

通信機器用スイッチング電源に用いる ノッチ特性を有するスペクトラム拡散技術

荒船 拓也*, 小堀 康功, 須永 祥希
王 太峰, 築地 伸和, 高井 伸和, 小林 春夫 (群馬大学)

Spread Spectrum Technique with Notch Frequencies Used in Switching Converters for Communication Devices

Takuya Arafune*, Yasunori Kobori, Yoshiki Sunaga, Taifeng Wang,
Nobukazu Tsukiji, Nobukazu Takai, Haruo Kobayashi (Gunma University)

This paper proposes a novel EMI spread spectrum technique with selectable notch characteristics using a pulse coding method for DC-DC switching converters in communication equipment. The notches in the spectrum of the switching pulses appear at the frequencies obtained from empirically derived the equation $f_n = N \{ 1 / (W_H - W_L) \}$ using the pulse coding method, or called as Pulse Width Coding (PWC). We have investigated these results with simulations and experiments.

キーワード：EMI 低減, スイッチング電源, スペクトラム拡散, パルスコーディング, ノッチ周波数
(Keywords: EMI Reduction, Switching Converter, Spread Spectrum, Pulse Coding, Notch Frequency)

1. はじめに

近年電子機器の高速高周波化・高密度化に伴い、電磁波輻射(Electro-Magnetic Interference: EMI)が問題となっている。電子機器内ではデジタルプロセッサや電源回路でクロック(周期的信号)が用いられる。このクロックをスイッチ制御に使用するとその基本周波数及びその高調波での輻射電磁波が大きくなる。これらは周辺の電子機器に干渉し、誤作動や機器の損壊等の悪影響を及ぼす。このため、世界の各国で EMI 規制がされており、EMI 対策は重要度が高まっている。

この EMI の低減方法として、クロック信号をランダムに変調するスペクトラム拡散手法がある。一般的にパルス幅変調(Pulse Width Modulation: PWM)およびパルス周波数変調(Pulse Frequency Modulation: PFM)が用いられている。しかし、その弊害として、拡散ノイズを希望しない帯域(拡散禁止帯)に重畳してしまう問題が生じる。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 AM, FM 等の受信周波数帯域と重なってはいけない」ことが挙げられる。

そこで筆者らはパルスコーディング手法によるスペクトラム拡散を行うことで、ノッチ(スペクトラム拡散の影響を受けない)周波数を任意に発生できるアルゴリズムを検討してきた [1-5]。このアルゴリズムを用いて拡散禁止帯にノッチを発生させることで、他の電子機器への影響を大幅低減することができる。

本論文では提案アルゴリズムを回路シミュレーションで検証した。さらに実機を作製し実験にても有効性を確認した。

2. スイッチングコンバータとスペクトラム拡散

2.1 スイッチング型 DC-DC コンバータ

図 1 に降圧型スイッチング電源の回路構成を示す。スイッチング電源はパワーステージ、制御部で構成されている。パワーステージはスイッチの ON/OFF により断続的な電圧を発生させ、それをインダクタとコン

デンサにより平滑して安定電圧を取り出す. ON/OFF の比率 (Duty 時比率) により供給電圧を決定し, その値は概ね次式で表すことができる.

$$V_0 = D \times V_i \quad (1)$$

ここでの問題点として大電力のスイッチングに伴い, 大きな EMI ノイズが発生してしまう.

一方, 制御部では基準電圧 V_r と出力電圧 V_0 を比較増幅してアナログ誤差電圧 ΔV_0 を得る. この電圧を次段のコンパレータで鋸歯状波と比較し, パルス幅変調信号 (PWM 信号) へ変換し (図 2), 入力へフィードバックする. このようなフィードバック制御で不可変動に対して安定した出力電圧を得る.

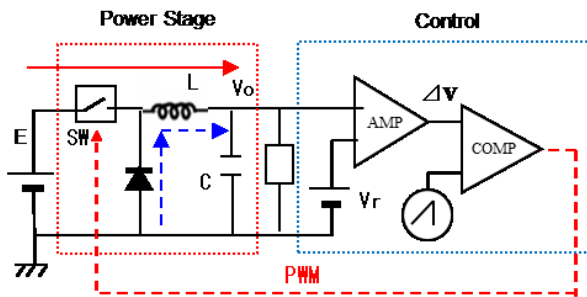


図 1 : 降圧型スイッチング電源の構成

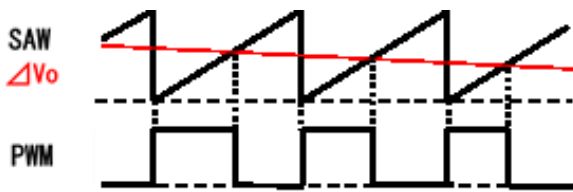


図 2 : 制御部での主要信号波形

2.2 従来方式スペクトラム拡散

通常クロックは一定の周期での繰り返し信号であるため, 特定の周波数成分にパワーが集中する. 例として図 3 は基本周波数 200kHz のクロック制御によるスペクトラムを示す. 基本周波数及びその高調波にパワーが集中していることが確認できる (図 3).

PWM 信号はノイズによりパルス幅を微小変調している. この結果, 図 4 ではクロック周波数及びその高調波のエネルギーを他の周波数へ拡散でき, スペクトラム拡散前と比較して, クロック成分は全て 1.5V の低減ができています. しかし, ランダムノイズによる変調のため, そのままでは拡散する周波数帯域を選択・制御することができない.

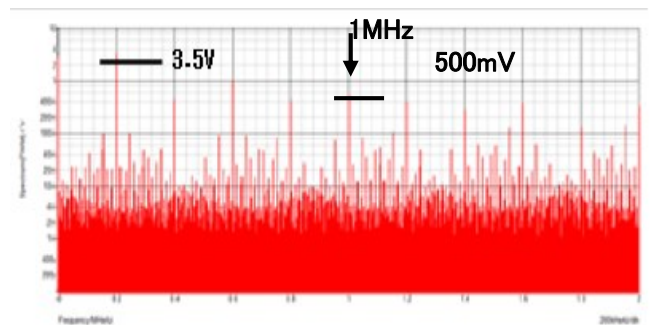


図 3 : 降圧型スイッチング電源のスイッチ駆動信号のスペクトラム (スペクトラム拡散無し)

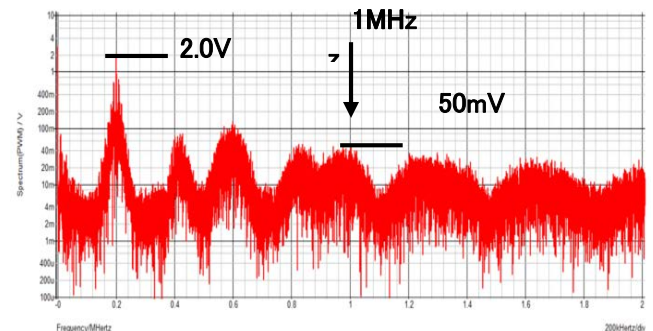


図 4 : 降圧型スイッチング電源のスイッチ駆動信号のスペクトラム (スペクトラム拡散有り)

2.3 パルス幅コーディング (PWC) 方式

そこで, 本論文で提案するパルスコーディングによるスペクトラム拡散技術では, 2 値のみの微小変調 (符号) に限定しパルスを発生させる. これらのパルスを適切に切換え制御することでスイッチング電源の出力電圧を安定させる. この結果, クロック周波数のスペクトラム成分を拡散するとともに, 任意の設定周波数にノッチを発生させることができる.

提案する PWC (Pulse Width Coding) 方式では, アナログの出力電圧誤差をデジタル信号へ変換する. この信号でパルス幅を適切に切換え制御することでスイッチング電源の出力電圧を安定させる.

PWC 方式のノッチ周波数の実験式を示すにあたり, パラメータを定義する. パルス周期を T とし, 変調幅の短い方を W_L , 長いほうを W_H と表す. また, 式にある N は自然数を表す. このときノッチ周波数 F_n は数値実験で得た下記の式で示される.

$$F_n = N \{ 1 / (W_H - W_L) \} \quad (2)$$

上式より, ノッチ周波数はコーディング信号のパルス幅の差のみに依存し, クロック周波数に依存しないことがわかる. また, パルス幅の調整により, ノッチ周波数を任意に設定できる.

3. パルスコーディング方式電源の検討

3-1. PWC方式スイッチング電源の構成

図 5 にパルスコーディング方式スイッチング電源の構成を示す。図中のパルスコーディング (Pulse Coding) 部では帰還するデジタル値に応じてパルス幅、パルス位置及びパルス周期等をコーディングする。本方式では図 6 に示した PWC 方式の提案回路を用いる。制御部では、出力電圧 V_0 を基準電圧 V_r と比較増幅し、コンパレータを用いて 1bit の High/Low 信号へ変換する。この信号を図 6 のコーディング回路で H/L に対応したパルスへ変換し、入力スイッチへフィードバックする。図 7 に H/L の SEL 信号と発生する PWC パルス (W_L, W_H) を示した。

ここで出力電圧を安定制御するためには PWC パルスの Duty (D_L, D_H) に下記の条件が必要である。

$$D_L < D_0 < D_H \quad (3)$$

ここで $D_0 \cong V_0/V_i$ (降圧型電源) (4)

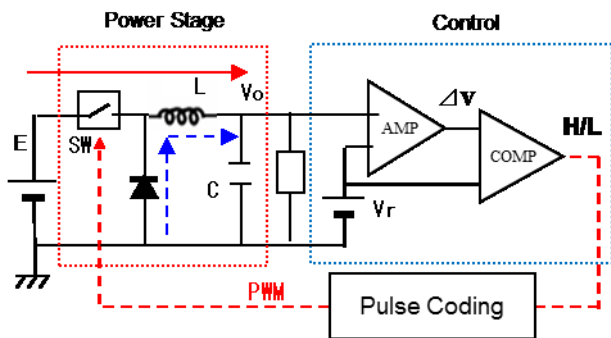


図 5 : パルスコーディング方式スイッチング電源

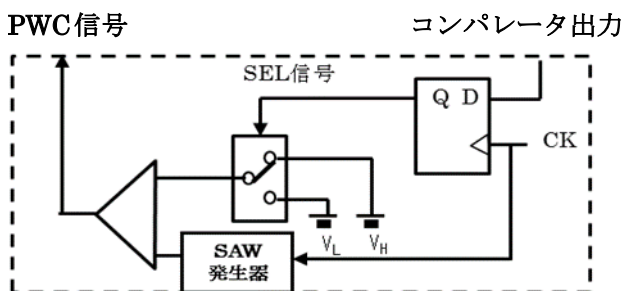


図 6 : PWC 方式のパルスコーディング部

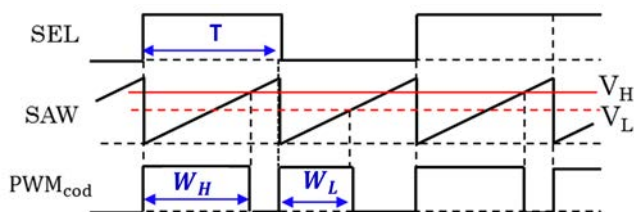


図 7 : PWC 方式 SW 電源の主要信号波形

3-2. PWCスイッチング電源のシミュレーション結果

回路シミュレータ SIMetrix により PWC 方式スイッチング電源のクロックスペクトルでのノッチの有無を検討した。本方式では変調パターンを 2 通りにしているため応答速度が遅くなり、リップルが発生しやすい。その対策としてクロック周波数を 500kHz と高く設定した。表 1 の各パルス幅を実験式(2)に代入すると、ノッチ周波数 f_{notch} は 769kHz, 1.54MHz と算出される。

