

スイッチング電源におけるノッチ特性を有するスペクトラム拡散技術

小堀康功* 深谷太詞 (小山工業高等専門学校)

荒船拓也 須永祥希 白石尚也 築地伸和 高井伸和 小林春夫 (群馬大学)

Spread Spectrum with Notch Frequency using Pulse Coding for Switching Converter

Yasunori Kobori*, Futoshi Fukaya (National Institute of Technology, Oyama College)

Takuya Arafune, Yoshiki Sunaga, Naoya Shiraiishi, Nobukazu Tsukiji, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード: スペクトラム拡散, EMI 低減, ノッチ特性, パルスコーディング, スwitchingコンバータ
(Keywords: Spread Spectrum, EMI Reduction, Notch Frequency, Pulse Coding, Switching Converter)

1. はじめに

電子機器に使用されるスイッチング電源では、大電力のスイッチングによる不要ノイズ等の電磁波放射 (Electro-Magnetic Interference: EMI) が問題となっている。これらのノイズは周辺の電子機器に悪影響を及ぼすことより、多くの国で EMI 規制がされている。例えば図 1 に CISPR (国際無線障害特別委員会) 22 の情報技術装置のエミッション規制(ノイズ規制)を示す。上側の線は商業・軽工業で使用する場合(industrial), 下側の線は家庭で使用する場合(home)の EMI の限界値を示す。

この EMI の低減方法として、筆者達はアナログノイズによりクロック信号をランダムに変調して、EMI を低減するスペクトラム拡散手法^{2~4)}を提案してきた。しかし、スペクトラム拡散の弊害として、拡散ノイズが希望しない帯域(拡散禁止帯)にまで広がる問題が生じる。例として「車載用の DC-DC コンバータで用いるスイッチング周波数及びその高調波は、ラジオの受信周波数帯域と重畳しない」ことが挙げられる。

そこで筆者らは、パルスコーディングを用いたクロック信号によりノッチ特性を有するスペクトラム拡散手法^{5, 6)}を提案してきた。今回さらに、ノッチ帯の中に発生する不要な線スペクトラムを、上述の EMI 拡散技術により除去することを検討した。

2. アナログノイズ利用 EMI 低減技術

2-1. 降圧形スイッチング電源の構成

クロックを用いるスイッチング電源として、代表的な降圧形電源の構成を図 2 に示す。パワーステージと制御部で構成され、パワーステージはスイッチの ON/OFF をパルス幅変調 PWM(Pulse Width Modulation)

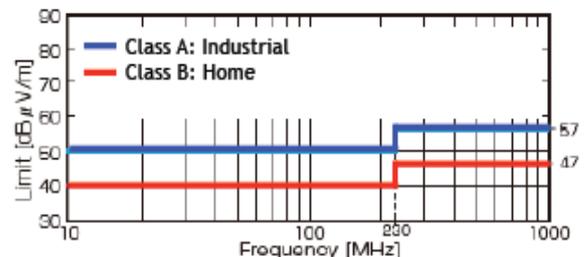


図 1 EMI パワー規定

Fig. 1 EMI power regulation

信号で制御し、その時比率(デューティ)を可変して出力電圧を一定に保つ。

一方、制御部では出力電圧と基準電圧を比較増幅する誤差増幅器と、この増幅誤差電圧を鋸歯状波と比較するコンパレータから構成される。鋸歯状波は固定周波数のクロックより発生している。ここで図 3 に示す PWM 信号のスペクトラムをみると、基本クロックの 200kHz およびその整数倍の周波数に大きな線スペクトラムが発生している。そこでこのクロック信号をランダムに位相・周波数変調することにより、鋸歯状波信号をランダム変調して EMI 拡散する必要がある。

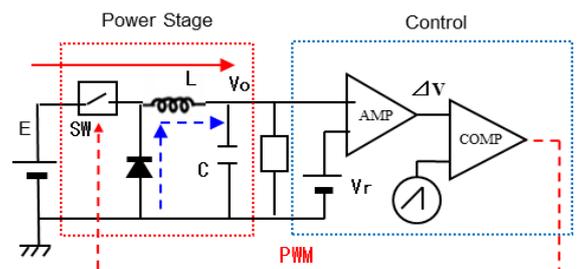


図 2 降圧形スイッチング電源の構成

Fig. 2 Construction of buck converter

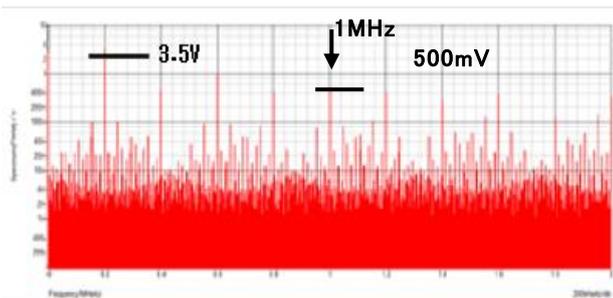


図3 PWM信号のスペクトラム(拡散無し)
Fig. 3 Spectrum of the PWM signal without spread

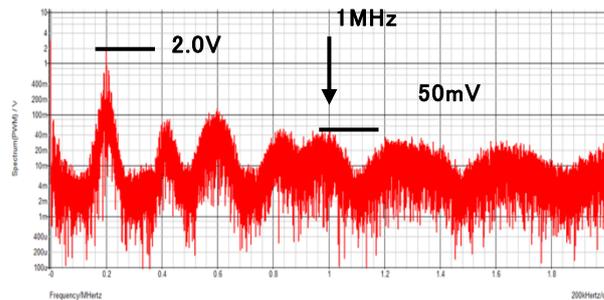


図6 PWM信号のスペクトラム(拡散有り)
Fig. 6 Spread spectrum of the PWM signal

2-2. ランダム周波数変調によるスペクトラム拡散

EMI低減技術として、これまでデジタル的にPWM信号の位相をランダム変調する方式が提案¹⁾されていた。しかし10ビット以上のカウンタと1,000個以上のシフトレジスタおよびセレクタが必要であり実用的ではなかった。そこで筆者達はこれまで、図4に示す「アナログノイズ+PLL回路」による周波数変調方式を提案してきた。同図において、M系列信号発生部²⁾からの信号をD/A変換して階段状パターンを得、LPFにて滑らかな周期性アナログノイズとする。このノイズを次段のPLL回路に印加して、非周期的に変調されたクロック信号を発生する。この場合、PLL回路の特性は、図5のように振動的な応答特性とする。これによりノイズの印加により不安定気味にPLL回路が振動して非周期的なクロックを発生する。

このようにして発生した非周期的なクロックを、図2の鋸歯状波発生部に供給することにより、図6のようなスペクトラム拡散を得ることができる。同図では基本クロックレベルが、図3に比較して1.5V(2.4dB)減衰している。同時にほぼ全ての帯域において、10mV以上のノイズレベルに拡散している

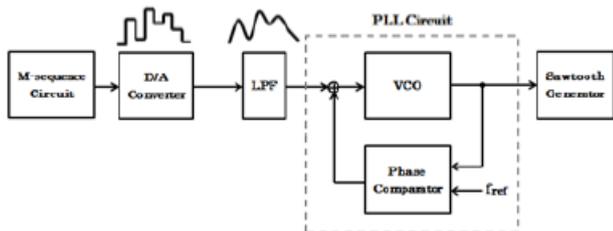


図4 周波数変調クロック発生回路

Fig. 4 Clock generator with frequency modulation

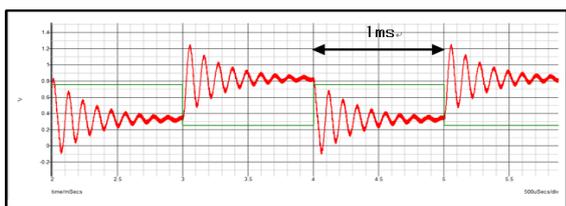


図5 PLL回路のステップ応答

Fig. 5 Step response of the PLL circuit

3. パルスコーディングによるノッチ特性

3-1. パルス幅コーディング PWC

スイッチング電源における電圧制御パルス変調方式として、PWM信号のパルス幅をリニアに変調制御するPWM制御方式を一般に利用してきた。一方、筆者達は図7に示す2種のパルス幅 W_L, W_H を有する同一周期 T のクロックを用意し、従来のPWM信号に代えて、増幅誤差信号のH/Lレベルに応じて2種のクロックを切り替え供給して電圧制御するパルス幅コーディングPWC制御方式^{3,4)}を検討してきた。

PWC制御方式の構成を図8に示す。同図において、増幅誤差電圧は基準電圧と比較されて「H/L」信号となり、クロックによりフリップフロップFFに取り込まれる。この場合、クロックは図7に同期したパルスである。このFFの出力により2つのコーディングパ

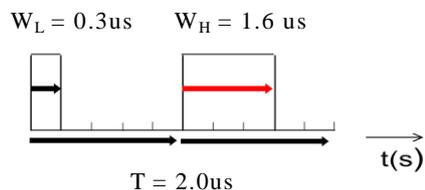


図7 パルス幅コーディング方式

Fig. 7 Pulse width coding method

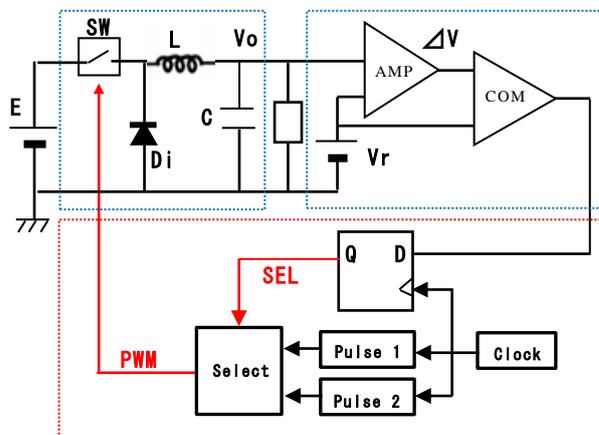


図8 PWC制御方式電源の構成

Fig. 8 Construction of the PWC controlled converter

ルスを適時選択してメインスイッチを制御する。なお、この方式ではループゲインは一般に低いので、クロック周波数は高めに設定する。また、コーディングパルスのデューティ D は制御特性に影響し、制御性を確保するには次式の関係が必要である。ここで、 D_o は電圧変換率である。

$$D_H > D_o > D_L \quad (1)$$

$$\text{ただし } D_o \doteq V_o / V_i \text{ (降圧形)} \quad (2)$$

3-2 スペクトラム拡散とノッチ特性

図 7 の条件における PWC 制御の結果、図 8 の降圧形スイッチングに適用した。シミュレーション・パラメータを表 1 に示す。シミュレーション結果のスペクトラム拡散を図 9 に、出力電圧リップルを図 10 に示す。

図 9 において、次式(3)に示す周波数近傍において、周囲レベルが極めて低いノッチ周波数を確認することができる。このシミュレーションでは、基本クロック周波数 500kHz として、2次高調波との中間にノッチ周波数 770kHz を発生させている。この場合、2次高調波のノッチは、クロックの高調波と近く不鮮明である。一方、パルス幅 W の設計により、2次と3次高調波周波数の中間の 1.25MHz にもノッチを発生させることができる。

$$F_N = K / (W_H - W_L) \quad (3)$$

表 1 PWC 電源のシミュレーション・パラメータ
Table 1 Simulation parameters of the PWC converter

| 入力電圧 E | 出力電圧 V_o | 出力電流 I_o | L |
|----------|---------------|------------|----------|
| 10.0V | 5.0V | 0.25A | 200uH |
| C_o | クロック f_{ck} | Coding幅1 | Coding幅2 |
| 470uF | 500kHz | 1.6us | 0.3us |

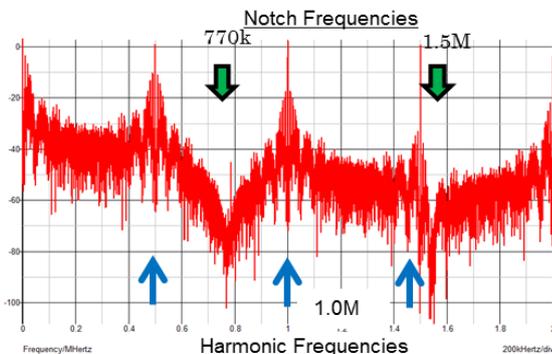


図 9 PWC 電源のスペクトラム拡散
Fig. 9 Spread spectrum of the PWC converter

4. PWC 制御スペクトラム拡散技術

4-1 周波数変調クロックへの PWC 制御方式

PWC 制御によりノッチ周波性を発生可能であるが、そのノッチ周波数帯には拡散された不要な線スペクトラムも混在する。また、メインクロック周波数のレベル低減も不十分であると思われる。そこで、3章のノッチ発生時のスペクトラム拡散方式に、2章のアナログノイズによる周波数変調方式を重畳することを検討した。この場合、ランダムに周波数変調されたクロックに同期して、2種のコーディングパルスを切換え同期させることが課題である。

検討した電源回路のコントロール部分を図 10 に、主要な波形を図 11 に示す。同図に入力されるクロック CK は、図 4 の回路によりランダムに周波数変調されたクロックである。この変調クロックにより鋸歯状波を発生させるとともに、パルス幅選択信号 (SEL 信号) を決定する。この SEL 信号により、パルス幅決定用の基準電圧 V_H, V_L を選択し、比較器にてパルス幅コーディング信号 PWC に変換しメインスイッチを制御駆動する。図 12 において、クロックにより鋸歯状波を発生し、基準電圧の高低によりパルス幅が決定される。

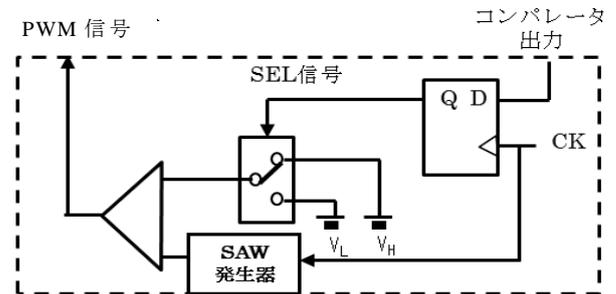


図 10 PWC コントロール回路
Fig. 10 PWC control circuit

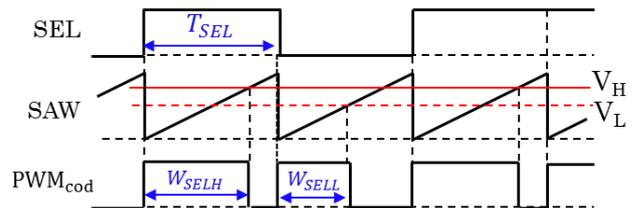


図 11 PWC 電源コントロール部の主要波形
Fig. 11 Waveform of PWC controlled converter

今回検討した PWC 制御電源のスペクトラムは図 12 であり、ノッチ周波数は $F_n=720\text{kHz}$ に発生している。メインクロック 500 kHz (▼印) のスペクトラムレベルは 0.90V であり、図 3 に比較して 2.6V (-1.3 dB) の低減であるが不十分である。また、ノッチ帯域内には不要な線スペクトラムが存在するので、上述のアナロ

グノイズ手法による EMI 拡散手法を施して、更なる EMI 低減と不要な線スペクトラムの除去を試みる。

上記の PWC 制御に EMI 拡散を施した電源のスペクトラムを、図 13 に示す。メインクロックのスペクトラムレベルは 0.65V であり、図 3 に比較して 2.85V (-7.3 dB) と大きく低減している。また、ノッチレベルをスペクトラムで 10mV 以下とすると、ノッチ周波数の帯域幅は 720 ± 40 kHz であり、不要な線スペクトラムも存在しない。なお、出力電圧リップルを図 14 に示すように、1.5mVpp 未満と十分に小さい。また、リップル波形には周期性は確認できず、アナログノイズと PLL 回路によりランダムに周波数変調されていることが分かる。

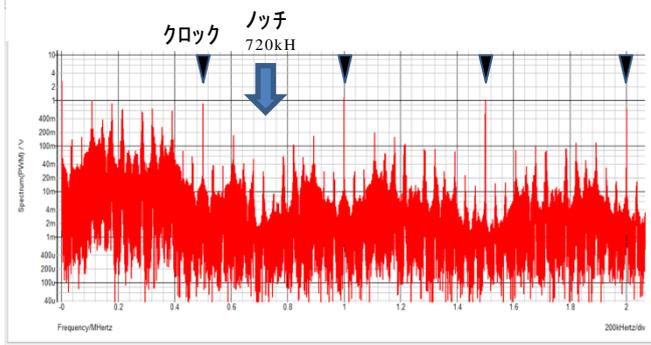


図 12 PWC 制御のみによるスペクトラム拡散
Fig. 12 Spread spectrum with PWC control only

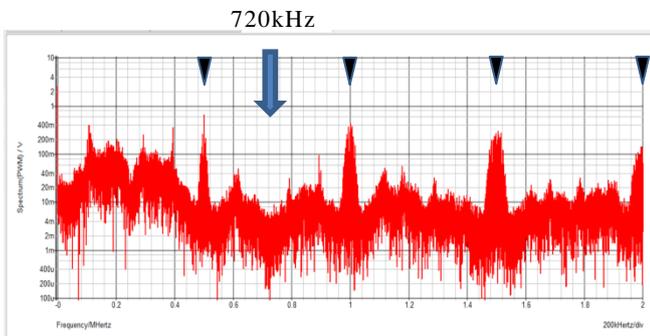


図 13 PWC 制御+EMI 低減によるスペクトラム拡散
Fig. 13 Spread spectrum with PWC control and EMI reduction

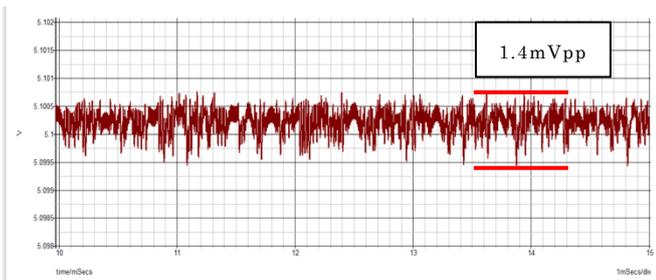


図 14 PWC 制御+EMI 低減時の出力電圧リップル
Fig. 14 Output voltage ripple of the buck converter with PWC control and EMI reduction

5. まとめ

スイッチング電源における EMI 低減手法として、アナログノイズ利用の PLL 回路方式によりスペクトラム拡散技法を提案している。この方式は全周波数帯域にノイズを拡散することより、ラジオ受信機等に向けた、選択的周波数帯にノッチ特性を有するパルス幅コーディング PWC 技術によるスペクトラム拡散を提案している。しかし、パルス幅コーディング手法では、EMI 低減が不十分とともに、ノッチ帯域内に不要な線スペクトラムが現れていた。

今回、ノッチ特性を有するパルス幅コーディング PWC 手法に、アナログノイズによる EMI 低減手法を施すことにより、ノッチ特性を有して EMI 低減効果が大きく、ノッチ帯域内に不要な線スペクトラムが存在しないスペクトラム拡散方式を確認した。

パルス幅コーディングを施すことにより、メインクロックのスペクトラムレベルは -1.3dB の低減であり、ノッチ周波数は 720kHz とした。この手法に EMI 低減技術を重畳することにより、クロックレベルを -7.3dB と大きく低減するとともに、ノッチ帯域は 720 ± 40 kHz を確保できた。同時に、ノッチ帯域内の不要な線スペクトラムを削除することができた。

文献

- [1] 森偉文樹, 山田佳央, Santhos Ario Wibowo, 光野正志, 小林春夫, 高井伸和, 藤村征弘, 杉山寿男, 松田順一, 深井功, 大西教久, 竹田一郎, “デジタル電源でのスペクトラム拡散クロックによる EMI 低減化”, 電子情報通信学会, 第 21 回回路とシステムワークショップ, 軽井沢 (2008 年 4 月)
- [2] R. Khatami, H. Kobayashi, N. Takai, Y. Kobori, T. Yamaguchi, E. Shikata, T. Kaneko, K. Ueda, J. Matsuda, “Delta-Sigma Digital-to-Time Converter and its Application to SSCG,” The 4th IEICE International Conference on Integrated Circuits Design and Verification”, Vietnam (Nov. 2013).
- [3] 荒船拓也, Ramin Khatami, 小堀康功, 小林春夫, “ $\Delta\Sigma$ 変調を用いた電源クロック周波数拡散技術の研究”, 第 5 回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-15-68 ETG-15-68 (2015 年 3 月)
- [4] Y. Kobori, N. Tsukiji, N. Takai, H. Kobayashi, “EMI Reduction by Extended Spread Spectrum in Switching Converter,” IEICE Technical Report EMCJ2015-18, pp. 1-6, Thailand (June 2015)
- [5] 荒船拓也, 小堀康功, 小林春夫, “パルスコーディングを用いたスイッチング電源における選択的ノッチ周波数発生方式”, 電子情報通信学会, 環境電磁工学研究会(EMCJ), 鎌倉 (2015 年 11 月)
- [6] Y. Kobori, T. Arafune, N. Tsukiji, N. Takai, H. Kobayashi, “Selectable Notch Frequency of EMI Spread Spectrum using Pulse Modulation in Switching Converter”, The IEEE 11th. International Conference on ASIC, China (Nov. 2015)