

## Application Note

**EMI 低減手法、デュアル・ランダム・スペクトラム拡散**

Paul Curtis, Eric Lee

**概要**

スペクトラム拡散手法はスイッチ・モード・コントローラとコンバータで一般的に使用されており、スイッチャが生成する電磁干渉 (EMI) の影響を低減することを目的にしています。スペクトラム拡散を実装するには多くの方法があり、業界標準のテストでは複数の分解能帯域幅 (RBW) が使用されることから、それぞれの方式は通常、低周波数と高周波数のどちらでも優れた性能を発揮します。デュアル・ランダム・スペクトラム拡散 (DRSS) は、スペクトル放射を複数の周波数帯域へ拡散する特化型設計のデジタル・アルゴリズムを使用し、それらの帯域間で性能のトレードオフが発生しません。

**目次**

1 はじめに.....	2
2 スペクトラム拡散のレビュー.....	3
2.1 スペクトラム拡散の目的.....	3
2.2 定義.....	4
2.3 最適化とトレードオフ.....	4
3 アナログと疑似ランダム的手法.....	5
3.1 適応型ランダム・スペクトラム拡散.....	5
3.2 デュアル・ランダム・スペクトラム拡散.....	6
4 まとめ.....	6
5 関連資料.....	7
6 改訂履歴.....	7

**商標**

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 はじめに

スペクトラム拡散手法 (または「ディザリング」) は、さまざまなアプリケーションで長年にわたって使用され、無線や有線の通信でも使用されてきた歴史があります。スイッチング・レギュレータでは、スペクトラム拡散を使用して、基本スイッチング周波数とその高調波の両方で、固定周波数スイッチングによって生成される EMI の影響を低減できます [1]。この EMI は、放射放出と伝導放出という両方の形で表面化する可能性があり、どちらにも対処することが重要です。このアプリケーション・ノートでは、車載用アプリケーションで、対象の主な周波数が CISPR-25 伝導 EMI テスト規格に準拠しているとき、スペクトラム拡散を最適化することに重点を置いています [2]。ただし、ここで説明する方法は、他のテスト規格にも応用できます。

スペクトラム拡散を最適化するとき、最大の課題の 1 つは、複数の周波数帯域で適切に動作するソリューションを見つけることです。ほとんどの変調方式は 1 つの帯域で優れた性能を発揮する一方で、他の帯域では欠点があります [1]。これは、業界標準の EMI テストでは、周波数帯域ごとに異なるスペクトラム・アナライザ RBW 設定が要求されることと、その RBW がディザリング性能に大きな影響を及ぼすことによるものです [3]。このアプリケーション・ノートでは、新しいデジタル・スペクトラム拡散方式である DRSS を紹介します。DRSS は、車載の伝導 EMI テストに使用される高 (120kHz) と低 (9kHz) の両方の CISPR-25 RBW で適切に動作します [4]。この方式は、電流モード、プログラマブル周波数、非同期整流、昇圧 / SEPIC / フライバック・コントローラおよびコンバータである LM5156x(-Q1) と LM5157x(-Q1) の両方で使用されています。

スペクトラム拡散の最適化時に直面するトレードオフについて、 $f_c$ 、 $\Delta f_c$ 、 $f_m$ 、 $m$  などの一般的なスペクトラム拡散設計パラメータを使用して解説し、RBW フィルタの時間領域の影響について説明します。このアプリケーション・ノートの大部分は、電流技法とスペクトラム拡散理論のレビューを中心にしています。これは意図的なものです。DRSS の価値を理解するには、どのようなトレードオフのバランスが必要かを理解することが最も重要であるためです。

## 2 スペクトラム拡散のレビュー

### 2.1 スペクトラム拡散の目的

スペクトラム拡散の背後にある基本原理は、狭帯域信号を広帯域信号に変換し、EMI の影響を低減することです。これにより、エネルギーは複数の周波数に分散されます。スイッチング・レギュレータの場合、これはスイッチング周波数を設定する発振器を操作することで行い、ほとんどのスイッチ・モード電源トポロジ (降圧、昇圧など) で実行できます。エネルギー保存則から、合計エネルギーは常に一定ですが、エネルギーを複数の周波数帯域に分散することで、エネルギーのピークを最小限に抑えられます。結果として、付近にある敏感な回路 (以後「ビクティム」と呼びます) は、干渉による揺動を受けにくくなります。時間の経過に応じてクロック周波数を操作すると、スイッチャによって生成されるエネルギーがどのように拡散できるかを、[図 2-1](#) に示します。

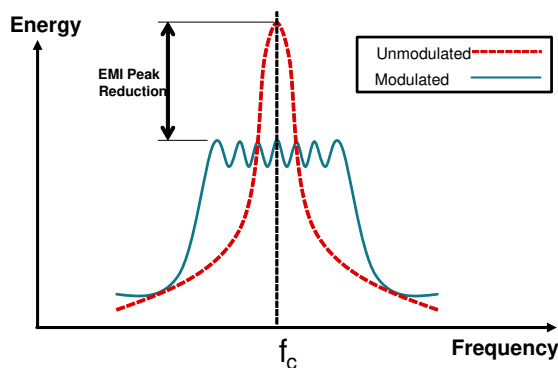


図 2-1. スペクトラム拡散と周波数変調による EMI 低減

## 2.2 定義

周波数変調を使用してスペクトラム拡散を実現する方法は、FM 無線送信と同様で、搬送波周波数の変調を使用して信号を転送します。スペクトラム拡散では信号を送信しませんが、FM 無線送信と共通の用語が使用されます。

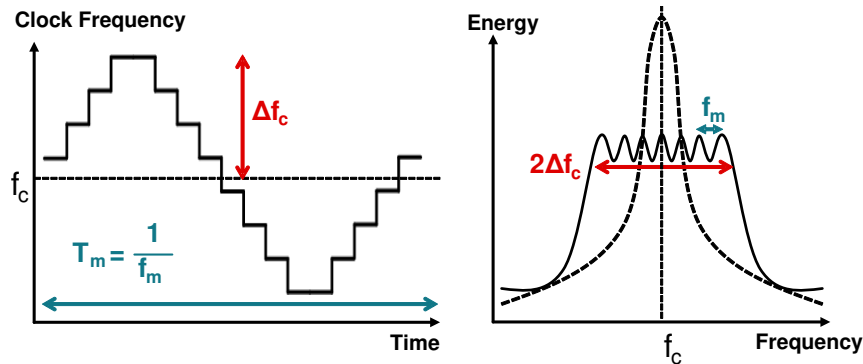


図 2-2. 時間領域 (左) と周波数領域 (右) における三角波変調

図 2-2 (左) は、三角波タイプのスペクトラム拡散の例で、クロック周波数が時間の関数としてプロットされています。結果として得られる基本のスペクトラム・プロットを図 2-2 (右) に示します。時間領域は、変調波形の 1 サイクル分を示します。ここで、 $f_c$  は変調されていない発振器 (キャリア) の周波数、 $f_m$  は変調周波数、 $\Delta f_c$  はスイッチング周波数が  $f_c$  から離れる距離です。図 2-2 (左) に示す波形は離散化されていますが、必ずしもデジタル・ディザリングであるとは限りません。スイッチング・レギュレータのクロック周波数は、スイッチング・サイクルごとに 1 回しか更新できないため、変調方式に関係なく、周波数と時間の波形は離散的にする必要があります。三角波変調のプロファイルは、多くのアナログ・ディザリング・プロファイルの 1 つにすぎませんが、生成が容易で、性能も優れているため、非常に一般的です [1]。この理由から、このアプリケーション・ノートでは、他の種類のアナログ・ディザリング・プロファイルは分析されません。

## 2.3 最適化とトレードオフ

スペクトラム拡散を最適化するとき、最も重要な係数は変調インデックス  $m$  で、 $\Delta f_c/f_m$  と定義されます [3]。一般に、この数値が大きいくほど、基本周波数でのエネルギーが低減されます。 $\Delta f_c$  を増やすと、エネルギーが追加の周波数に拡散します。また、 $f_m$  を減らすと、カーソン帯域幅である  $2\Delta f_c$  内に追加の周波数成分が発生するため、基本周波数のエネルギーが減少します [1]。ただし、 $\Delta f_c$  と  $f_m$  はいずれも制限があります。 $\Delta f_c$  の場合、時間領域と周波数領域の両方に制限があります。時間領域では、 $\Delta f_c$  が大きいと出力リップルが増加し、インダクタの電流リップルも大きく変動する可能性があります。周波数領域では、 $\Delta f_c$  が大きすぎると、望ましくない帯域にエネルギーが拡散され始めることがあります。

数学的な観点では、 $f_m$  を減らすと、エネルギーは常に削減されます。しかし、RBW フィルタの時間ベースの効果には別の制限があります。RBW フィルタにはセトリング・タイムがあり、その長さはフィルタの帯域幅に反比例します [3]。このフィルタが安定していれば、スペクトラム・アナライザのピーク検出器は、変調されていない信号と等しいエネルギーを検出します。一方、RBW フィルタのセトリング・タイムと比べて非常に高速な変調を行うと、フィルタが反応できないため、ピーク・エネルギーは減衰しません。これは、変調が有用になるには、フィルタの帯域幅の外で十分な時間が経過する必要があるということです。この概念を、図 2-3 に示します。この図では、RBW フィルタに入るときと出るときに、有限のセトリング・タイムが存在することが示されています。理論的な観点では  $f_m$  を小さくする方が望ましいのですが、この制限が存在するため、通常は  $f_m$  を RBW とほぼ等しい値にします。スペクトラム拡散を最適化するには、理論的な観点と時間ベースのフィルタの観点の両方で変調周波数を分析することが重要です。

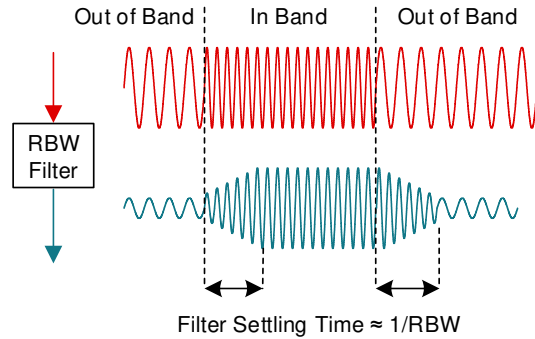


図 2-3. RBW フィルタのセリング・タイムの影響

システムの周波数 ( $f_c$ ) が減少すると、スペクトラム拡散 / ディザリングによって実現できる最高の性能が低下することに注意してください。これは単に、低い周波数では  $\Delta f_c$  がシステムの制約によって制限され、スペクトラム拡散のピーク低減は  $10\log(RBW/2\Delta f_c)$  を上回れないためです [3]。

### 3 アナログと疑似ランダムの手法

三角波アナログ・ディザリングは、9kHz の RBW 要件がある 150kHz~30MHz の範囲の CISPR-25 帯域で優れた性能を発揮する一般的な手法です [4]。この帯域では広い  $\Delta f_c$  を簡単に実現でき、 $f_m$  を RBW とほぼ等しい値に設定できるため、この方法が優れた性能を発揮します。残念ながら、この周波数は可聴範囲内に存在するため、アナログ・ディザリングが可聴範囲外になるよう注意する必要があります。変調周波数が 9kHz のままである場合、120kHz の RBW 要件がある 30MHz~108MHz の高周波数帯域での性能は最適なものではありません。120kHz の RBW 要件 [4] がある高い周波数帯域では、疑似ランダム・スペクトラム拡散 (PRSS) を使用するのが一般的なソリューションです [1]。この変調方式では、スイッチング・サイクルごとに周波数が疑似ランダムに変更され、120kHz RBW に近い高速な変調が行われます。疑似ランダム・シーケンスは頻繁に繰り返されないため、理論的な観点では  $f_m$  が大幅に低減され、EMI と可聴性能の両方が向上します。PRSS は高 RBW では良好に動作しますが、高速変調で RBW フィルタを十分に長い時間離れることができないため、低 RBW では問題が発生します。第 2 に、出力リップルに関連する懸念があるため、 $\Delta f_c$  を小さく保つ必要があります。これはステップ・サイズの制限により緩和できますが、ランダム分布の変化によって性能が低下します。

#### 3.1 適応型ランダム・スペクトラム拡散

デジタル・スペクトラム拡散テクノロジーの最近の進歩は、適応型ランダム・スペクトラム拡散 (ARSS) と呼ばれる手法です。ARSS の基本原理は、変調周波数  $f_m$  を取得し、すべてのランプの終了時にランダムに変化させることです。この目的は、固定周波数でのディザリングに伴う可聴トーンを低減することです。図 3-1 は、スペクトル・アナライザで伝導放射を調べると、10kHz トーンがどれだけ減少し、拡散しているかを示しています。ラボでは、可聴周波数範囲の低減は定性的に観察されましたが、定量的には測定されていません。基本周波数での性能は、アナログ・ディザリングとほぼ同じです。RBW 以外のトーンは、RBW の観点からは性能を低下させますが、これは疑似ランダム・シーケンスの非常に低い期間から発生する理論的性能の改善によって相殺されます。

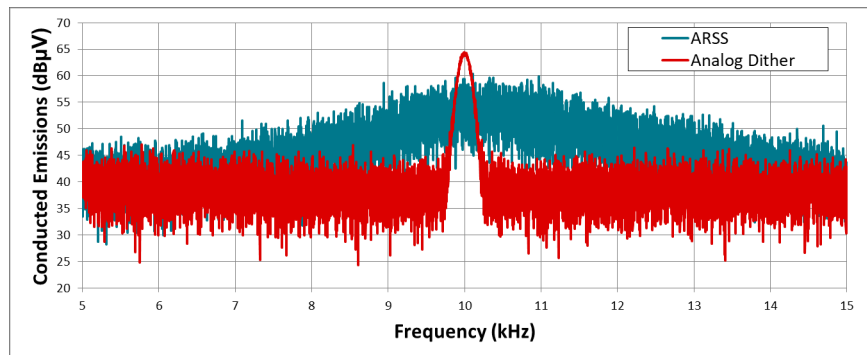


図 3-1. ARSS は、10kHz のトーンを拡散することで可聴ノイズを改善する

残念ながら、有限ステップ・サイズのデジタル三角波変調方式では、代償として高周波帯域の性能が悪化します。発振器の周波数に対する変更はデジタルに実装されるため、スイッチャは多くのサイクルにわたって同じ周波数で動作できま

す。高い RBW では、低速な移動変調による時間ベースの効果があり、複数の帯域に周波数を拡散しますが、ピークのエネルギーは減少せず、これはスペクトラム拡散の目標に反しています。

### 3.2 デュアル・ランダム・スペクトラム拡散

RBW が高いときに ARSS で起きる問題を解決する方法は、三角波プロファイルの上に疑似ランダムのサイクル単位ディザリングを追加することです。この疑似ランダム変調により、120kHz RBW に対して十分に高速な変調が行われるため、高い周波数での性能が向上します。低い周波数と低 RBW の場合も、三角波変調のエンベロープでは、ARSS の低  $f_m$  という利点を引き続き実現できます。両方に同時に対処することで、低 RBW と高 RBW の間のトレードオフを排除できます。この機能を時間領域に実装する方法を、図 3-2 に示します。RBW は時間領域でウィンドウ関数として表され、離散フーリエ変換理論と一致します。この理論では、周波数ビンのサイズはウィンドウのサイズによって設定されます。

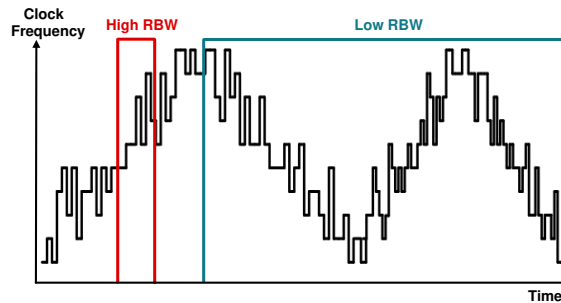


図 3-2. DRSS の時間領域での実装

LM5156 デバイスを使用し、2.2MHz で動作する非同期昇圧コンバータで、DRSS をイネーブルにする前と後の伝導放射を、図 3-3 に示します。30MHz に不連続があるのは、RBW が 9kHz から 120kHz に変化するためです。CISPR-25 の低周波数帯域では、DRSS でピークが 10~15dB 低減します。CISPR-25 の高周波数帯域では、DRSS でピークが 5~7dB 低減します。