表 1 シミュレーション回路のパラメータ値

| 入力電圧E | 出力電圧 V_0 | 出力電流 I_0 | L |
|-------|---------------|------------|----------|
| 10.0V | 5.0V | 0.25A | 200uH |
| C_0 | クロック f_{ck} | Coding幅1 | Coding幅2 |
| 470uF | 500kHz | 1.6us | 0.3us |

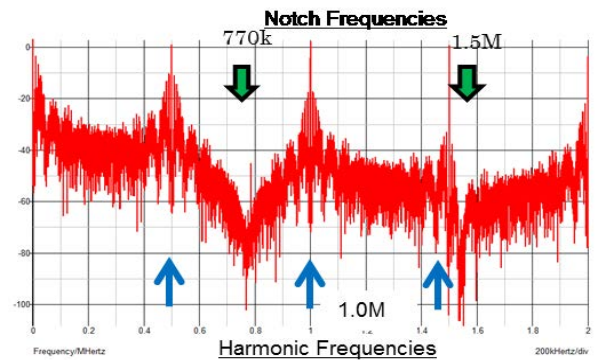


図 8 : PWC方式のスイッチ駆動信号スペクトラム

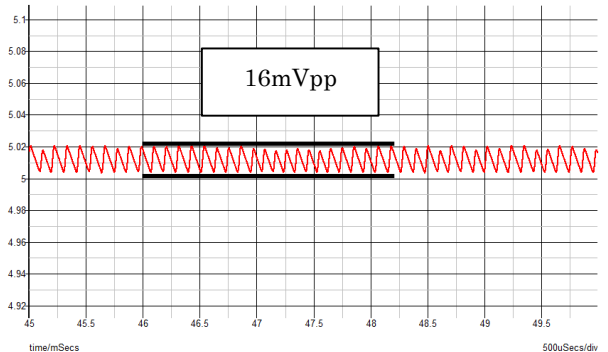


図 9 : PWC 方式 SW 電源の出力 V_0 の波形

一方、図 8 のスペクトラム結果では下向き矢印で示した周波数でノッチが確認でき、そのノッチ周波数は実験式(2)より求めた値と一致しており、シミュレーション結果と実験式は整合性が取れていることが確認できた。さらに、通常のクロックと提案回路の各最大パワーを比較した結果、提案回路のほうが 5dB 程低減で

きた。図 9 は出力電圧波形を示しており、電圧リップルは 16mVpp であり、出力電圧の $\pm 0.16\%$ の変動である。この変動率は非常に小さく、安定した DC-DC 変換ができています。

4. パルスコーディング方式電源の実機

図 5,6 の回路を実装し、PWC 信号のスペクトラムを計測した結果を図 10 に示す。クロック周波数は 160kHz であり、パルス幅を $W_H = 5.0ns$, $W_L = 1.0ns$ と設定した。これらのパラメータを実験式(2)に代入すると約 250kHz が算出され、この式とほぼ一致している。同様にコーディング幅を $W_H = 4.0ns$, $W_L = 1.1ns$ に変更して、ノッチ周波数を $2f_{ck}$, $3f_{ck}$ の間に発生させた結果を図 11 に示す。また、図 12 にクロック周波数を 420kHz としパルス幅を $W_H = 2.0ns$, $W_L = 1.0ns$ と変更した際の PWC 波形のスペクトラムを示す。

これらの結果で実験式との整合性が確認できた。

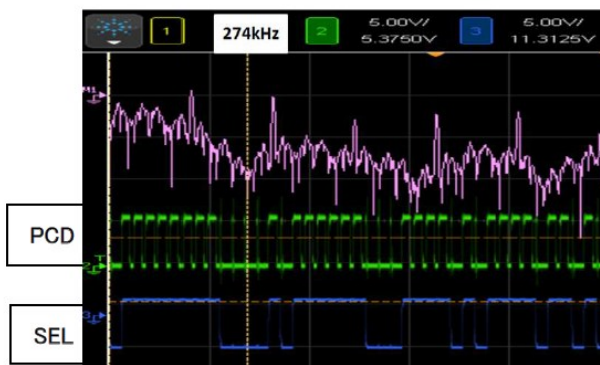


図 10 : 実機での PWC 波形とそのスペクトラム

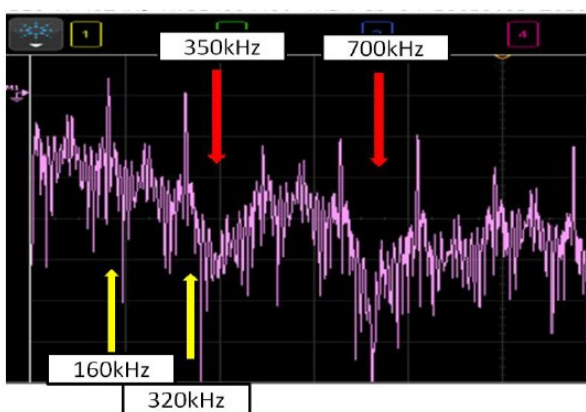


図 11 : 実機での PWC のスペクトラム
(クロック周波数 160kHz)

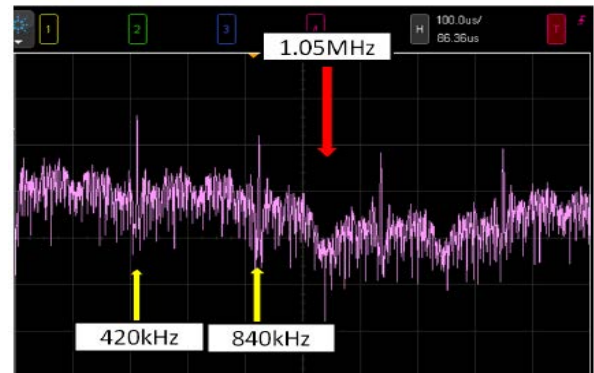


図 12 : 実機での PWC のスペクトラム
(クロック周波数 420kHz)

5. まとめ

本論文ではスイッチングコンバータに使用可能な、スペクトラム上の任意周波数にノッチを発生させる PWC 方式を提案した。本方式におけるノッチ周波数の発生式を実験的に導出した。

さらに提案方式をスイッチング電源に適用する回路構成を設計し、シミュレーションで有効性を示した。すなわちピークスペクトラムの低減、ノッチの発生と式との整合性、電源電圧の安定性を確認した。この回路をもとに実機での検証も行い、ノッチの発生及びノッチ発生式との整合性を確認した。

今後はさらにノッチ特性を有するスペクトラム拡散のためのさまざまなアルゴリズム[1]を検討・検証していく。

文 献

- [1] R. Khatami, H. Kobayashi, Y. Kobori, "Delta-Sigma Digital-to-Time Converter For Band-Select Spread Spectrum Clock", Key Engineering Materials, Advanced Micro-Device Engineering V, pp. 79-92 (2015).
- [2] 荒船拓也, Ramin Khatami, 小堀康功, 小林春夫, "ΔΣ 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, 宇都宮 (2015 年 3 月)
- [3] Y. Kobori, N. Tsukiji, N. Takai, H. Kobayashi, "EMI Reduction by Extended Spread Spectrum in Switching Converter", IEICE Technical Report EMCJ 2015-18, pp. 1-6, Bangkok, Thailand (June 2015).
- [4] Y. Kobori, T. Arafune, N. Tsukiji, N. Takai, H. Kobayashi, "Selectable Notch Frequency of EMI Spread Spectrum using Pulse Modulation in Switching Converter", IEEE 11th International Conference on ASIC, Chengdu, China (Nov. 2015)
- [5] Y. Kobori, F. Fukaya, T. Arafune, E. Li, N. Tsukiji, N. Takai, H. Kobayashi, "Spread Spectrum Notch Frequency using Pulse Coding Method for Switching Converter of Communication Equipment", 18th International Conference on Electronic, Information and Communication Engineering, Amsterdam, Netherlands (May 2016).