定した波形が得られたら（またはアキュイジションが停止したら）、オシロスコープ前面操作パネルのズーム・ノブ（右下）を時計回りに回して、時間領域波形を拡大します。自動的に拡大された波形がオシロスコープ画面下部に表示されます。時間領域の波形表示下部にスペクトラム・タイム（ズーム比や RBW に応じて大きさが変化する色付きのボックス）が表示されていることに注目してください。この領域を指やマウスで掴んで動かすことで、時間領域アキュイジションでのボックスの位置に対応した、周波数領域における影響を確認することができます。時間領域の波形の特定の部分にスペクトラム・タイムを配置することで、ノイズ・スペクトラムの時間依存性を調べることができます。オシロスコープのディスプレイに表示されるスペクトラム・タイムの例については、**図 8 および 図 9** を参照してください。

例として、セキュア・エントリ・アクセスとして使用される指紋スキャナの DDR RAM バスのノイズを測定してみます（**図 7**）。このメモリ IC のすぐ隣にはフレックス・ケーブルがありますが、データ・バスと結合することで、規則的なパルス状の EMI を放射しています。デジタル回路のパルスは、強力な高調波成分を生成する可能性がきわめて高いことが知られています。

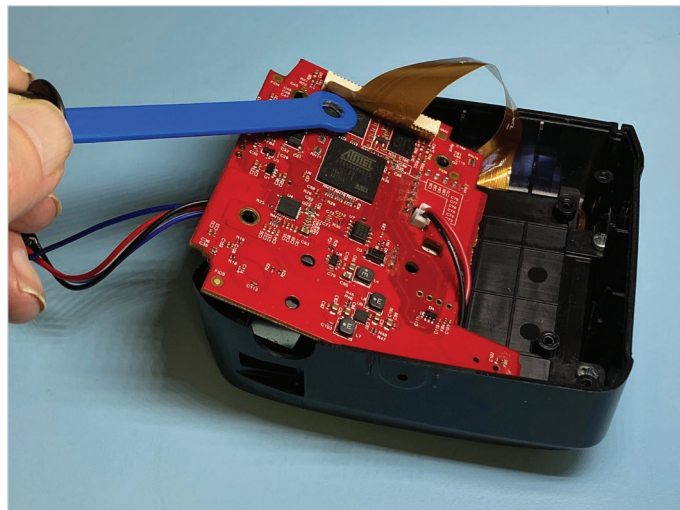


図 7. LCD ディスプレイのフレックス・ケーブルに隣接する DDR RAM メモリ IC への近接界プロービング近距離で結合されることで、ケーブルが放射アンテナとして働いています。

時間領域画面に複数のノイズ・バーストが表示されるように、水平方向の時間軸を調整します。トリガ・レベルを調整して表示を安定させます。または、前面パネルの Run/Stop ボタン（右上）でアキュイジションを停止します。次に、前面パネルのズーム・ノブ（右下）を時計回りに回して、波形を少しずつ拡大します。

ズーム・インするにしたがってズーム・ウィンドウが徐々に短くなることに注目してください。このズーム・ウィンドウをマウスまたは指で掴んで、時間領域波形に沿って前後にスライドさせると、時間領域波形の様々な部分における高調波への影響を観測できます。その結果、これらのバーストの発生源を推測し、有効な緩和策を適用できるかもしれません。**図 8 と 図 9** は、時間領域波形の異なる部分が高調波成分にどのように影響を与えるかを示すとともに、Spectrum View ウィンドウが更新され、スペクトラム・タイム・ボックスが示すタイミングに相関するスペクトラム成分が表示された様子を示しています。バーストの立上りエッジでは、ハーモニクスが 20dB 増加しています。



図 8. ズーム・ウィンドウが時間領域波形の比較的穏やかな部分に配置されている状態



図 9. スペクトラム・タイムを時間領域のノイズの多いデジタル・バーストに移動したところ、EMI が 20dB 増加したスペクトラム・タイムを使用することで、この EMI パルスがケーブルに結合して放射される可能性を解析できます。

拡張トリガの技法

ハードウェア・トリガによるトラブルシューティング - 当社の 4/5/6 シリーズ MSO には、RF 対時間ハードウェア・トリガ・オプションが用意されており (RFVT オプションで有効化)、トリガ・バッジからアクセスできます (トリガ・オプションを表示するには、RF 対時間トレースをアクティブにする必要があります)。

- 振幅対時間 - RF 振幅対時間プロットを表示します。
- 周波数対時間 - RF 周波数偏差対時間プロットを表示します。
- 位相対時間 - RF 位相対時間プロットを表示します。

これらは、3つ同時にすべて表示することができます。RF 振幅対時間プロットおよび RF 周波数対時間プロットでは、エッジ、パルス幅、タイムアウト・イベントに対してハードウェア・トリガを選択することができます。

例：振幅トリガ

振幅対時間トリガは、周波数成分の振幅を測定し、振幅のエッジ、パルス幅、およびタイムアウト・イベントでトリガできます。これは、上向きのパルスが断続的に検出されているなど、周波数成分が特定の高調波の状態と関連しているときなどに役立ちます。

たとえば、中型 (1cm) の磁界プローブで 35MHz の高調波が観測されたときに、30dB の上向きのパルスが断続的に検出されているとします。こうした断続的な高調波が I/O ケーブルに結合して放射されるだけで、コンプライアンス・テストに不合格になる場合があります。

プローブがチャンネル1に接続されているとします。この特別なトリガ・モードをセットアップするには、チャンネル1バッジをダブルタップし、Spectrum View を選択します。Spectrum View がオンになったことを確認したら、ノーマルとマックス・ホールドをオンにします。RF 対時間波形セクションで振幅をオンにします (図 10)。

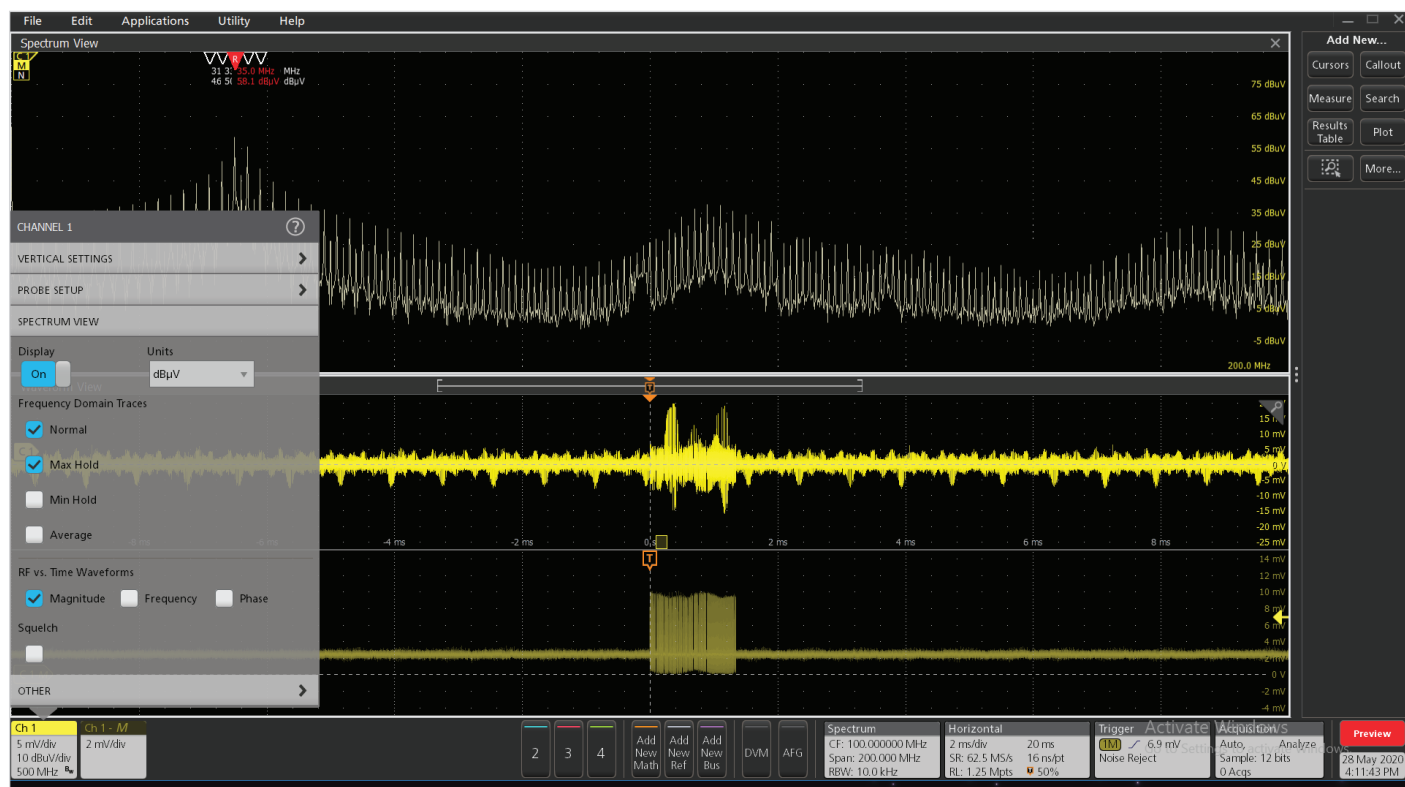


図 10. Spectrum View の基本設定

ここで、右下の Spectrum コントロール・ボックスをダブルタップし、Center Frequency を 100MHz、Span を 200MHz に設定します。垂直軸の単位は "dBuV" に設定しています。0Hz から 200MHz までのスペクトラムを表示します。分解能帯域幅 (RBW) は 10kHz に設定し、それ以外はデフォルト設定のままにします (図 11)。

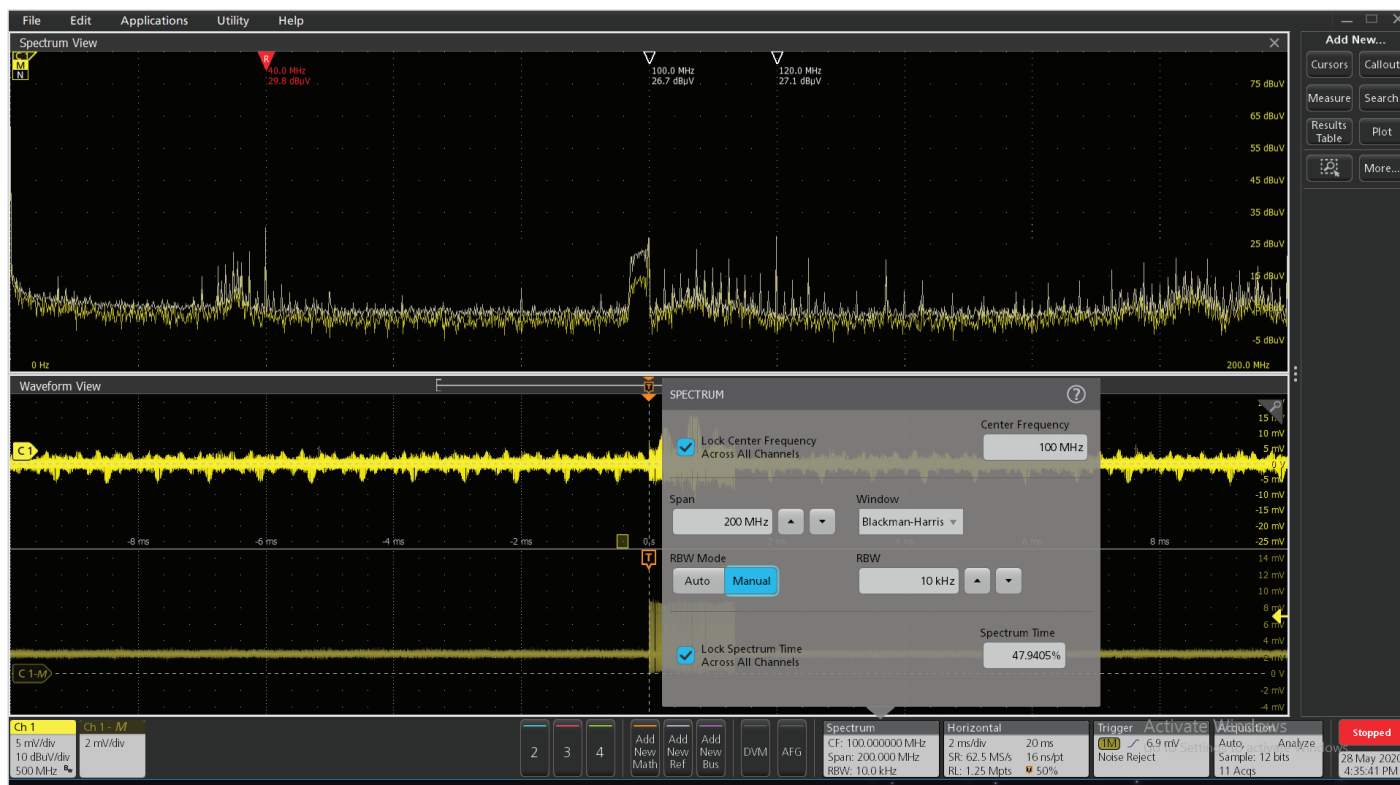


図 11. Spectrum View の詳細設定

最後に、Trigger コントロール (画面右下) をダブルタップして、Trigger Type を Edge (デフォルト)、Source を Channel 1 に設定します。マウス・ポインタを重ねるか、または指でシングルタップすると、"Mag_vs_Time" という選択肢が表示されるので、それを選択します (図 12)。**"Mag_vs_Time"** と Spectrum View がセットアップされていることを確認してください。セットアップされていない場合は、このオプションは表示されません。ここで、必要なトリガ値を入力するか、または **"Channel1-Mag"** プロット上に見える黄色の矢印 (垂直スケール内) を上方向に調整しながら、トリガの基準線がノイズの振幅対時間波形と交差するように、振幅パルス内の適切な位置まで動かします。

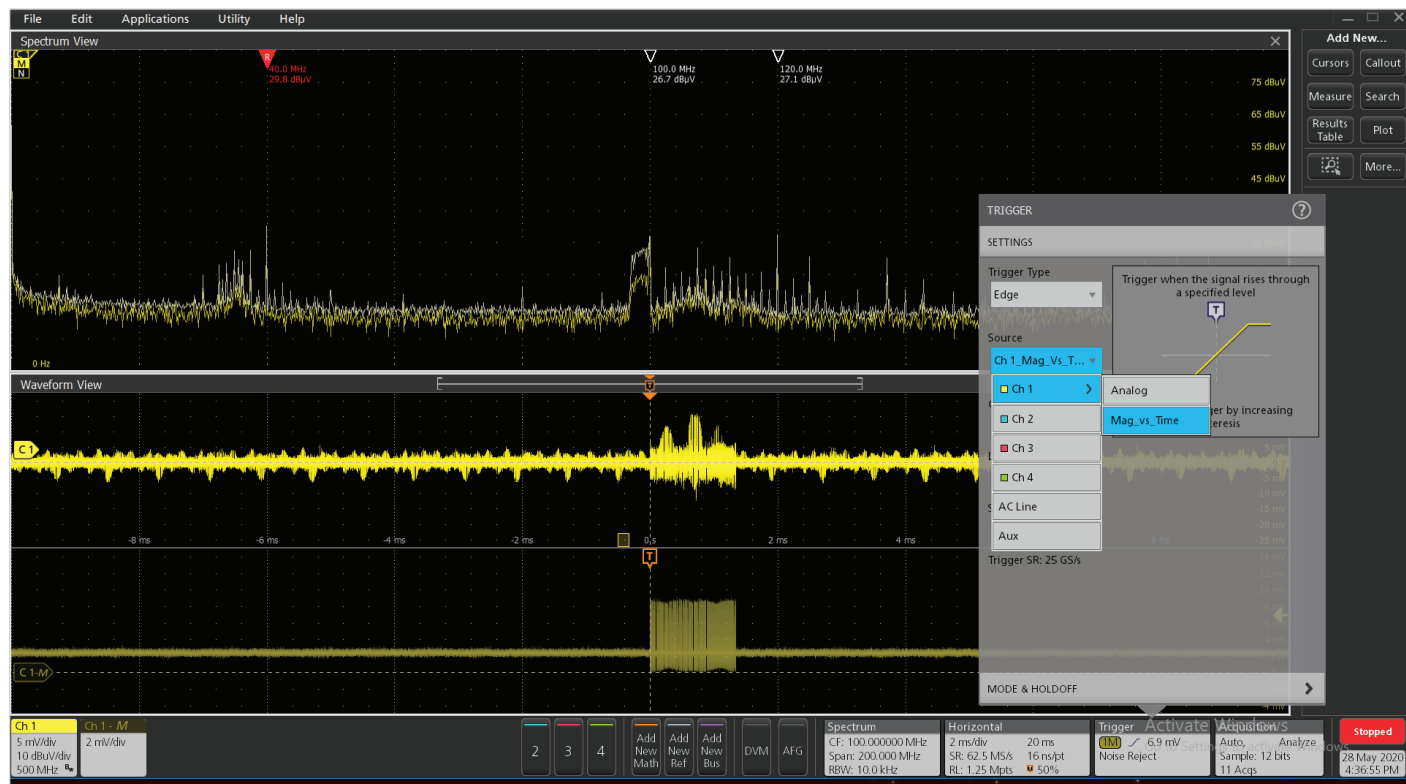


図 12. トリガを振幅対時間に設定

デジタル・パルス列 (バースト) の幅が広い場合は、トリガ・ホールドオフを調整する必要があるかもしれません。トリガ・パネル内で、"Mode and Holdoff" を選択し、Trigger Mode を Normal、Holdoff を Time に設定し、Holdoff Time をトリガしたいバーストの幅よりも大きな値に設定します。ここでは、バースト幅が約 1.3ms でしたので、ホールドオフ時間を 1.5ms に設定することで、パルスが完全に消失した後にトリガが再度かかるようにしています (図 13)。

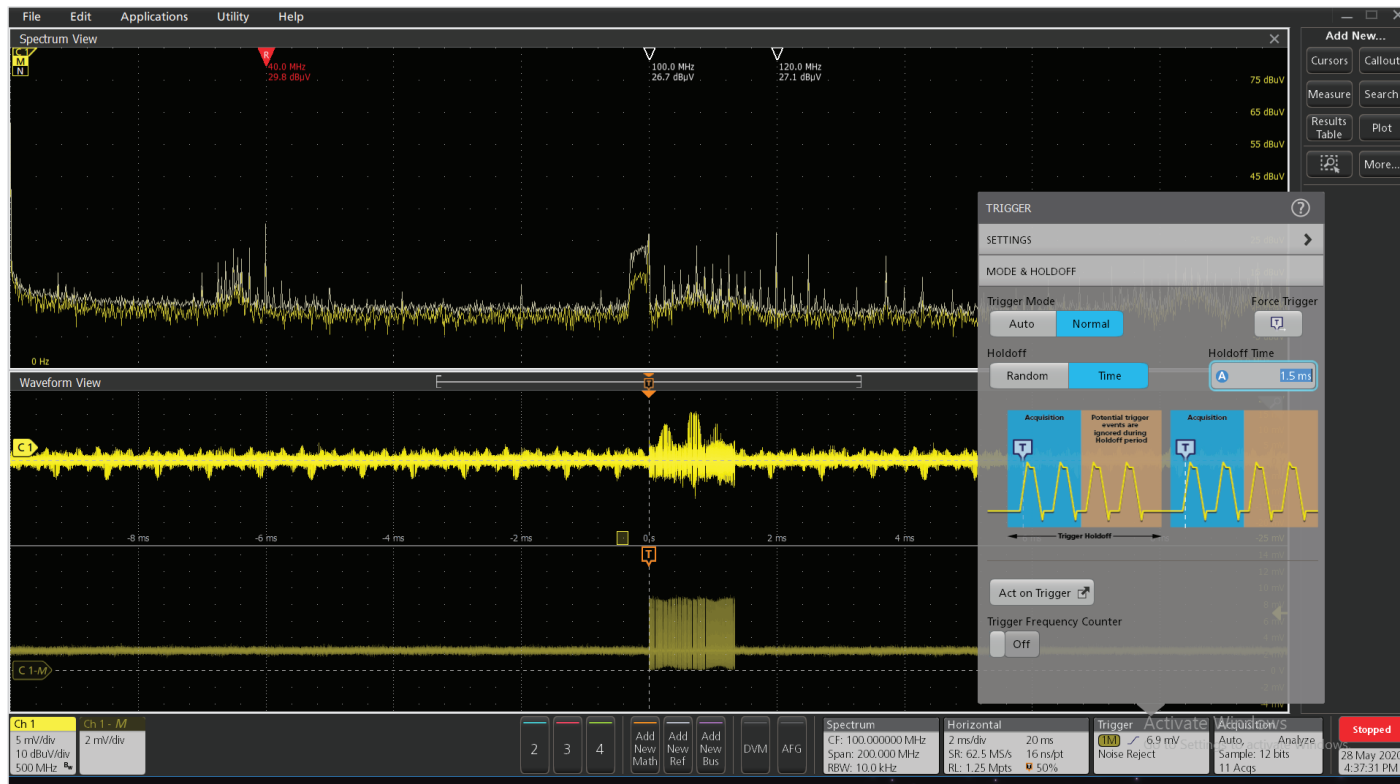


図 13. トリガを安定させるために、必要に応じてホールドオフ時間を設定する

時間領域プロットの横軸に沿った小さな黄色のボックスに注目してください。これはスペクトラム・タイム・ボックスで、その幅は RBW によって異なります。スペクトル・タイム・ボックスを掴んで、時間領域プロットに沿って前後にスライドさせることで、異なる時間におけるスペクトラム表示の変化を観察することができます。

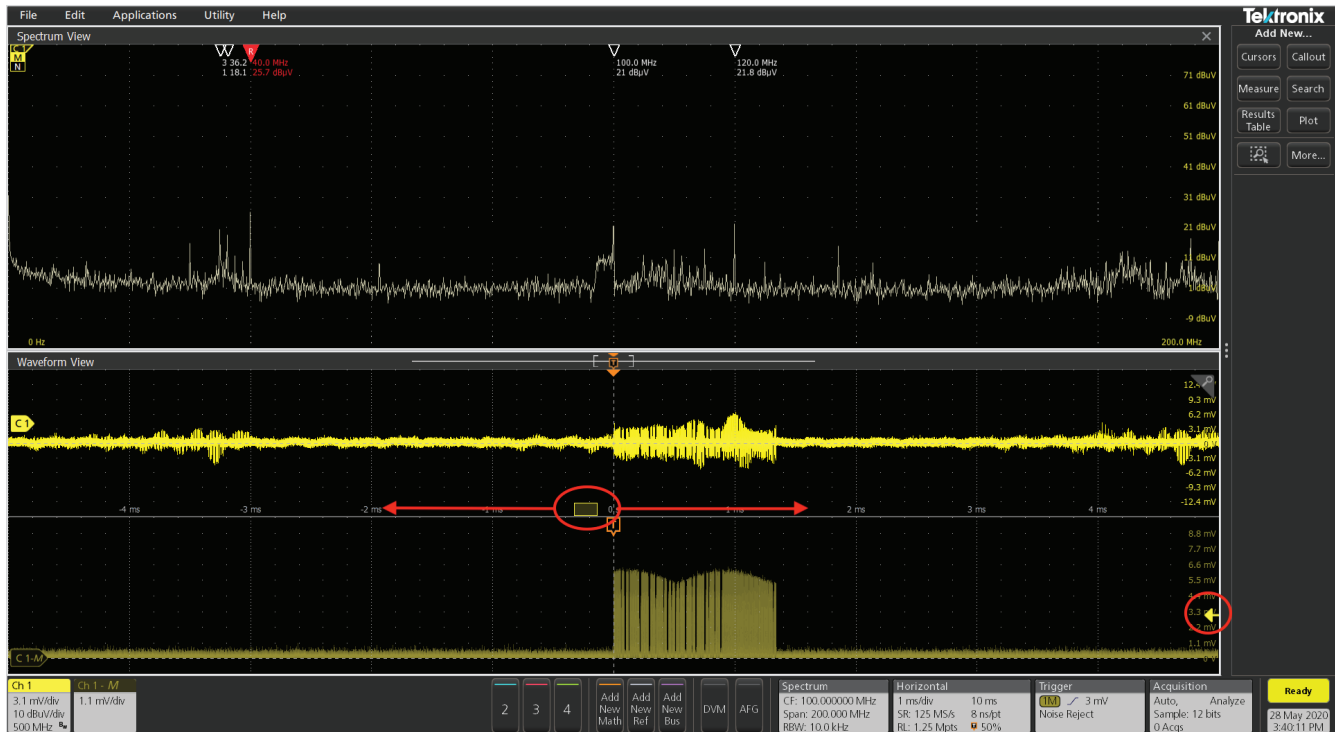


図 14. 振幅トリガ・レベル（赤丸で囲まれた黄色の矢印）を残留ノイズ・フロアよりも上になる位置（振幅パルスの中ほど）に設定する。スペクトラム・タイム・ボックス（赤丸で囲まれた矢印）は、マウスや指で掴んで前後にスライドさせることで、スペクトル表示における影響を観察できる

たとえば、ボックスをバーストの外側にスライドさせると、高調波は最小になり（図 14）、ボックスをバーストの開始地点にスライドさせると、高調波は最大になります（図 15）。RBW の値が大きいほどスペクトル・タイム・ボックスは狭くなり時間分解能を高くできますが、周波数分解能が低くなるため、システムに最適な解析を行うには、試行錯誤が必要になる場合があります。

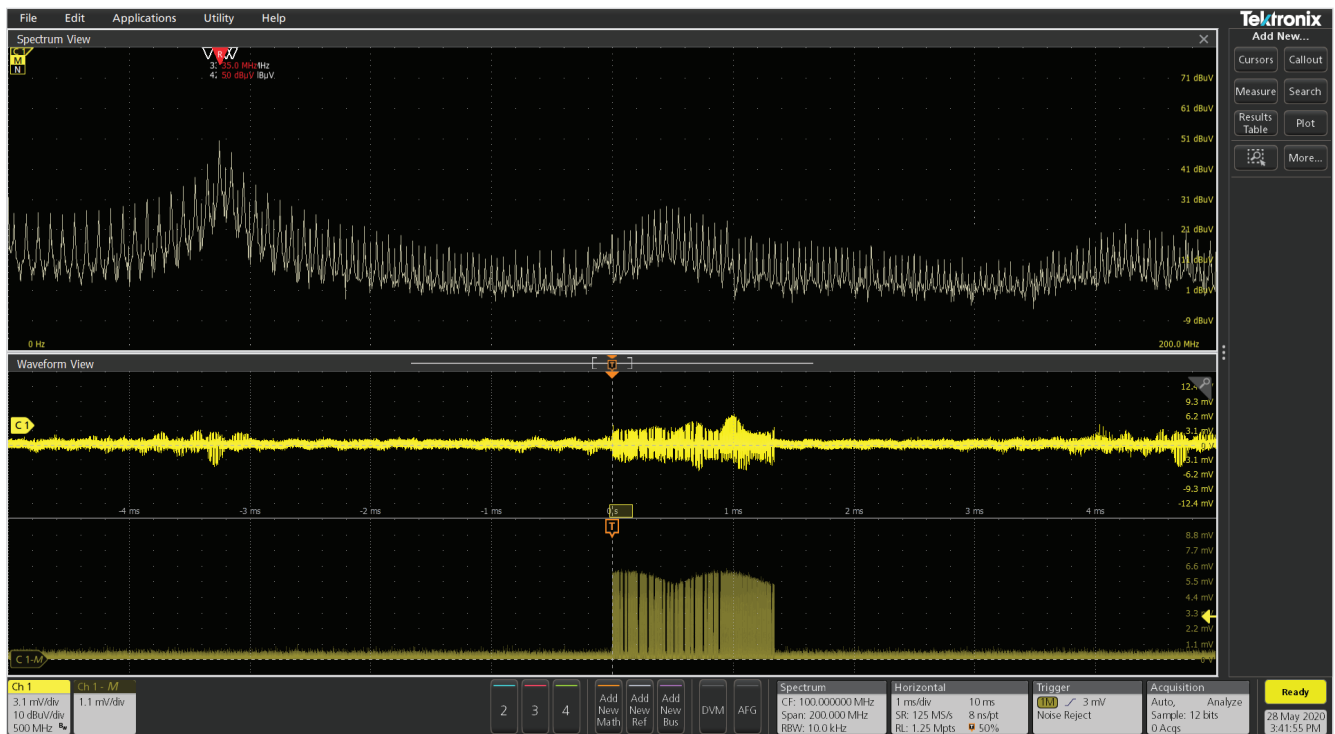


図 15. スペクトラム・タイム・ボックスをバーストの先頭部分にスライドさせると、35MHzの高調波（および関連するスペクトラム）が最大 30dB 増加する

オシロスコープのプロブをチャンネル 2 に接続して、ボードの周りをプロービングすると、チャンネル 1 のバーストと関連のあるデジタル信号が他に存在することがわかり、ケーブルや筐体の継ぎ目に結合したことがこの 35MHz の高調波の問題の原因なのか、さらに結合を減らすためにどのような緩和策が最適であるかを判断することができます。

例：周波数偏差トリガ

周波数偏差対時間トリガは、時間領域プロットの周波数偏差を測定し、偏差 (Hz) でトリガできます。これは、周波数領域が特定の高調波の条件に相関する可能性がある場合に役立ちます。

この例では、終端が悪く、オープン・ループ周波数で発振しているオペアンプから約 155MHz のスプリアス発振が検出されています。その部分に触ると、私の体の静電容量が加わったことで周波数が変化したため、古典的なスプリアス発振であることがわかりました。

チャンネル 1 の中型磁界プローブを使用して、オペアンプの上に置いて、発振の特性を調べてみましょう(図 16)。手順を簡単にするために、まず Default Setup ボタン (前面パネルの右下) を押します。次に Autoset (Default Setup の隣) を押して、クリッピングのない安定した時間領域波形を取得します。チャンネル 1 バッジをダブルタップすると、Spectrum View パネルが表示されます。Display を ON にし、Nomal ボックスと Max Hold ボックスをオンにします。

次に、Spectrum View の設定を開き、Center Frequency を 150MHz、Span を 200MHz に設定し、RBW を 10kHz に設定します。155MHz で発振がはっきりと観測できます (図 17)。

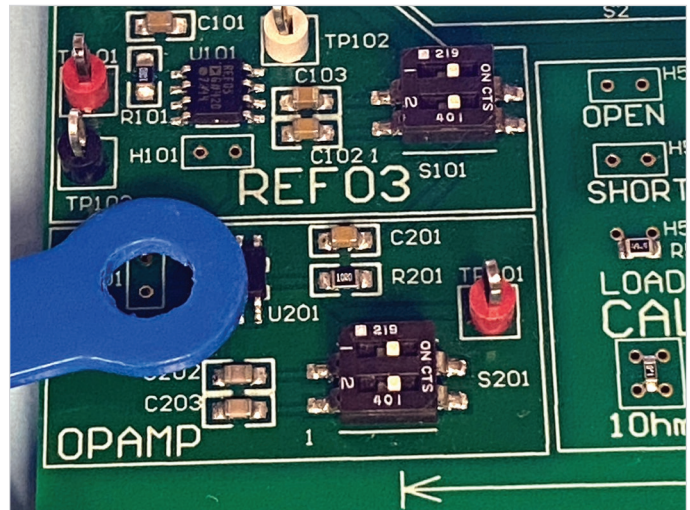


図 16. 中型の磁界プローブをオペアンプ (U201) に緩く結合させることで、スプリアス発振を観測できる

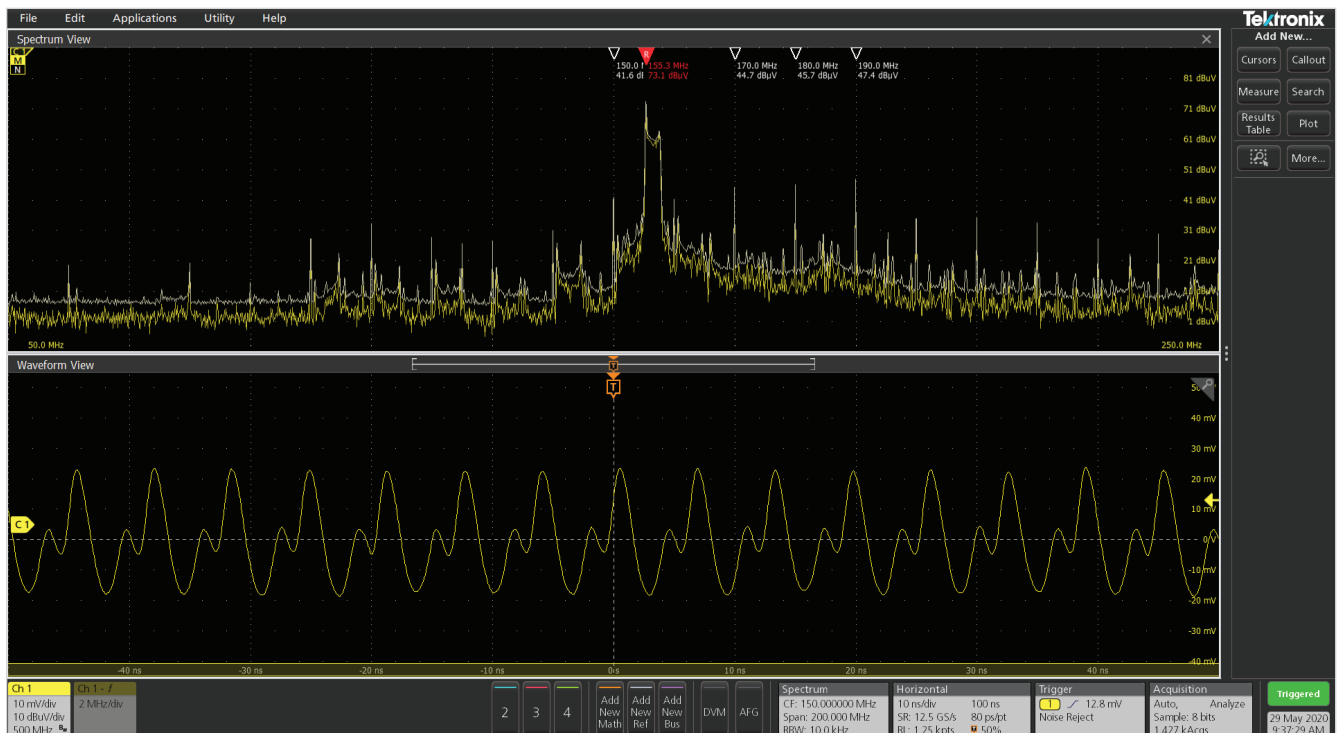


図 17. 表示の中心部にスプリアス発振があることが容易に見て取れる

Spectrum View の設定を開き、Span を 10MHz、RBW を 500Hz にして、スプリアス発振を拡大してみましょう。周波数応答を明確に観測することができます。Spectrum View をドラッグして発振の部分を表示の中心に戻す必要があるかもしれません (図 18)。



図 18. スプリアス発振を拡大して中央に表示。時間領域の波形をトリガしており、周波数の変化に伴って発振部が伸縮しているのがわかる

ここで、Channel 1 >> Spectrum View パネルに戻り、RF 対時間のセクションで Frequency を選択します。波形の垂直軸スケールを調整し、水平軸スケールの時間軸を 40us/div まで遅くして、見やすくする必要があります。これにより、発振の周波数対時間プロット (図 19) が表示されます。

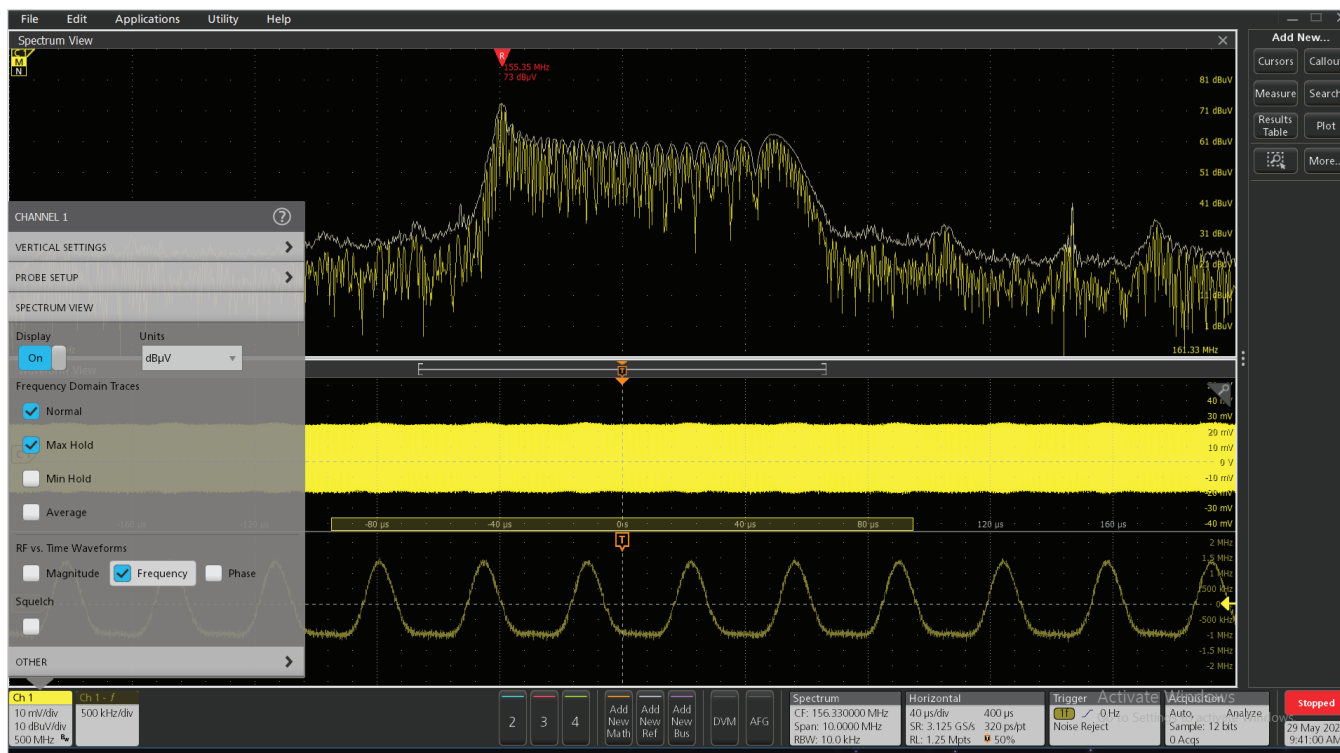


図 19. Spectrum View パネルの RF vs Time セクションで Frequency ボックスを選択します。

Trigger パネルを開き、Channel 1 >> Freq_vs_Time (図 20) を選択するこれにより、画面下の周波数偏差対時間波形をトリガすることができます。トリガ・レベル (黄色の矢印) を調整して、ディスプレイ上の RF 周波数対時間波形を安定させます。Run/Stop ボタン (前面パネル右上) を使用して、アキュイジションを停止することもできます。

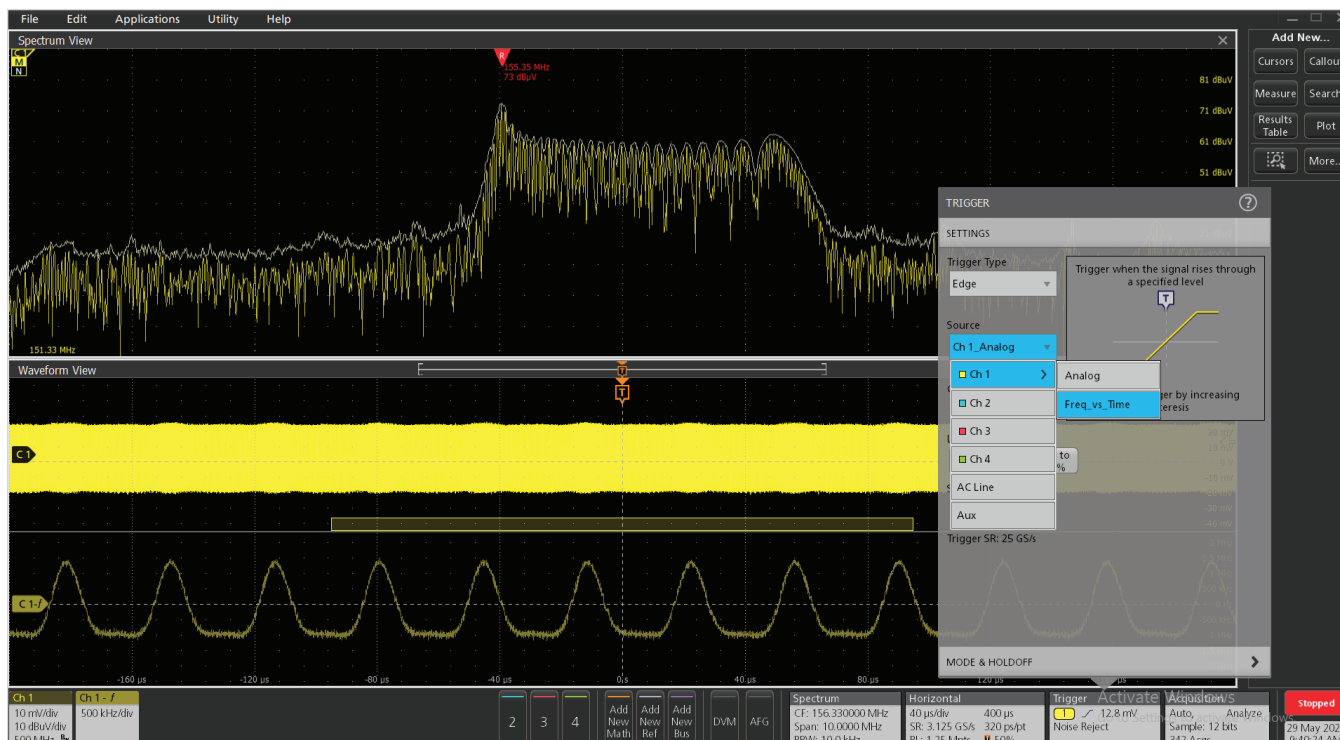


図 20. Trigger パネルを開き、"Freq_vs_Time" トリガを選択する

周波数の低い 155.34MHz でのピークの方が、右側の 157.55MHz でのピークよりも高くなっていることに注意してください (図 21)。画面下側の周波数対時間プロットを調べると、最高周波数偏差が約 1.5MHz、最低周波数偏差は-1MHz となっています。この差は、マーカ ("157.55 - 155.34 = 2.21 MHz") で示されているように、2 つのピーク終了点の周波数の差にはほぼ対応しています。周波数偏差のプロット (赤いボックス) で、+1.5MHz よりも低い方の -1MHz で長く持続していることに注目してください。周波数が低くてもピークが高いのはそのためです。RF 対時間プロットには、標準的な時間/周波数測定をすべて追加できます。測定結果は、画面右側の測定結果バッジに表示されます。



図 21. スプリアス発振の周波数偏差分析では、約 2.2MHz の偏差があり、高い周波数 (157.2MHz) よりも低い周波数 (155.5MHz) の方が、発振が長時間持続していることがわかる

ここでは最終的に、オペアンプに出力容量を加えてオープン・ループ・ゲインを制御することで、スプリアス発振を容易に制御することができました。この例は、周波数によって変化する異常な高調波信号の特性を分析するのに役立つ、周波数偏差対時間トリガの優れた機能を示しています。スペクトラム拡散クロック信号の特性評価を行う際に、この機能が強力な手段となることがわかります。

まとめ

テクトロニクス 4/5/6 シリーズ MSO と、内蔵機能の Spectrum View (マルチドメイン解析/時間対周波数トリガ) を組み合わせることで、捉え難い EMC の問題をよりすばやく容易に解明できます。放射/伝導エミッション対策の EMI トラブルシューティング・テスト・ラボを独自に開発することで、トラブルシューティングのプロセスを社内で行えるようになり、時間とコストを節約できます。時間貸しのテスト・ラボ内でトラブルシューティングを実施するよりも効率的で経済的です。

EMC 技術者や製品設計者に必要なのは、技術の進歩に合わせて、これまでの解析/テスト・ツールをアップグレードすることです。そうすることで、最新技術を十分に活用しながら、想定外の異常なエミッションに対してもより正確に測定し、的確な判断が下せまします。4/5/6 シリーズ MSO をはじめとするオシロスコープは、時間相関をとりながら観測できるハードウェア (振幅または周波数) トリガを備えているため、EMI のデバッグやトラブルシューティングにきわめて有用です。モバイル機器の小型化が進み、ワイヤレスやその他の高度なデジタル・モードを搭載した製品が増えるにつれ、今後高度なスペクトラム解析が特に重要になるはずで

参考文献

André and Wyatt, EMI Troubleshooting Cookbook for Product Designers, SciTech, 2014.

Ott, Electromagnetic Compatibility Engineering, Wiley, 2009

テクトロニクス 4 シリーズ MSO オシロスコープ、<https://jp.tek.com/oscilloscope/4-series-mso-mixed-signal-oscilloscope>

テクトロニクス 5 シリーズ MSO オシロスコープ、<https://jp.tek.com/oscilloscope/5-series-mso-mixed-signal-oscilloscope>

テクトロニクス 6 シリーズ MSO オシロスコープ、<https://jp.tek.com/oscilloscope/6-series-mso-mixed-signal-oscilloscope>

テクトロニクス EMI ホーム・ページ、<https://jp.tek.com/application/electromagnetic-interference-emi-and-electromagnetic-compatibility-emc>

2017 EMI Pre-Compliance Test Guide (Interference Technology)、<http://learn.interferencetechnology.com/2017-emc-pre-compliance-test-guide/>

米国の携帯電話の周波数 (Wikipedia)、https://en.wikipedia.org/wiki/Cellular_frequencies_in_the_US

新世代オシロスコープによる EMI トラブルシューティング、テクトロニクス、<https://jp.tek.com/document/application-note/emi-troubleshooting-with-the-latest-generation-oscilloscopes>

EMI Pre-Compliance Testing and Troubleshooting with Tektronix EMCVu (Tektronix EMCVu による EMI プリコンプライアンス・テストとトラブルシューティング)、テクトロニクス、<https://jp.tek.com/document/application-note/emi-pre-compliance-testing-and-troubleshooting-tektronix-emcvu>

連絡先情報：

イタリア 00800 2255 4835
インド 000 800 650 1835
インドネシア 007 803 601 5249
オーストラリア 1 800 709 465
オーストリア* 00800 2255 4835
オランダ* 00800 2255 4835
カナダ 1 800 833 9200
シンガポール 800 6011 473
スイス* 00800 2255 4835
スウェーデン* 00800 2255 4835
スペイン* 00800 2255 4835
タイ 1 800 011 931
デンマーク +45 80 88 1401
ドイツ* 00800 2255 4835
ニュージーランド 0800 800 238
ノルウェー 800 16098
バルカン半島諸国、イスラエル、南アフリカ、および他の ISE 諸国 +41 52 675 3777
フィリピン 1 800 1601 0077
フィンランド +41 52 675 3777
フランス* 00800 2255 4835
ブラジル +55 (11) 3759 7627
ベトナム 12060128
ベルギー* 00800 2255 4835
ポーランド +41 52 675 3777
ポルトガル 80 08 12370
マレーシア 1 800 22 55835
メキシコ、中南米およびカリブ海域 52 (55) 56 04 50 90
ルクセンブルグ +41 52 675 3777
ロシアおよび CIS 諸国 +7 (495) 6647564
英国／アイルランド* 00800 2255 4835
韓国 +82 2 565 1455
香港 400 820 5835
台湾 886 (2) 2656 6688
中央ヨーロッパおよびギリシ +41 52 675 3777
中華人民共和国 400 820 5835
中東、アジア、および北アフリカ +41 52 675 3777
中東欧諸国／バルト諸国 +41 52 675 3777
南アフリカ +41 52 675 3777
日本 81 (3) 6714 3086
米国 1 800 833 9200
* 欧州のフリーダイヤル番号つながらない場合は次の
番号におかけください：+41 52 675 3777

Rev. 02.2018

その他のリソースについては当社 Web サイト (jp.tek.com) を参照してください。

