

# パルス周期コーディング方式電源のスペクトラム拡散 におけるノッチ特性の検討

Manimel wadu Sahan dulara\* 孫逸菲 築地伸和 小堀康功 小林春夫 (群馬大学)

Notch frequencies of EMI Spread Spectrum for DC-DC Converter using Pulse Coding method

Manimel wadu Sahan dulara\*, Yifei Sun, Nobukazu Tsukiji, Yasunori Kobori, Haruo Kobayashi  
(Gunma University)

## Abstract

This paper proposes novel EMI reduction methods in electronic systems through spread spectrum technique with adjustable notch frequencies using the Pulse Width Coding (PWC) method of the DC-DC buck converter. Furthermore, we consider here to generate a wide range of notch frequencies based on our derived theoretical equations, and we show that our method using Pulse Cycling Coding (PCC) can extend the adjustable notch frequency range by 15 times compared to conventional methods.

キーワード: スイッチング電源, パルスコーディング, スペクトラム拡散, ノッチ周波数

(Keywords: Switching Converter, Pulse Coding, Spread Spectrum, Notch Frequency)

## 1. はじめに

近年,電子機器に電圧を供給する電源回路では,スイッチのON・OFFにより,電力を安定供給するスイッチング型電源回路が幅広く使用されている. また,高速高周波化・高密度化に伴い,電磁波輻射(Electro-Magnetic Interference: EMI)が問題となってきた. 従来のスイッチング電源ではノイズを低減するためにシールドフィルタを利用したものが多いが,専用部品であるチップフェライトビーズやコモンモードチョークコイル等の追加による高コスト化や,基板面積が余計に必要なことが問題点である.

本研究では,スイッチング電源のEMI低減とスペクトラム拡散において,パルス幅コーディング PWC (Pulse Width Coding) 方式により,特定の周波数バンドにノイズの少ないノッチ特性を発生させてきた. 今回,さらにパルス周期コーディング PCC (Pulse Cycle Coding) を検討し,任意周波数でのノッチ発生に加え,その高周波が 15 倍以上の高調波まで拡張することをシミュレーションにより確認した.

## 2. EMI ノイズのスペクトラム拡散

本節では,アナログ変調によるスペクトラム拡散により,ノッチ周波数を幅広く高周波までのEMI低減できる PWC 方式を説明する. まず初めに,降圧形 DC-

DC コンバータの動作原理を簡単に説明する. 次に高周波が 15 倍以上の高周波まで拡散できたパルス周期コーディング (PPC) 方式による結果を報告する.

### <2.1> 降圧形 DC-DC コンバータの動作原理

図 1 に電圧モード制御による降圧形 DC-DC コンバータ回路を示す. 図 1 の回路でパワースイッチ SW がオン時には,スイッチの両端が等しい電圧になる. 一方, SW スイッチがオフ時には,ダイオードの順方向電圧を無視した場合,インピーダンス入力電圧 ( $V_s$ ) は GND と等しくなる. スイッチングのオンとオフを交互にすることにより,  $V_s$  の電圧波形は入力電圧 ( $E$ ) と GND を繰り返す矩形になる. LC フィルタで平滑化することによって直流電圧として得られる. そして,出力電圧を一定に制御するため,矩形波の時比率 (Duty Ratio) 制御する必要がある. 出力電圧と基準電圧 ( $V_{ref}$ ) の誤差を増幅器により増幅し,コンパレータで比較することによってスイッチのオン・オフ制御する信号 (PWM) を発生する. これが降圧形コンバータの原理である.

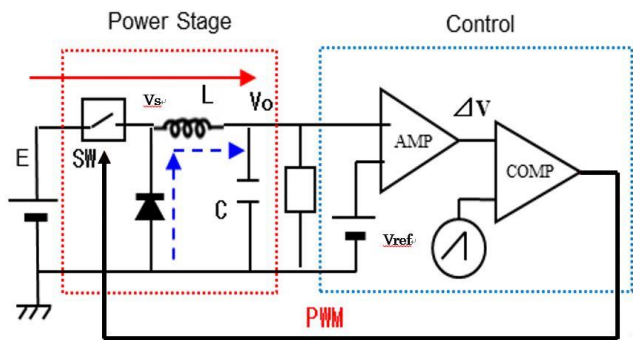


図1 降圧形スイッチング電源の構成  
Fig.1 Buck type switching converter

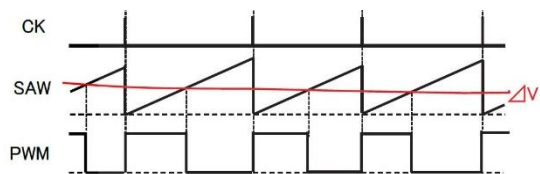


図2 降圧形スイッチング電源の主要な波形  
Fig.2 Waveforms of switching buck converter

### <2.2> 従来のスペクトラム拡散方式

図3, 図4に一般的なPWMのスペクトラムとスペクトラム拡散を施したPWMのスペクトラムを示す。これらのクロック周波数は200kHzであり, そのスペクトラムの電圧が3.5Vから2.0Vまで低減が確認できる。ボトムレベルは全体に10mVに増大している。

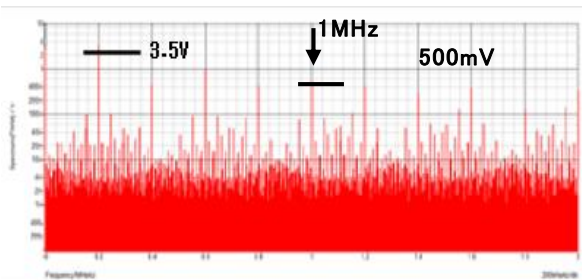


図3 降圧形電源のスペクトラム (EMI 拡散なし)  
Fig.3 Buck converter signal spectrum without EMI reduction

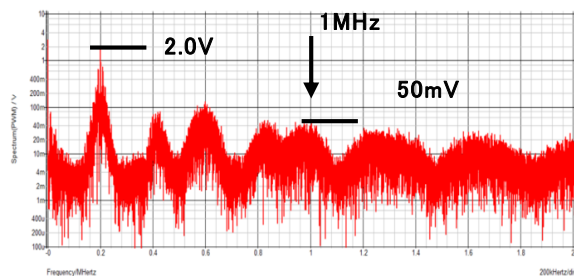


図4 降圧形電源のスペクトラム (EMI 拡散有り)  
Fig.4 spectrum with EMI reduction

## 3. パルスコーディング方式

### <3.1>パルスコーディング方式電源

一般にスイッチング電源の制御方式として帰還するパルス幅をリニアに変調するPWM方式が利用されている。帰還パルスの幅を変調する方式としてパルスコーディングPWC方式やパルス周期を変調する方式としてPCC方式を検討してきた。パルス幅コーディングPWC (Pulse Width Coding) 制御電源の構成を図5に示し, 回路の動作波形を図6に示す。ただし, 安定制御を行うためには次式の関係が必要である。

$$D_L < D_0 = (V_{out}/V_{in}) < D_H \quad (1)$$

$D_H, D_L$ はデジタル信号がそれぞれ High, Low のときに生成されるパルスの Duty 比である。

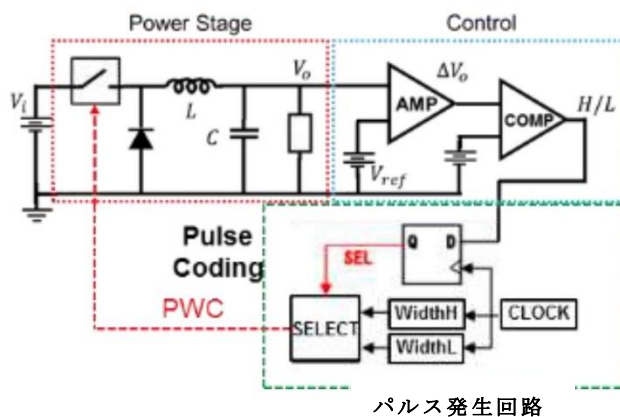


図5 パルスコーディングPWC信号の生成回路  
Fig.5 Converter of pulse coding

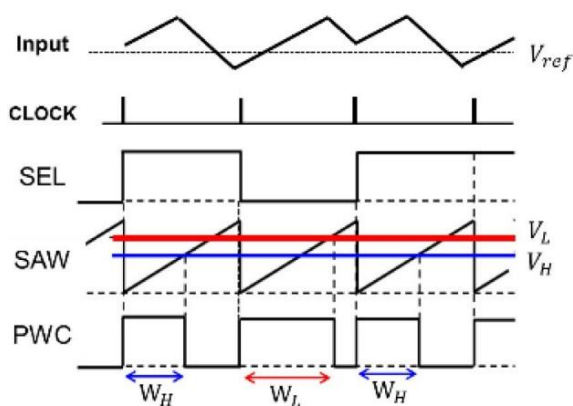


図6 PWC生成における主要波形  
Fig.6 Coding pulse of PWC signal

### <3.2> PWC方式のシミュレーション結果

SIMPLIS回路シミュレータにより, PWC方式を用いたノッチ特性を検討した。SEL信号がLOWの時のパルス幅・周期を  $W_L \cdot T_L$ , HIGHの時のパルス幅・周期

を  $W_H \cdot T_H$  と表す. また, 条件を満たすためには  $W_L > W_H, T_L < T_H$  になり,  $N \cdot M$  は自然数となる. PWC 方式のノッチ周波数を (2) 式に表す.

$$f_{\text{notch}} = N \{ 1 / (W_L - W_H) \} \quad (2)$$

すなわちノッチ周波数は2つのパルス幅の差により設定することが可能になる. 今回のパラメータとしてクロック周波数 500KHz,  $W_L=160\text{ns}, W_H=20\text{ns}$ , パルス幅差 ( $\Delta W$ ) = 140ns のときノッチ周波数 = 1.54MHz となる. 出力電流は 0.25A の時, 出力電圧リップルは図 8 のように  $\Delta V_o = 2\text{mV}$  になる. また, アンダーシュート/オーバーシュートはわずかに  $\pm 2.5\text{mV}$  であり, 出力電圧  $V_o = 5.0\text{V}$  の  $\pm 0.05\%$  と十分に小さい.

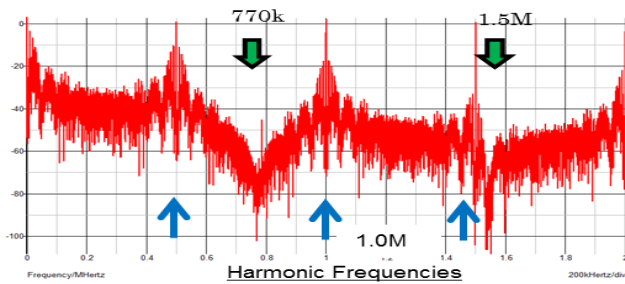


図 7 PWC 方式のスペクトラム  
Fig.7 Simulated spectrum of PWC control

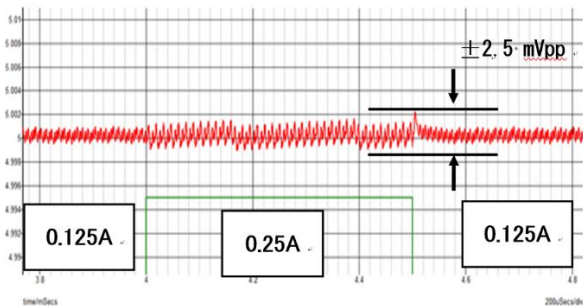


図 8 PWC 方式の出力リップル  
Fig.8 Output voltage ripple of PWC control

#### 4. パルスコーディング方式の理論解析

##### <4.1> パルス周期コーディング (PCC) 方式

本節では, 提案する PCC (Pulse Cycle Coding) 方式を用いたパルスコーディング制御電源回路の動作原理について説明する. 図 9 に PCC 方式のスペクトラム拡散電源の回路図を示し, 回路の動作波形を図 10 に示す. PCC 方式とは周波数及びパルス幅が一定で, パルス周期の異なる 2 つパルスを用いるパルスコーディング方式である. パルス波形を PWC と比較して図 11 に示す.

PCC 方式におけるノッチ周波数を解析するコーディングパルス 2 列をフーリエ変換すると, (3) 式が得ら

れ, その絶対値を取り (4) 式が得られる. この式の絶対値をとる. ノッチ周波数は (7) 式で表わされる.

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

$$f(\omega) = \int_0^W f(t)e^{-j\omega t} dt + \int_{T_L}^{T_L+W} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

$$f(\omega) = \frac{1}{\omega} \{ j \cos(\omega T_L) + \sin(\omega T_L) \}$$

$$-j \cos(\omega(T_L - W)) - \sin(\omega(T_L - W)) - j \cos(\omega T_H) - \sin(\omega T_H) + j \cos(\omega(T_H - W)) + \sin(\omega(T_H - W)) \quad (3)$$

$$|f(\omega)| = (T_H - T_L) \left| \text{sinc} \left\{ (T_H - T_L) \frac{\omega}{2} \right\} \right| \left| \sin \left\{ W \frac{\omega}{2} \right\} \right| \quad (4)$$

$$f_{n1} = \frac{N}{(T_L - T_H)} \quad f_{n2} = \frac{M}{W} \quad [N, M \text{ は自然数}] \quad (5)$$

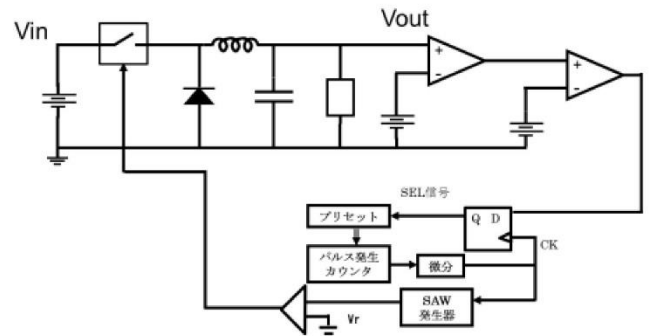


図 9 PCC 信号の生成回路  
Fig.9 Converter of EMI reduction & PCC control

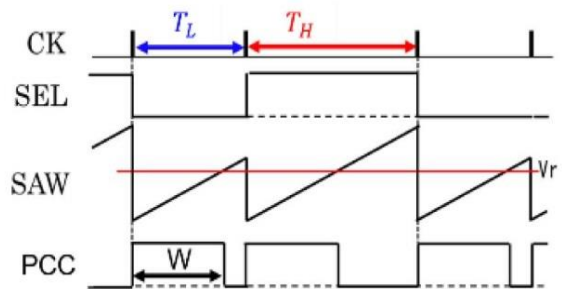


図 10 PCC 信号生成における主要波形  
Fig.10 Coding pulse of PCC control

表 1 シミュレーションパラメータ

Table 1 Simulation parameters

| 入力電圧  | 出力電圧  | 出力電流  | L     |
|-------|-------|-------|-------|
| 10.0V | 3.0V  | 0.5A  | 100uH |
| Co    | W     | TL    | TH    |
| 470uF | 305ns | 864ns | 464ns |

(2), (5) 式により PCC 方式では PWC 方式と異なり, コーディングパラメータである周期差とパルス幅に依存したスペクトラム特性である. スイッチング電源の出力を安定制御させるには(1)式と同様にクロックの周期とパルス幅 (W) は (6) 式の関係が必要である.

$$\frac{w}{T_H} < D_o < \frac{w}{T_L} \quad (6)$$

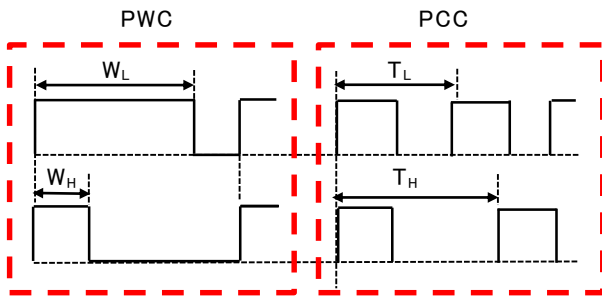


図 11 各種パルスコーディング方式

Fig.11 Comparison between pulse coding methods

## 5. シミュレーション結果

シミュレーションでのパラメータ値を表 1 に示す. 図 12 のように  $T_L=864\text{ns}$ ,  $T_H=464\text{ns}$ ,  $W=306\text{ns}$  として同期差は  $\Delta T=400\text{ns}$  になる. 定常出力電流  $I_o=0.5\text{A}$  時の出力電圧リップルは  $\Delta V_o=0.42\text{mVpp}$  である. 理論的には  $F_{n1}=2.5\text{MHz}$ ,  $F_{n2}=3.3\text{MHz}$  になる. 図 13 に示すシミュレーション結果をみると  $F_{n1}$  ノッチ周波数を確認できず,  $F_{n2}$  ノッチ周波数およびその高調波を確認できた. また図 14 では  $M \times F_{n2}$  のノッチ周波数 [ $M=1 \sim 15$ ] を確認できた. 図中の最大高調波は  $15F_{n2}=49.2\text{MHz}$  になる.

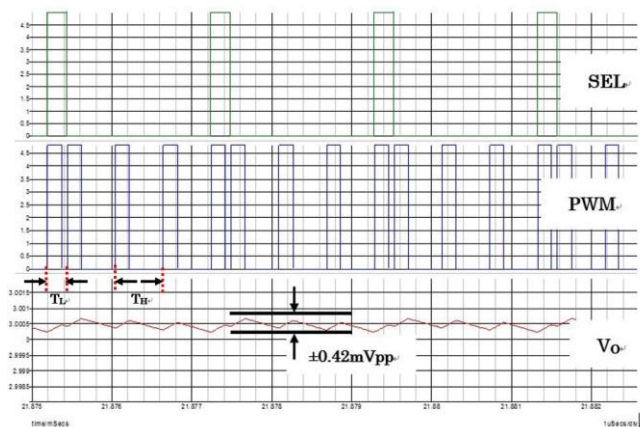


図 12 PCC 方式により出力電圧リップル

Fig.12 Output voltage of PCC control

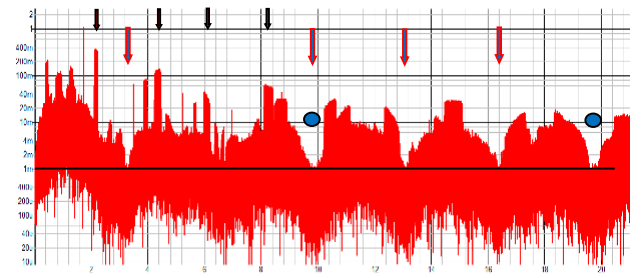


図 13 PCC 方式スペクトラム

Fig.13 Harmonic spectrum with PCC control

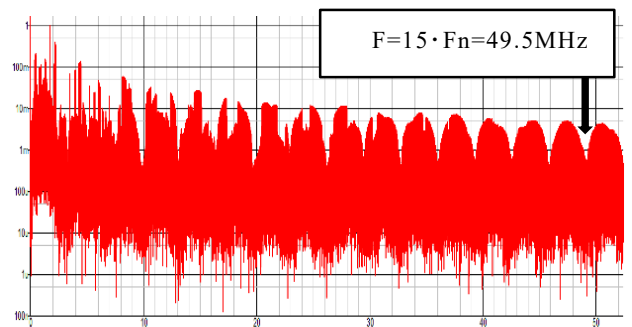


図 14 高周波ノッチ特性拡大スペクトラム

Fig.14 Simulated spectrum

## 6. まとめ

本論文ではノッチ特性を持つスペクトラム拡散方式電源回路に関し, 長さを調整する PCC 方式を用いたスペクトラム拡散を提案し, シミュレーションを用いてその効果を検討した. シミュレーション結果により, 15 倍高調波大ノッチ特性が表れることを確認した.

## 文 献

- [1] Y. Kobori, T. Arafune, N. Tsukiji, N. Takai, H. Kobayashi, "Selectable Notch Frequency of EMI Spread Spectrum using Pulse Modulation in Switching Converter", IEEE 11<sup>th</sup> International Conference on ASIC, Chengdu, China (Nov. 2015)
- [2] Y. Sun, Y. Xiong, N. Tsukiji, Y. Kobori, H. Kobayashi, "Self-adjustable Notch Frequency in Noise Spectrum of Pulse Coding DC-DC Converter for Communication Devices", International Conference on Mechanical, Electrical and Medical Intelligent System (Nov. 2017).
- [3] H. Kobayashi, T. Nabeshima (Editors), Handbook of Power Management Circuits, Pan Stanford Publisher (2016)
- [4] 荒船拓也, 築地伸和, 浅見幸司, 小堀康功, 小林春夫, "パルスコーディング制御スイッチング電源における周波数可変のノッチ特性を有するスペクトラム拡散" 電気情報通信学会環境電磁工学研究会 EMC, 2016-88 東京