

Application Note
三角波スペクトラム拡散回路の設計



Gary Liu, Feng Ji

概要

スペクトラム拡散は、PWM コントローラの周波数プログラミング ピンに三角波摂動電流を注入することで実装できます。このアプリケーション ノートでは、特定のスペクトラム拡散ターゲットを満たすために、方形波からこの三角波電流を導出する方法を紹介します。LM5171 評価基板 (LM5171EVM-BIDIR) をリファレンスとして使用すると、設計例が付属しています。非安定マルチバイブレータ回路を分析し、マイコンレス アプリケーション向けの方形波を生成します。提案手法はシミュレーションにより検証され、ベンチ結果によって検証されます。

目次

1 概要.....	2
2 方形波からのスペクトラム拡散.....	3
3 LM5171EVM-BIDIR をベースとしたスペクトラム拡散の結果.....	7
4 まとめ.....	10
5 参考資料.....	10

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 概要

スペクトラム拡散手法は、「変調」または「ディザリング」と呼ばれることが多く、電磁干渉 (EMI) を軽減するために DC/DC コンバータに広く実装されています。この方法は、狭帯域信号を広帯域信号に変換し、より広い周波数スペクトルにわたってエネルギーを分配することによって動作します。その結果、図 1-1 に示すように、この再分配によってピーク エネルギーレベルが大幅に低下します。[1]

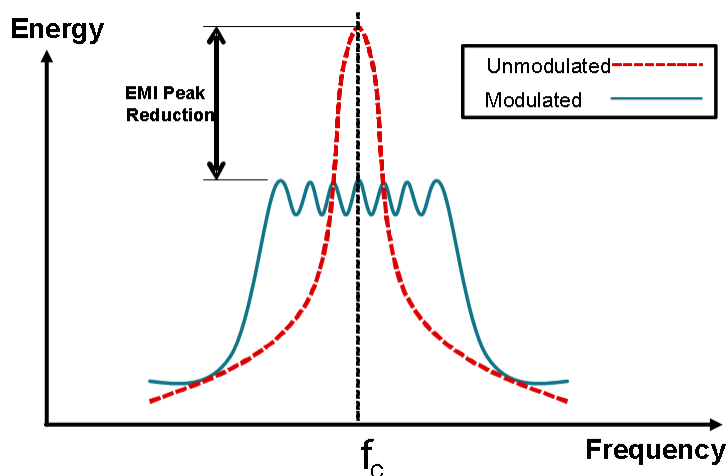


図 1-1. スペクトラム拡散による EMI 低減

図 1-2 に、時間ドメイン (左) と周波数ドメイン (右) の両方の三角波変調を示します。左側の時間ドメイン プロットは 1 つの変調サイクルを示しており、クロック周波数が時間に対してプロットされています。このプロットでは、 f_c は変調されていない発振器の周波数、 f_m は変調周波数、 Δf_c は中心からの周波数偏差を示します。右側に、この変調に起因する基本周波数の対応するスペクトル分布を示します。

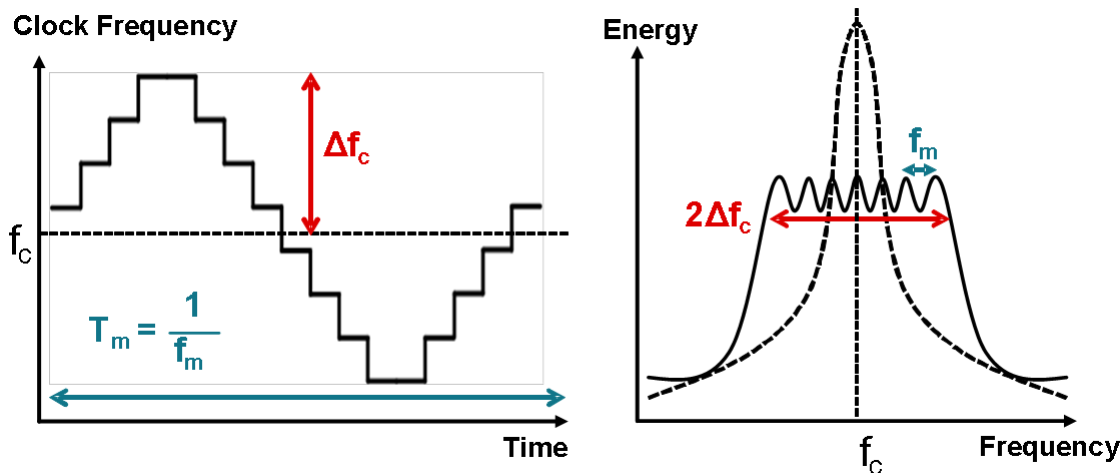


図 1-2. 時間領域 (左) と周波数領域 (右) における三角波変調

図 1-2 (左) に示す波形は離散化されていますが、これはデジタル ディザリングを意味するものではありません。どのスイッチングレギュレータでも、クロック周波数はスイッチングサイクルごとに 1 回しか更新できません。したがって、変調方式がアナログとデジタルのどちらであっても、周波数は本質的にディスクリートです。

このアプリケーション ノートは、簡潔性と実績のある性能を重視して選定された三角波変調に注目します [2]。

Δf_c および f_m は、スペクトラム拡散を実行する際の重要なパラメータです。 Δf_c と f_m を選択するときは、複数のターゲット間のトレードオフを考慮する必要があります。

次によって制限される EMI を低減するために Δf_c を最大化します

- 互いに重なる高調波
- 望ましくない帯域への拡散
- 電流または電圧のリプル
- f_m を解像度の帯域幅 (RBW) に近づける
- f_m は制御ループ帯域幅よりも低く保つ
- 可能なら、 f_m は可聴帯域から離して配置する

標準的な場合、 Δf_c は f_c の $\pm 4\% \sim \pm 10\%$ として選択し、 f_m は 4kHz ~ 15kHz の範囲で選択できます (RBW = 9kHz の場合)。

通常、スペクトラム拡散を実装するには 2 つの方式があります。例として LM5171 を使用します。

• SYNCI ピン方式

内部 PLL は、SYNCI ピンに印加された外部周波数変調クロックにロックします。この方法は、公称スイッチング周波数で最大 $\pm 20\%$ のディザリング範囲をサポートしますが、マイコンが周波数変調クロックを連続的に出力する必要があるため、ファームウェアの複雑性が増します。

• OSC ピン方式

スイッチング周波数は、OSC ピンから流れ出る電流によって決定されます。OSC ピンに小さな三角波電流摂動を注入し、スイッチング周波数を変調します。これに必要なのは、アクティブ周波数変調ではなく、低周波数の方形波のみです。ファームウェアの複雑さは大幅に緩和されます。

このアプリケーション ノートでは、OSC 手法に焦点を当てます。

2 方形波からのスペクトラム拡散

図 2-1 に示すように、外付け抵抗 (R_{OSC}) により、定常状態の発振器電流が設定されます。OSC ピンは、内部的に V_{OSC} にレギュレートされます。外部の方形波 ($0V \sim V_{SQ}$) から R_f を印加すると、 C_f の両端に三角波の電圧が生成されます。その後、この電圧により、 R_m 経由で対応する三角波電流が生成されます。

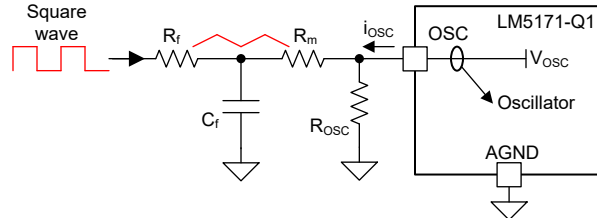


図 2-1. 方形波からのスペクトラム拡散

発振器の周波数は、OSC ピンからの電流 (i_{osc}) に比例します。

具体的には、スペクトラム拡散がない場合 (R_m がオープンのままになる場合など)、発振器周波数 f_{osc} は次の式で与えられます。

$$f_{osc} = 4.15 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{A}} \cdot \frac{V_{OSC}}{R_{OSC}} \quad (1)$$

$R_f \ll R_m$ を選択することで、 C_f の平均電圧は $V_{SQ}/2$ 程度になります。 F_C は次のようになります。

$$f_c = 4.15 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{A}} \cdot \left(\frac{V_{OSC}}{R_{OSC}} + \frac{V_{OSC} - \frac{V_{SQ}}{2}}{R_m} \right) \quad (2)$$

線形周波数変調を実現するには、 R_f と C_f を次のように選択します。

$$R_f C_f \geq \frac{1}{f_m} \quad (3)$$

C_f のピーク ツー ピーク電圧は、

$$\Delta V_{Cf} \approx \frac{V_{SQ}}{4 \cdot f_m \cdot R_f \cdot C_f} \quad (4)$$

Δf_C は、次のように求められます。

$$\Delta f_C = 4.15 \times 10^9 \frac{\text{Hz}}{\text{A}} \cdot \frac{V_{SQ}}{8 \cdot f_m \cdot R_f \cdot C_f \cdot R_m} \quad (5)$$

式 2 に示すように、通常は、 $\frac{V_{OSC} - \frac{V_{SQ}}{2}}{R_m} \ll \frac{V_{OSC}}{R_{OSC}}$ です。ここで、 f_C は f_{OSC} として近似できます。 f_C を f_{OSC} で代入し、式 5 と 式 1 を適用すると、 $\Delta f_C / f_C$ は次のように求められます。

$$\frac{\Delta f_C}{f_C} \approx \frac{1}{8} \cdot \frac{R_{OSC}}{V_{OSC}} \cdot \frac{V_{SQ}}{f_m \cdot R_f \cdot C_f \cdot R_m} \quad (6)$$

LM5171EVM-BIDIR をベースとするスペクトラム拡散の例

LM5171EVM-BIDIR では、 $V_{OSC} = 1\text{V}$ 、 $R_{OSC} = 38.3\text{k}\Omega$ です。方形波の振幅は、 $V_{SQ} = 2.5\text{V}$ です。

LM5171EVM-BIDIR クロスオーバー周波数よりも低い変調周波数 f_m を選択します。ここでは、 $f_m = 1\text{kHz}$ を選択します。この場合、 $\Delta f_C / f_C = 7\%$ を選択します。

式 3 に基づいて、次を選択します。

$$R_f C_f = \frac{1}{f_m} \quad (7)$$

式 4 と 式 6 は次のように簡略化できます。

$$\Delta V_{Cf} = \frac{V_{SQ}}{4} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta f_C}{f_C} = \frac{1}{8} \cdot \frac{R_{OSC}}{V_{OSC}} \cdot \frac{V_{SQ}}{R_m} \quad (9)$$

式 7 に基づいて $C_f = 100\text{nF}$ を選択すると、 $R_f = 10\text{k}\Omega$ が得られます。

式 9 から、 $R_m = 171\text{k}\Omega$ が得られます。

非安定型マルチバイブレータを使用して方形波を生成

マイコンを使用して方形波を生成するのは簡明です。マイコンレス アプリケーションでは、非安定マルチバイブレータ回路を使用して効果的な代替手段を実現します。図 2-2 に示すように、コンパレータ出力で方形波が生成されます。

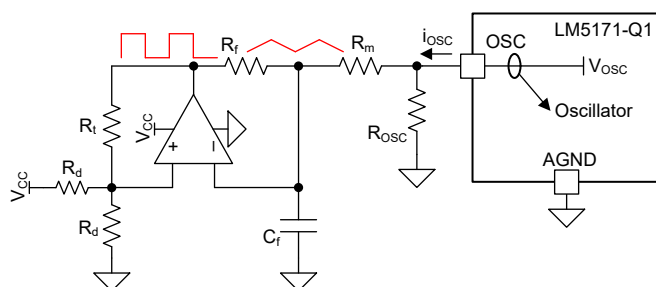


図 2-2. 安定型マルチバイブレータによるスペクトラム拡散

このアプリケーションでは、レール ツー レール入力、プッシュプル出力コンパレータを推奨します。レール ツー レール入出力のオペアンプを使用する場合は、過負荷復帰時間を確認してください。

線形周波数変調を実現するには、低い ΔV_{Cf} を選択します。ここで $\Delta V_{Cf} = \frac{V_{CC}}{4}$ を選択し、式 7 および 式 9 を使用して、 R_f 、 C_f 、 R_m を計算できます。

2 つの R_d と R_t により、 C_{fa} のピーク電圧とバレー電圧が決まります。

C_f のピーク ツー ピーク電圧は、次のように記述できます。

$$\Delta V_{Cf} = \frac{R_d}{R_d + 2R_t} \cdot V_{CC} \quad (10)$$

$\Delta V_{Cf} = \frac{V_{CC}}{4}$ を 式 10 の歩留まりに入れます。

$$R_t = 1.5 \cdot R_d \quad (11)$$

同じスペクトラム拡散仕様と $V_{CC} = 2.5V$ から、 $C_f = 100nF$ 、 $R_f = 10k\Omega$ 、 $R_m = 171k\Omega$ が得られます。 $R_d = 20k\Omega$ を選択すると、式 11 は $R_t = 30k\Omega$ となります。

図 2-3 に、パラメータに基づく TINA の回路図を示します。シミュレーションでは、過負荷復帰時間である $0.85\mu s$ を持つ、低コストの TLV9002 を選択しています。

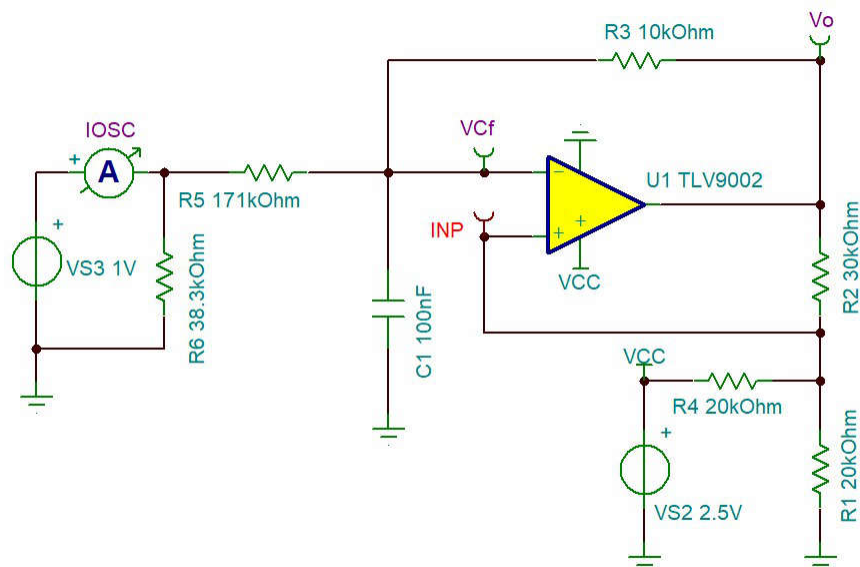


図 2-3. TLV9002 を使用した安定型マルチバイブレータの回路図

図 2-4 にシミュレーション結果を示します。

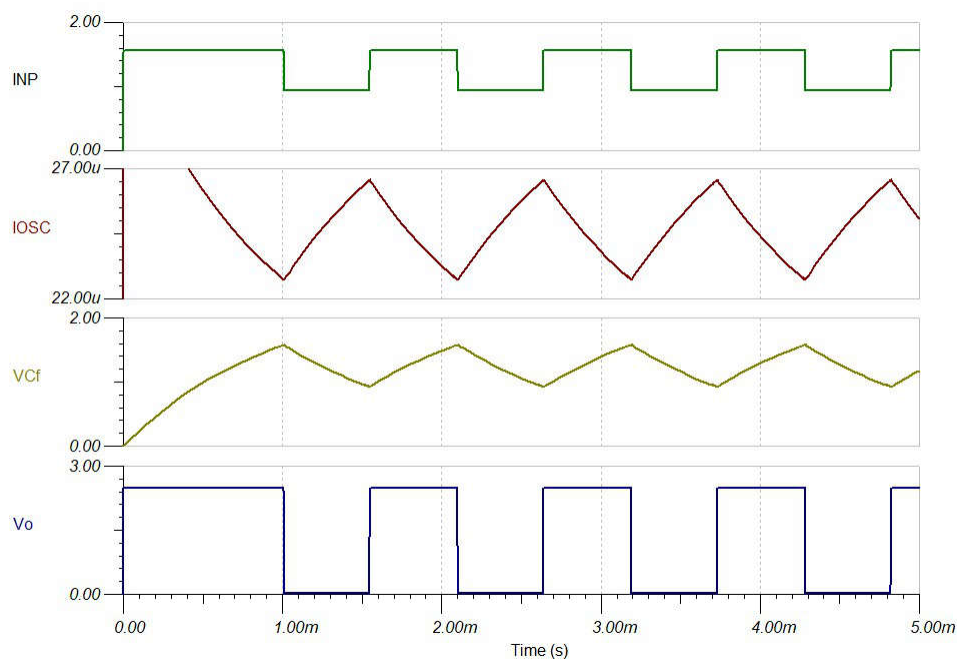


図 2-4. TLV9002 を使用した安定型マルチパイプレータのシミュレーション結果

3 LM5171EVM-BIDIR をベースとしたスペクトラム拡散の結果

この評価基板は、 $V_{out} = 14.5V$ で降圧モードに構成されています。詳細については、LM5171 評価基板ユーザーガイド [3] セクション、『2.4.1 降圧モード、電圧レギュレーション付き』を参照してください。負荷電流は 20A です。

LM5171EVM-BIDIR では、 $R_{osc}(R16) = 38.3k\Omega$ 、 $R_f(R18) = 10k\Omega$ 、 $C_f(C14) = 100nF$ です。印加される方形波は、 $V_{SQ} = 2.5V$ および $f_m = 1kHz$ です。

スペクトラム拡散が適用されていない場合 (R_m がオープンのまま)、出力電圧リップルとスイッチング周波数を図 3-1 に示します。

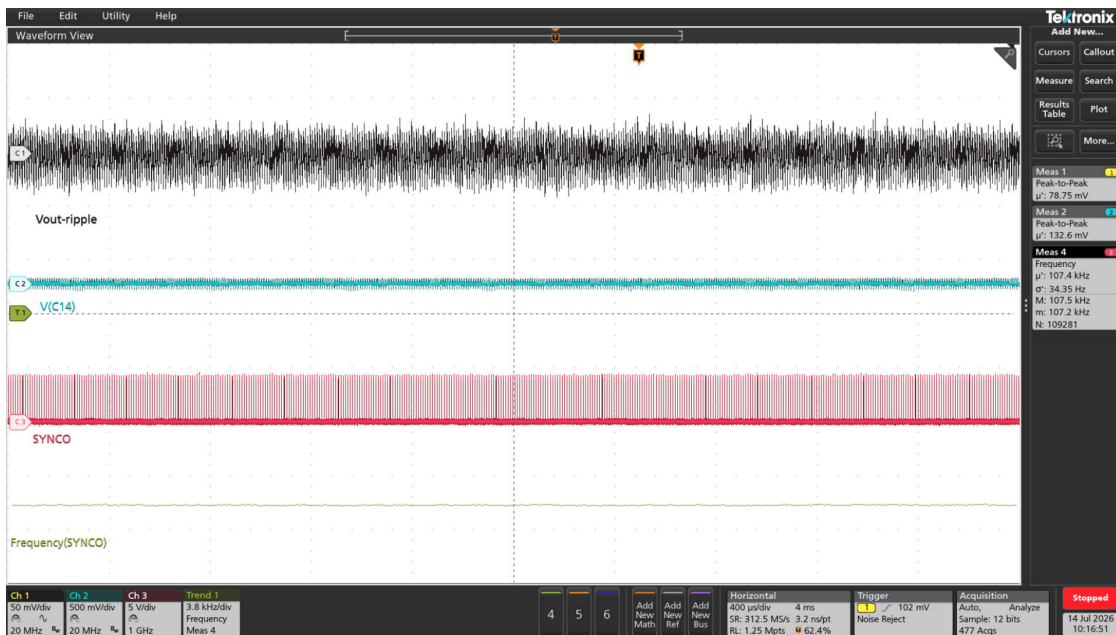


図 3-1. スペクトラム拡散なしでの出力電圧リップルとスイッチング周波数

理論的なスイッチング周波数は 108.4kHz と計算されますが、ベンチ テストの結果から 107.4kHz の値はわずかに小さくなります。式 1 に基づいて、 $R_{osc} = 38.64k\Omega$ と判断できます。以下の計算では、 $f_{osc} = 107.4kHz$ の測定スイッチング周波数と一致するように、この値を使っています。

R_m が 374k Ω の場合のテスト波形を図 3-2 に示します。

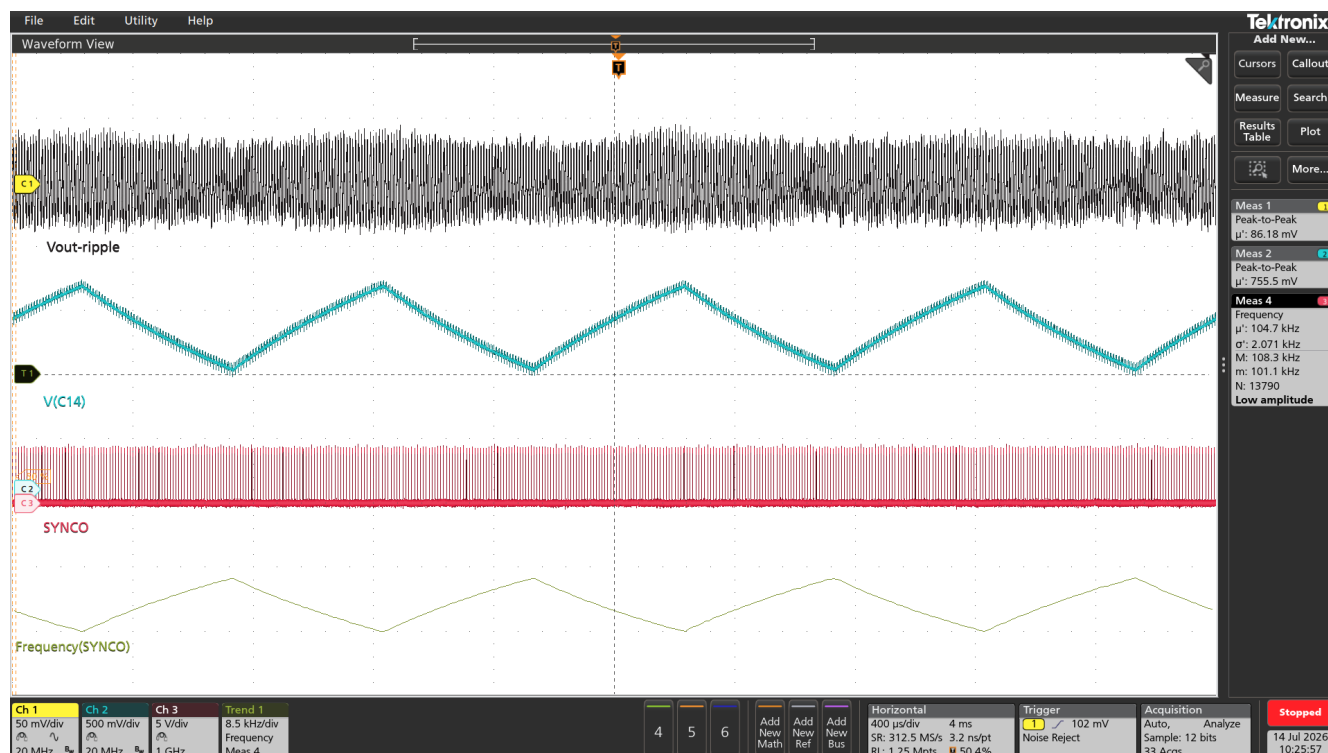


図 3-2. 出力電圧リップルとスイッチング周波数 ($R_m = 374k\Omega$)

最大スイッチング周波数は 108.3kHz であり、最小スイッチング周波数は 101.1kHz です。 $\Delta f_c/f_{osc}$ と f_c についての計算結果と測定結果を表 3-1 に比較します。

表 3-1. 計算結果と測定結果との関係 ($R_m = 374k\Omega$)

	$\Delta f_c/f_{osc}$	f_c
計算結果	3.2%	104.6kHz
測定結果	3.4%	104.7kHz

R_m が 182k Ω の場合のテスト波形を図 3-3 に示します。

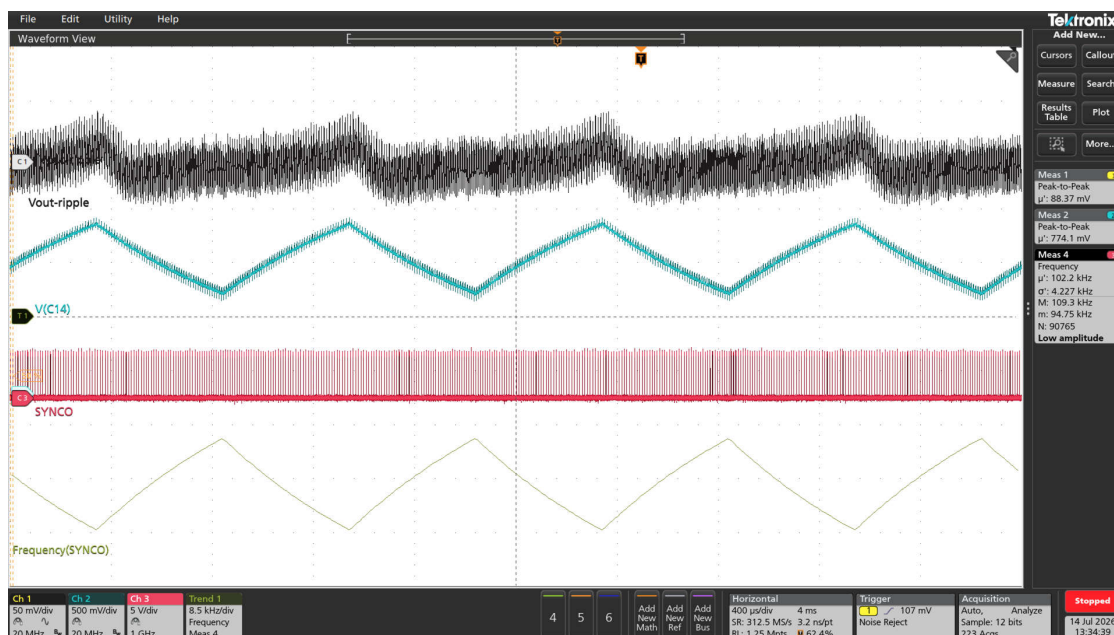


図 3-3. 出力電圧リップルとスイッチング周波数 ($R_m = 182k\Omega$)

最大スイッチング周波数は 109.3kHz であり、最小スイッチング周波数は 94.75kHz です。 $\Delta f_c/f_{osc}$ と f_c についての計算結果と測定結果を表 3-2 に比較します。

表 3-2. 計算結果と測定結果との関係 ($R_m = 182k\Omega$)

	$\Delta f_c/f_{osc}$	f_c
計算結果	6.6%	101.7kHz
測定結果	6.8%	102.2kHz

上記の測定結果から、次のことがわかります。

- 計算結果と実測結果は一致しています。
- 図 3-3 に示すように、スペクトラム拡散によって生じる出力電圧リップルが大きくなります。

4 まとめ

このアプリケーション ノートでは、周波数プログラミング ピンに三角波の摂動電流を注入することによるスペクトラム拡散について解説します。これに必要なのは、アクティブ周波数変調ではなく、低周波数の方形波のみです。RC フィルタと注入抵抗の設計を提示します。LM5171EVM-BIDIR をベースとする、実用的な設計例を提示します。さらに、マイコンレス アプリケーション向けに、シンプルな非安定マルチバイブレータ回路を提案します。提案手法を実験的ベンチテスト結果で検証しました。

5 参考資料

- テキサス インスツルメンツ、『[EMI 低減手法、デュアル ランダム スペクトラム拡散](#)』、アプリケーション ノート
- テキサス インスツルメンツ、[スイッチング電源アプリケーションにおけるノイズ分散技術とその効果](#)、セミナー。
- テキサス インスツルメンツ、『[LM5171 評価基板ユーザー ガイド](#)』、ユーザー ガイド。

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みいかなる保証も、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、TI は一切の責任を拒否します。

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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月