

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

EMI Reduction by Spread Spectrum Clocking in Digitally Controlled DC-DC Converters

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† 深井 功† 大西 教久† 竹田 一郎† 松田 順一†

群馬大学大学院 工学系研究科 電気電子工学専攻 〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1

Phone: 0277-30-1788 Fax: 0277-30-1707 e-mail: k.haruo@el.gunma-u.ac.jp

† 東光 (株) 半導体事業センター 〒 350-2281 埼玉県鶴ヶ島市大字五味ヶ谷 18

Ibuki Mori Yoshihisa Yamada Santhos Ario Wibowo Masashi Kono Haruo Kobayashi
Nobukatu TAKAI Yukihiro Fujimura

Toshio Sugiyama † Isao Fukai † Norihisa Onishi † Ichiro Takeda † Jun-ichi Matsuda †

Electronic Engineering Department, Graduate School of Engineering, Gunma University

1-5-1 Tenjin-cho Kiryu Gunma 376-8515 Japan

† Toko, Inc. 18 Oaza Gomigaya Tsurugashima-shi Saitama 350-2281 Japan

要約— この論文ではデジタル制御電源において EMI 低減のためのスペクトル拡散クロックの変調アルゴリズムを提案する。スイッチング電源での PWM 変調方式は、クロックおよびその高調波の特定周波数にスイッチングノイズや高調波ノイズが集中し EMI 問題になる。この問題低減のためスペクトラム拡散クロック変調が用いられる。従来のアナログ制御方式では実現が難しかった複雑なスペクトル拡散クロックのアルゴリズムをデジタル制御回路部において実現することにより、従来より EMI 低減が効果的であることを示す。その提案変調方式のアルゴリズム、電源シミュレータ (SCAT) によるシミュレーション結果を述べる。

キーワード : デジタル電源, PWM 制御, スペクトル拡散クロック, EMI

1 はじめに

近年、携帯機器の低消費電力化に伴い、電源回路には高効率で大電流出力が求められておりそれを実現する回路構成にスイッチング電源回路がある。しかしながら、このスイッチング電源回路は非常に大きなスイッチングノイズを発生するデメリットも持ち合わせている。昨今、デジタル機器の普及が進むにつれ電子機器は以前と比べ非常に大きな電氣的ノイズ源と見られるようになり、このノイズに対する厳しい規制が規定されるようになった [1]。これらの電氣的ノイズの性能指標を表すものとして、妨害側は EMI (Electro-Magnetic Interference: 電磁障害) とよばれ、

ノイズ耐性側は EMS (Electro-Magnetic Susceptibility: 電磁耐性) とよばれる。さらにこれら二つを合わせたものは EMC (Electro-Magnetic Compatibility: 電磁環境両立性) とよばれる。市販される電子機器は定められた EMC 規格に適合させなくてはならない。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やフィルタが使われることが多い。この方式はノイズを効率よく低減できるが、トランスやコイルを利用するため小型化が難しく、またコスト高になる。

そこで、我々はパワーモジュールではなく、スイッチング電源回路への制御モジュールに着目した。そこでアナログスイッチング電源で用いられている技術「スペクトラム拡散技術」[2, 3, 4, 5] をデジタルスイッチング電源 [6, 7] に応用・展開可能かを検討し、デジタル制御でのみ実現可能な複雑であるが効果的な変調方式アルゴリズムを 2 つ提案する。デジタル電源では、制御部に関して容易にシステム変更が可能な上、アナログ制御では難しかった高度な制御理論の導入や新トポロジー制御の導入をすることができる。今回提案する二つの変調方式は、アナログ電源では複雑で実現が難しいが、デジタル電源では DSP 部で実現可能である。

また SCAT (Switching Converter Analysis Tool) 電源高速シミュレータ [8] を用いてデジタル電源シミュレーションを行う手法を開発し、提案アルゴリズムの EMI 低減効果を確認する。SCAT はプログラム素子をもち、プログラミングによりさまざまなクロック変調を実現し、様々

な素子を作成可能である。図1にプログラム素子作成例を示す。図2・図3には、今回シミュレーションを行う回路を示す。実際のデジタル電源回路では、このプログラム部をDSPによって処理を行う。

この論文は以下のような構成になる。2節に従来のスペクトル拡散クロック変調方式、3節に提案する二つの変調方式のアルゴリズム、4節に提案する二つの変調方式の低減効果のシミュレーション結果、5節にまとめと今後の課題を記述する。

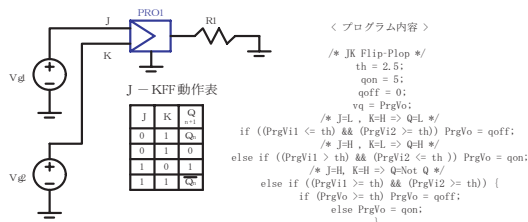


図1: プログラム素子の一例。

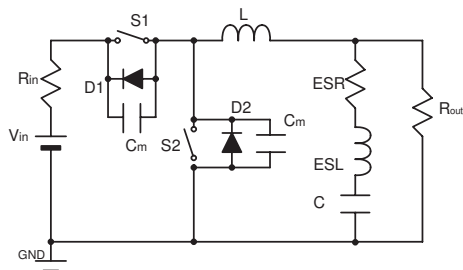


図2: シミュレーション回路図。

2 従来のスペクトル拡散クロック変調方式

スイッチング電源のクロック変調方式として、基本としてPWM(Pulse Width Modulation)があり、またスペクトラム拡散のためにそれを少し変形したPPM(Pulse Position Modulation), ASM(Asynchronous Modulation)等がある[2, 3, 4, 5].

PWM変調方式(図4)は一定クロック周期でまたクロックの立ち上がりタイミングも一定周期で、クロックパルスのデューティを変化させそれに応じてスイッチング電源中のスイッチをオン・オフさせる方式となっている。

PPM変調方式(図5)は、クロック周期は一定であるがクロックの立ち上がりタイミングをランダムに変化させる方式である。

パラメータ項目	値
Rout	1Ω
L	2μH
C	4.7μF
ESR	4mΩ
ESL	6.8nH
Cm(Highスイッチ)	240nF
Cm(Lowスイッチ)	100nF
Rin	1mΩ
Vin	6V
Fsw(スイッチング周波数)	1M, 2MHz
デッドタイム	10n/1MHz 5n/2MHz

素子	オン抵抗	オフ抵抗
スイッチS1	0.4m	1M
スイッチS2	0.8m	1M
素子	オン抵抗	オフ抵抗
ダイオードD1	10m	1M
ダイオードD2	10m	1M

C:0603 X5R 47μF 63V
MRATA製

図3: シミュレーションに用いた素子パラメータ表。

ASM変調方式(図6)は、クロック毎にデューティ比は保ちながら周期幅をランダムに変更する変調方式である。

今回提案する2つのスペクトル拡散クロックのPAS(=PPM ASM Select)とPAF(PPM ASM Fused)の二つの変調方式は、その名のとおり、PPMとASMの二つの変調方式を利用した構成である。今回提案する変調方式に使用するPPM変調方式とASM変調方式の動作は以下のようなになる。

PPMは、図7に示すように周期毎にランダム値を与え、ランダム値に応じて各モード(0~3)を選択し、図8のようなクロックが出力される。各モード(0~3)については、図9に示し、図10にランダム値と対応したモードの関係を示す。

ASMは、図11に示すように周期毎にランダム値を二つ与え、PPMと同様に各モード(A~E)が選択され、図12のようなクロックが出力される。選択される各モードについては、図13に示し、図14にランダム値と対応したモードの関係を示す。

3 デジタル電源用スペクトル拡散クロックアルゴリズムの提案

この節では、デジタル電源用に提案する二つ変調方式((i)PPMとASMの二つをランダムに選択するPAS変調方式、(ii)PPMとASMの二つを融合するPAF変調方式)の動作について記述する。

3.1 提案アルゴリズム 1: PAS(PPM ASM Select) 変調方式

PAS 変調方式は, PPM と ASM の二つをランダムに選択する変調方式である. ランダム変数値を一つ増やすのみで生成できるので DSP で容易に実現可能である. 動作は, 図 15 に示すように各周期毎に与えられたランダム値に応じて, 周期毎に図 16 に示すようなクロックが出力される. 出力されるモードは, PPM のモード (0~3) と ASM のモード (A~E) の計 9 つである. 図 17 にランダム値と対応したモードの関係を示す.

3.2 提案アルゴリズム 2: PAF(PPM ASM Fused) 変調方式

PAF 変調方式は, PPM と ASM の二つを融合する変調方式である. PAS 変調方式と同様にランダム変数値を一つ増やすのみで生成できる. 動作としては, 図 18 に示すように各周期毎に与えられたランダム値に応じて, 周期毎に図 16 に示すようなクロックが出力される. 出力されるモードは, PPM のモード (0~3) と ASM のモード (A~E), 加えて図 20 に示すモード (~) の計 11 つである. 図 17 にランダム値と対応したモードの関係を示す.

4 提案する二つの変調方式の EMI 低減効果のシミュレーション

SCAT を用いて図 2 の回路でのシミュレーションを行った. 二つの提案変調方式ノイズ低減の結果と比較のために PWM 変調方式を適用した際のノイズパワーの図を図 22 に示す. また, 図 23 にはデューティに対するノイズパワーの変化を示す.

5 まとめと今後の課題

この論文では, 従来のアナログ制御電源では実現が難しく, デジタル制御電源で実現可能な複雑であるが効果的なスペクトラム拡散クロックアルゴリズムを 2 つ提案した. (すなわち スペクトラム拡散クロックによる EMI 低減という面で, デジタル電源のアナログ制御電源に比べて性能向上の可能性を示した.) またデジタル電源の SCAT を用いたシミュレーション手法を確立した. 従来のスペクトラム拡散クロック変調方式よりも提案アルゴリズムは十分な EMI 低減効果のあることを SCAT をで確認した.

スペクトル拡散クロックを使用すると出力電圧のリプルが増加する傾向にあるが, 今後その解析と対策を検討していく [9].

謝辞 有意義なご討論をいただきました傘昊先生に謝意を表します.

参考文献

[1] 山崎弘郎編「デジタル回路の EMC」オーム社 (2002 年).

[2] T. Tanaka, et.al., "Random-Switching Control in DC-DC Converters: An Implementation using M-sequence," IEEE PESC (July 1992).

[3] A. M. Stankovic, G. C. Verghese, D. J. Perreault, "Analysis and Synthesis of Randomized Modulation Schemes for Power Converters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.10, no.6, pp.680-693 (Nov. 1995).

[4] T. Daimon, H. Sadamura, T. Shindou, H. Kobayashi, M. Kono, T. Myono, T. Suzuki, S. Kawai, T. Iijima, "Spread-Spectrum Clocking in Switching Regulators for EMI Reduction," IEICE Trans. on Fundamentals, vol. E86-A, no. 2, pp.381-386 (Feb. 2003).

[5] 定村宏, 行方真実, 光野正志, 小林春夫, 石川信宣, "スイッチング電源の EMI 低減化回路と測定による検証," 電子情報通信学会和文誌 C, vol. J86-C, no.11, pp.1169-1176 (2003 年 11 月).

[6] M.He, J. Xu, "Nonlinear PID in Digital Controlled Buck Converters," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA (Feb. 2007).

[7] 木村 圭吾, 森 偉文樹, 山田 佳央, 小林 春夫, 小堀 康功, 清水 一也, 光野正志, 傘昊, デジタル制御電源用 高時間分解能 DPWM 回路電子情報通信学会 第 20 回 回路とシステム (軽井沢) ワークショップ (2007 年 4 月).

[8] 中川正俊 編著, 「SCAT 電源シミュレーション入門」日刊工業新聞社 (2004).

[9] J. Wibben, R. Harjani, "A High Efficiency DC-DC Converter Using 2nH On-Chip Inductors," Tech. Digest of VLSI Circuit Symposium, pp.22-23, Kyoto (June 2007).

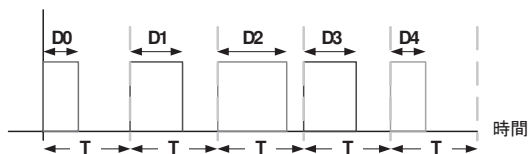


図 4: PWM 変調方式のクロック動作.

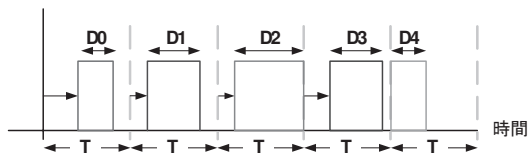


図 5: PPM 変調方式のクロック動作.

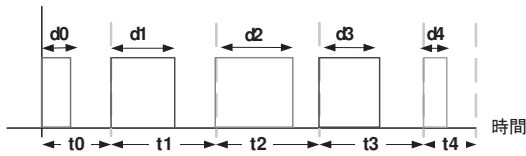


図 6: ASB 変調方式のクロック動作.

ランダム値における各モードの周期とデューティ			
ランダム I	モード	周期 T'	オンデューティの立ち上がり
0	0	$T' = T$	位置変調なし
1	1		25%前へずらす
2	2		50%前へずらす
3	3		75%前へずらす

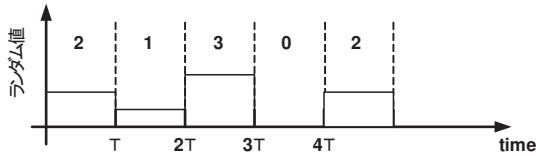


図 7: PPM 変調方式に使用されるランダム値動作.

図 10: PPM 変調方式:ランダム値における各モードの立ち上がりの位置変動.

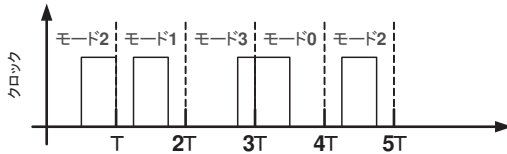


図 8: PPM 変調方式の周期毎のモード.

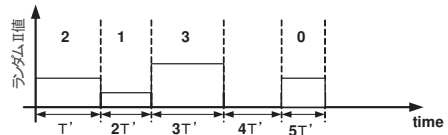
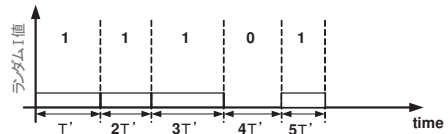
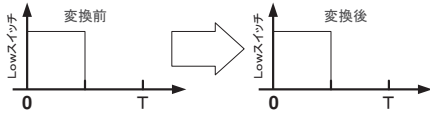
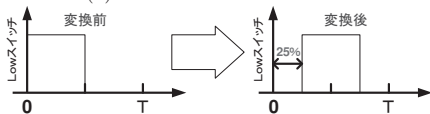


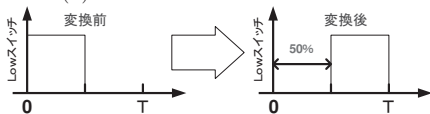
図 11: ASB 変調方式に使用されるランダム値動作.



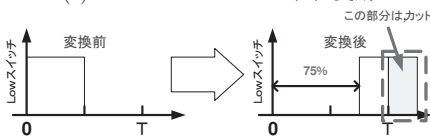
(a) モード 0 のとき:位置なし



(b) モード 1 のとき:25 %位置変動



(c) モード 2 のとき:50 %位置変動



(d) モード 3 のとき:75 %位置変動

図 9: PPM 変調方式における各モード.

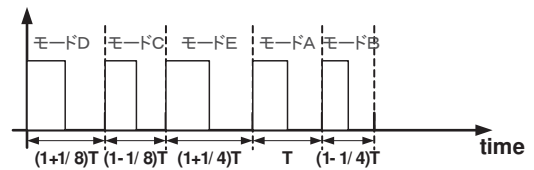


図 12: ASB 変調方式の周期毎のモード.

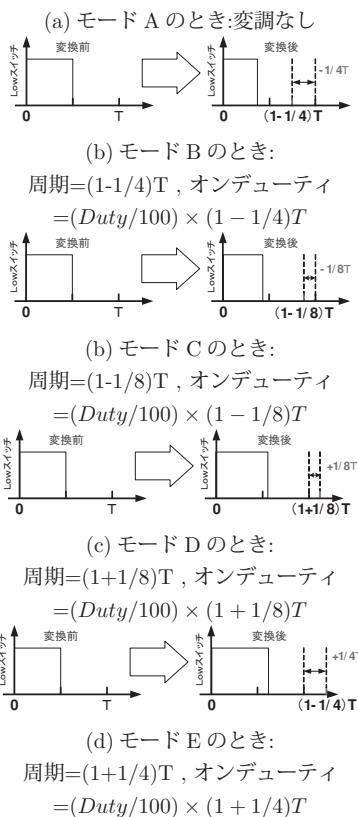


図 13: ASM 変調方式における各モード.

ランダム値における各モードの周期とデューティ				
ランダム I	ランダム II	モード	周期 T'	オンデューティ:Duty [%]
0		A	$T' = T$	$(Duty/100) \times T$
1	0	B	$T' = (1-1/4)T$	$(Duty/100) \times (1-1/4)T$
1	1	C	$T' = (1-1/8)T$	$(Duty/100) \times (1-1/8)T$
1	2	D	$T' = (1+1/8)T$	$(Duty/100) \times (1+1/8)T$
1	3	E	$T' = (1+1/4)T$	$(Duty/100) \times (1+1/4)T$

図 14: ASM 変調方式:ランダム値における各モードの周期とオンデューティ.

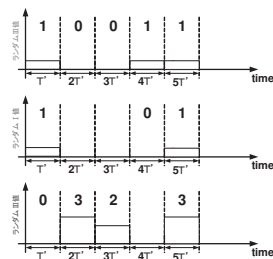


図 15: PAS 変調方式に使用されるランダム値動作.

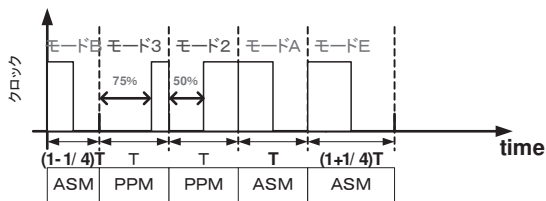


図 16: PAS 変調方式の周期毎のモード.

ランダム値における各モードの周期とデューティ				
ランダム I	ランダム II	変調方式	モード	オンデューティ:Duty [%]
0	0	PPM	0	位置変動なし
	1		25%位置変動	
	2		50%位置変動	
	3		75%位置変動	
1	1	ASM	A	$T' = T$ $(Duty/100) \times T$
			B	$T' = (1-1/4)T$ $(Duty/100) \times (1-1/4)T$
			C	$T' = (1-1/8)T$ $(Duty/100) \times (1-1/8)T$
			D	$T' = (1+1/8)T$ $(Duty/100) \times (1+1/8)T$
			E	$T' = (1+1/4)T$ $(Duty/100) \times (1+1/4)T$

図 17: PAS 変調方式:ランダム値における各モードの周期とオンデューティ.

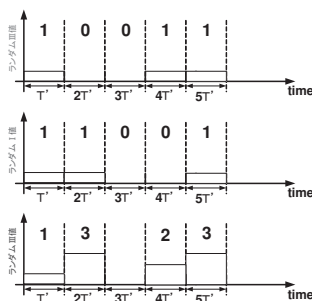


図 18: PAF 変調方式に使用されるランダム値動作.

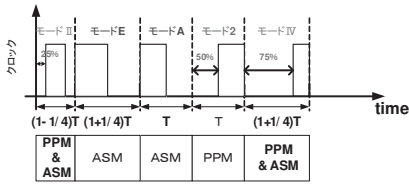


図 19: PAF 変調方式の周期毎のモード。

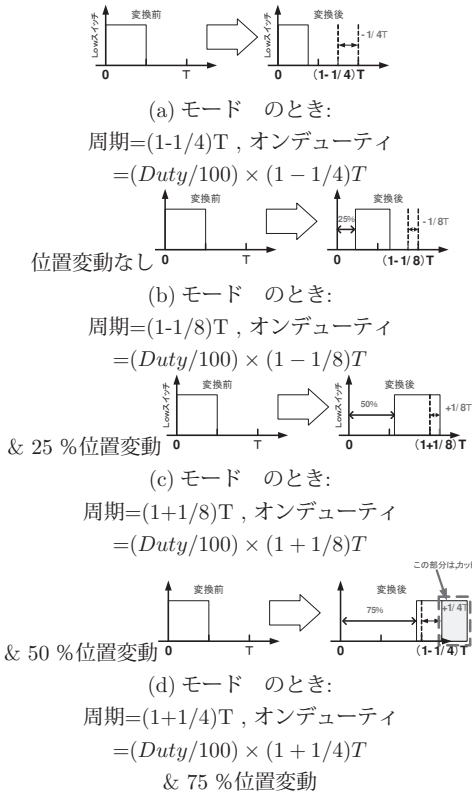


図 20: PAF 変調方式における各モード。

ランダム値における各モードの周期とデューティ					
ランダム値	ランダム値	変調方式	モード	周期T	オンデューティ[Duty %]
0	0	ASM	A	$T = T$	位置変動なし
	1		B	$T = (1-1/4)T$	
	2		C	$T = (1-1/8)T$	
	3		D	$T = (1+1/8)T$	
	3		E	$T = (1+1/4)T$	
1	0	PPM	0	位置変動なし 25%位置変動 ($T = T$) 50%位置変動 75%位置変動	
	1		1		
	2		2		
	3	PPM&ASM	I	$T = (1-1/4)T$	位置変動なし (Duty100) * (1-1/4)T & 25%位置変動
	1		II	$T = (1-1/8)T$	(Duty100) * (1-1/8)T & 25%位置変動
	2		III	$T = (1+1/8)T$	(Duty100) * (1+1/8)T & 50%位置変動
	3		IV	$T = (1+1/4)T$	(Duty100) * (1+1/4)T & 75%位置変動

図 21: PAF 変調方式:ランダム値における各モードの周期とオンデューティ。

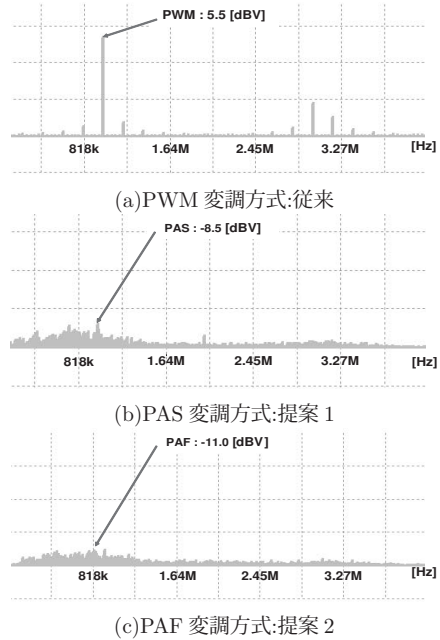


図 22: 周波数におけるノイズパワー (デューティ=50%)。

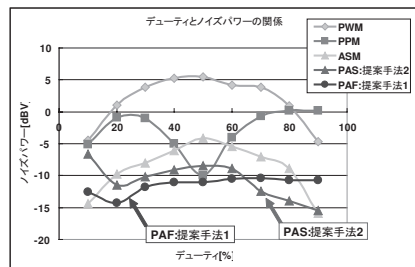


図 23: デューティにおけるノイズパワー。