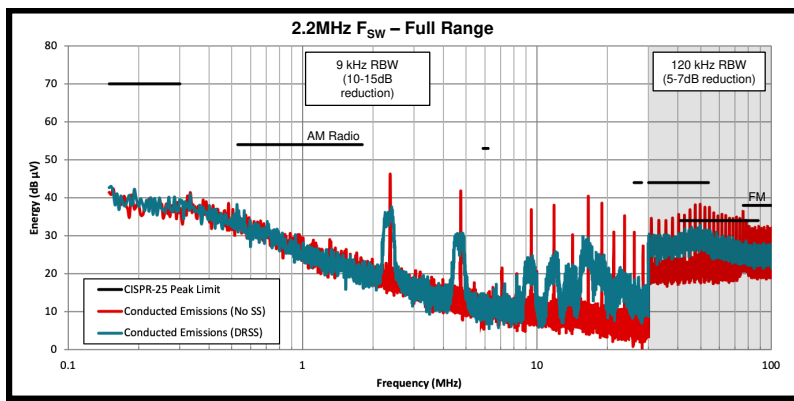


図 3-3. DRSS による伝導 EMI の低減 (LM5156、2.2MHz でのスイッチング)

LM5156 では、DRSS は  $\Delta f_C$  が  $f_C \times 5.5\%$ 、 $\Delta f_{PRSS}$  が  $f_C \times 2.3\%$ 、 $f_m$  は 10kHz~16kHz の範囲のランダム化で実装されています。これらの値は、ピーク EMI の低減と、時間領域でのレギュレータ性能との間でバランスを適切に保つよう選択されています。出力リップルはスイッチング・レギュレータにとって重要な検討事項なので、DRSS などのスペクトラム拡散方式を実装するときは注意する必要があります。電流モードのレギュレータでは、発振器の周波数に反比例する方法でスロープ補償ランプを変調すると、出力リップルを大幅に改善できます。この方法は、スペクトラム拡散変調で、インダクタが励起を開始する時間を操作しても、平均インダクタ電流を維持する効果があります。

## 4 まとめ

このアプリケーション・ノートでは、スペクトラム拡散の理論、手法、トレードオフについて触れるとともに、分解能帯域幅が異なる複数の周波数帯域でスイッチング・レギュレータのスペクトラム拡散性能を向上させる、新しいデジタル手法について説明しました。新しいデジタル・スペクトラム拡散方式である DRSS は、ランダムに変化する三角波プロファイルに、疑似ランダムなサイクル単位のディザリングを追加することにより、複数の周波数帯域でピーク EMI を効果的に最小化します。



## 5 関連資料

- [1] Rice, John, Dirk Gehrke, Mike Segal. 『ノイズ拡散手法とそのスイッチモード電源アプリケーションへの影響について』、テキサス・インスツルメンツの電源設計セミナー SEM1800、2008 年。
- [2] Timothy Hegarty. 『DC-DC コンバータの EMI についてのエンジニア向けガイド (第 1 部): 標準の要件と測定の技法』、How2Power Today、2017 年 12 月。
- [3] Pareschi, F., Rovatti, R., Setti, G. 『DC/DC コンバータのスペクトラム拡散による EMI 低減: 最新の最適化とトレードオフ』、IEEE Access.2015、3、2857-2874。
- [4] CISPR 25:2016、第 4 版 (または EN 55025:2017)、『車両、船舶、内燃エンジン - 無線揺動特性 - オンボード・レシーバ保護のための制限と測定方法』。

## 6 改訂履歴

Changes from Revision * ( June 2020) to Revision A (November 2022)	Page
• 文書全体にわたって表、図、相互参照の採番方法を更新.....	1

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated