

自動車のコックピット・アプリケーションにおけるスイッチ・モード電源の電磁気放射の削減

FPGA (Field Programmable Gate Arrays) を使用した擬似ランダム拡散スペクトル変調の実装



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

TECHNICAL NOTE

はじめに

自動車設計の中心にあるのは、伝導および放射される妨害波と感受性を最小化することで、電磁環境適合性(EMC)の制限に合格するための要件を満たすことです。現在ではスイッチ・モード電源(SMPS)がごく一般的に使用されていますが、この電源は電磁波放射の主要な発生源でもあります。このような放射を最小化することは、SMPS設計の主要な目標の1つです。この目標を達成するために、拡散スペクトル手法が一般的に採用されるようになっていますが、擬似ランダム拡散スペクトル変調などより複雑な手法は、放射に関する最大の向上を達成できる可能性があります。SMPS用の一部の集積回路(IC)には拡散スペクトル機能が内蔵されていますが、多くのICはそれに該当しません。拡散スペクトル手法を実装するために、FPGA (Field Programmable Gate Array) を使用し、FPGAのリソースに対する負荷を最小限に抑えることができます。

多くの車載オーディオ/ビジュアル・システムは、システムの主要部品としてFPGAを活用しています。システム全体の方針を決定する最初の段階では、多くの場合、電源設計は主要な懸案ではありません。ただし、電源設計とFPGAシステム・リソースをある程度詳細に考慮すると、FPGAを使用して電源の電磁波放射を最小化することができ、その結果、EMCの制限に合格するために費やす対策コストと時間を削減できます。このアプローチでは、FPGAの1本のI/Oピンと、同期(SYNC)ピンを持つ、互換性のあるSMPS ICが必要です。

スイッチ・モード電源

「バック」または「ステップダウン」型のSMPSは、より高い電圧を、より低い電圧に変換するもので、入力電圧と出力電圧の比をデューティ・サイクルDと呼びます。目標は、入力電圧の変動に応じてデューティ・サイクルを変化させ、出力電圧を固定値に安定化することです。インダクタを貫通する電流が連続である限り(連続導通モード、CCM)、DC伝送条件(1)は維持されます。

$$V_{OUT} = V_{IN} \times D \quad (eq. 1)$$

Figure 1を参照すると、メイン・スイッチ Q_1 が閉じている場合、DC電圧源からインダクタLを充電するための電流パスが提供されます。固定的なDC電圧源が印加されている間、インダクタ電流は直線的に増加します。出力電圧が目標レベルに達した時点で、メイン・スイッチはオープンになります。インダクタを貫通する電流は瞬時に変化することはできないので、インダクタ両端の電圧は逆電圧になります。ダイオード D_1 には逆バイアスが発生し、自己転流し、インダクタ電流はグラウンドに向かって流れます。コンデンサ C_0 はインダクタ電圧をフィルタし、リップル電圧を制限します。リップル電圧は出力電圧のピーク・ツー・ピーク変動であり、負荷 R_L の両端で観測されます。

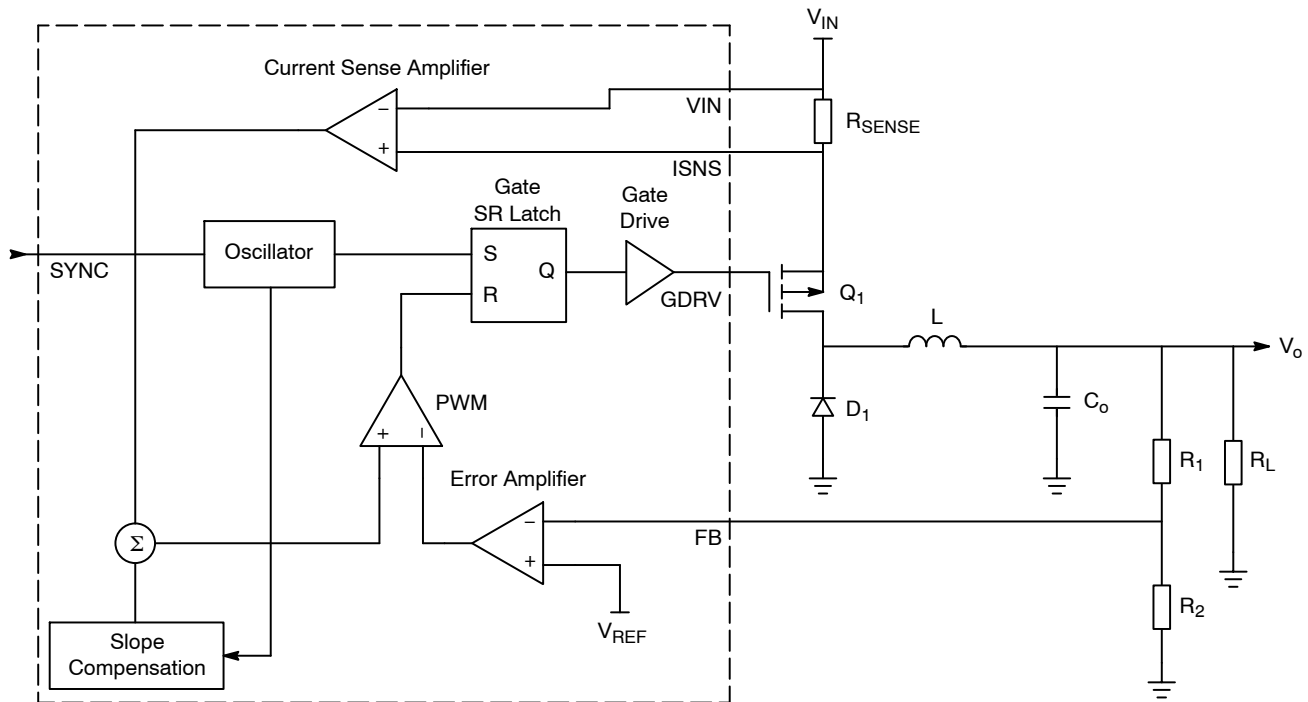


Figure 1. Current Mode Control “Buck” Switched Mode Power Supply

SMPS ICのSYNCピンにより、外部信号を使用して内部発振器を制御できます。通常は、印加される信号と同じ周波数を持つ、内部レベルにシフトされた信号を使用して内部発振器をバイパスする手法を使用します。IC製造業者は、形状、周波数、デューティ、および電圧振幅を通じて信号の波形に制限を課します。SYNCピンを使用することで、直前の周期の終了時点でのみ次の周期に切り替わることが保証され、その結果、正確なデューティ・サイクル制御が保証され、出力電圧リップルが制限されます。

拡散スペクトル

周波数変調(FM)は、変調信号に比例して搬送波信号の周波数を変調するプロセスとして説明できます。

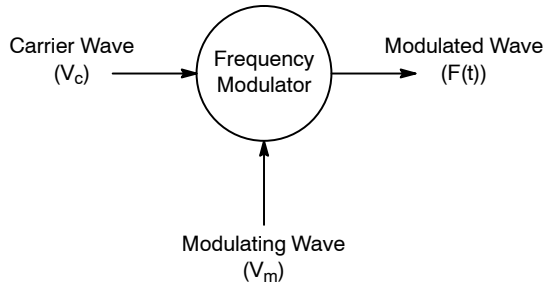


Figure 2. The Frequency Modulation Plant

変調器が生成する出力信号の瞬間的な周波数は、搬送波の定常周波数と、変調波の振幅に比例する時間変動性の成分に直接的に比例します。正弦波の波形を表す式を(2)に示します。

$$F(t) = A \sin(\omega \cdot t + \phi) \tag{eq. 2}$$

- ここで、
- A = 振幅
- ω = 角周波数
- t = 時間
- ϕ = 位相角

スペクトル拡散

電力スペクトル密度(PSD)は、周波数の関数として信号の電力を表す測定値です。非変調正弦波のPSDを、周波数変調された正弦波のPSDと比較することで(Figure 3)観測されるのは、周波数変調が基本周波数のピーク振幅を減少させること、および搬送波信号の狭帯域エネルギーが変調信号の広帯域エネルギーに変換されることです。搬送波信号には、基本信号のみが含まれる(正弦波のみに固有の特性)のに対し、周波数変調された波形には高調波側波帯の通倍成分が含まれます。この結果は、周波数変調の基本的な利点を示しています。放射のピーク振幅は抑止され、より広いスペクトルに拡散されます。この手法を拡散スペクトルと呼びます。

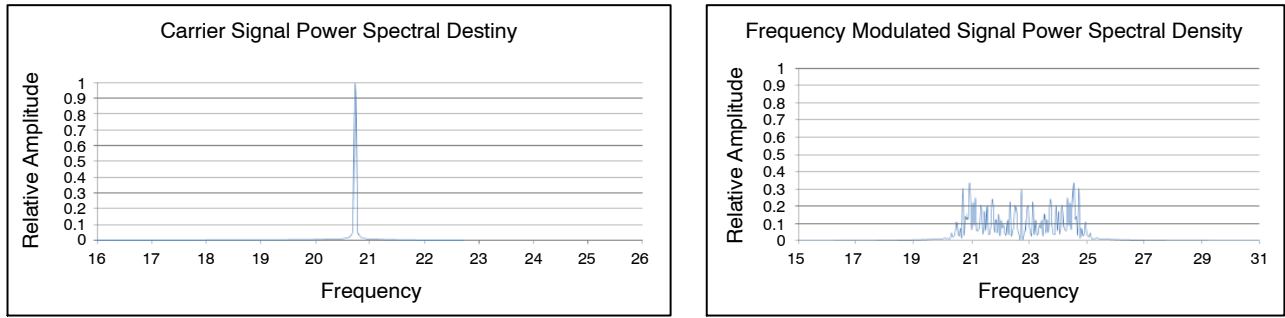


Figure 3. The Affect of Spectral Spreading on Power Spectral Density

変調指数 β は、比を評価する測定値であり、この値を使用して、変調波から搬送周波数へのピーク偏移を決定できます。

$$\beta = \frac{\Delta f_c}{f_m} \quad (\text{eq. 3})$$

ここで、

Δf_c = ピーク周波数の偏移

f_m = 変調周波数

Figure 4ではベッセル関数を使用して、搬送波信号(J0)と変調信号(>J0)の関係を示し、最大11次の変調信号の高調波側波帯(最初の高調波はJ1)を示しています。基本周波数が低下すると、変調指数は増大します。

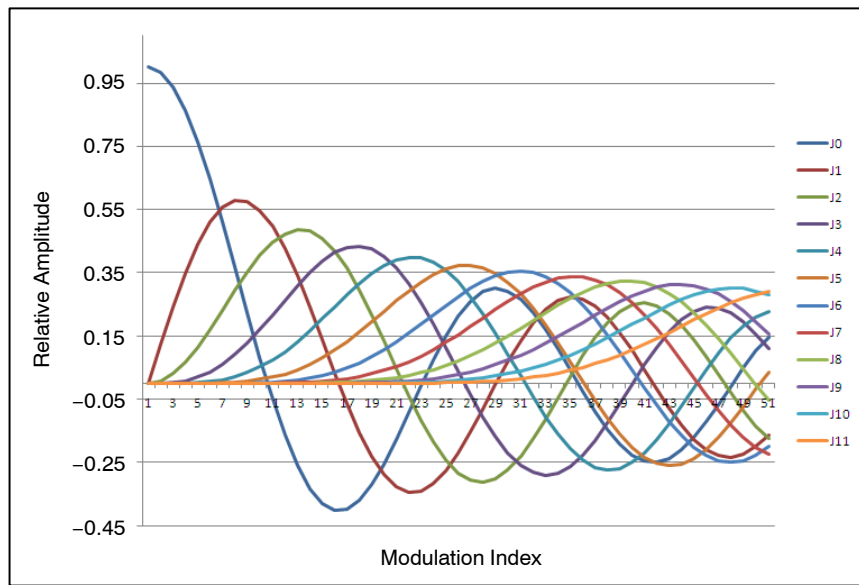


Figure 4. Plots of the Bessel Function at Different Modulation Indices

変調指数の特定の値に関して、Figure 5の結果を対称型棒グラフの形で複製し、基本周波数を中心とすることで、変調指数の増大に伴う効果をより明確に観測できます。Figure 5では、y軸で相対振幅(変調指数= 0に対して1.0の値を割り当て)を示し、x軸の中心

で基本周波数を配置し、変調によって生成された側波帯をその周囲に示しています。変調指数が0に等しくなるのは、変調が行われていないことを意味します。

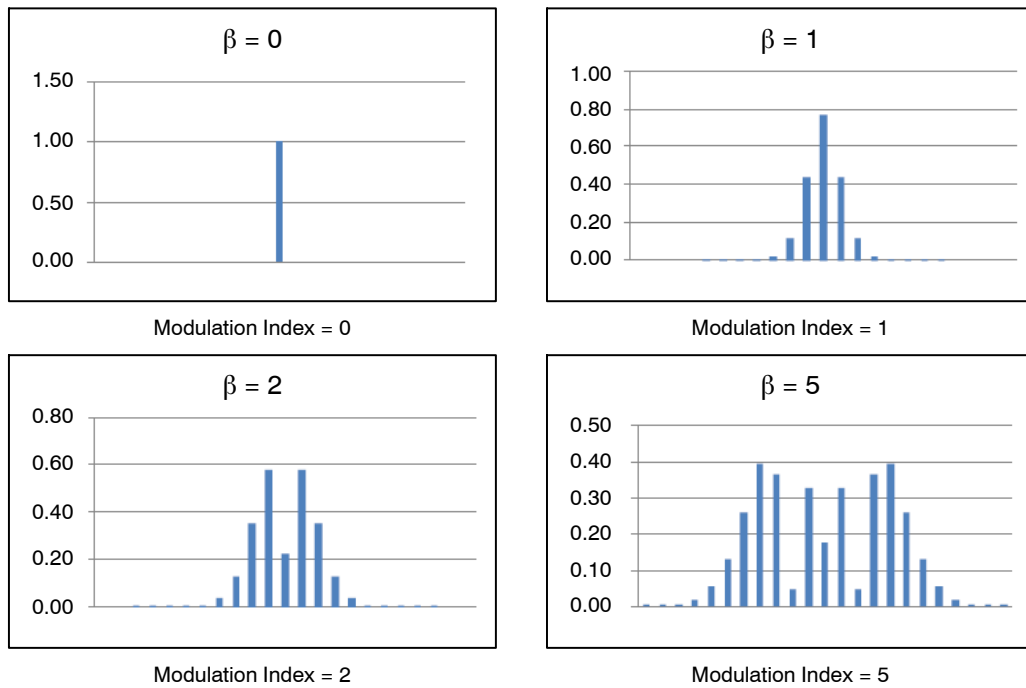


Figure 5. The Affect of Adjusting the Modulation Index on Spectral Spreading

変調指数が0の場合、側波帯は存在していません。変調指数が大きくなるにつれて、基本周波数の振幅は小さくなり、高調波側波帯の数は多くなり、拡散効果は増大します。ただし、スペクトル内のエネルギー量は同じです。

フーリエ解析により、無数の側波帯が存在することが明らかになりますが、高調波の次数が大きくなるにつれて、振幅は全体として下限0に向かって減少します。この現象は、特定のレベルを上回る高次の高調波が、解析の目的にとって無視できることを示しています。

ランダム変調

SMPSスイッチ制御にはいくつかの方式がありますが、その中で最も一般的に使用されているのがパル

ス幅変調(PWM)です。PWMバックSMPSは、入力電圧レベルと出力側で生じている負荷電流に応じてスイッチのオン時間を調整することで、自らの出力電圧を安定化された定常状態レベルで維持します。デューティ・サイクル比を調整することで、出力電圧を安定化できます。

SMPSのPWM波形を方形波に簡略化する(Figure 6)と、該当の波形パラメータは次のようになります。周期 T_K 、スイッチのオン時間 a_K 、スイッチのオン時間遅延 ϵ_K

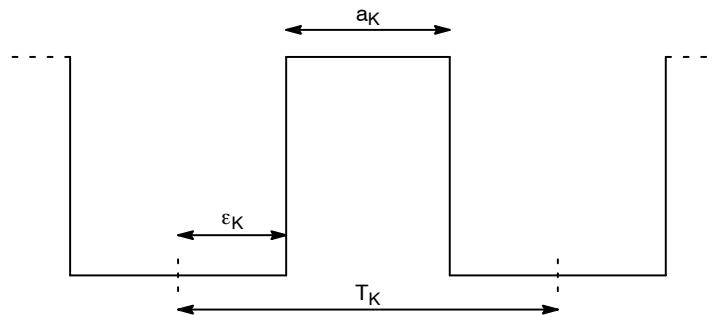


Figure 6. Pulse Width Modulation

標準的なPWMは固定周波数を維持し、スイッチのオン時間遅延がありませんが、スイッチのオン時間はそれに応じて調整されます。したがって、PWM

は、 T_K が固定、 a_K が可変、 ϵ_K が0に固定された波形として表示できます。

パラメータのランダム変調は、境界条件によって制限され、その結果、擬似ランダム変調と呼ばれます。擬似ランダム変調とは、確定的プロセスによって生成されたパラメータを使用する、統計的なランダム変調のことです。

PWM波形を解析すると、実行可能な変調方式が明らかになります。変調方式のパラメータを、表の形で示すことができます。

Table 1. MODULATION SCHEMES AND THEIR PARAMETERS

Modulation Schemes	T_K	a_K	ϵ_K	$d_K = a_K / T_K$
Pulse Width Modulation	Fixed	Fixed	Zero	Fixed
Pseudo Random Pulse Position Modulation	Fixed	Fixed	Random	Fixed
Pseudo Random Pulse Width Modulation	Fixed	Random	Zero	Random
Pseudo Random Frequency Modulation Fixed Duty	Random	Random	Zero	Fixed
Pseudo Random Frequency Modulation Variable Duty	Random	Fixed	Zero	Random

擬似ランダム周波数変調および固定デューティ (PRFMFD)は、そのPSDの結果が連続ノイズ・スペクトルを示すという理由で、最適な結果をもたらすことが明らかになってきました。また、期間とスイッチのオン時間が可変であり、その結果、サイクルごとに固定デューティ・サイクルを維持できることも示されています。サイクルごとの固定デューティ・サイクルを示さない方式では、出力電圧リップルの増大が発生し、自らの出力電圧の安定化能力が不足し、周波数ノイズが不十分であることが明らかにな

ります。さらに、ループ安定性の問題も生じます。リップルが小さいほど、フィードバック・ループの設計がシンプルになります。

回路の実装

実装に当たって、2つの重要な設計ブロックが必要です。ランダム化ブロックと変調ブロックです。これら2つのブロックのインタフェースとして、デコーダ・ブロックも必要です。

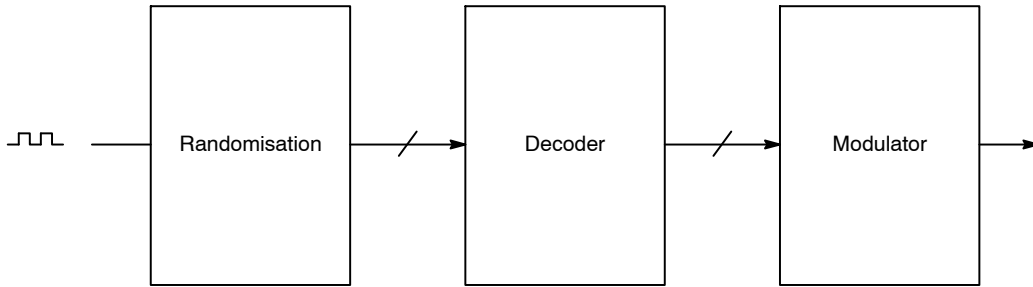


Figure 7. Top Level Entity Block Diagram

ランダム化

各種のランダム化方式を考案できますが、この状況ではリニア・フィードバック・シフト・レジスタ (LFSR)がデジタル実装にとって最適な手法として使用できます。

LFSRは同期回路であり、複数のDフリップフロップを直列接続し、シフト・レジスタとして使用します。このシフト・レジスタは「m」ビットの長さであり、擬似ランダム・ビット・シーケンス(PRBS)を生成する周期的なクロックによってクロック駆動されます。1つまたは複数の「タップ」ポイント、つまりそれぞれm番目のビットとn番目のビットをXOR演算したものを、レジスタの入力にフィードバックとして提供します。このレジスタは、一連の確定状態を循環し、「K」個のサイクルごとにシーケンスを反復します。サイクルの最大数を「極大長」と呼びます。

$$K = 2^m - 1 \tag{eq. 4}$$

「-1」の項が使用されているのは、レジスタがオール0になっている状態では、入力に対して0がフィードバックされ、その結果、n回の永続的なオール0状態が発生することが原因で、最終的にレジスタがロックアップするからです。その上で、目標は特定の長さを持つレジスタに関する極大状態、つまり、オール0の状態が発生しないことを保証するXORフィードバックのタップ・ポイントを確定することです。極大長を達成するタップ・シーケンスは、多項式のmod2 (2の整数剰余)です。

$$1 + x^n + x^m \tag{eq. 5}$$

TND6032/D

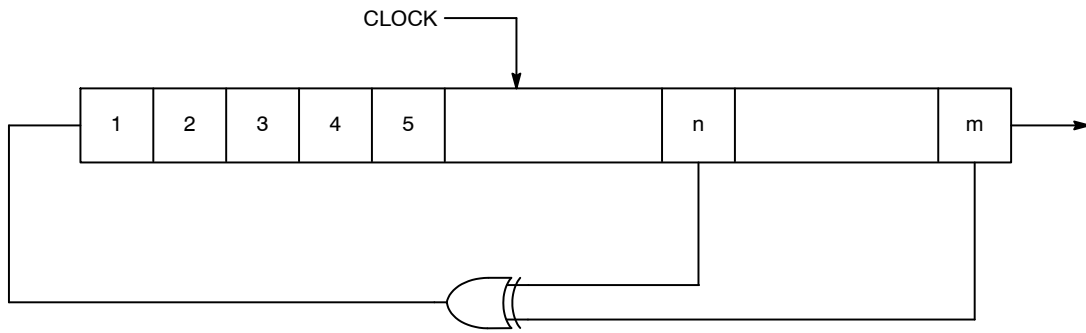


Figure 8. Linear Feedback Shift Register

したがって、LFSRはランダム・シーケンスを生成しませんが、擬似ランダム・シーケンスを生成します。これは、サイクルが終了した時点で自らを反復するシーケンスだからです。ただし、シーケンスの長さは、反復レートつまり周波数を低くするように設定できます。その結果、大部分の実用的な目的では、統計的にランダムとみなすことができます。

LFSRの長さmは重要なパラメータであり、変調周波数および他の重要な制御パラメータを制御できるようにします。変調周波数、つまりレジスタ周波数は、可聴周波数を避けて設定する必要があります。人間の可聴範囲は、およそ20 Hz~20 kHzです。

レジスタ長が異なる場合、異なるタップ・ポイント、つまり、XOR演算されるm番目とn番目の項が必要になります。「m」のほとんどの値に対して、単一のタップ・ポイント「n」が必要とされます。ただし、「m」のいくつかの値に対して、複数のタップ・ポイントが必要とされます。追加のXOR演算子を設計に含めることもできますが、複数のタップ・ポイントを必要とする「m」の値を回避することで、回路をある程度簡略化できます。

LFSRのサイクル・シーケンスは確定的です。正しく動作することを確認するために、結果として、レジスタは既知の状態から開始する必要があります。この理由で、既知の状態への初期化と、レジスタのロックアップが発生しないことの両方が保証されるように、リセット時にレジスタに対して「シードを割り当てる」、つまり擬似乱数の生成源を設定するように、リセットを使用する必要があります。

デコーダ

デコーダは、LFSRのワードから変調器のワードへのインタフェースとして機能し、特定の期間に関するLFSRの結果を解釈します。デコーダは非同期ブロックとして設計できます。これは、デコード・プロセスがLFSRのクロック期間より短い期間のうちに実行され、その結果、統計的なランダム性が損なわれないようにすることを意図しています。

実装した設計では、LFSRの最初の4ビットをサンプリングします。次に、これらを最大16通りの実現可能な周波数の結果にデコードします。

変調器

矩形の波形を生成するために、完全デジタルのインタフェースを開発することもできます。実用的には、この方針を採用すると、インタフェースはSMPSのSYNCピンの駆動専用になります。ただし、このアプローチはFPGAの実装に適しています。

LFSRはデコーダに対して並列の出力信号を供給し、デコーダはLFSRの数値を、変調器が解釈して出力を再現することができる、それに対応する期間にデコードします。

変調器は同期回路であり、デコーダからデータを受信して固定期間として解釈し、自らの出力信号を適切に駆動します。この出力は50%デューティ固定の矩形波を送信します。

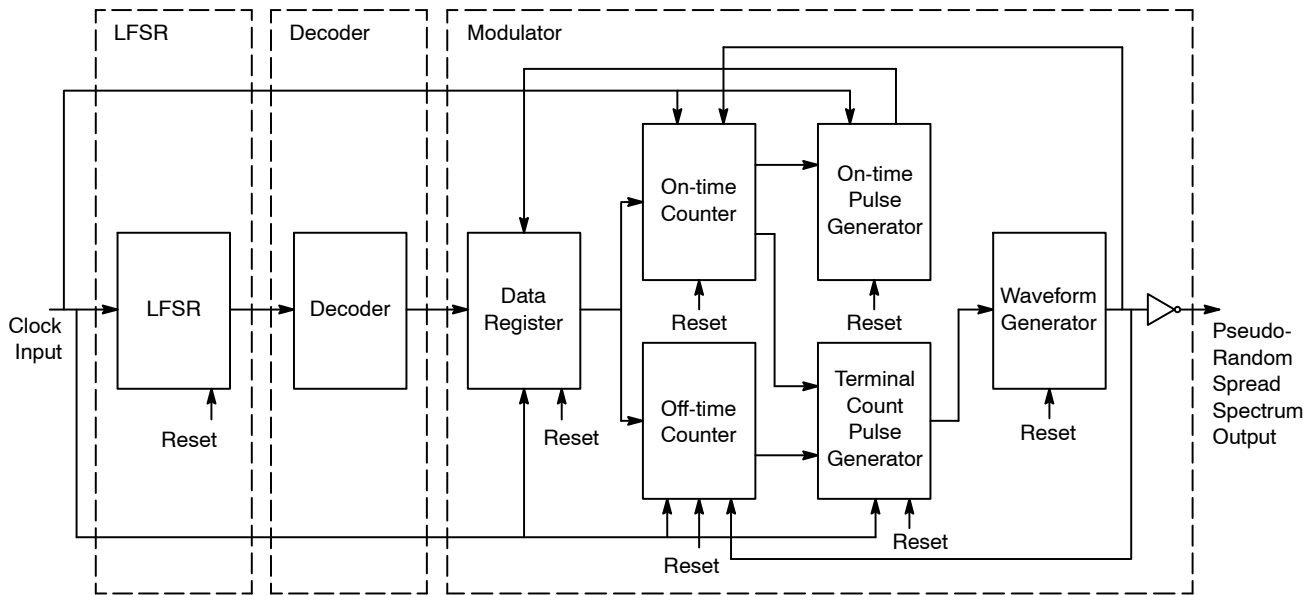


Figure 9. Pseudo Random Spread Spectrum Clock Generator Block Diagram

主要な検討事項は、自動車のコックピット・アプリケーションに適した方法でSMPS ICを制御するように設計を行うことです。ただし、この方針では、自動車のコックピット内にある他のシステム、特に非常に感度の高いラジオ受信機に対して、設計が及ぼすあらゆるEMCの影響を最小化する必要があります。この設計による周波数操作の結果、および制御対象となるSMPS ICのスイッチング周波数による影響は、重要な検討事項です。多くの消費者がFMバンドの放送局のアナログ・オーディオ周波数を聴いている状況で、FMの信号ノイズ比が高いという事実から、AMへの干渉に比べるとFMへの干渉は懸念が比較的小さいと考えられます。基本周波数や、その高調波のいずれかが、チューニングされる無線バンドと競合する事態を避けることは、重要な目標です。その結果、ラジオの受信機が受信するオーディオに対する干渉を最小化できます。あらゆる高調波で放送局のバンドを回避するのは困難ですが、競合を参照化する交渉周波数を選択することは可能です。スイッチング周波数が高くなるほど、高調波が放送局のバンドと競合する可能性は低くなります。

結果

Altera Cyclone 2の2C20 FPGAを使用して回路を実装しました。63個のロジック要素を使用して設計を実装しましたが、これは使用可能なリソースのうち0.3%のみを使用したことを意味します。1本のピンが拡散スペクトル出力を供給します。テストの目的で、ハード・ワイヤードのトグル・スイッチを使用し、出力のイネーブル/ディセーブルを切り替えました。

FPGAの拡散スペクトル出力を、オン・セミコンダクターの2個の車載用「バック」SMPS ICに供給しました。1個はNCV8851Fつまり0.5 MHzのNMOS同期コントローラで、もう1個はNCV890201、つまり2 MHzのNMOS非同期コンバータです。SMPS ICのSYNC周波数範囲に基づき、2つの異なる公称周波数設定と帯域幅を使用しました。219 kHz~481 kHzの範囲にある32個の周波数と、1.92 MHz~2.5 MHzの範囲にある4個の周波数です。

TND6032/D

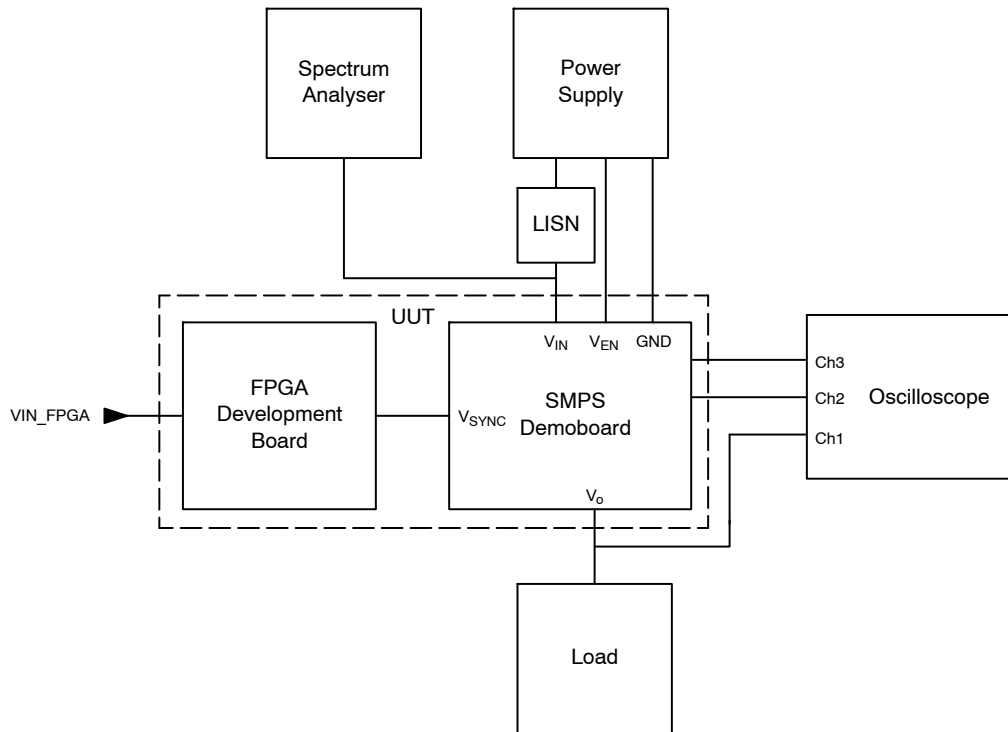


Figure 10. Evaluation Set-up

0.15 MHz ~ 30 MHzのClass Bバンドでピーク検出器を使用して伝導放射を測定したところ、次の結果が得られました。

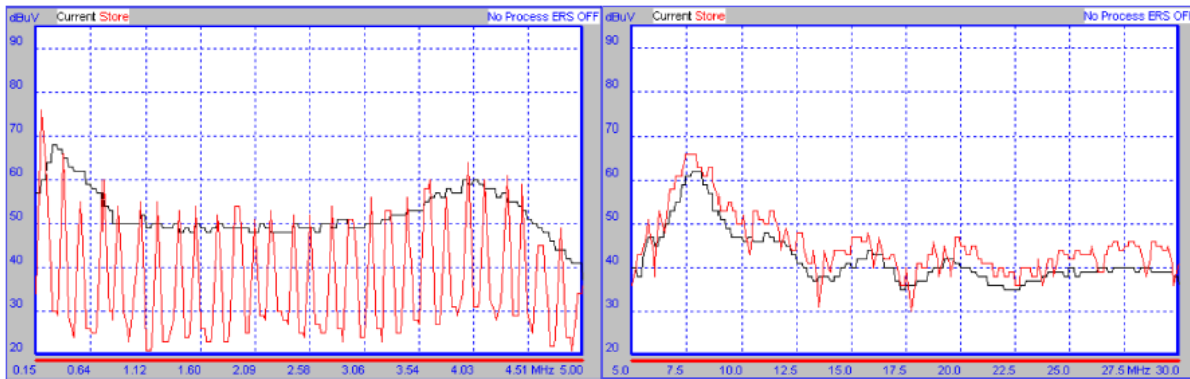


Figure 11. NCV8851F ($F_{SW}=170$ KHz) CE Results 0.15 MHz to 30 MHz

(赤のトレースは固定周波数動作、黒のトレースは擬似ランダム拡散スペクトル動作)

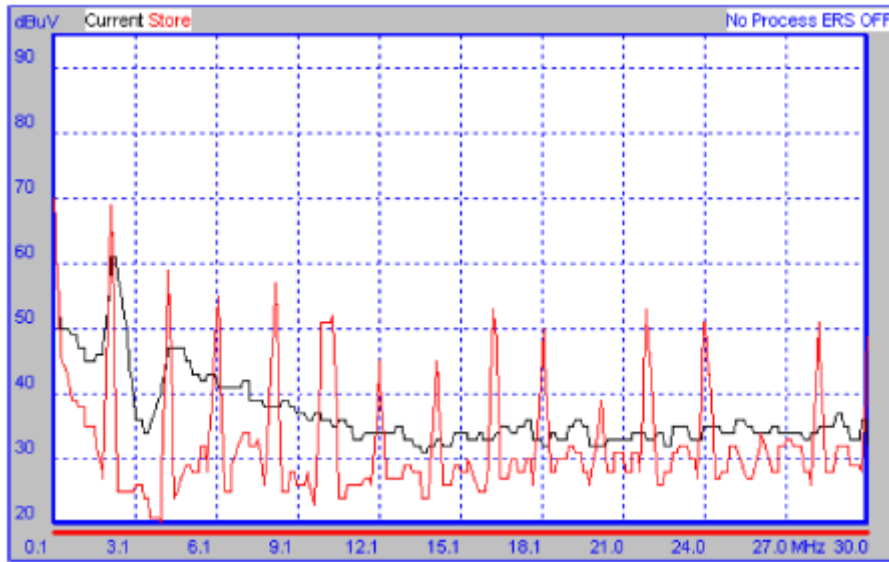


Figure 12. NCV890201 ($F_{SW}=2\text{MHz}$) CE Results 0.15 MHz to 30 MHz

(赤のトレースは固定周波数動作、黒のトレースは擬似ランダム拡散スペクトル動作)

複数のスペクトル間で性能は異なりますが、結果を要約することは可能です。NCV8851Fの擬似ランダム変調により、170 kHzの基本周波数で10 dB/ μV 、スペクトル全体で約5 dB/ μV の改善が達成されました。NCV890201の擬似ランダム変調により、2 MHzの基本周波数で8 dB/ μV 、スペクトル全体で約10 dB/ μV ~18 dB/ μV の改善が達成されました。

出力電圧リップルのレベルが低いことも記録されました(Figure 13)。LFSRのmパラメータと出力電圧リップルの間の相関も観測されました。ただし、別の実験で測定したピーク・ツー・ピーク出力電圧の下限と上限の差はわずか240 mVであり、ワースト・ケース・リップルは800 mVでした。これは、固定周波数動作で測定されたワースト・ケースのピーク・ツー・ピーク出力電圧の720 mVに匹敵する値です。擬似ランダム拡散スペクトル動作に起因するリップルの増大は、結果として有意とみなすことはできません。

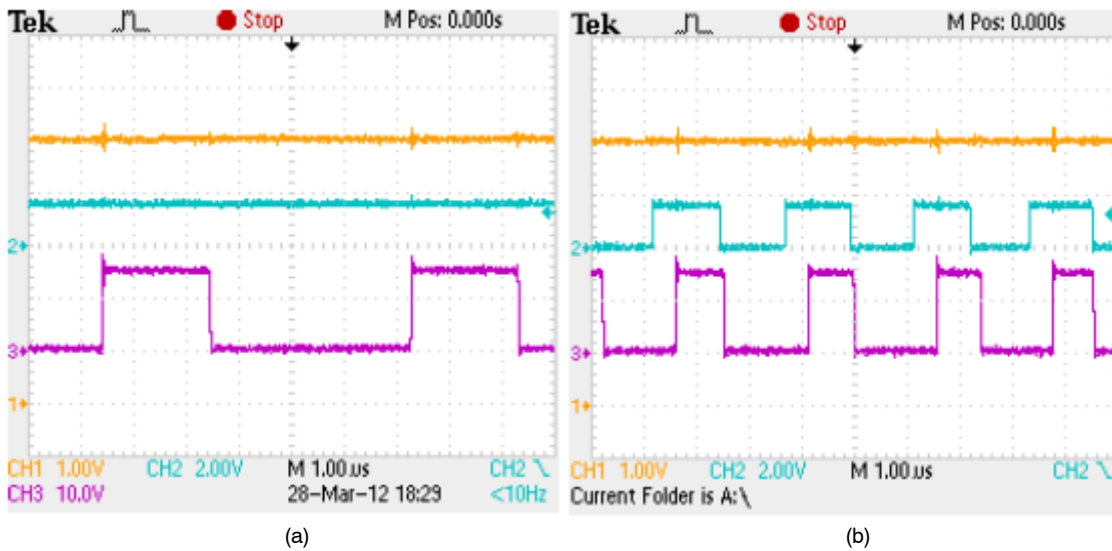


Figure 13. NCV8851F Output Voltage Ripple (CH1=VOUT, CH2=SYNC, CH3=VSW):
(a) 170 KHz Fixed Frequency Operation, (b) Pseudo Random Spread Spectrum Operation

結論

自動車のコックピット・アプリケーションでは、余剰のFPGAシステム・リソースと、オン・セミコンダクターのNCV8851FおよびNCV890201のような複数のSMPS ICを使用して、擬似ランダム拡散スペクトル変調を実装できます。このソリューションはFPGAの最小のシステム・リソースとI/Oを活用し、自動車のコックピット・アプリケーションでスペクトル放射を大幅に低減することができ、しかも出力電圧リップルを犠牲にすることはありません。

参考文献

- [1] K. McDonald, *A Pseudo Random Spread Spectrum Clock Generator to Reduce Electro-Magnetic Emissions in Automotive Cockpit Switched Mode Power Supply Applications*. University of Bolton, 2012.
- [2] http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCV8851F-D.PDF
- [3] http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCV890131-D.PDF

ON Semiconductor及びONのロゴはSemiconductor Components Industries, LLC (SCILLC)の登録商標です。SCILLCは特許、商標、著作権、トレードシークレット(営業秘密)と他の知的財産権に対する権利を保有します。SCILLCの製品/特許の適用対象リストについては、以下のリンクからご覧いただけます。www.onsemi.com/site/pdf/Patent-Marking.pdf。SCILLCは通告なしで、本書記載の製品の変更を行うことがあります。SCILLCは、いかなる特定の目的での製品の適合性について保証しておらず、また、お客様の製品において回路の応用や使用から生じた責任、特に、直接的、間接的、偶発的な損害に対して、いかなる責任も負うことはできません。SCILLCデータシートや仕様書に示される可能性のある「標準的」パラメータは、アプリケーションによっては異なることもあり、実際の性能も時間の経過により変化する可能性があります。「標準的」パラメータを含むすべての動作パラメータは、ご使用になるアプリケーションに応じて、お客様の専門技術者において十分検証されるようお願い致します。SCILLCは、その特許権やその他の権利の下、いかなるライセンスも許諾しません。SCILLC製品は、人体への外科的移植を目的とするシステムへの使用、生命維持を目的としたアプリケーション、また、SCILLC製品の不具合による死傷等の事故が起り得るようなアプリケーションなどへの使用を意図した設計はされておらず、また、これらを使用対象としておりません。お客様が、このような意図されたものではない、許可されていないアプリケーション用にSCILLC製品を購入または使用した場合、たとえ、SCILLCがその部品の設計または製造に関して過失があったと主張されたとしても、そのような意図せぬ使用、また未許可の使用に関連した死傷等から、直接、又は間接的に生じるすべてのクレーム、費用、損害、経費、および弁護士料などを、お客様の責任において補償をお願いいたします。また、SCILLCとその役員、従業員、子会社、関連会社、代理店に対して、いかなる損害も与えないものとします。SCILLCは雇用機会均等/差別撤廃雇用主です。この資料は適用されるあらゆる著作権法の対象となっており、いかなる方法によっても再販することはできません。

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free
USA/Canada
Europe, Middle East and Africa Technical Support:
Phone: 421 33 790 2910
Japan Customer Focus Center
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: www.onsemi.com

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative