

R&S®RTO および R&S®RTE

オシロスコープによる EMI デバッグ

アプリケーションノート

製品：

| R&S®RTO

| R&S®RTE

このアプリケーションノートでは、R&S®RTO および R&S®RTE を使用して、EMI 問題を解析する方法を簡単に説明いたします。この議論は、不要な RF エミッションを引き起こす可能性のある基本的なメカニズムをカバーするところから始まり、ついで、EMI 問題の解析方法を説明しています。最後に、解析プロセスを説明するために、実際の例を提示します。

コンテンツ

1	はじめに	4
2	放射エミッションの基本原理	5
2.1	干渉源	5
2.1.1	差動モード RF エミッション	6
2.1.2	コモンモード RF エミッション	7
2.1.3	伝導性エミッション	10
2.1.4	干渉源としての、信号の完全性の問題	11
2.2	結合メカニズム	12
2.3	放出素子（アンテナ）	12
3	EMI デバッグに使用する計測方法	14
3.1	はじめに - ニアフィールドおよび遠方界	14
3.2	RFI 電流および電圧計測	15
3.2.1	接続されたライン上の RFI 電流と、放出された遠方界のコンポーネントの関係 15	
3.2.2	RFI 電流計測の利用方法.....	15
3.2.3	電力線の RFI 電圧の計測.....	16
3.2.4	RFI 電流を計測するための電流プローブ	17
3.3	ニアフィールドプローブを使用した EMI 問題の解析	18
3.3.1	電気および磁気ニアフィールドプローブ	18
3.3.2	ニアフィールドプローブのアプリケーション	20
3.3.3	R&S®HZ-15 ニアフィールドプローブセット	22
4	R&S®RTO デジタルオシロスコープによる、EMI デバッグの実践的 側面	23
4.1	開発ラボにおける、EMI デバッグの基本手順	23
4.2	R&S®RTO を使用した EMI デバッグ	25
4.2.1	オシロスコープの基本設定	25
4.2.2	EMI デバッグのための、特別な R&S®RTO 機能.....	25
4.2.3	R&S®RTO による EMI デバッグのヒント	30
4.3	実例 - IP 電話での EMI デバッグ	31
4.3.1	遠方界解析の結果.....	32

4.3.2	接続された線上の RFI 電流計測.....	33
4.3.3	ニアフィールド解析	37
4.3.4	EMI デバッグの結果	44
5	サマリー	45
6	参考文献	46
7	オーダー情報	47

1 はじめに

すべての電気および電子装置はデバイス、ある程度の不要な電磁場を放出しており、不要な妨害電圧および電流を、それらの接続ラインを通じて伝送しています。他の機器の作動および電波受信に影響を及ぼすこのような電磁干渉を防止するために、法令ではすべての経済地域において、エミッションについての法定限度が規定されています。

EMC 適合性試験は、必要な限度の遵守について検証するために使用されています。非遵守の場合には、通常、時間のかかるデバッグが必要になります。開発中における EMI 問題の迅速な解析の開始は、期限までに製品を市場に投入するのに必要な、重要な成功要因です。

Rohde & Schwarz の R&S®RTO および R&S®RTE デジタルオシロスコープの強力な FFT 機能により、開発者自身の職場において、EMI 問題を解析することができます。1 mV/div の感度、最大 4 GHz の帯域幅および非常に低い入力ノイズにより、これらのオシロスコープは、このアプリケーションにおける非常に便利なツールとなります。開発者は、ニアフィールドプローブのみならず、電流プローブも使用して、不要な放射エミッションおよび妨害電流の特定および解析をすることができ、そして、それらを低減させる効率的なソリューションを開発することができます。

このアプリケーションノートでは、デジタルオシロスコープおよびニアフィールドプローブを併用して、ハードウェア開発者が EMI 問題を解析するための、簡単なガイドラインを説明いたします。実際の解析プロセスは、R&S®RTO を使用した実際の例に基づいて実証しています。

2 放射エミッションの基本原則

基本的な規則として、以下の条件が満たされている場合にのみ、放射エミッションが発生する場合があります：

- a) RF エミッションに関連する周波数レンジにおいて、十分に高い妨害レベルを生成する干渉源が存在している（例、高速スイッチングエッジ）
- b) 生成された妨害信号を、干渉源から発散素子に伝達する結合メカニズムがある
- c) 源によって生成されたエネルギーを、遠方界に放射することができるいくつかの発散素子がある（例、接続されたケーブル、筐体内のスロットまたはアンテナとして機能するプリント回路基板）

以下のセクションにおいて、これら 3 つの要素すべてについて考察します。

2.1 干渉源

最新のデジタル回路は、デジタル情報を送信するために、急峻なライズタイムおよびフォールタイムを持つ、高周波数の方形波信号を使用しています。一般的に、異なるコンポーネント間では、シングルエンド（非対称）信号伝送（例、パラレルアドレスまたはデータバス）が使用されていますが、非常に速いクロック速度（例、差動クロック線）の場合には、差動（対称）伝送も使用されています。このようなデバイスは、放射され得る高周波スペクトラムを有する電磁エネルギーを生成します。使用されるテクノロジーによって、回路コンポーネントは低い電源電圧を持っているため、外部からシステムに影響を与える電磁妨害に対しても同時に敏感です（例、電源ネットワークを介して）。

険しいエッジを有する、スイッチング作動に依存するスイッチモード電圧コンバータなどの回路の一部は、多数の高周波高調波を伴う干渉源としても機能することができます。

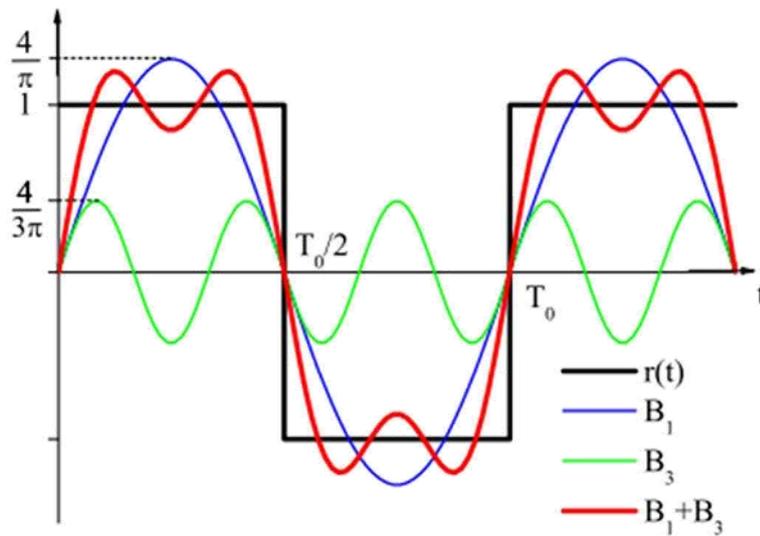


図 2-1：奇数高調波の方形波信号。

高調波の振幅は、周波数によって減少しますが（方形波信号の場合では 20 dB/decade、有限のライズタイム信号の場合では、特定のカットオフ周波数を超える 40 dB/decade）、高調波は、不要な放射エミッションにおいて重要な役割を果たしています。高い周波数においては、電子システムで使用される導体構造が、妨害信号の波長のオーダーに達するので、妨害信号はより効率的に放射されます（セクション 2.1.2 を参照してください）。このため、スイッチモード電源を使用する場合は、一般的に、まずは高い高調波を遠方界の妨害スペクトラムと見なします。

シールドされていないシステムの場合、遠方界への干渉の実際の放出は、例えば、プリント回路基板上のトラックまたはコンポーネントを介して直接に発生します。シールドされたシステムの場合、シールドされた筐体の開口部または接続されたケーブルに結合された RFI 電流に起因して、不要な RF エミッションが発生する場合があります。

2.1.1 差動モード RF エミッション

プリント回路基板からの差動モード RF エミッションは、フォワードコンダクタおよびリターンコンダクタが、一緒に経路指定されていない信号パスを通る電流 (I_{DM}) の流れによって発生し、それによってコンダクタループが形成されます。この場合、干渉源は、回路の主要な機能の結果、すなわち、回路の 2 つのコンポーネント間でデータを転送している結果であります。EMI 問題は、不適切なトラックの配置によって引き起こされます。コンダクタループから得られる磁界は、電流 I_{DM} 、ループの面積および RFI 電流の周波数の 2 乗に比例します。

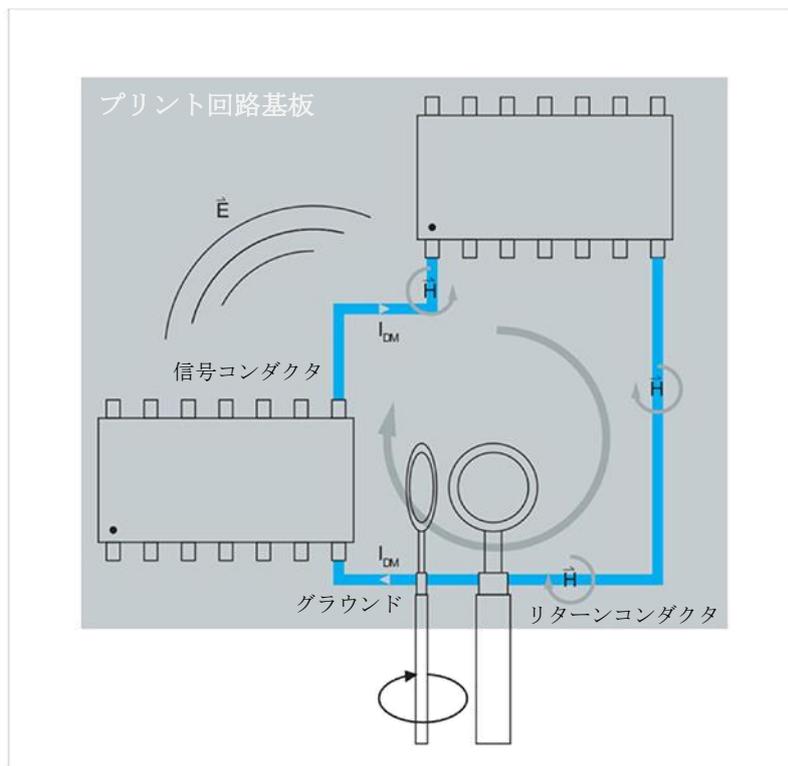


図 2-2 : プリント基板からの差動モードの RF エミッションおよびこのようなエミッションを計測するためのループニアフィールドプローブの位置決め。

ニアフィールド試験装置を使用して、差動モード RF エミッションソースを検出することができます。ここでは、適切な指向性を持つループアンテナを使用し、RF エミッションの最大値を見つけるため、計測中にループアンテナを回転させなければなりません。放射パターンがそのような計測によって影響される場合があるため、干渉を除去するための是正措置を取った後の比較計測において、これは特に重要です。さらに、磁気ニアフィールドは、距離とともに急激に低下します。このため、正確に同じ場所に計測値を記録することが重要となります。

差動モードの RF エミッションを低減することができるステップには、ループ領域の縮小（すなわち、フォワードコンダクタおよびリターンコンダクタのより近い経路指定）、ならびに、回路の作動に影響を与えることなく可能である場合には、コンダクター内の電流の低減が含まれます。他の選択肢としては、例えば、送信されたデータ信号のライズタイム/フォールタイムを短縮するまたはフィルタリングを用いて、より高い周波数の信号コンポーネントを除去して、妨害スペクトルを制限するという事もできます。

2.1.2 コモンモード RF エミッション

コモンモード RF エミッションは、望ましくない寄生効果、例、電流リターンパスのインダクタンスまたは信号伝送中の非対称性のために発生します。この問題は、グラウンドプレーンのスロットまたは他の不連続部が、信号線に送信信号のリターン電流が近づくのを防止する場合において、多層プリント回路基板で非常に一般的です。これは、リターン信号のパスに望ましくないインダクタンスをもたらし、その結果、グラウンドプレーン内の異なる点間において、望ましくない電圧差を発生させます。このタイプのプリント回路基板にケーブルを接続すると、これはアンテナのように機能し、コモンモード電流 I_{CM} を流すことができるようになります。RF エミッションに関連する周波数レンジにおいては、信号および電源ラインは、非常に効率的なアンテナとして機能することができます。ここでは、 $\lambda/10$ を超えない線の長さは重要ではありませんが、より長い線（例、 $\lambda/6$ ）は、RF エミッションの潜在的なソースとして扱われなければならないという経験則があります。

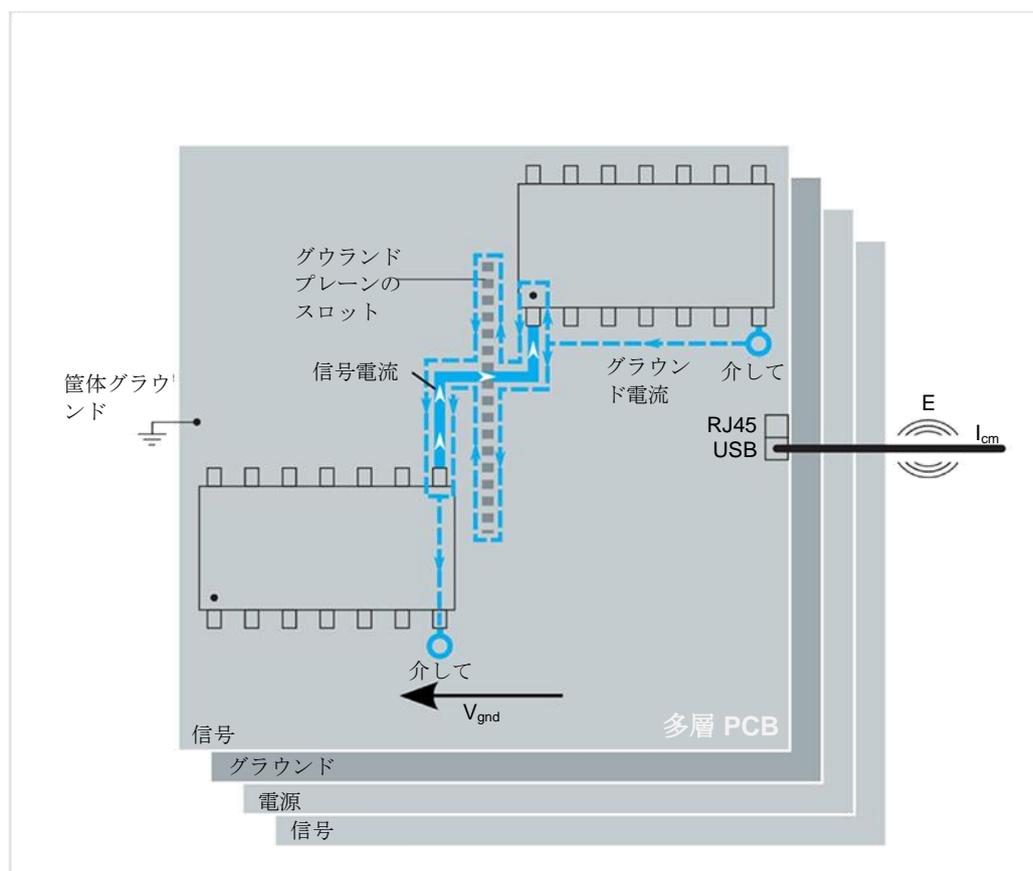


図 2-3 : プリント基板からのコモンモード RF エミッション。ソースはグラウンドプレーンのスロットであり、リターンコンダクタに寄生インダクタンスを生じさせます。このため、グラウンドプレーンの異なる点間において、電圧降下が発生します。

グラウンドプレーン上における電圧降下の大きさおよび接続ラインに結合されるコモンモード電流の大きさは、寄生インダクタンスおよび信号のスロープの傾斜によって決定されます。よって、ライズタイムおよびフォールタイムを制限し（すなわち、周波数スペクトラム）、グラウンドプレーンにおけるインピーダンスを低減することで、コモンモード RF エミッションは低減させることができます。一般的には、機能の損失を招くことなく、高速デジタル信号のスロープの傾斜を十分に低減することはできないため、リターン電流（可能な限りインダクタンスが小さいパス）の処理は、設計プロセスにおける重要な要素となります。

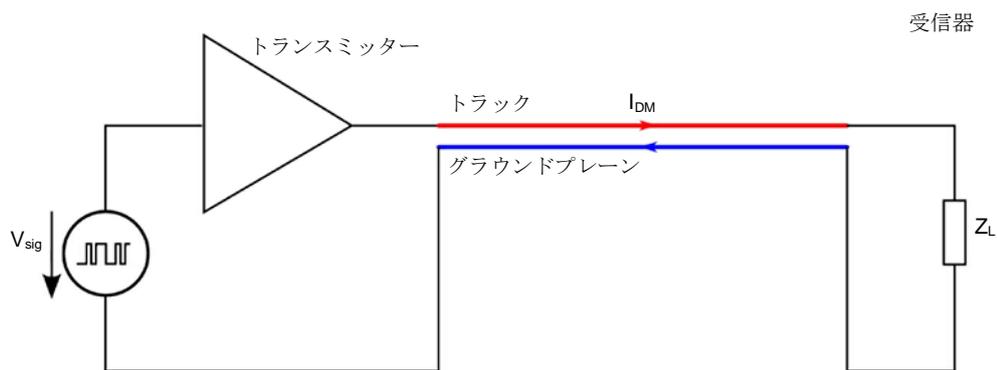


図 2-4：理想的な差動モード伝送：フォワードコンダクタおよびリターンコンダクタは、互いに近接して配置され、生成された磁界は、遠方界においてほぼ完全に相殺されます。

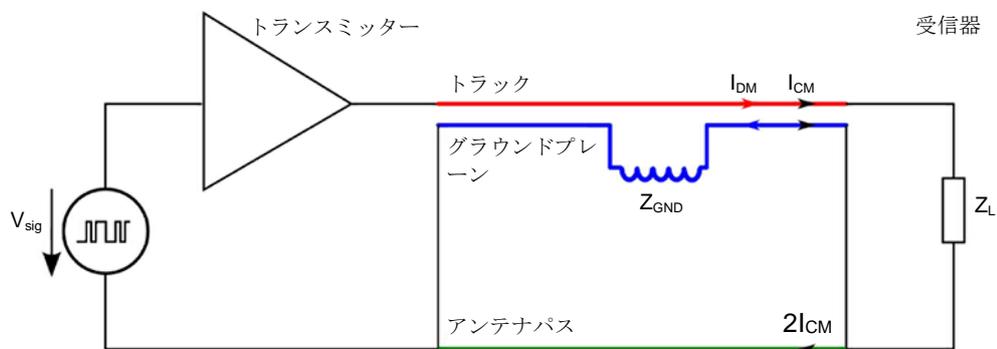


図 2-5：グラウンドプレーンにおける、望ましくない寄生インダクタンスによる、アンテナパスを介した共通モードリターン電流の形成。ここでの「アンテナパス」とは、一般的には、アンテナとして機能する外部線のことです、例、電源ケーブル。

実際には、共通モード RF エミッションは、差動モード信号送信のために発生することもあります。差動モード伝送パスの寄生終端インピーダンスが、実質的に異なる場合、希望の差動モード電流 I_{DM} に加えて、共通モード電流 I_{CM} もまた、トランスミッターモジュールおよび受信器モジュールを接続するグラウンドプレーンを介して流れます。この不要なグラウンド電流 I_{CM} は、ボードに接続されているラインに結合され、遠方界においてエミッションを発生させることもできます。

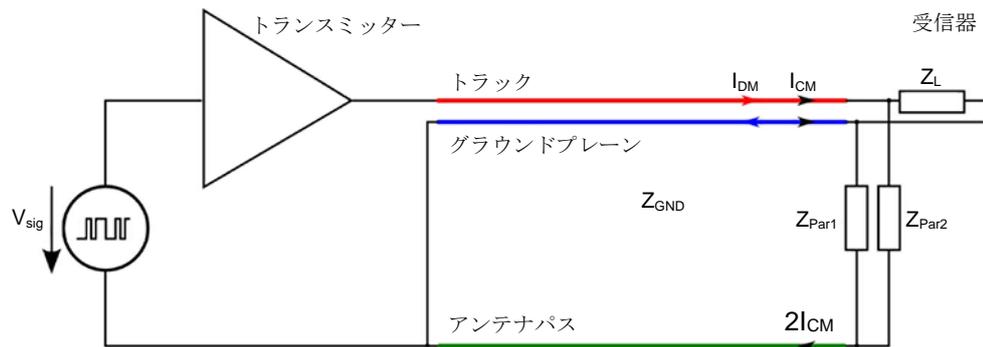


図 2-6：不要なコモンモード電流 I_{CM} を引き起こす、差動モード信号ラインの不均衡（寄生）終端インピーダンス。グラウンドプレーンに接続された線は、コモンモード電流 I_{CM} の一部を運ぶことができる場合、アンテナとして機能することができます。

実際には、コモンモード電流は、望ましくない RF エミッションの主な原因の 1 つです。ニアフィールド試験装置を使用して、差動モード RF エミッションソースを検出することができます。コモンモード電流（または その結果のフィールド）を検出できる磁気ニアフィールドプローブは、この作業に適しています。個々のトラックの電流を決定するための R&S® HZ-15 ニアフィールドプローブセット（セクション 3.3.3 を参照してください）に含まれている、RS-H 2.5-2 などのコンパクトなニアフィールドプローブを使用することにより、変換係数を使用して、実際のコモンモード RFI 電流を計算することができます。もちろん、ニアフィールド計測は、接続されたラインに沿ったコモンモード電流の計測値によって、補われなければなりません。

コモンモード RF エミッションを削減するための、一般的な手順：

- 1 レイアウトを最適化したり、グラウンドプレーンのインピーダンスを下げたりまたはコンポーネントを再配置したりすることにより、RFI の電流 I_{CM} を低減します
- 1 フィルタリングまたはデジタル信号のライズタイム/フォールタイムを短縮することにより、高周波信号コンポーネントを低減します
- 1 シールドする（ライン、筐体など）
- 1 不要なオーバーシュート（リングング）を低減させるために、信号の完全性を最適化します、セクション 2.1.4 も参照してください。

2.1.3 伝導性エミッション

デバイスに接続されたラインは、多くの場合、RF エミッションの主要なソースとなります。30 MHz から 1 GHz の周波数レンジの電磁波は、10m から 30cm の波長を有しています。したがって、ケーブルは、遠方界計測のために必要な標準試験セットアップにおいて、その長さがこれらの波長の範囲内にあるため、RFI 電流を効率的に放射することができます（セクション 2.1.2 を参照してください）。

コモンモード電流の放射は、特に効率的です。差動モード電流によってケーブルに沿って発生するフィールドは、部分的に相殺されますが、これは、コモンモード電流の場合にはありません。放射されたフィールドの強度は、コモンモード電流と直接に比例します。

ニアフィールド計測を使用して、干渉源を検出することができます。DUT に接続されたライン上の RFI 電流を計測することにより、接続されたラインが遠方界において、RF エミッションを引き起こしているかどうかを確認することができます。

RF 電流プローブは、コモンモード電流を計測するために使用されており、異なるバージョンもご用意しております（異なるケーブル直径および周波数レンジ用）。これらの計測中に、RFI 電流が、ライン上の位置の関数として変化することを考慮しなければなりません。

2.1.4 干渉源としての、信号の完全性の問題

高いスロープ傾斜を持つ信号を送信する場合、伝播速度、すなわち、信号がトランスミッターから受信機へ移動するのに必要な時間を無視することは、もはや妥当ではありません。伝送パス上における、インピーダンスのミスマッチは反射を引き起こし、信号波面の一部がソースに戻り、元の信号に重畳されます。

デジタル信号が送信されると、その影響はリングングアーチファクトを引き起こし、そうして放出される妨害信号の形成につながります。EMC コンプライアンスを達成するための必須の前提条件として、適切な信号の完全性を保証するために、伝送パスに沿ったすべてのコンポーネント（例、トランスミッター、トラック、ケーブル、コネクタ、受信器）は、関連する特性インピーダンスと一致させる必要があります。

もしも信号の完全性が不十分な場合、信号を計測することにより、問題を解析することができます。例、トランスミッターの出力または受信器の入力において、FFT を用いて周波数領域に変換した後、対応する放射源を決定するために、干渉源のスペクトラムを、遠方計測の結果と比較することができます。

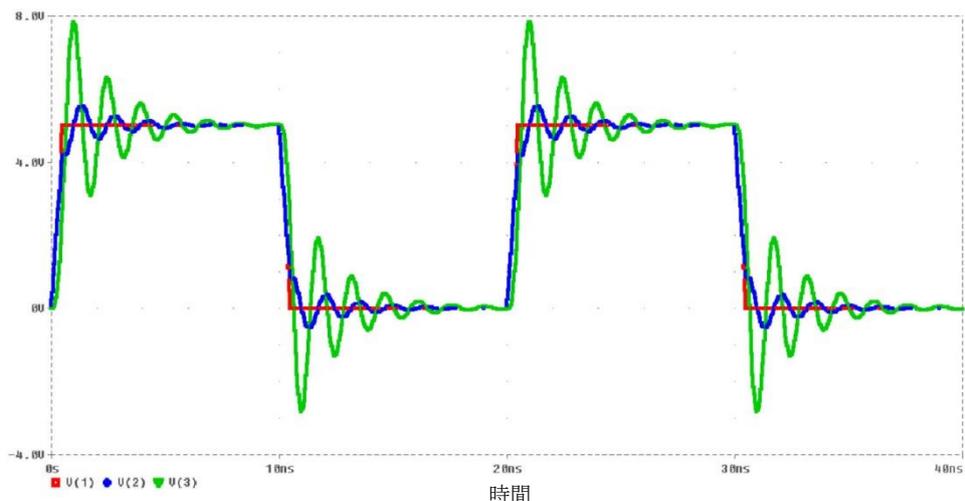


図 2-7：リングングの PSpice シミュレーション：100Ω の終端されていないラインを介しての、ライズタイム/フォールタイムが 0.5 ns、パルス幅が 20 ns のクロック信号の伝送。線上における伝播時間：0.1ns；トランスミッターのソースインピーダンス：10 Ω。(赤) 伝送されたクロック信号；(青) トランスミッター出力における信号；(緑) 受信器における信号

2.2 結合メカニズム

プリント回路基板上において生成される、放出されるべき干渉のため、RFI 電力は、ソースから放出素子に伝送されなければなりません。これは「結合パス」として知られており、透過型は「結合メカニズム」と呼ばれています。

基本的に、以下の結合パスを区別します：

- 1 ソースからの直接の RF エミッション、例、トラックまたは個別のコンポーネントから
- 2 接続された電源、データまたは信号線を介する RF エミッション
- 3 接続された電源、データまたは信号線を介する導電性エミッション

潜在的な結合メカニズムは、以下のとおりです：

- 1 コモンインピーダンスによる結合

この場合、干渉源 および放出素子とは、共通のインピーダンスを介して接続されています。

この状況は、通常、干渉源および放出素子との間の電子システムにおいて、直接接続が存在するために頻繁に発生します（例、影響を受けるデジタル回路のコモングラウンド（干渉源）および接続された信号ケーブルのケーブルスクリーンまたはグラウンドコンダクタ（アンテナ））。

- 2 フィールドによる結合

a 電界

この場合、干渉源によって放出される、電気ニアフィールドが生成されます。このフィールドは、隣接する回路または放出素子（例、ヒートシンク）に結合され、遠方界において放射または伝導方式によって放射されます。干渉源およびシンクとの間の寄生結合キャパシタンスは、周波数の関数としてエネルギー伝送に影響を与えます。

b 磁界

この場合、電気回路は、隣接するコンダクタループまたは磁氣的に敏感なコンポーネントに結合する磁気ニアフィールドを発生させます。結果として生じるエネルギー伝送は、回路および干渉源における電流との間の結合係数によって決定されます。

c 電磁界

この場合、干渉源およびシンクは遠く離れており、すなわち、少なくとも1つの λ またはその倍数となっています。電界および磁界の両方が生成されます。ソースは、遠方界に直接に干渉を放出します。

2.3 放出素子（アンテナ）

EMI 用途に関連する放出素子は、基本的には意図しないアンテナであります。

そのようなアンテナの効率（放射抵抗、アンテナ係数）は、アンテナのジオメトリに依存しています。主な要因は、干渉の波長に対するアンテナの長さであります。

干渉波長のわずかな長さを有するアンテナ、例、 $\lambda/6$ は、効率的な放射器とすることができます。ここでの経験則は、長さが $\lambda/10$ 未満のアンテナは、重要ではないということです。

電子機器における、意図しないアンテナの主な種類は、以下のとおりです：

- ┆ 接続されたライン（電源、データ/信号/コントロールライン）
- ┆ プリント回路基板のトラックおよびプレーン
- ┆ システムコンポーネント間の内部ケーブル
- ┆ コンポーネントおよびヒートシンク
- ┆ 筐体のスロットおよび開口部

3 EMI デバッグに使用する計測方法

3.1 はじめに - ニアフィールドおよび遠方界

EMC コンプライアンス試験においては、実際には、遠方界への DUT のエミッションのみを気にしています。電界および磁界のコンポーネントが同相であり、伝播方向に垂直に向けられており、かつ、平面波面が形成されている場合には、「遠方界」という用語を使用します。電磁波は、アンテナから分離しており、媒体の伝播条件に依存しています（ソースの特性とは対照的に）。波長に関して小さい放射器の場合、遠方界は約 $\lambda/2\pi$ の距離で始まり、波長に関して大きいアンテナの場合には、遠方界は $2 \cdot D^2/\lambda$ まで始まりません。ここの D は、アンテナ構造の直径になります。

法令遵守試験において必要とされる遠方界計測は、専用の EMC 試験ラボ（試験チャンバまたは地域の試験場）でのみ可能であり、費用および時間がかかる傾向があります。EMC のコンプライアンスに問題が発生した場合、費用および時間の制限は、一般的に、改善について開発および解析するために、何回も試験ラボへ訪問できなくなってしまう可能性があります。しかしながら、EMI 問題を解析するために使用することができる、他の計測方法が存在しています。開発ラボにおけるアプリケーションでは、ニアフィールドおよび RFI 電流計測が、魅力的な代替となります。

ニアフィールドには、距離とともに $1/r^2$ または $1/r^3$ の因子によって降下する、電界および磁界のコンポーネントが含まれています。EMC コンプライアンス試験においては、遠方界のみが関連しています；ソースからの距離が増加するにつれて、 $1/r$ に比例して降下します。ニアフィールドにおいては、電界および磁界のコンポーネントは、まだ自由空間の特性波インピーダンス (377Ω) に結びついてはいません。ウェーブは、まだトランスミッターから切り離されてはおらず、フィールドコンポーネントは、まだソースの特性に依存しています。このため、ニアフィールドにおいて計測したレベルから、遠方界（つまり EMC 準拠）についてのいかなる結論も導き出すことはできません。

しかしながら、反対の結論を導き出すことが可能です：遠方界の電磁波を計測することができるのであれば、ニアフィールドにおいては、電界および磁界のコンポーネントが存在していなければなりません。例えば、EMC コンプライアンス試験中に、DUT が許容できないレベルの放射を生成していると判定をした場合、ニアフィールドプローブを使用して、そのような放射源を特定することができます。

ニアフィールドプローブによって得られた結果を解釈する際には、常に、遠方界に放射する関連するアンテナ構造（例、接続されたケーブルまたは長いトラック）が、存在するかどうかを考慮しなければなりません。高い振幅を持つニアフィールド放射は、必ずしも、強い遠方界放射をもたらす必要はありません。

ニアフィールド計測に加えて、RF エミッションの原因を解析するために、例えば、DUT の接続された信号ケーブルまたは電源ケーブル上を流れる、RFI 電流を計測することも重要になります。

一般的には、ニアフィールドプローブによる解析の前に、臨界周波数を特定するために、遠方界計測を実行することが推奨されています。実際の干渉源は、ニアフィールド計測によって特定することができます。遠方界への結合メカニズムが特定されれば、適切な是正措置を取ることによって、問題を解消することができます。

3.2 RFI 電流および電圧計測

3.2.1 接続されたライン上の RFI 電流と、放出された遠方界のコンポーネントの関係

典型的な放射メカニズムには、内部コンダクタまたは DUT に接続されたラインのスクリーン上を流れるコモンモード RFI 電流も含まれています。通常、このようなラインは、少なくとも 1 メートルの長さがあるために、30 MHz から 1 GHz の周波数レンジにおける効率的なアンテナとなっており、これは、EMC コンプライアンスにおいて非常に重要となっています。そうであるため、それらはしばしば最も重要な放射素子となります。遠方界における結果としての場の強さは、RFI 電流に正比例しています；この電流を低減するステップは、放射エミッションの直接的な改善につながります。以下の式[1]

$$E[\mu V/m] = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot f[\text{Hz}] \cdot l[m] \cdot I_{CM}[\mu A] \cdot \sin(\Theta) / r$$

接続されたライン上の、最大許容コモンモード RFI 電流の簡単な推定値を提供します（ダイポールアンテナの仮定に基づき）。ここでは、 l はライン長、 r はソースと受信アンテナ間の距離、 I_{cm} は同相 RFI 電流であり、 Θ は双極子に対する角度となっています。

角度 $\Theta = 90^\circ$ 、計測距離 3m、周波数 100 MHz、ケーブル長 1m、RFI 電流 2.5 μA 、RF エミッションの場の強さレベル約 100 $\mu V/m$ (=40 dB $\mu V/m$) が得られます。たとえば、これは、EN55022 に準拠したクラス B の制限に相当します。これは、したがって、2.5 μA のオーダーの RFI 電流でさえも、EMC コンプライアンスの限界に違反する可能性があるということは明らかです。

3.2.2 RFI 電流計測の利用方法

DUT に接続されたライン上のコモンモード電流を計測することにより、遠方界においてエミッションを発生させているラインがあるのか、あるとすればどのラインか、といったことを判断することができます。RFI 電流がすべての接続されたライン上において無視することができる場合、別のメカニズムが RF 放射の原因でなければなりません（例、RF シールドが不十分であるために、筐体からの RF 漏れ）。

さらには、RFI 電流のスペクトラムと、遠方界において計測されたスペクトラムを比較することにより、プリント回路基板上の主な干渉源を決定することができます。例えば、ブロードバンド干渉源が、100 MHz の最大値の遠方界において存在しており、ニアフィールドにおいて同様のスペクトラムを持った干渉源が検出された場合、我々はニアフィールドにおける干渉源を明らかに発見しています。CW 干渉源についても、同様に扱うことができます。例えば、25 MHz の高調波が遠方界において存在しており、匹敵する高調波スペクトルを持った干渉源がニアフィールドにおいて検出された場合、それは恐らくは我々が求めている干渉源であると思われます。

遠方界に放射される電磁波と、RFI 電流とは直接に比例するため、提案された改善は容易に評価することができます。

再現可能な計測条件は、そのような比較計測の重要な要素であります。RFI 電流が、ライン上の位置の関数として変化することを特に考慮しなければなりません。接続されたライン上での反射のために、定在波が生じてしまい、ライン上の異なる位置での異なる RFI 電流をもたらしてしまいます。遠方界のエミッションの結果としての改善を計測できるようにするには、電流プローブ（セクション 3.2.4 を参照してください）を使用して、ライン（例、電力線）上の最大 RFI 電流を計測しなければなりません。手順の最中に線の長さを変更しないでください。くわえて、問題のある定在波については、必要に応じて、ラインの終端の吸収クランプ（フェライト）を使用して減衰させることができます。



図 3-1：RFI 電流計測中の定在波を減衰させる、R&S®EZ-24 吸収クランプ。

一般的に、放射されたエミッションを、開発ラボにて計測する場合、計測されたエミッションが、周囲の干渉を表している可能性があるかどうかは注意を払うことが重要です。周囲の干渉を分離して計測するために、DUT をオフにして予備計測を行うことを推奨しています。

3.2.3 電力線の RFI 電圧の計測

RFI 電圧計測は、接続されたラインに沿って伝搬する RFI 電流を決定するためにも使用されます。このような計測は、ラインインピーダンス安定化ネットワーク (LISN) を使用して、電力線上で実行されます。例、AC/DC 電源ライン上の V-LISN および電気通信ライン上の T-LISN。ラインインピーダンス安定化ネットワークは、電源ネットワークのインピーダンスまたはケーブルインピーダンスのインピーダンスをシミュレートすることを意図されており、接続された電源ネットワークからの外部干渉を取り除き、DUT によって生成された RF 干渉を、計測出力において利用できるようにします。



図 3-2 : 伝導度計測用 R&S®ENV216 二線式 V ネットワーク

RFI 電圧計測は、RFI 電流計測の代わりに使用することができ、また、過剰な放射エミッションが発生している場合のデバッグのためにも使用することができます。標準的な電流プローブの周波数レンジよりも低い周波数レンジでは、通常、ラインインピーダンス安定化ネットワークが使用されるということを思い出してください。

3.2.4 RFI 電流を計測するための電流プローブ

RF 電流プローブは、RFI 電流を計測するために使用されており、異なるケーブル直径および周波数レンジ用にも使用することができます。EMI 問題をデバッグする際には、以下の側面が重要です：

- 1 | 電流プローブの内径は、良好な磁気結合を可能にするため、ケーブルの直径に合わせる必要があります。
- 1 | 周波数応答は、目的の周波数レンジにおいて、できるだけ平坦でなければなりません。
- 1 | 計測電流を「増幅」出力電圧 V として表示するには、電流プローブの伝達インピーダンス Z をできるだけ高くしなければなりません。計測された電流は、以下のように簡単に計算することができます： $I_{cm}[dB\mu A] = U[dBuV] - Z[dB\Omega]$ 。
- 1 | 電流プローブは、クランプとして設計することにより、ラインの周りに簡単に取り付けすることができます。
- 1 | RFI 電流計測に適したデバイスの 1 つの例は、20 Hz から 100 MHz の帯域幅および 10 dB Ω (モデル 02) または 17 dB Ω の伝送インピーダンス (モデル 03) を備えた、Rohde & Schwarz R&S®EZ-17 電流プローブです。



図 3-3 : 10 dBQ の伝送インピーダンス (モデル 02) または 17 dBQ の伝送インピーダンス (モデル 03) および 20Hz から 100 MHz の帯域幅を備えた R&S®EZ-17 電流プローブは、RFI 電流を計測するのに適したデバイスの好例です。30mm の大きな内径は、ケーブル束の計測を可能にしています。

電流計測の場合には、R&S®MDS-21 などの吸収クランプ、または 適切な直径と、適切な感度および帯域幅を持ついかなる電流プローブと組み合わせても計測出力がない、R&S®EZ-24 などのフェライトクランプを使用することもできます。

3.3 ニアフィールドプローブを使用した EMI 問題の解析

ニアフィールドプローブの主な目的は、可能な限り最高の感度で、プローブの近くに正確に定義された領域内にある DUT によって生成された電界または磁界を計測することです。他の方向から不要なフィールドを抑制するために、特別なシールド技術がプローブで使用されています。さらに、近接場プローブは、磁界または電界のいずれかを検出し、可能な限り他のフィールドコンポーネントを抑制するようにデザインされています。これにより、関連するニアフィールドの詳細な解析とともに、干渉源の正確な検出が可能になります。例えば、プリント回路基板上の個々のトラックからのエミッションを分離して検出するために使用できる、特別なニアフィールドプローブが存在しています。これにより、放射されたエミッションの原因であるトラックの識別を、検査することができるようになります。その他のタイプのプローブは、IC ピンまたはデカップリングコンデンサの電流を計測するために、特別にデザインされています。

3.3.1 電気および磁気ニアフィールドプローブ

電気ニアフィールドプローブは、磁界コンポーネントを抑制し、ニアフィールドの電界コンポーネント (E) に比例した出力信号を生成します。周波数依存のトランスデューサ係数 (K_e) を使用することにより、プローブのニアフィールドにおける電界強度を、以下のように計算することができます：

$$E[\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}] = U[\text{dB}\mu\text{V}] + K_e[\text{dB}/\text{m}].$$

磁気ニアフィールドプローブは、電界コンポーネントを抑制し、ニアフィールドの磁界コンポーネント (H) に比例した出力信号を生成します。周波数依存のトランスデューサ係数 (K_h) を使用することにより、磁界強度を以下のように計算することができます：

$$H[dB\mu A/m] = U[dB\mu V] + K_h[dBA/(Vm)].$$

磁気ニアフィールドは、RF 電流によって引き起こされます。同様に周波数依存性のある別のトランスデューサ係数 (K_i) を使用して、場を引き起こす電流を見積もることができます：

$$I[dB\mu A] = U[dB\mu V] + K_i[dBA/V].$$

通常、トランスデューサの係数は、プローブの製造元によって指定されます。しかしながら、定数参照フィールドに基づいて、独自に決定することもできます。

特に、磁気ニアフィールドプローブは、一般的に等方性ではありません、すなわち、計測された場の強さは、フィールドの方向、プローブの選択された位置、そしてもちろんソースまでの距離に依存しています。この理由により、プローブは、関連する干渉源上 (例、トラック) に直接に配置され、フィールドの最大値が計測されるまで回転されていなければなりません。この手順は、繰り返し計測の再現性を高めます、例、問題を解決するための手順を実行した後。

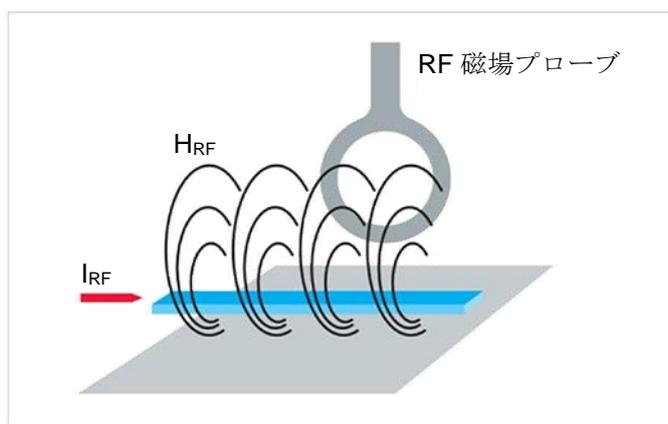


図 3-4 : 導体に沿った RF 電流によって引き起こされる、磁気ニアフィールドの形成/方向。

一般的に、磁気ニアフィールドプローブは、電気ニアフィールドプローブよりも優れた耐干渉性を有しており、そのため、使用がより容易となっています。さらに、差動モードおよびコモンモード RFI 電流の両方が、磁気ニアフィールドを主に引き起こしているために、磁気ニアフィールドプローブによって、それらを検出することができます。この理由により、磁気ニアフィールドプローブを使用した計測は、好ましい診断技術といえます (接続線上の RFI 電流測計測に加えて)。

例として、電気ニアフィールドプローブを使用して、電界の比較計測、結合メカニズムの解析および検出、さらに信号線および DC 供給システムにおけるスイッチングエッジの計測を挙げることができます。これらは、エミッションが、電位の変化 (電流とは対照的に) に主に起因する場合において、特に適したアプリケーションとなっています。さらに、筐体をシールドする際の漏れを探すときに役立ちます。

3.3.2 ニアフィールドプローブのアプリケーション

ニアフィールドプローブは、プリント回路基板上の EMI 問題の詳細な解析を行うために便利なツールです。主なアプリケーションには、干渉源の局在化およびデカップリングメカニズムの識別が含まれています。

I プリント基板上の干渉源の局在化

使用される実際のニアフィールドプローブによって、プローブが、電界または磁界を検出する空間領域は、必然的に小さくなります。ニアフィールドプローブを DUT のプリント回路基板上に移動させることにより、関心のある妨害スペクトラムが最大値をもつ位置を決定することができますようになります。そこでは、遠方界で問題を引き起こしている干渉の原因を見つけることがよくあります。これには、個々のトラック、バスシステム、電源プレーン、IC、ヒートシンク、さらには、スイッチングトランジスタが含まれます。

ニアフィールドプローブを使用することにより、グラウンドプレーンにおける電流分布についても調べることができます。この方法により、リターン電流が意図したパスを流れているのかまたはグラウンドプレーンの破損のために、意図していない分布がされているのかを決定することができます。

デカップリングコンデンサのプロービングは、電源デカップリング計測の有効性を評価する方法を提供します。R&S®HZ-15 ニアフィールドプローブセットにある、RS-H 2.5 などの磁気ニアフィールドプローブを使用することにより、デカップリングコンデンサを流れている電流を計測し、放射エミッションがどれくらい抑えられているかについて確認することができます。より高い電流レベルにおいては、一般的にデカップリングは、より効果的となります。異なるタイプのデカップリングコンデンサを選択し、その値を変更および必要に応じて電源およびグラウンドにどのように接続するかというレイアウトを変更することにより、コンデンサの計測電流を最大にし、デカップリング効果を最適化させることができます。

I デカップリングメカニズムの識別

接続されたライン上の RFI 電流の計測と組み合わせることにより、計測されたニアフィールドが、接続線を介して遠方界に結合されているかどうかを、ニアフィールドプローブを使用して明確にすることができます。これが当てはまらない場合には、筐体内のスロット周辺でニアフィールドプロービングを実行することにより、不十分なシールドが、不要な遠方界エミッションの原因であるかどうかを判断することができます。

干渉源およびデカップリングメカニズムを特定したら、次のステップでは、問題を解決する方法を見つけることとなります。これには、以下のものが含まれます（例として）：

- I DUT の重要な伝送パスにおける、信号の完全性についての試験。ここでの典型的な問題には、リングングが含まれています、例、伝送線の不適切な終端による
- I 高調波の振幅を低減するための、傾斜勾配の低減または伝送信号のフィルタリング。一定のオーダーを超えると、高調波は一般的には信号の完全性に実質的な影響を及ぼさないが、周波数が高いために容易に放出される
- I レイアウトの変更、例、シングルエンド（非対称）信号伝送が使用されている場合において、リターン電流のルーティングを最適化します

-
- | 重要なコンポーネントへ電源が供給される方法のリワーク（電源バスのデザイン）
 - | ラインのシールドイングおよびフィルタリング、例、SMD フェライト、コモンモードチョークまたはケーブルフェライトの使用
 - | 筐体のシールドの改善

3.3.3 R&S®HZ-15 ニアフィールドプローブセット

EMI 問題の解析中には、異なるニアフィールドプローブのセットがとても役に立つ場合があります。R&S®HZ-15 のセットには、このアプリケーションに理想的な、サイズの異なる 2 つの電気ニアフィールドプローブおよび 3 つの磁気ニアフィールドプローブが含まれています。

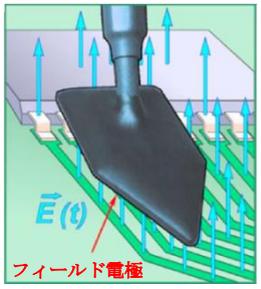
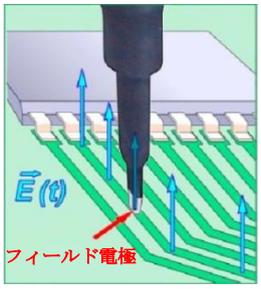
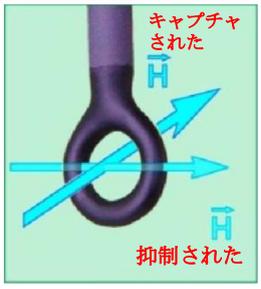
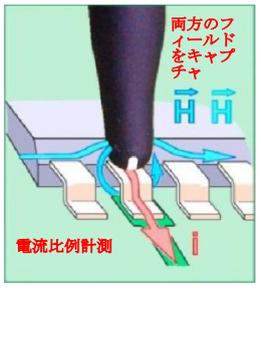
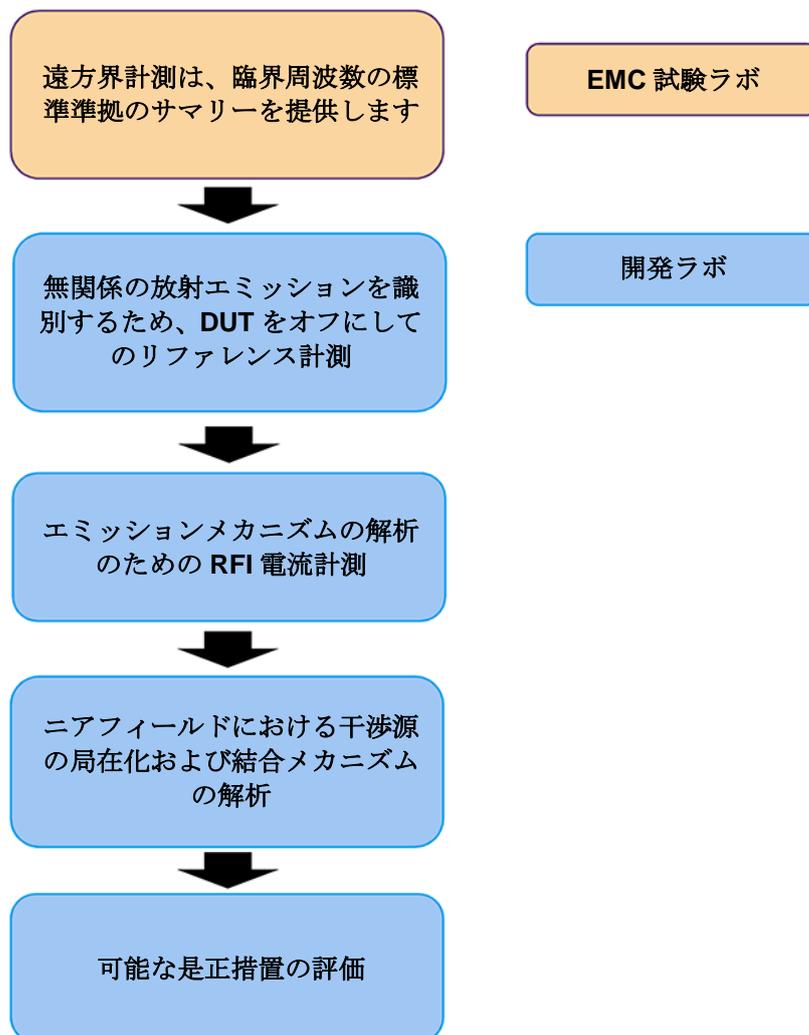
<p>RS-E 02: 大きな表面積のストラクチャから放出された電界を計測するための大面積ニアフィールドプローブ（例、アドレスバスまたはデータバス、ヒートシンク、プリント回路基板上の領域）。電界はプローブの底面で測定されます；上側は電気的にシールドされています。可能であれば、プローブ全体を DUT に配置しなければなりません。この方法により、プローブとソース（または 放出素子）との間の未定義の距離による、計測の不確実性を低減させることができます。</p>	
<p>RS-E 10: 電界を計測するための、非常に高い空間選択性を持ったニアフィールドプローブです。プローブのシールドは、隣接するストラクチャからのフィールドを抑制します。その分解能を約 0.2mm とすることで、一群のトラックにおいて最も高い妨害レベルを有するトラックを見つけることが可能になります。</p>	
<p>RS-H 400-1: 高感度ではありますが、空間選択性が比較的低い磁気ニアフィールドプローブです。粗い計測が必要な場合および干渉を局在化する必要がある場合において、初期解析を実行するのに非常に便利です。このプローブには方向性があるので、計測中に最大値が見つかるまで回転させておかなければなりません。</p>	
<p>RS-H 50-1: RS-H 400-1 よりもはるかに高い分解能を持つ磁気ニアフィールドプローブですが、感度は大幅に低下します。このプローブには方向性があるので、計測中に最大値が見つかるまで回転させておかなければなりません。</p>	
<p>RS-H 2.5: 高い空間分解能を持った磁気ニアフィールドプローブです；特に、コンダクタトラック、部コンポーネントおよびそのリードの中およびそれに沿った RF 電流の計測、ならびに、バスシステム内の干渉の検出に便利です。IC の表面またはコンデンサを流れる電流を計測するためにも使用することができます。0.5mm のギャップを有するコアからなっています。磁界は、ギャップ（白線）において検出されます。プローブは、干渉源の上にギャップと共に直接に配置されます。このプローブには方向性があるので、計測中に最大値が見つかるまで回転させておかなければなりません。</p>	

表 3-1 : R&S®HZ-15 ニアフィールドプローブセット。

4 R&S® RTO デジタルオシロスコープによる、EMI デバッグの実践的側面

4.1 開発ラボにおける、EMI デバッグの基本手順

以下のフローチャートは、EMI デバッグの基本手順を説明しています。一般的にこのプロセスは、臨界周波数の標準準拠のサマリーを提供している遠方界計測の結果に基づいています。



遠方界計測の結果が利用可能になると、実際のデバッグの手順が開始されます。推奨される手順は以下のとおりです：

1 無関係の RF エミッションを識別するため、DUT をオフにしてのリファレンス計測

開発ラボにて EMI デバッグを開始する前に、DUT をオフにしてリファレンス計測を行うことをお勧めいたします。この方法により、ラボまたはラジオサービスの他の機器からの RF エミッションが、DUT からの RF エミッションとして誤って識別されないようにすることができます。これは、電気ニアフィールドプローブおよびライン上の RFI 電流計測をよって計測を行う際に重要なステップです。磁気ニアフィールドプローブは、無関係な RF エミッションの影響を受けることはありません。

2 ラインがデバイスに接続されている場合の RFI 電流計測

多くの場合において、デバイスに接続されたラインは、私たちが探している放出素子になります。RFI 電流計測を使用して、どのラインが妨害信号を遠方界に放射しているのかを決定します。ソースがプリント回路基板上で識別されると、基板上の干渉源から放出素子までの、結合メカニズムを追跡することができますようになります。RF エミッションを減らす作業の際には、結合メカニズムは非常に重要になります。

3 干渉源を特定するために、異なるプローブを用いたニアフィールド計測

ここでの最善のアプローチは、RS-H 400-1 ループアンテナ (R&S®HZ-15) のような大きな磁気ニアフィールドプローブから始めて、プリント基板上の干渉源を探すことです。次いで、RS-H 50-1 および RS-H 2.5 などの小さなループアンテナに切り替えることによって、干渉源をさらに局在化することができます (22 ページを参照してください)。

電気ニアフィールドプローブに比べ、望ましくない妨害に対して優れた耐性を持っているために、磁気ニアフィールドプローブを使用することが最善となります。

4 可能な是正措置の解析

干渉源、結合メカニズムおよび放出素子が分かれば、可能な解決策を実施し、解析することができるようになります。ニアフィールドプローブまたは RFI 電流計測のための電流プローブは、RF エミッションに関して提案されたソリューションの効果を研究するために、容易に使用することができます。ここでは、常にニアフィールドプローブとの比較計測を同じポイントで行うことが重要です；ニアフィールドプローブは、最大値を検出するために回転させておかなければなりません。これは、潜在的なソリューションが、RF エミッションの偏光を変える可能性があるために必要となっています。接続されたライン上の RFI 電流の計測中において、RFI 電流の極大値を常にチェックすることも同様に重要となります。

4.2 R&S®RTO を使用した EMI デバッグ

4.2.1 オシロスコープの基本設定

以下の簡単な手順を使用して、EMI デバッグ用に R&S®RTO をセットアップします：

- 1 PRESET を押して、定義済みのセットアップを取得します
- 1 電流プローブ（RFI 電流計測用）またはニアフィールドプローブを、任意の入力チャンネルに接続します
- 1 高感度用に、垂直分解能を 1 mV/div から 5 mV/div のレンジで選択します
- 1 50Ω 結合を選択します（使用されている電流プローブまたはニアフィールドプローブの出力インピーダンスに適切にマッチングさせるため）
- 1 約 50 μs/div の水平偏向にセットしますこれは、0.5ms の信号記録間隔において、少なくとも 1 回発生する干渉源の検出を可能にします
- 1 FFT を起動します（FFT ツールバーのシンボルを選択し、適切な入力信号をクリックします）
- 1 FFT のスペクトル表示用カラーテーブルを有効にします（メニュー：ディスプレイ - 信号の色 - カラーテーブルの有効化）

これらの基本設定により、RF エミッションを高感度で容易に計測することを確実にします。同時に、オーバーラップ FFT 機能は、多数の個々のスペクトルによって、自動的に起動されます。カラーテーブルがあることにより、表示されたスペクトラムの RF エミッションが、時間とともにどのように変化するかを簡単にモニターすることができます。

4.2.2 EMI デバッグのための、特別な R&S®RTO 機能

高いアキュイジション帯域幅および周波数レンジにおける容易なナビゲーション

EMI 問題を解析するために、R&S®RTO を使用することの重要なメリットの 1 つは、スペクトル解析機能による高いアキュイジション帯域幅です。この方法により、入力スペクトラム全体を、一度に計測することができます（オシロスコープの帯域幅にのみ制限されます）。スペクトラムアナライザーを使用する場合とは異なり、最大ホールド機能を起動し、スペクトラム全体がプロセスされるのを待つために、プリント回路基板上において、RF エミッションを局在化する必要はありません。ニアフィールドプローブは、遅延なしでボード上を移動することができ、同時に、スペクトル全体を常に表示しています。

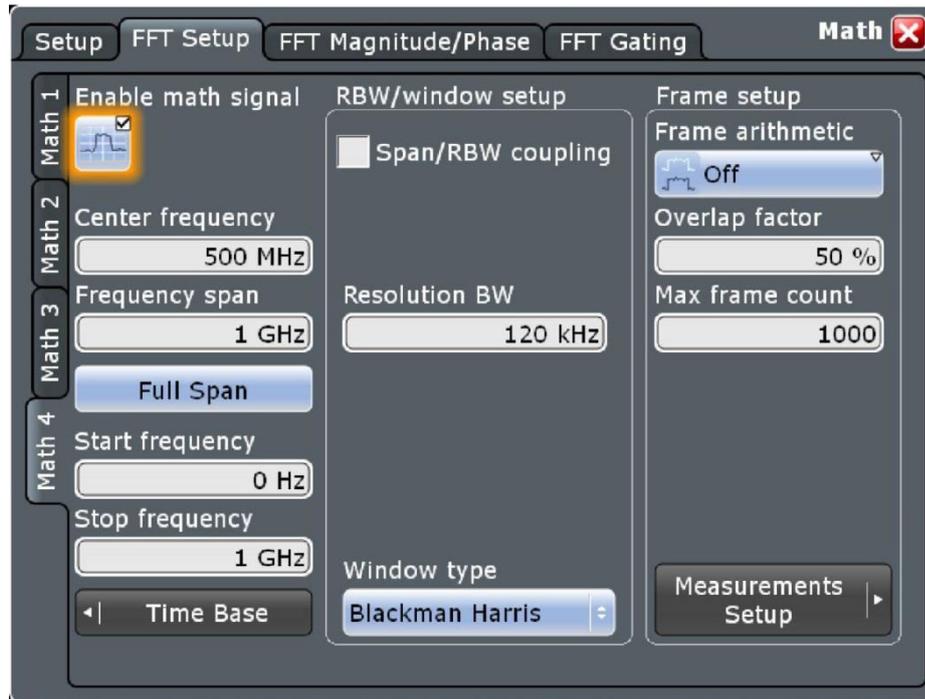


図 4-1 : FFT パラメータをセッティングするためのダイアログ : 利用可能なセッティングは、スペクトラムアナライザーのものに似ています。

R&S® RTO の FFT 機能は、スペクトラムアナライザーのそのように機能するようにデザインされています。つまり、開始および停止周波数（または中心周波数）、帯域幅および分解能帯域幅を直接にセットすることができます。時間領域のセッティング（必要なアキュジション）は、自動的に調整されます。これにより、周波数レンジ内をナビゲートするのがとても簡単になります。

「スパン/RBW カップリング」機能を起動すると、スパンおよび分解能の帯域幅の固定比をセッティングする入力ボックスが表示されます。これは、スパンが変更された場合、画面上での一貫した表示を確実にするために、表示された帯域幅に対する固定比率に基づいて、分解能帯域幅が、常に調整されるということを確認しています。

「フレームセットアップ」パラメータグループは、オーバーラップ FFT 機能を構成するために使用されます（以下を参照してください）。

スペクトルコンポーネントの色分け表示によるオーバーラップ FFT

R&S® RTO で提供されている FFT 機能のもう 1 つの鍵となる特徴は、オーバーラップ FFT です。この自動起動機能により、スペクトラムのタイミング特性も見るできるようになります。記録された信号は、一連のセグメントのシーケンスに分割され、各セグメントについてスペクトラムが計算されます。セグメント数は、パラメータセッティングに基づいて自動的に計算されます（スパンおよび必要な分解能帯域幅）。ここでは、分解能の帯域幅が小さくなるとセグメント長が長くなり、そしてセグメントが少なくなります（固定レコード長の場合）。

個々のスペクトルは次いで、色分けスキームを使用して、スペクトル表示に重ね合わされます。一般に発生する周波数コンポーネントは、希少な周波数コンポーネントと区別するために、異なる色で表示されます。この方法により、所定のエミッションが、一定周波数のクロックラインに由来するのか、散発的な妨害に関連するのかを一目で把握することができます。

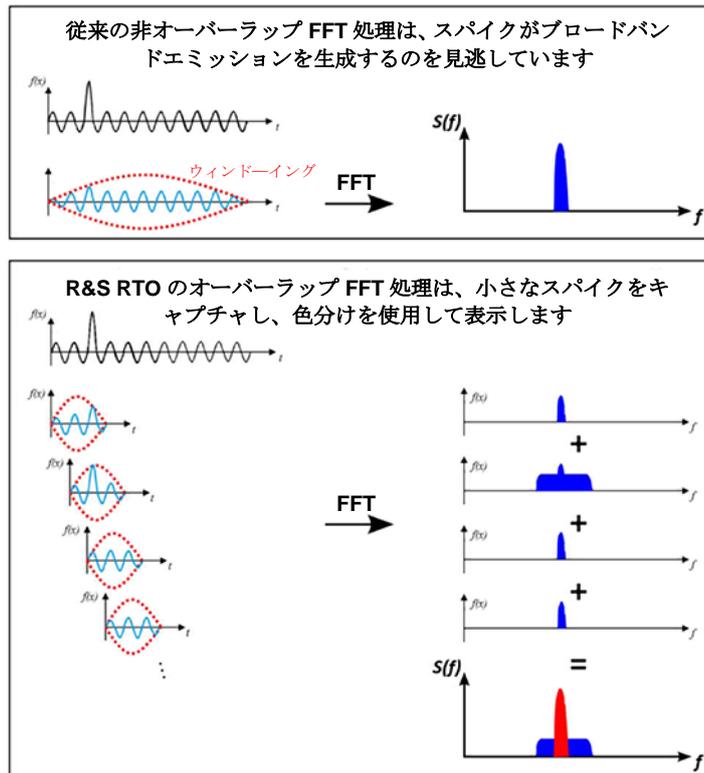


図 4-2：オーバーラップ FFT のオペレーション：一般に発生するスペクトルコンポーネントは、散発的な信号に関連するスペクトルコンポーネントとは異なる色で表示されます。

「フレームセットアップ」パラメータグループ (図 4-1 を参照してください) を使用して、オーバーラップ FFT 機能用のパラメータをセットします。用語「フレーム」は、時間関数の自動的に生成されたセグメントを指しています。「フレーム演算」を使用することにより、個々の信号セグメントのすべてのスペクトルを同時に表示するか (「オフ」を選択する)、または、単一の平均スペクトルを表示させるかどうかを選択することができます。「オーバーラップ係数」は、個々の信号セグメントがオーバーラップする程度について決定します。50%の値は一般的には十分であり、オーバーラップ領域で発生するスペクトルコンポーネントさえも検出し、表示することを確実にします。しかしながら、このパラメータは、必要に応じて 0%から 99%の任意の値にセットすることができます。

「最大フレームカウント」パラメータは、生成されるセグメントの最大数を制限します。非常に大きな分解能の帯域幅の場合では (したがって、非常に小さいセグメント長または非常に多くのセグメント数)、この機能は、処理されるべきセグメントの過剰な数を回避することを確実にします。高速スペクトル表示を確実にするため、可能な最大設定は、10,000 セグメントになります。セグメント数が制限されている場合、警告 (「最大フレーム数に達しました！フレームカバレッジ 19%」) が、FFT セットアップダイアログに表示されます。パーセンテージは、スペクトル計算にまだ使用されている計測信号の部分を表しています (アキュジション開始から計測された)。

相関時間 - 周波数解析のためのゲート（時間制限付き）FFT

「ゲート FFT」機能は、スペクトル解析用に、計測信号の定義された部分のみを使用することを可能にします。これにより、散発的に発生するスペクトルと、対応する時間領域信号との正確な相関が可能になります。これは、FFT セットアップダイアログによってコントロールされます（以下を参照してください）。

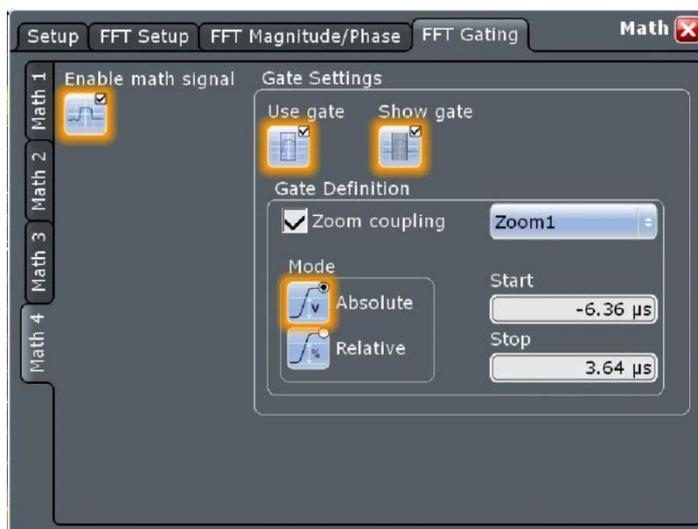


図 4-3: FFT ゲーティング機能: セッティングは、FFT ダイアログ内において扱われます。ゲートをズームウィンドウに自動的に結合するために、「ズーム結合」オプションを使用することができます。

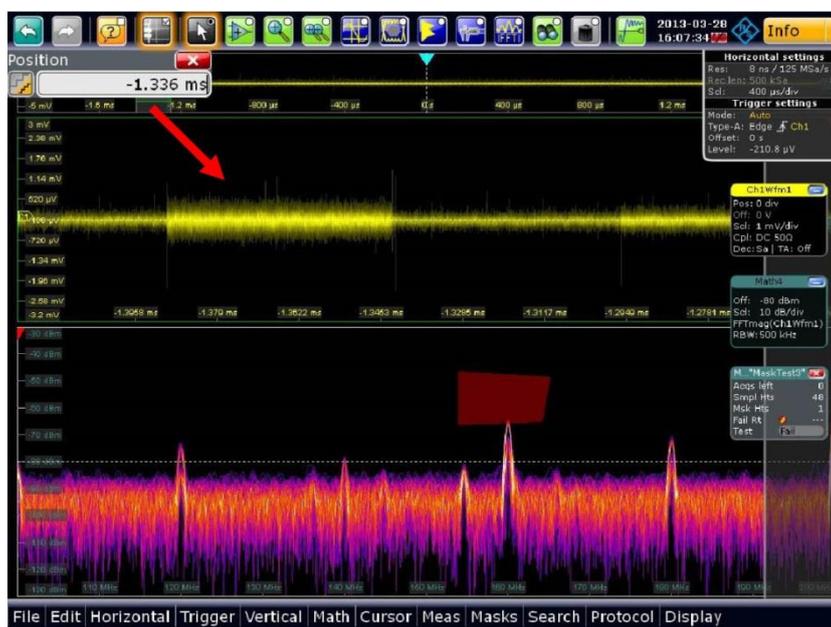


図 4-4: 結合ズームウィンドウによる FFT ゲーティング: 表示されるスペクトラムは、自動的にズームウィンドウの長さに制限されます。ズームウィンドウをスライドすることにより、ズームウィンドウ内に信号のどのスペクトルコンポーネントが存在するかを、正確に決定することができます。

散発的イベントの検出をトリガーするための周波数マスク

R&S®RTO マスク機能は、時間領域および周波数領域において使用することができます。マスクダイアログ内でセットされている「Stop-On-Violation」機能を使用することにより、散発的に発生するスペクトルコンポーネントを、簡単に検出することができます。オシロスコープは、スペクトルコンポーネントがマスク内に広がると、自動的にアキュイジションを停止します。それゆえに、その後の詳細な解析のために、解析が困難な散発的なエミッションを、容易にキャプチャすることができるようになります。

スペクトラムは FFT により保存された時間領域信号から計算されるため、アキュイジションプロセスが完了した後でも、スパンまたは分解能帯域幅などのパラメータを変更することができます。唯一の前提条件は、所定のケースにおいて、サンプリングレートおよびアキュイジション長の設定が、要求されているスパンおよび分解能帯域幅をサポートしていなければならないということです。

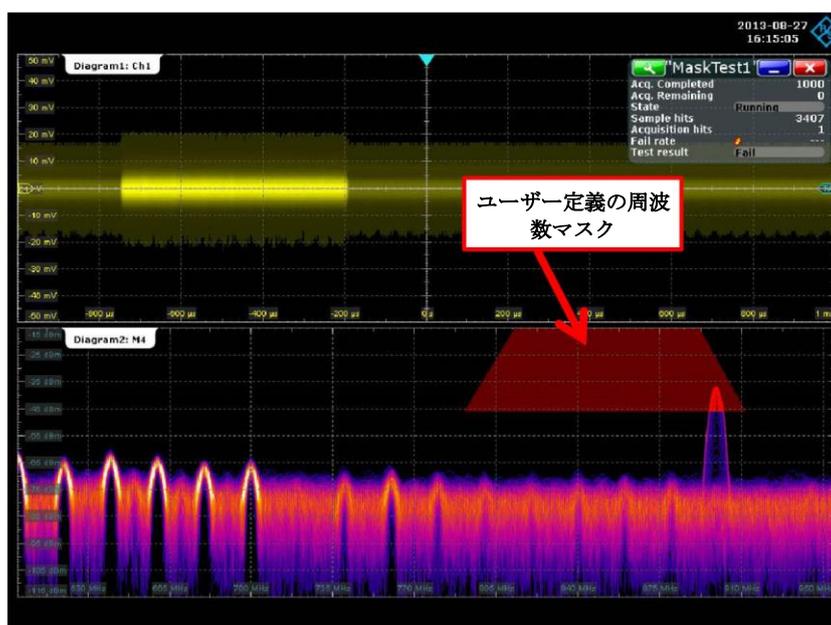


図 4-5 : 散発的に発生するスペクトル線のキャプチャ : マスク違反は、信号の詳細な調査を可能にするために、アキュイジションを停止します。

非常に長い信号シーケンスの計測を可能にする、FFT ディスプレイの最大レコード長の増加

場合によっては、FFT 計算の最大レコード長を増やす必要があります。これは、水平セットアップダイアログにおける、「レコード長制限」パラメータの設定を含みます。デフォルトでは、FFT 機能による高速応答を確実にするために、1 MS (Msample) にセットされています。R&S®RTO 4 チャンネル機器と R&S®RTOB101 メモリ拡張を使用することにより、このパラメータを最大 25 MS まで増やすことができます。

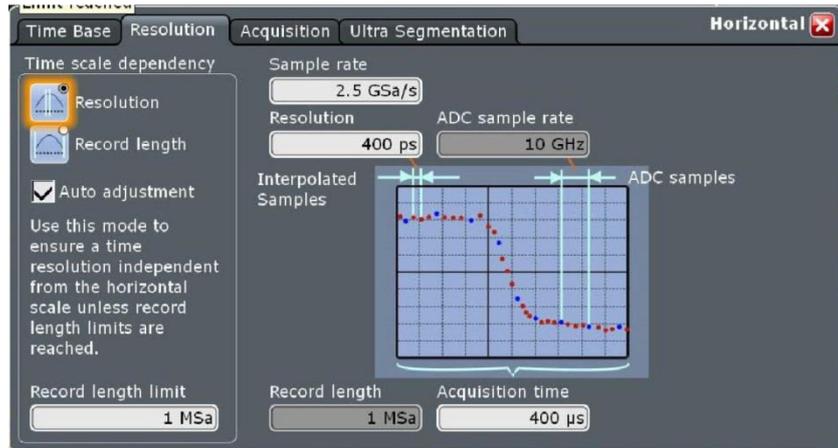


図 4-6 : 最大レコード長のセッティング。

オシロスコープを EMI デバッグに使用する際の制限

強力なスペクトル解析機能を備えたオシロスコープは、EMI 問題を解決するための非常に便利なツールです。しかしながら、オシロスコープは、テストレシーバに代わるものではありません。ですので、オシロスコープを使用する場合に適用される制限に留意することが重要です。これには以下のものが含まれます：

I 限られたダイナミックレンジ

オシロスコープは、通常、テストレシーバよりもはるかに分解能の低い A/D コンバータを使用するため、ダイナミックレンジがはるかに小さくなります。EMI デバッグにおいては、ほとんどの場合、最大エミッションのみに興味があるため、通常ではこれは制限要因とはなりません。

I 事前選択なし

オシロスコープには、事前選択がありません。この理由により、関心のあるスペクトルレンジの外側よりの強い干渉は、関心のある周波数帯域内における、不必要な相互変調積につながる場合があります。ニアフィールドプローブを使用した EMI デバッグにおいては、ニアフィールドプローブの空間選択性が、RF エミッションがプローブが配置されている場所のすぐ近くでのみで計測されることを確実にするため、これは一般的には制限要因にはなりません。

I 標準に準拠していない検出器

R&S®RTO は、平均値および RMS 検出器を備えていますが、CISPR 標準に準拠した機能については提供していません。しかしながら、CISPR に準拠した検出器は、概して、EMI デバッグのアプリケーションには必要ありません。

4.2.3 R&S®RTO による EMI デバッグのヒント

I 過負荷を避ける

スペクトル解析機能による正しい結果を得るためには、オシロスコープに過負荷がかからないようにすることが重要です。過負荷は、計測信号がもはや画面に完全に表示されなくなった場合において発生します。容易に過負荷を引き起こし得る大きな振幅の差と遭遇するために、ニアフィールドプローブを用いて作業する場合においては、これはとても重要になります。偽スペクトルコンポーネントに加えて、過負荷の場合における、スペクトルパワー密度についても間違った結果を入手してしまいます。

このような状況を回避するためには、スペクトル信号に加えて、時間領域の信号を常に画面上でモニターしていなければなりません。過負荷の場合は、オシロスコープの垂直感度を下げなければなりません。

- 1 FFT スペクトルの振幅表示の単位は、スペクトル解析ダイアログ内において、EMI 試験および計測アプリケーションにおける従前の dB μ V 単位に変更することができます。

4.3 実例 - IP 電話での EMI デバッグ

このセクションでは、EMI 問題を解析するために R&S®RTO を使用する方法を示す、具体的な例について説明いたします。EMC 適合性試験の結果より始めて、開発ベンチ上における、RFI 電流計測とニアフィールドプローブとを組み合わせた EMI 問題の解析方法について説明いたします。

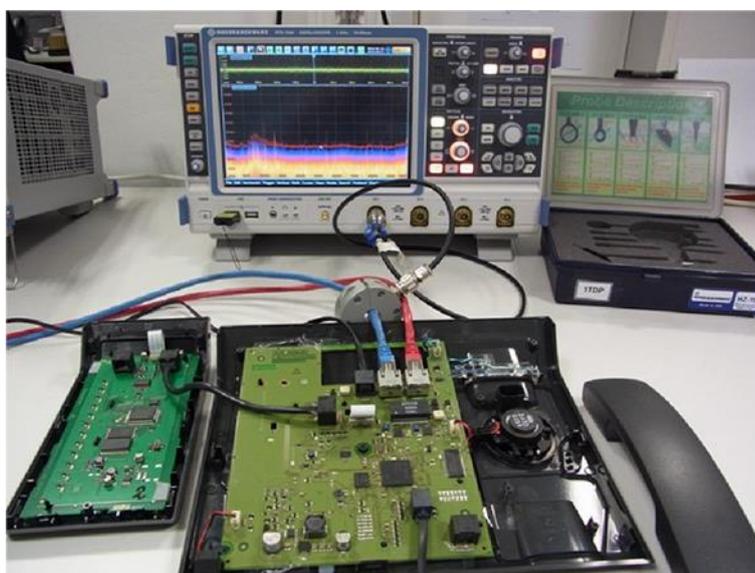


図 4-7: 近代的な IP 電話での EMI デバッグのセットアップを試験します。この例では、電流プローブを接続して、接続されたライン上のコモンモード RFI 電流を計測します。

DUT は、ベースユニットおよび拡張ユニットより構成される IP 電話です。これらのそれぞれ 2 つのデバイスには、コントロールモジュールおよびディスプレイが備わっています。デバイスはシールドされておらず、シールドされていないラインを介して、相互に接続されています。ベースユニットは、2 つの LAN 回線（ギガビットイーサネット、パワーオーバーイーサネット）および外部電源に接続されています。くわえて、ディスプレイおよびハンドセットへのケーブル接続もあります。

ベースユニットには、DDR2 メモリ、イーサネットレイヤー 2 スイッチ、LAN インタフェースを操作するための 2 つのギガビットイーサネット PHY、各種の DC/DC コンバータ、ディスプレイインタフェースドライバ、拡張ユニットへの SPI インタフェースおよびラウドスピーカーとマイク用のアナログ回路（ハンズフリーモード）が備わっています。拡張ユニットは、ディスプレイドライバ、SPI インタフェースモジュールおよびキーデコーダより構成されています。

4.3.1 遠方界解析の結果

試験ラボにおいて実施される EMC 適合性試験（遠方界計測）の目的は、法的に要求されている限界に関して、臨界周波数および絶対マージンを共に発見することです。

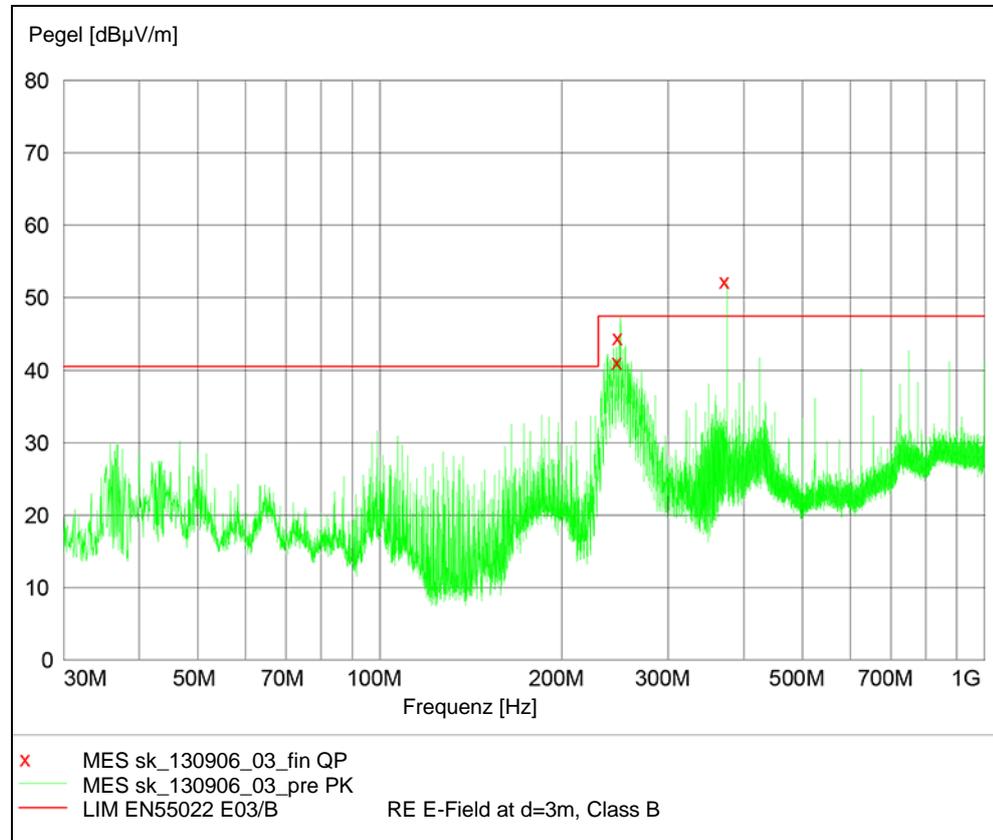


図 4-8 : EMC 適合性試験の結果。

周波数	レベル	トランス	制限	マージン	高さ	方位角	分極
MHz	dB μ V/m	dB	dB μ V/m	dB	cm	度	
248.68	41.20	17.50	47.50	6.30	0.0	157.00	水平
250.00	44.50	18.00	47.50	3.00	0.0	293.00	水平
375.00	52.30	20.30	47.50	-4.80	0.0	359.00	水平

表 4-1: 遠方界計測結果のサマリー。3つの重要な周波数があります。さらに、制限には違反していませんが、エミッションレベルが制限をわずかに下回る、250 MHz の広帯域妨害信号が存在しています。

EMC 試験の結果は、250 MHz、375 MHz および 125 MHz の他の高調波における、狭帯域干渉源の発生源を決定しなければならないことを表しています。さらに、250 MHz における広帯域干渉源を解析することも重要です。異なる条件の下では、今のところは制限を下回っている広帯域干渉源は、EMC 試験ラボにおける新しい遠方界計測中に、制限を超えるエミッションを容易に生成することができます。

この問題を正確に解決するには、遠方界への結合メカニズムを決定することもまた重要です。ここでは、以下の予備的な解析が役に立ちます：

最も高い臨界周波数 (375 MHz) の波長は、80cm に等しいです。この周波数では、効率的なアンテナは、少なくとも $\lambda/6$ 、すなわち約 13.3cm のサイズを必要とします。このような線の長さがプリント回路基板上で発生しないとすると、最初にデバイスに接続された線が、RF 放射を引き起こしていると仮定することができます。しかしながら、ヒートシンクおよびメカニカルコンポーネントなど、他に考えられる放射素子についても考慮することが重要です。妨害信号は、これらの素子と結合することができ、RF エミッションを生成することができます。

4.3.2 接続された線上の RFI 電流計測

最初のステップでは、すべての接続された線の妨害レベルを計測して、最大値を決定します。最も高い RFI 電流は、青色の LAN 配線で発生しています (図 4-9 を参照してください)。そうであるため、この線は、遠方界へのデカップリングのための臨界アンテナを表しています。計測には、20 dB Ω の伝送インピーダンスの電流プローブを使用しました。プリアンプは使用していません。したがって、RFI 電流のレベルは、オシロスコープに表示される電圧レベル (dB μ V) から、20 dB を引いたものとして直接計算することができます。以下の計測例では、375 MHz で約 34 dB μ V の表示電圧値から、14 dB μ A (または 5 μ A) の電流を計算します。セクション 3.2.1 の見積もりに基づきますと、これはすでに臨界レベルです。

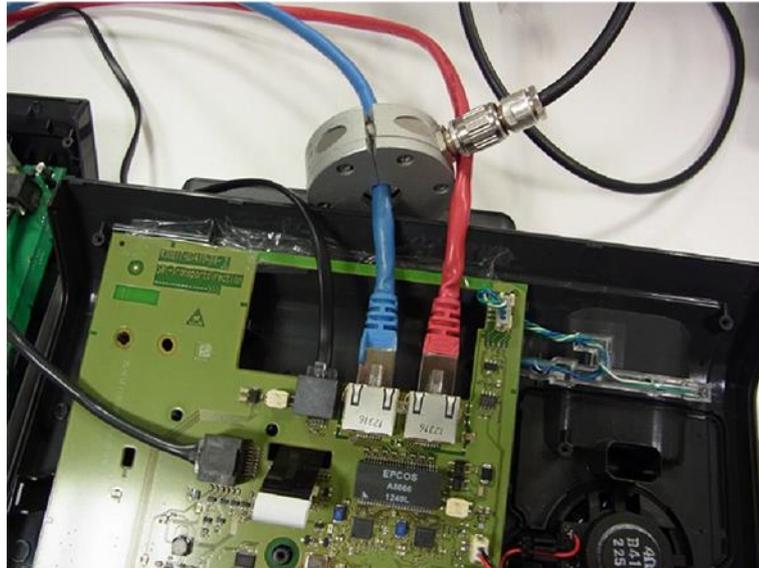


図 4-9：特別な電流プローブを使用した、接続された LAN の配線上の RFI 電流の計測。

遠方界において検出可能な 250 MHz および 375 MHz のエミッションのほかにも、360 MHz の広帯域干渉源などの他のエミッションも見られます。しかしながら、後者は、EMC 適合（遠方界計測を参照してください）の問題ではないため、これ以上の検討は必要ありません。

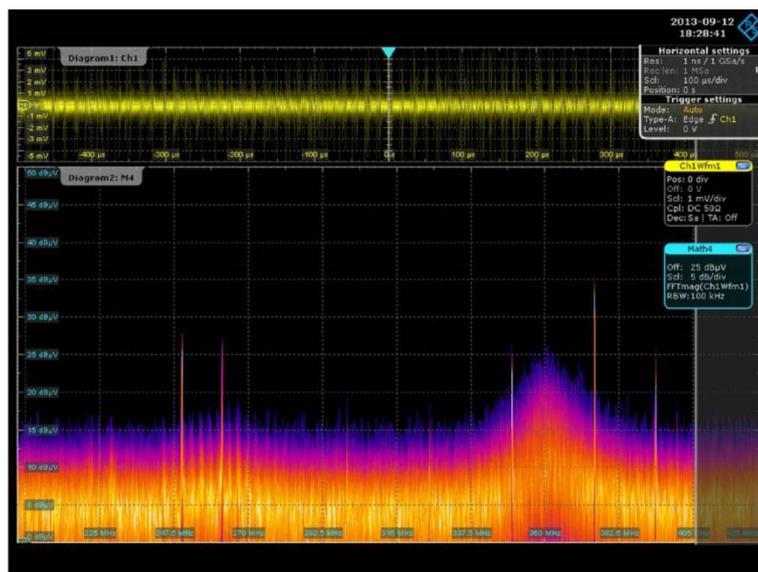


図 4-10：200 MHz から 425 MHz の周波数レンジにおける、青色の LAN 配線上での RFI 電流計測の結果。360 MHz における明白な広帯域干渉源と共に、250 MHz、262 MHz、350 MHz、375 MHz および 400 MHz においても明確な最大値が存在しています。

散発的で一定した干渉源を見つけることが期待されている場合（または遠方界計測中に散発的な干渉源を検出した場合）、最大ホールドディテクタータイプ（セクション 4.2 を参照してください）を使用してこのタイプのエミッションを計測し、継続的に表示することができます。RFI 電流は線上の位置の関数であるため、この例においては、計測中に電流プローブを線に沿って移動させます；最大値は最大ホールド機能によって保持されます。しかしながら、現在の DUT では、最大ホールド機能を使用して、散発的な干渉源に関する新しい洞察を得ることはできません。

しかしながら、最大 RFI 電流（赤色のスペクトル曲線）は、電流プローブの現在位置（色分けされたスペクトラム）における計測値とは著しく異なっているということは明らかです。

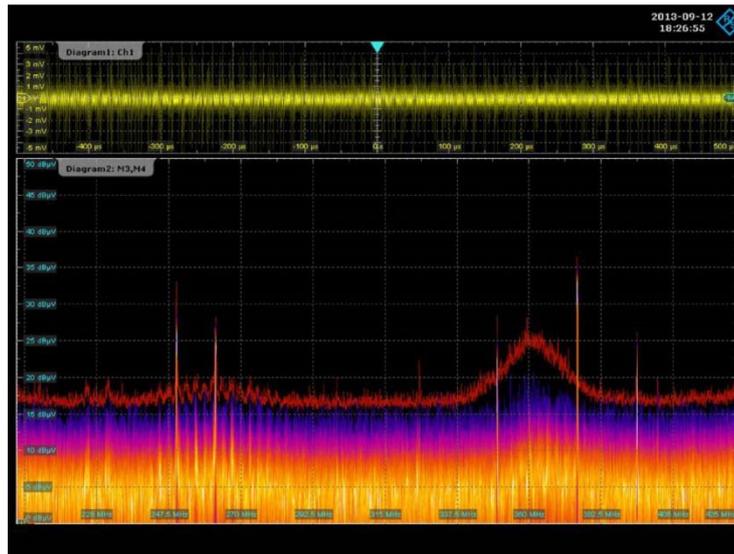


図 4-11 : 同じダイアグラムにおいて、2つのスペクトルを持つ R&S®RTO を使用したスペクトル解析 : 現在計測されているスペクトルは、最大ホールド (赤のエンベロップ) を使用して決定されたスペクトラムとともに、色分けされて (黄-赤-青) 表示されます。

計測帯域幅を広げることによって、広帯域干渉源と狭帯域干渉源の区別を、明確に視覚的に表すことができます。色分けに基づき、一定の存在を有するスペクトルは、散発的に生じるスペクトルとは異なって表示されます。この例では、375 MHz の白線は、一定の周波数を持ったクロック信号によって生成される、一定のスペクトルを表しています。解析区間隔中では、青色のスペクトルコンポーネントはほとんど発生しませんでした。

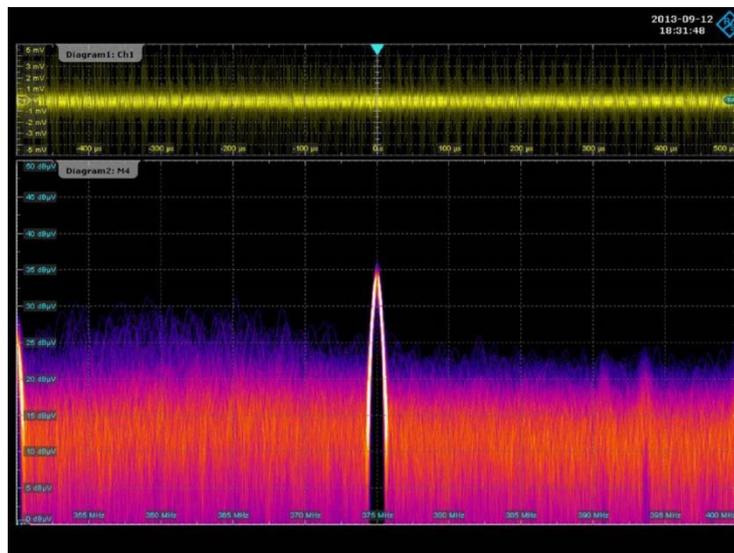


図 4-12 : 375 MHz の CW 干渉源 : 白い線は、このスペクトルが一定の存在であることを示しています。このタイプの高調波は、しばしばクロック信号によるものです。



図 4-13 : ハンドセット配線上の RFI 電流計測。

ハンドセット配線上の RFI 電流計測は、375 MHz の高い RFI 電流を明らかにします;さらに、250 MHz の広帯域干渉源も見えています。故に、ハンドセット配線もまた、重要な放出素子ということになります。250 MHz の広帯域干渉源は、他の線のいずれにも見られなかったため、主にハンドセット配線をより放射されていることが明らかです。

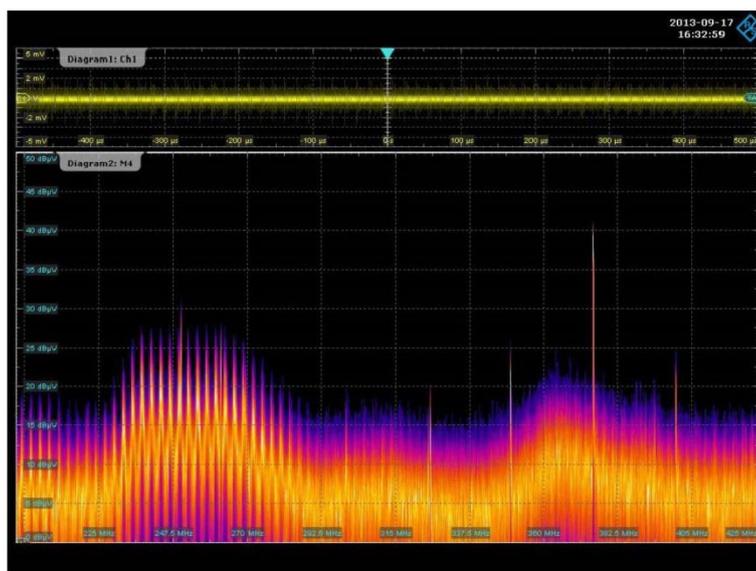


図 4-14 : ハンドセット配線上における RFI 電流計測の結果 : 375 MHz の CW 干渉源のほかに、250 MHz の広帯域干渉源もはっきりと見えています。

これらの RFI 電流計測を使用することにより、接続された線が、遠方界への RF エミッションを引き起こす、主な原因の 1 つであるということを実証することができました。これは、計測された RFI 電流の振幅に続きます (例、図 4-13 ; 375 MHz での電流プローブの給電点での計測電圧は 40 dBμV です ; 20 dBQ の伝達インピーダンスに基づき、これは 20 dBμA または 10 μA の RFI 電流を意味しています)。

4.3.3 ニアフィールド解析

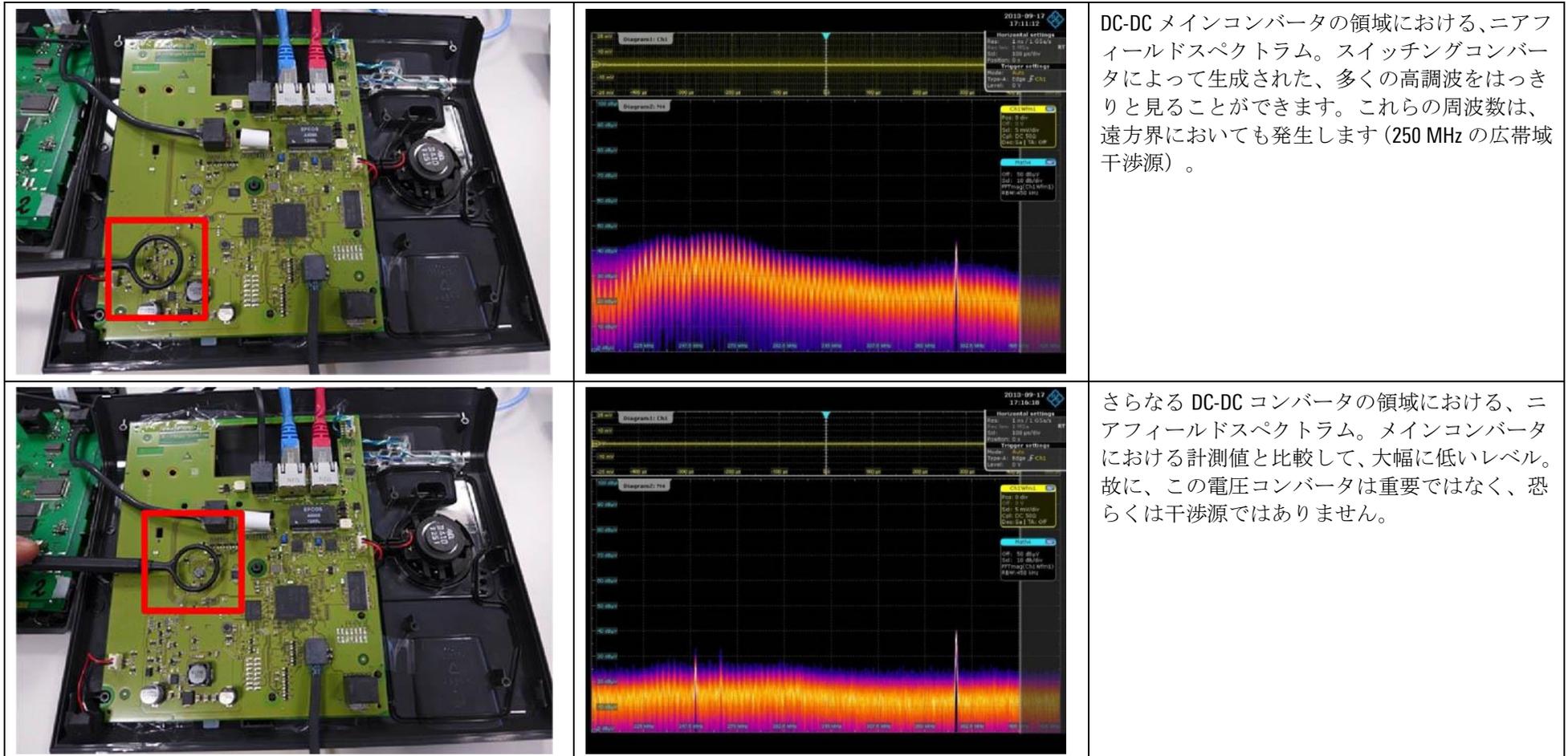
ニアフィールドプロービングを使用して、干渉源を局在化し、結合メカニズムを決定します。この目的のために、オシロスコープのセッティングを若干変更しました。特に以下の変更を含みます：

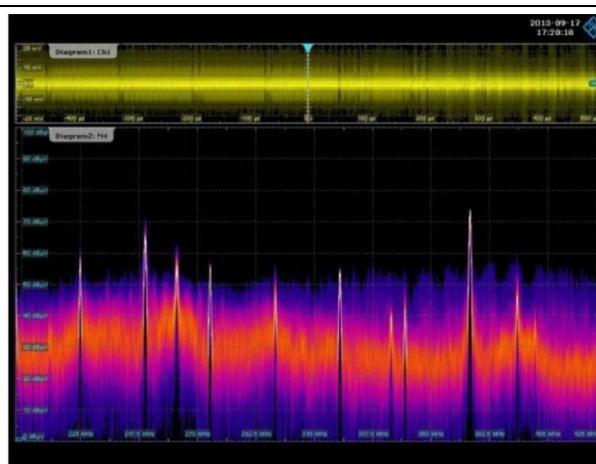
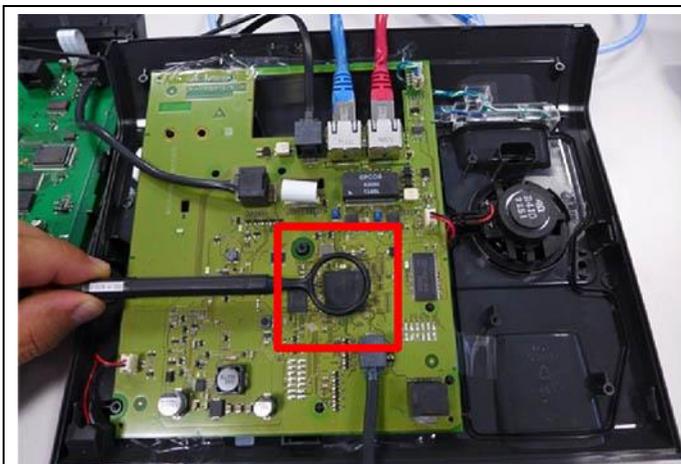
- I 感度の低下：1 mV/Div の代わりに 5 mV/div。ニアフィールドプロービング中に、比較的高いレベルが発生する傾向があります。過負荷を防ぐために、感度を下げる必要があります
- I 変更された垂直スケール：FFT セットアップダイアログ内において、「手動範囲」オプションを使用して垂直スケールを変更したため、FFT スペクトルが画面を適切に埋めるようになり、読みやすくなりました

以下のページでは、ニアフィールドプローブの使用方法および干渉源の特定方法を示すために、写真、スクリーンショットおよび説明をまとめました。

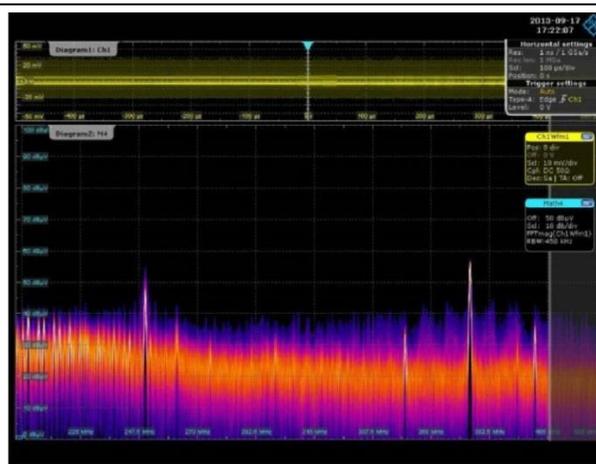
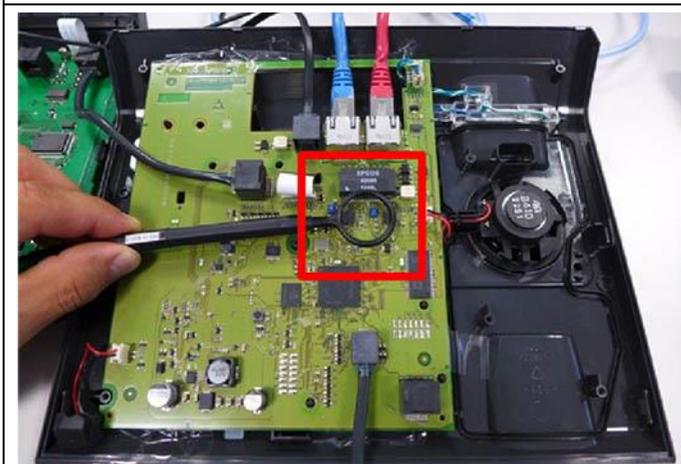
I 異なる位置における、RS H 400-1 大型磁気ループアンテナによる計測

目的：遠方界計測中に検出された妨害スペクトラムまたは接続された線上の妨害スペクトルと比較できるニアフィールドスペクトラムを生成する発生源を特定します。



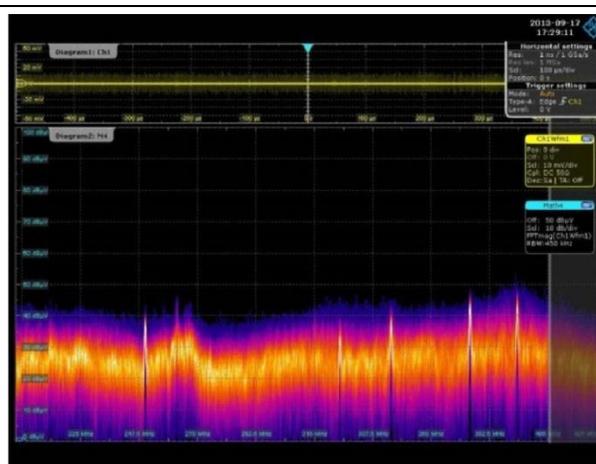
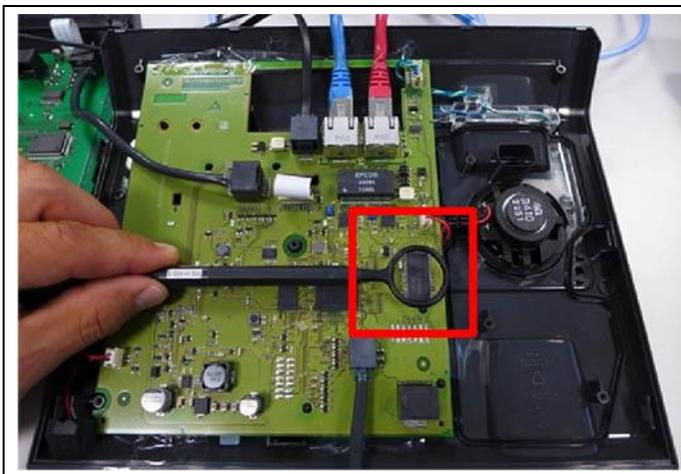


プロセッサチップの領域における、ニアフィールドスペクトラム。125 MHz、特に 375 MHz の高調波のレベルを大幅に高めました。このモジュールは、遠方界 RF エミッションの可能性のあるソースです。



ニアフィールドスペクトラムは、ギガビットイーサネット PHY IC の領域において検出されました。個々のクロック周波数は、特に 250 MHz および 375 MHz において、はっきりと見ることができます。

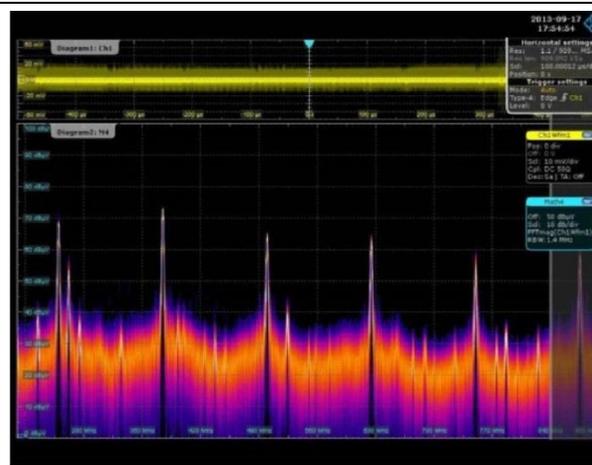
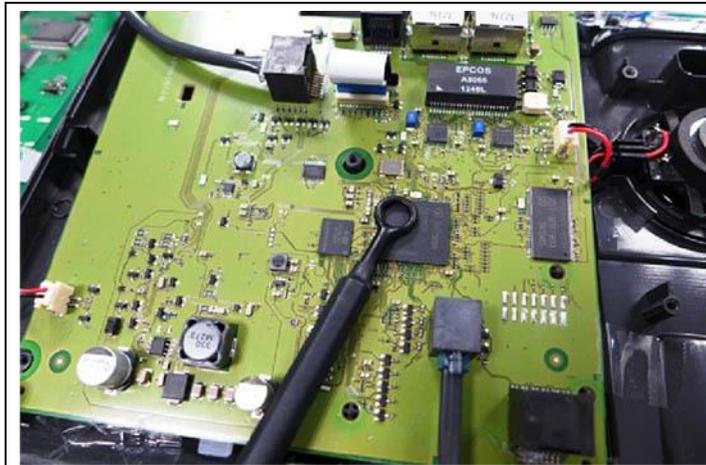
プロセッサチップに比べて低いレベルにもかかわらず、PHY は、LAN インタフェースを直接に駆動します、すなわち、それらは、トランスを介して LAN ケーブルに接続されます。LAN ケーブルはキー放出素子であるため、ここでは、結合パスが存在していると仮定することができます。



メモリーチップの領域における、ニアフィールドスペクトラム。ここでは、他の計測場所と比較して、著しく低いレベルが見うけられます（または 遠方界において観測される妨害スペクトルが全く存在していない）。この理由により、このチップは重要ではありません。

I RS H 50-1 小型磁気ループアンテナによる計測

より小さなループアンテナを使用して、最初のステップで検出したソースを、さらに局在化できるようになりました。

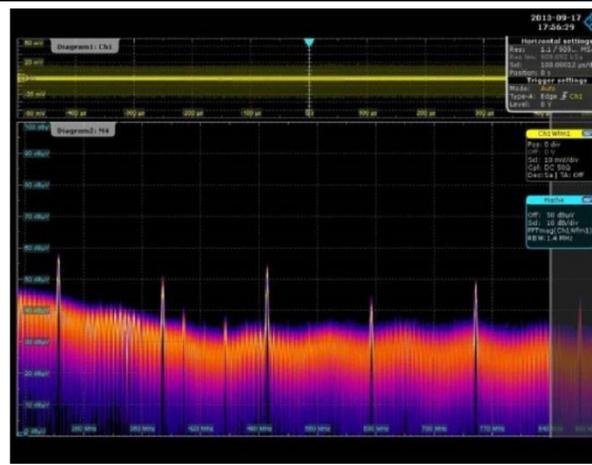


プロセッサチップ上における計測：

125 MHz の倍数を、はっきりと見ることができます。くわえて、262 MHz およびその高調波におけるエミッションがあります。

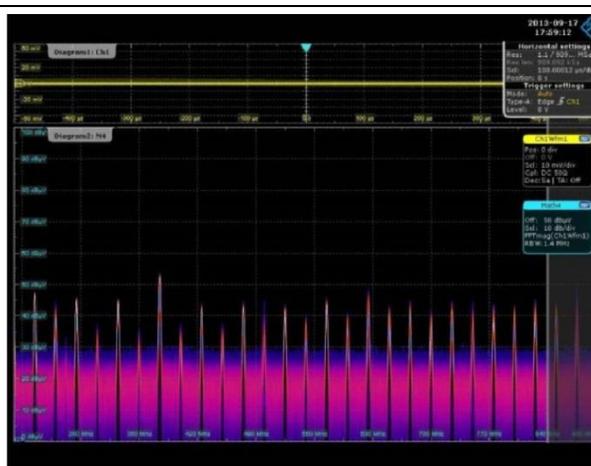
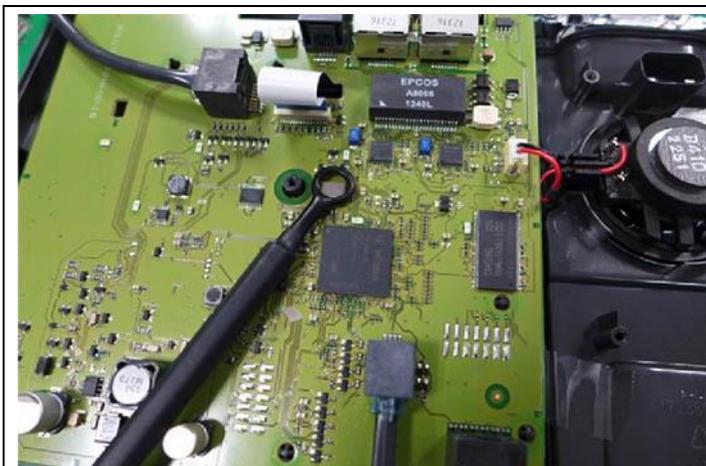
125 MHz の倍数も、遠方界において観測される周波数に対応しています。結果として、これらの周波数は重要です。

くわえて、プロセッサの左上、すなわち、プロセッサの Reduced Gigabit Media Independent Interface (RGMI) 領域において、最大のエミッションを検出することができました。干渉源は、この方法によってさらに局在化されます。



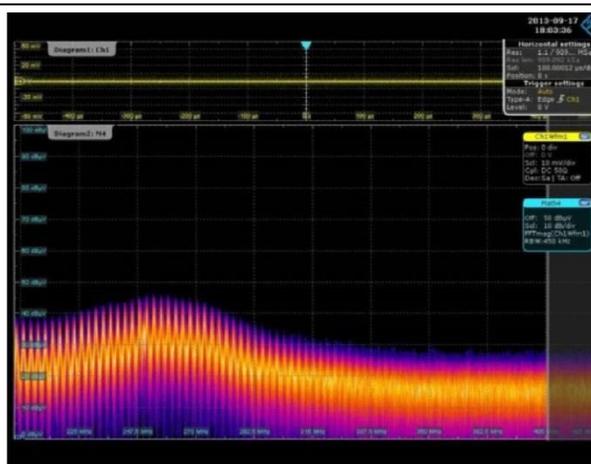
ギガビットイーサネット PHY 上での計測：

125 MHz の高調波を発生するソースをはっきりと見ることができます。これらの周波数は、高レベルの遠方界においても発生するために、重要であります。



クロックジェネレーター (25 MHz) 上での計測 :

25 MHz の高調波を発生する重要なソースをはっきりと見ることができます。しかしながら、遠方界において 125 MHz (25 MHz ではなく) の高調波が発生しているため、クロック発生器は干渉源の候補ではありません。

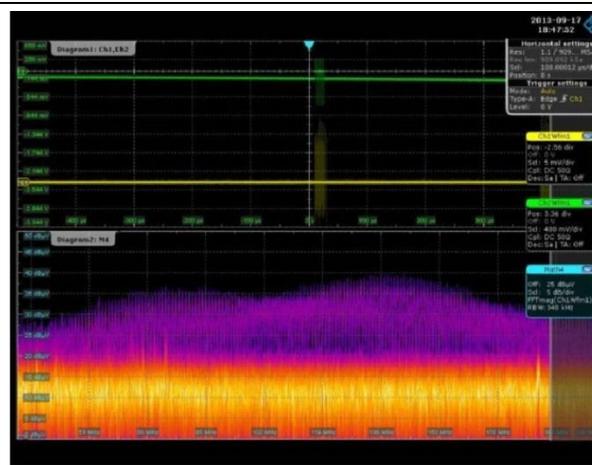
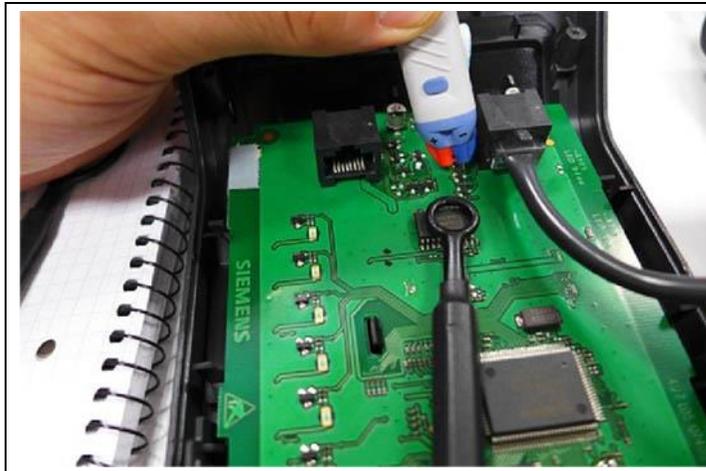


メインコンバータ上での計測 (DC/DC 36 V から 3.3 V) ; 整流ダイオード出力時 :

約 250 MHz の最大値を持つ、多くの線からなるスペクトラムをはっきりと見ることができます。これは、遠方界における 250 MHz の広帯域干渉源に対応しています。特定のスペクトルのサインは、この電圧コンバータが、干渉源の候補であることを示しています。これは、時間領域における信号を見る際に確認されます。この例では、タイミング相関を得るためにスイッチングトランジスタが起動された瞬間にのみ、ゲート FFT 機能を使用して、スペクトラムを表示していました。

I 時間 - 周波数の組み合わせの計測

RS-H 50-1 小型磁気ループアンテナおよび差動プローブを使用することにより、観測された RF エミッションの一部と、電話機と拡張ユニットとの間の SPI データ転送との間のタイミング関係を表示することができます。



SPI インタフェース (Clk、緑色の曲線) + SPI インタフェースモジュール上のニアフィールドプローブ (黄色色の曲線) 上での時間領域計測：

観測された妨害スペクトラムは、SPI インタフェース (Clk) 上の活動と一致しています。したがって、SPI クロック (または このインタフェース) が、遠方界において観測される干渉を生成していると、間違いなく結論づけることができます。再度、SPI 転送が行われたときに発生する妨害スペクトラムのみを表示するために、ゲート FFT 機能を使用しました。

4.3.4 EMI デバッグの結果

- I 遠方界計測の結果に基づいて、ニアフィールドおよび RFI 電流解析を使用することにより、干渉源および結合パスを決定することができました
- I 以下の重要な干渉源を特定しました：プロセッサ（RGMII インタフェース）、LAN PHY およびメインコンバータ。さらなる解析により、コモンモードの妨害は、LAN PHY の電源と LAN コンバータを介して、LAN 線と結合されていることが分かりました。ハンドセット配線への結合は、プロセッサを介してまたはレイアウトの結果としてのガルバニック結合として発生しています
- I 私たちの分析に基づいて、RF エミッションを大幅に削減するためのステップを導入することができました（例、フィルタリングおよび終了処置によって、RGMII インタフェース（コモンモード電流のリターンパス）のレイアウト変更、LAN シールドの改善されたグラウンド接続、LAN PHY およびプロセッサ用の改善された電力バスデザイン（低インピーダンス）およびメインコンバータの領域におけるレイアウトの改良および回路の変更）

5 サマリー

これまでは、遅くて使いにくい FFT 機能のため、オシロスコープは、EMI デバッグにはほとんど適していませんでした。さらには、RF エミッションを確実に計測するための十分な感度がありませんでした。

この状況は、Rohde & Schwarz の R&S®RTO デジタルオシロスコープの導入によって変化しました。1 mV/div の感度、最大 4 GHz の帯域幅、非常に低い内部ノイズにより、ニアフィールドプローブまたは電流プローブを使用した EMI エミッションの計測および解析に理想的です。EMC 適合試験の結果に基づきますと、オシロスコープは価値のあるラボツールであり、不要なエミッションを迅速に把握し、根本的な原因を特定するのに使用することができます。標準的な開発者のツールとして、開発ラボにおけるオシロスコープのアプリケーションのレンジが、EMI デバッグを含むように拡張されました。

特に、時間領域解析および周波数領域解析の柔軟な組み合わせにより、新しい可能性が開かれています。くわえて、色分けされたディスプレイは、スペクトルコンポーネントの発生頻度を示すことにより、デバッグ中に役に立ちます。

このアプリケーションノートでは、EMI デバッグの理論および実践について説明しており、そこには、個々の作業手順を説明する現実的な例が含まれています。このドキュメントが開発者の作業環境において、追加の試験機器を必要とせず、EMC コンプライアンス問題の解析に役立つことを特に願っています。

6 参考文献

- [1] Henry W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", John Wiley & Sons Inc (May 19, 1976)
- [2] Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility Engineering", John Wiley & Sons; 1st edition (September 11, 2009), ISBN-13: 978-0470189306
- [3] Clayton R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility", John Wiley & Sons; 2nd edition (February 10, 2006), ISBN-13: 978-0471755005

7 オーダー情報

指定	タイプ	注文番号
オシロスコープ		
1 GHz、2 チャンネル、10Gsample/秒、チャンネル当たり 20 / 40Msample	R&S®RTO1012	1316.1000.12
1 GHz、4 チャンネル、10Gsample/秒、チャンネル当たり 20 / 80Msample	R&S®RTO1014	1316.1000.14
1 GHz、2 チャンネル、5Gsample/秒、チャンネル当たり 10 / 20Msample	R&S®RTE1102	1317.2500.02
1 GHz、4 チャンネル、5Gsample/秒、チャンネル当たり 10 / 40Msample	R&S®RTE1104	1317.2500.04
アクセサリ		
E および H ニアフィールド計測用のコンパクトプローブセット、30 MHz から 3 GHz	R&S®HZ-15	1147.2736.02
プリアンプ 3 GHz、20 dB、R&S®HZ-15 用 電源アダプタ 100 V から 230 V、	R&S®HZ-16	1147.2720.02
1.5 GHz、アクティブ、差動、1M Ω 0.6 pF、R&S®プローブメーター、マイクロボタン	R&S®RT-ZD20	1410.4409.02

Rohde & Schwarz について

Rohde & Schwarz は、エレクトロニクスに特化した独立系企業です。我々は、試験および計測、放送、ラジオモニタリングおよび無線標定、そして安全な通信の分野におけるソリューションのリーディングサプライヤーです。75 年以上前に設立された Rohde & Schwarz は、世界 70 カ国以上に拠点を構えており、専用のサービスネットワークを保有しています。本社はドイツのミュンヘンにあります。

本社 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-20-1 住友不動産西新宿ビル 27 階

URL : <http://www.rohde-schwarz.co.jp>

ご購入に関するお問い合わせ

TEL : ☎ 0120-190-721

FAX : 03-5925-1290/1285

E-mail : Sales.Japan@rohde-schwarz.com

技術・仕様に関するお問い合わせ

TEL : ☎ 0120-190-722

E-mail : Technical-Support.Japan@rohde-schwarz.com

修理・校正・サービスに関するお問い合わせ

TEL : ☎ 0120-138-065

E-mail : service.rsjp@rohde-schwarz.com

電話受付時間 9:00 ~ 18:00

(土・日・祝・弊社休業日を除く)

環境へのコミットメント

- ┆ 省エネルギー製品
- ┆ 環境の持続可能性における継続的改善
- ┆ ISO14001 認証取得済み環境マネジメントシステム

認定品質システム

ISO 9001

このアプリケーションノートおよび付属のプログラムは、Rohde&Schwarz のウェブサイトのダウンロードエリアに記載されている使用条件に従ってのみ使用することができます。

R&S®は Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG の登録商標です；商号は所有者の商標です。

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Mühlhofstraße 15 | D - 81671 München

Phone + 49 89 4129 - 0 | Fax + 49 89 4129 - 13777

www.rohde-schwarz.com