

複合パルスコーディング制御DC-DCコンバータにおける 適応型ノッチ周波数を有するスペクトラム拡散方式

小堀 康功*、築地 伸和、
高井 伸和、小林 春夫
(群馬大学)

アウトライン

1. 研究背景と目的
2. スイッチング電源とスペクトラム拡散
 - 2-1. DC-DC降圧形コンバータ
 - 2-2. スペクトラム拡散技術
3. パルスコーディング方式電源
 - 3-1. パルス幅コーディング(PWC)方式
 - 3-2. パルス位相コーディング(PPC)方式
 - 3-3. 複合パルスコーディング(PWPC)方式
4. パルス幅コーディング方式電源の実装結果
5. まとめ

研究背景と目的

研究背景

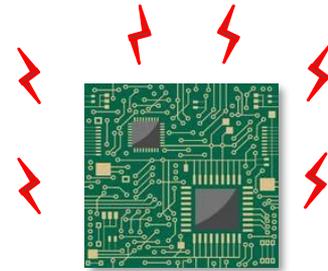
- * 情報通信機器の発展 ➡ スイッチング電源の多用
- * パワースイッチングにより **EMIノイズの発生**
- * 他の機器への妨害低減の必要性が高まる

目的

- ① 電源ラインへの **EMIノイズの低減**
- ② 特定周波数への **ノイズ拡散の除去**

研究背景

電子回路の複雑化・高密度化に伴い
妨害電磁波(EMI)が問題視



EMI

小規模回路でEMIを大幅改善できることから
スペクトラム拡散技術に注目

課題: EMI低減時に近傍周波数にノイズが拡散

ラジオ受信機では不適

EMIノイズの低減と拡散ノイズの周波数制御
できるスペクトラム拡散技術が必要

研究目的と提案法

目的: 任意周波数にノイズ拡散の無い
新方式スペクトラム拡散技術の開発



提案技術: パルスコーディング処理により
拡散ノイズの周波数を任意制御できる
新スペクトラム拡散技術を提案

——— 今回の報告 ———

- ノイズ制御方式の提案 ⇒ パルスコーディング技術
- 複合パルスコーディングによる ノイズ制御技術

アウトライン

1. 研究背景と目的
2. スイッチング電源とスペクトラム拡散
 - 2-1. DC-DC降圧形コンバータ
 - 2-2. スペクトラム拡散技術
3. パルスコーディング方式電源
 - 3-1. パルス幅コーディング(PWC)方式
 - 3-2. パルス位相コーディング(PPC)方式
 - 3-3. 複合パルスコーディング(PWPC)方式
4. パルス幅コーディング方式電源の実装結果
5. まとめ

2. スイッチングコンバータとスペクトラム拡散

2-1. DC-DC降圧形コンバータ

PWM: Pulse Width Modulation

(1) スイッチング電源の構成

* パワーステージ : $V_i \Rightarrow V_o$

入力 V_i をスイッチングし、LCフィルタで平滑 \Rightarrow 出力 V_o

* 制御部 : SW駆動信号の生成

誤差信号の増幅 \Rightarrow 鋸歯状波との比較 \Rightarrow PWM信号発生

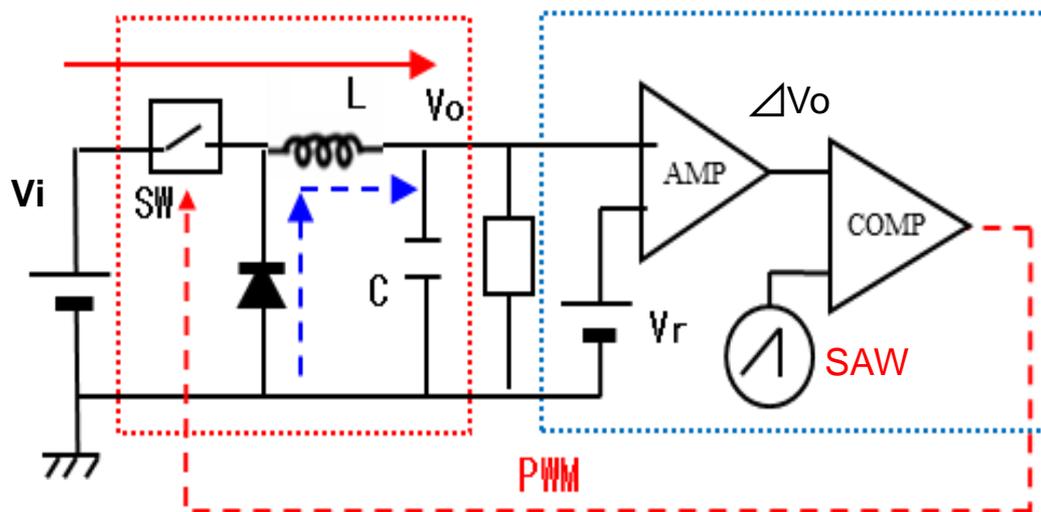


図2-1 降圧型スイッチング電源の構成

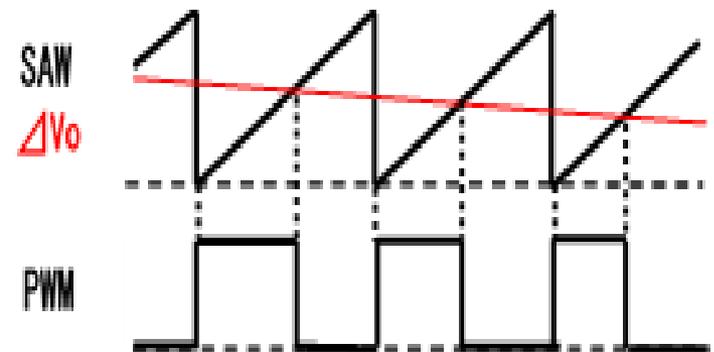


図2-2 制御部での主要信号波形

2. スイッチングコンバータとスペクトラム拡散

(2) スペクトラム拡散方法:

- * 通常、鋸歯状波は固定クロックにより発生
- * 固定クロックの位相/周波数を**ランダム変調**
⇒基本周波数・高調波の集中ノイズを拡散低減

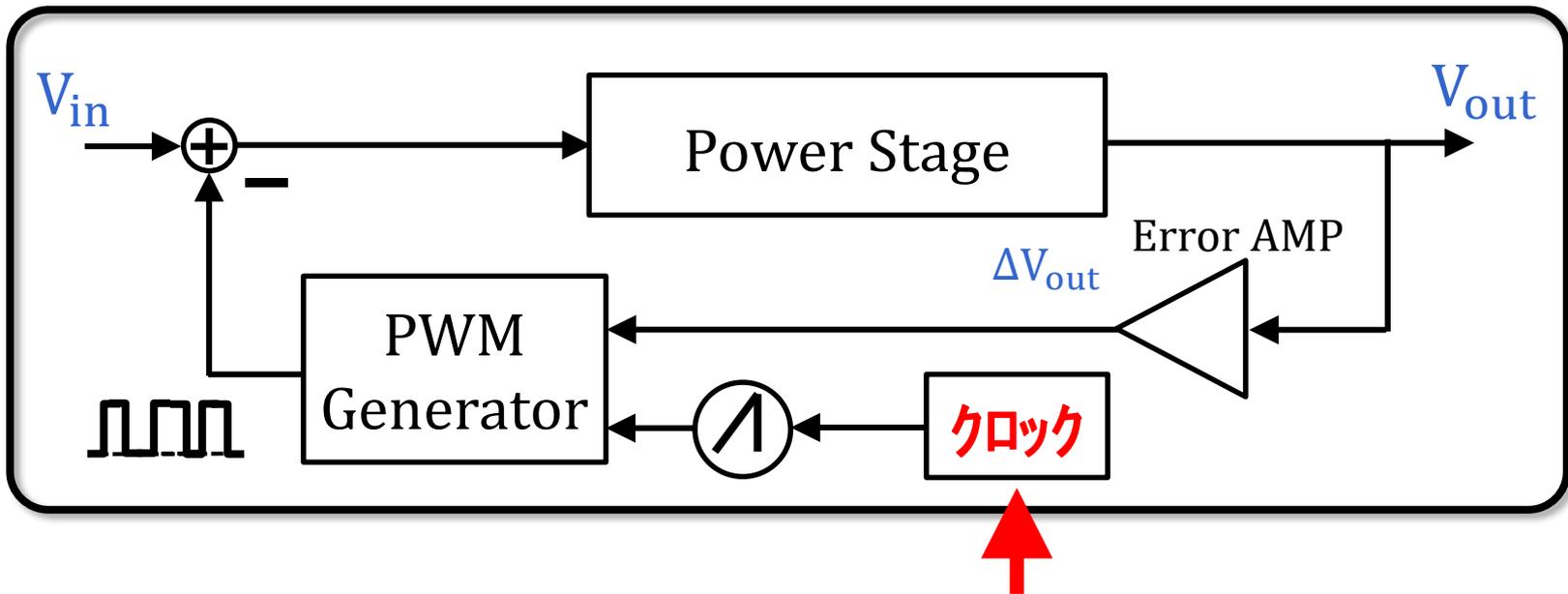


図2-3 スペクトラム拡散方式 ★ 各種位相/周波数変調

2. スイッチングコンバータとスペクトラム拡散

2-2. スペクトラム拡散技術

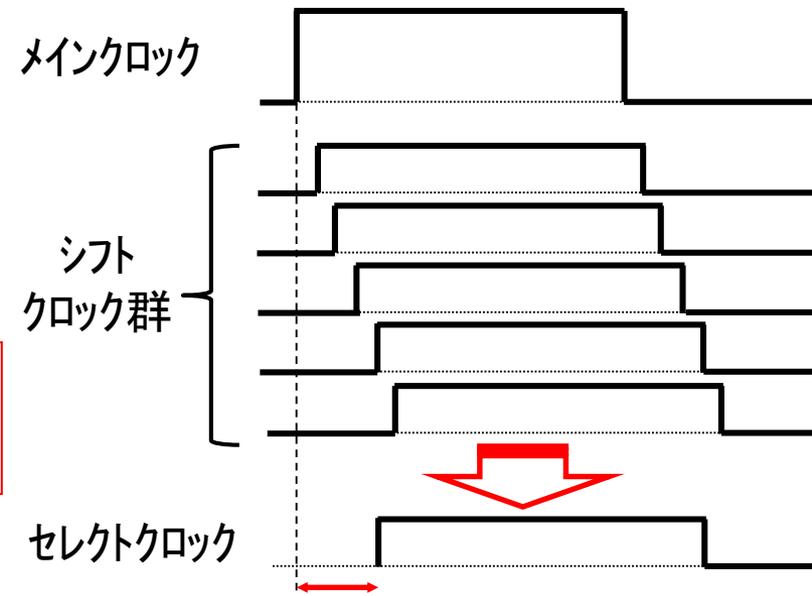
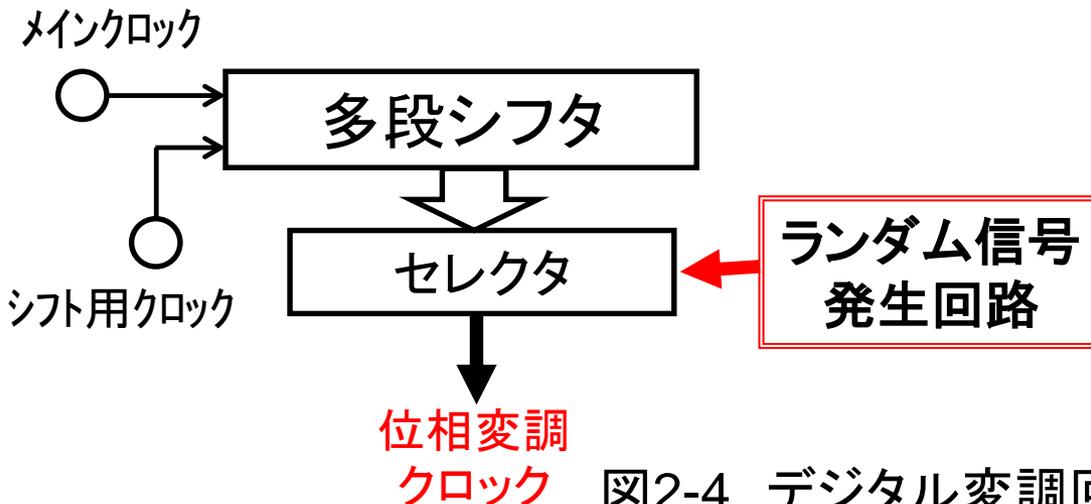
a) デジタル位相変調方式:

* メインクロックを、シフトレジスタに順次保存

* 周期毎にランダム信号でセレクト ⇒ **ランダム位相クロック**

欠点: 10ビット程度必要. 1,000個のレジスタ・セクタ必要

● デジタル制御電源に最適



2. スイッチングコンバータとスペクトラム拡散

b) リニア掃引周波数変調方式:

- * VCOクロックを、三角波で周波数変調: 簡単構成
- * 変調三角波: 200 Hz, 0.5 V(DC:4.0V)
- * スペクトラムは一様に平坦に拡散
- * 三角波のレベル・周波数により
拡散スペクトラムは変化

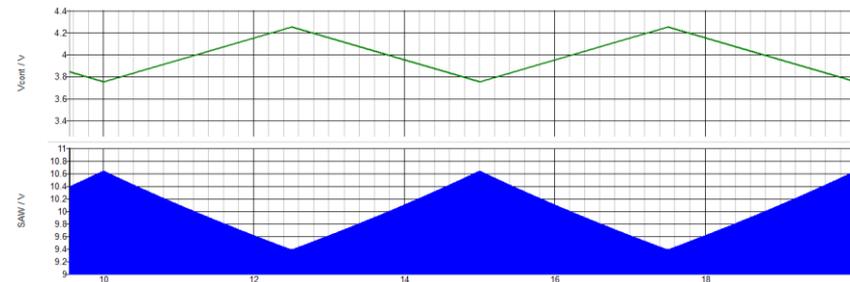


図2-7 変調信号とSAW波形

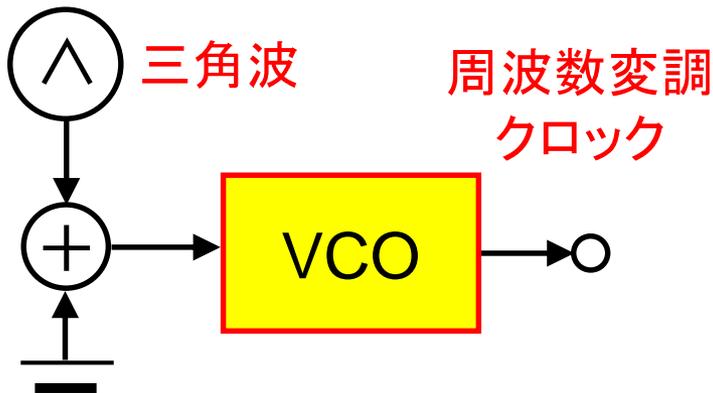


図2-6 デジタル変調回路

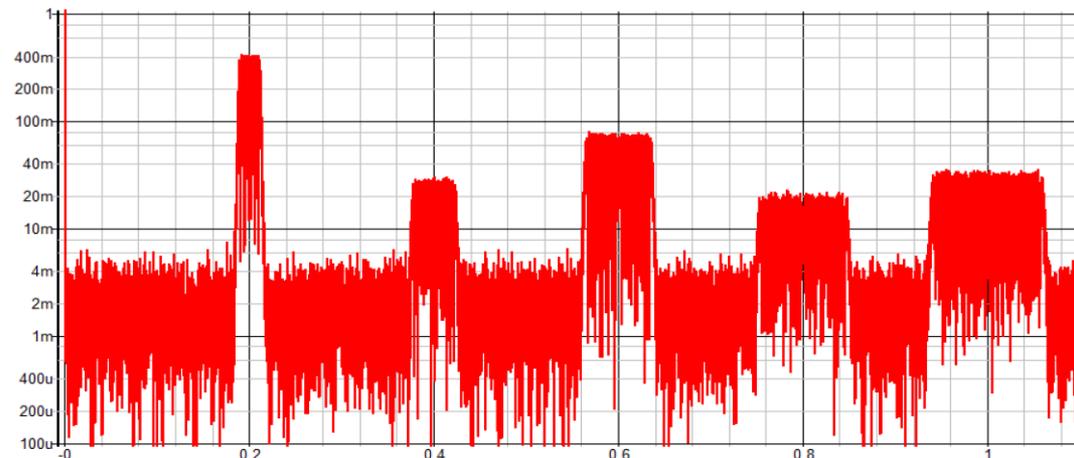


図2-8 スペクトラム拡散結果

2. スイッチングコンバータとスペクトラム拡散

c) 疑似アナログノイズ周波数変調方式:

- * M系列信号をLPFを介して、**疑似アナログノイズ**を生成
- * 応答特性の遅い**PLL回路**で、非周期的化:**周波数変調クロック**
- * スペクトラムは、中心ノイズの近傍に拡散

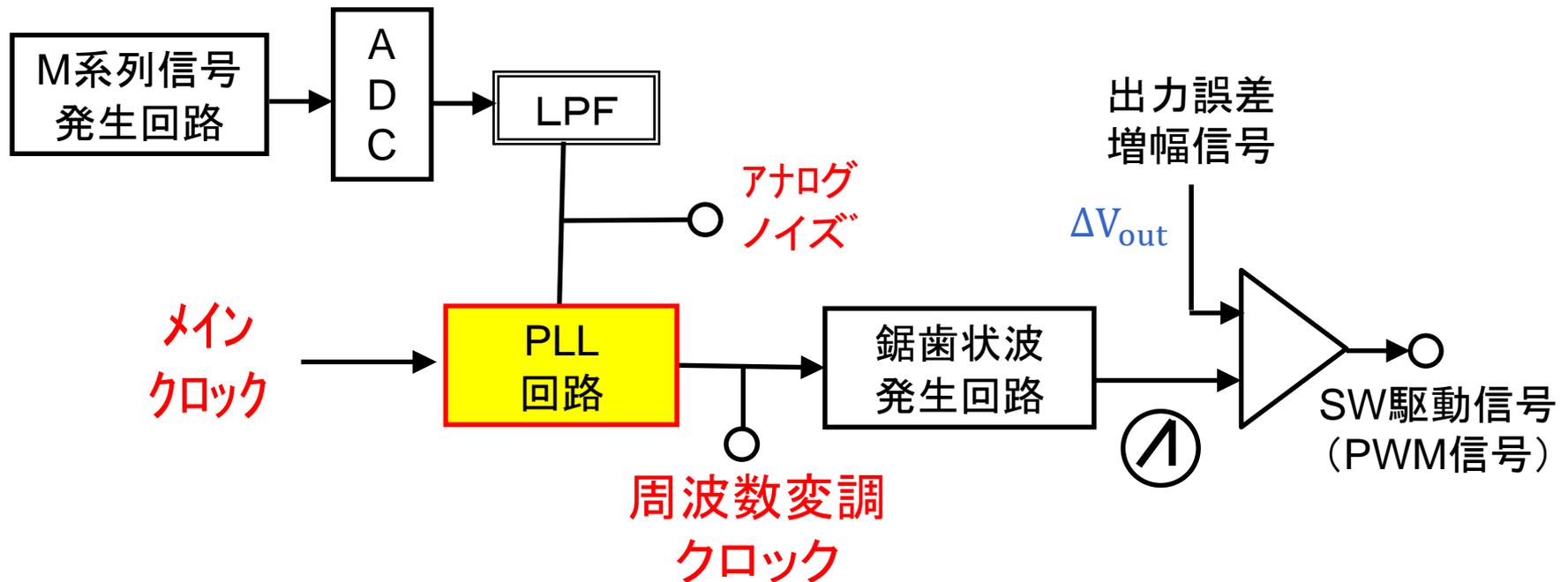


図2-9 アナログノイズ発生+PLL回路

2. スイッチングコンバータとスペクトラム拡散

● アナログノイズ方式の波形

* スペクトラム拡散比較

基本波: -4.9dB ($=1/3.5$)

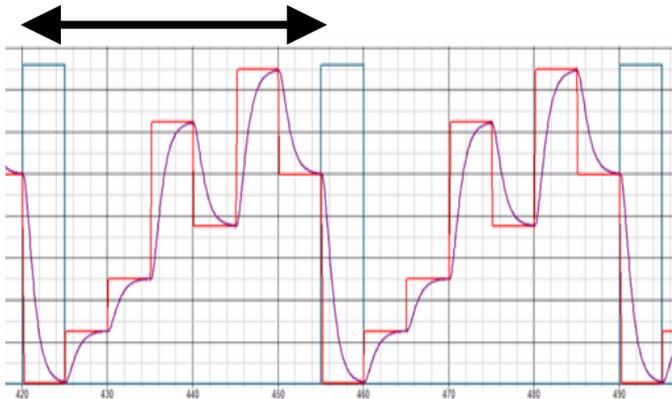


図2-10 疑似アナログノイズ

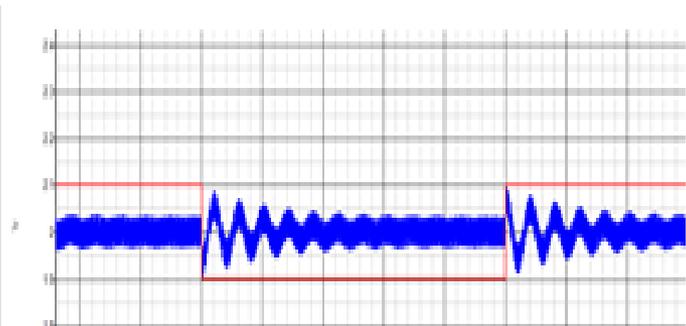


図2-11 PLL回路の特性

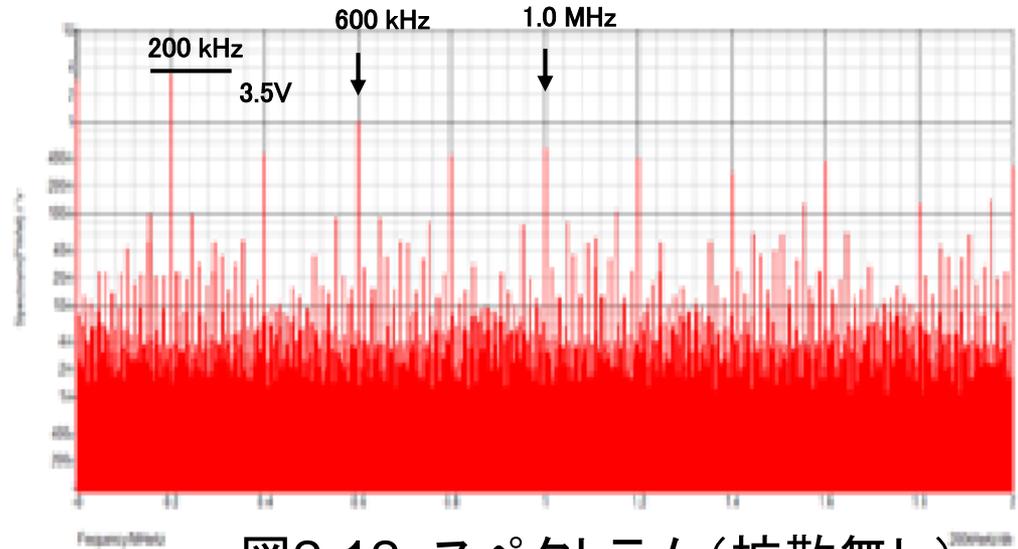


図2-12 スペクトラム(拡散無し)

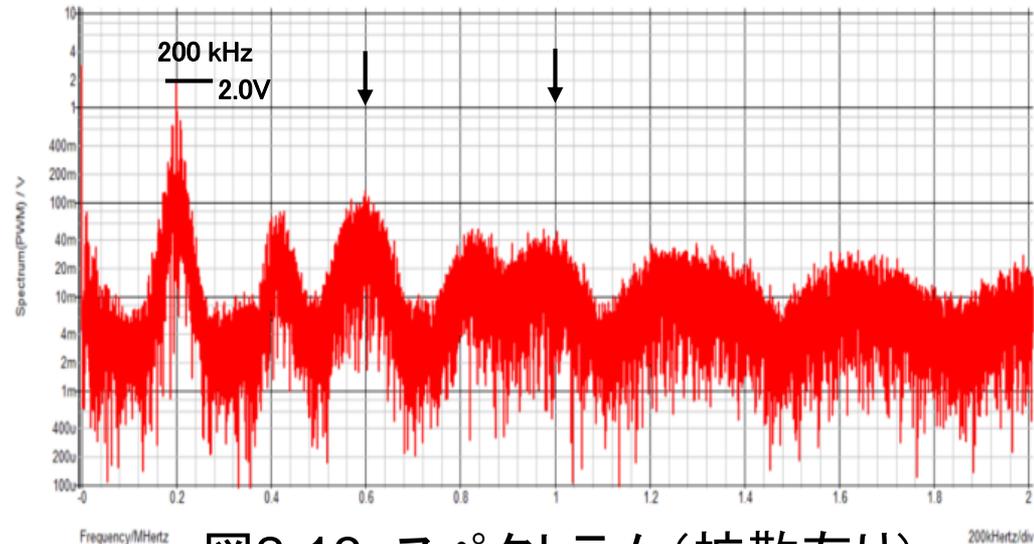


図2-13 スペクトラム(拡散有り)

アウトライン

1. 研究背景と目的
2. スイッチング電源とスペクトラム拡散
 - 2-1. DC-DC降圧形コンバータ
 - 2-2. スペクトラム拡散技術
3. パルスコーディング方式電源
 - 3-1. パルス幅コーディング(PWC)方式
 - 3-2. パルス位相コーディング(PPC)方式
 - 3-3. 複合パルスコーディング(PWPC)方式
4. パルス幅コーディング方式電源の実装結果
5. まとめ

3. パルスコーディング方式電源

- パルスコーディングとは:

入力H/L信号に対して、**パラメータの異なる2種のパルス**を出力

Ex. パルスの 幅、位相、周期、(レベル)

- パルスコーディング方式電源とは:

- * PWM発生用コンパレータで、H/Lの**2値パルス**(SEL信号)出力

- * SEL信号により、**コーディングパルス**を選択 ⇒ PWM信号

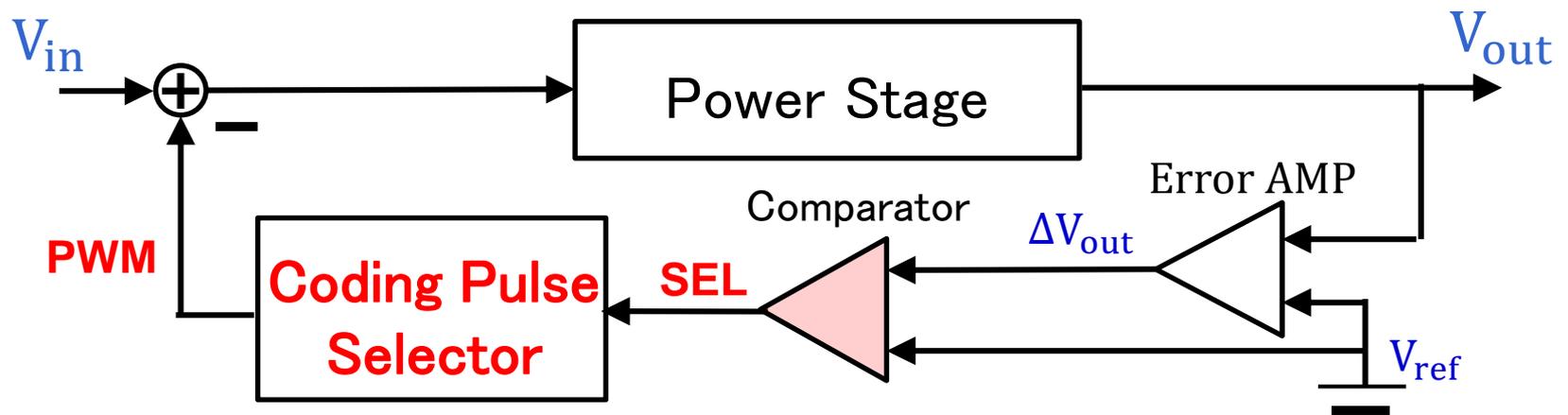


図3-1 パルスコーディング方式電源の構成

3. パルスコーディング方式電源

3-1. パルス幅コーディング (PWC) 方式

PWC: Pulse Width Coding

- * 2種のパルス幅(クロックに位相同期)
- * クロックに同期して切換え(DFF利用)
- * パルス幅の設定: **デューティの条件** (電圧制御に必要条件)
 $D_H > D_o > D_L$: $D_o = V_o/V_i$ (降圧形電源の場合)
- * パルス発生方式: デジタル回路、アナログ回路(鋸歯状波利用)

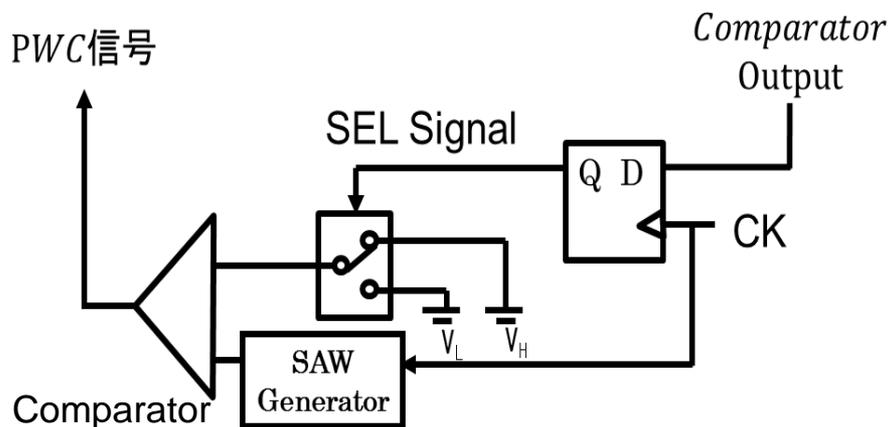


図3-2 PWC方式の回路構成

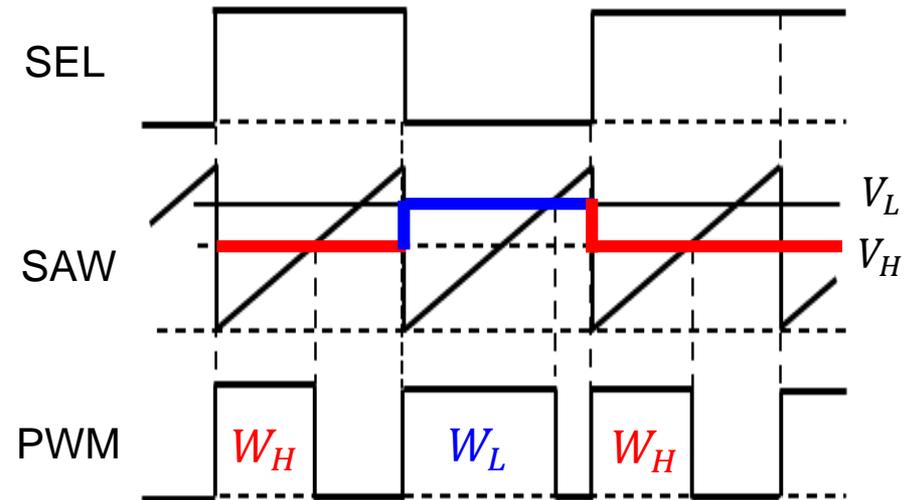


図3-3 PWC方式の動作波形

(a) シミュレーション結果

● PWC方式のシミュレーション結果

* ノッチ周波数:

$$F_N = 1 / (1.6 - 0.3) \mu s = 770, 1,500 \text{ kHz}$$

* 出力電圧リップル(過度応答特性)

定常リップル = 2mVpp (@ $I_o = 0.25A$)

過度応答 < $\pm 2.5 \text{ mV}$

◎ 条件

入力 V_{in} : 10V

出力 V_{out} : 5V

インダクタ L : 200 μ H

コンデンサ C : 470 μ F

クロック f_{ck} : 500 kHz

変調幅 W_H : 0.3 μ s

変調幅 W_L : 1.6 μ s

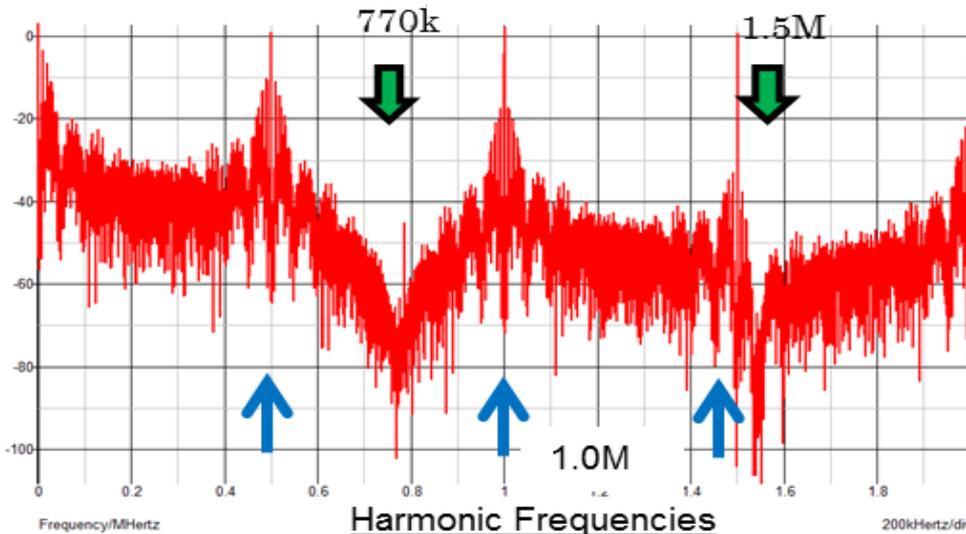


図3-4 PWC方式のスペクトラム

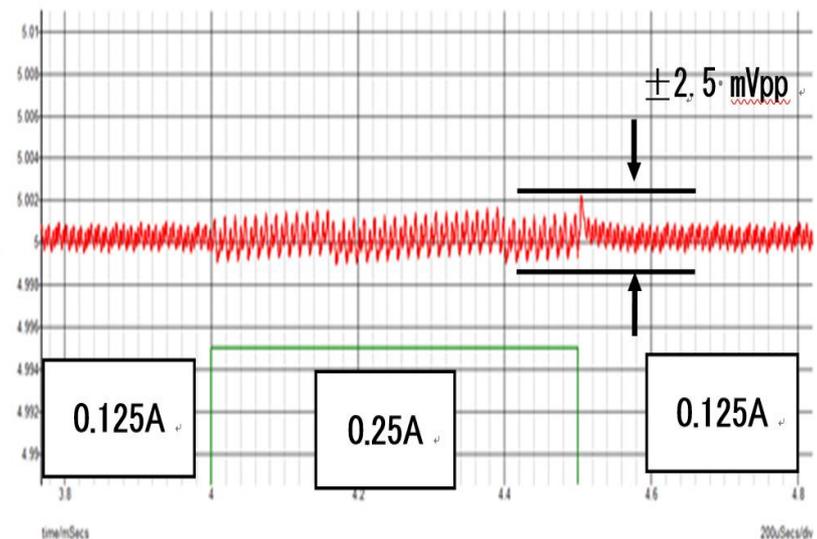


図3-5 PWC方式のパルス波形

(b) スペクトラム拡散2

ノッチ周波数

$$f_{\text{notch}} \cong N \times \frac{1}{(W_L - W_H)} \quad [n = 1, 2, 3, \dots, N]$$

$$= N \times \frac{1}{(480\text{ns} - 320\text{ns})} = \mathbf{6.25\text{MHz}}$$

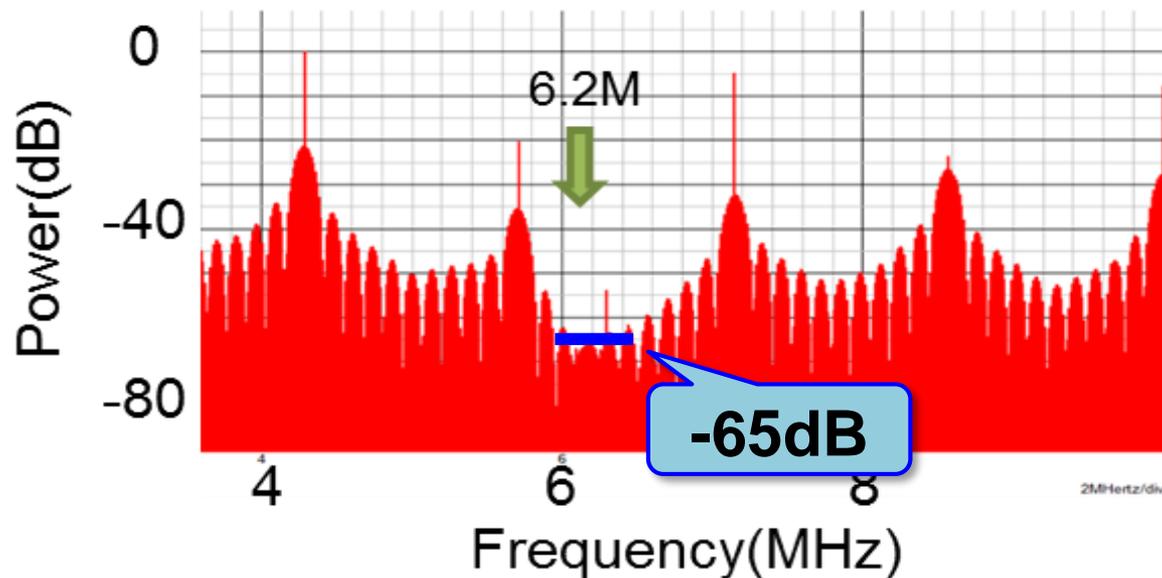


図3-6 PWC方式のスペクトラム

(c) ノッチ周波数の解析

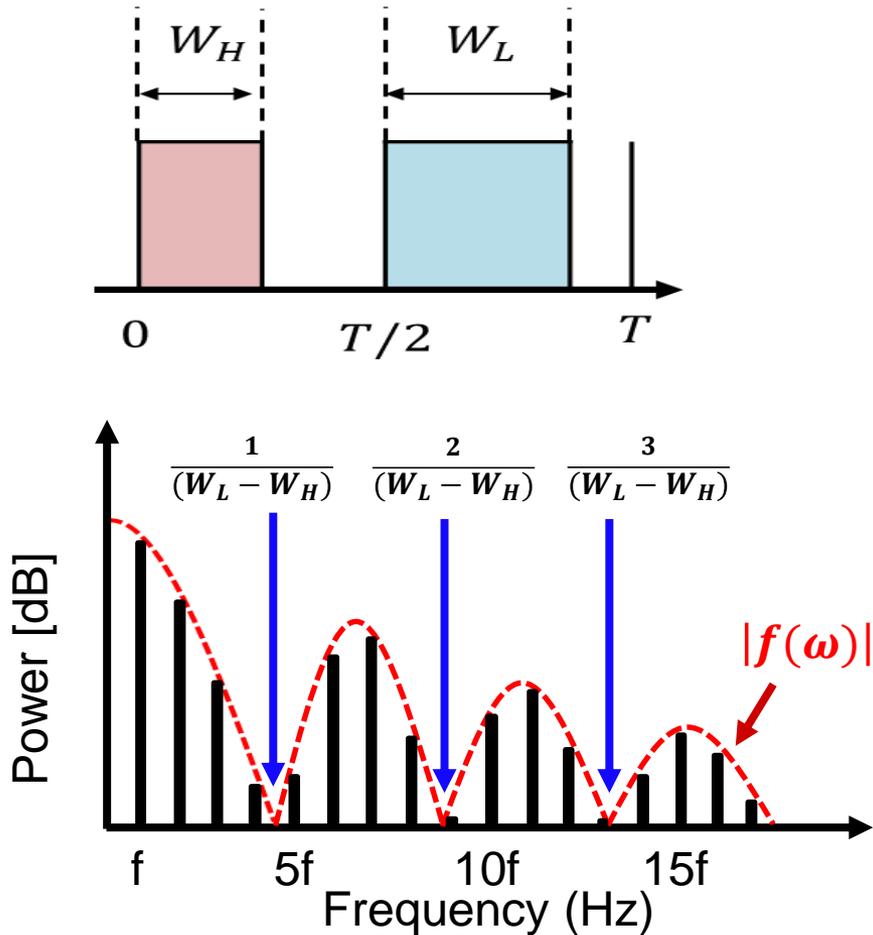


図3-7 PWC方式のスペクトラム解析

ノッチ周波数は「パルス幅の差」に依存

$$\begin{aligned}
 f(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \\
 &= \int_0^{W_H} e^{-j\omega t} dt + \int_{T/2}^{W_L+T/2} e^{-j\omega t} dt \\
 &= -\frac{1}{j\omega} \{ \cos(\omega W_H) - j\sin(\omega W_L) \\
 &\quad - \cos(\omega W_L) + j\sin(\omega W_L) \}
 \end{aligned}$$

$$|f(\omega)| = \frac{1}{\omega} \sqrt{2 - 2\cos(\omega W_H - \omega W_L)}$$

↓ 倍角の定理より

$$= \frac{1}{\omega} \sqrt{4\sin^2\{(\omega W_L - \omega W_H)/2\}}$$

$$= \frac{(W_L - W_H) \left| \sin\left\{\frac{\omega}{2}(W_L - W_H)\right\} \right|}{\frac{\omega}{2}(W_L - W_H)}$$

$$= (W_L - W_H) \left| \text{sinc}\left\{\frac{\omega}{2}(W_L - W_H)\right\} \right|$$

3-2. パルス位相コーディング (PPC) 方式

PPC: Pulse Phase/Position Coding

- * コーディング・パルス :
 - ・ クロックに対して、位相の異なるパルス
- * 使用条件 :
 - ・ デューティ差がない \Rightarrow 電源制御には不適
 - ・ **他コーディング方式との複合**
- * 位相差 : $\phi_M = |\tau_L - \tau_H|$ (通常、 $\tau_H = 0$)

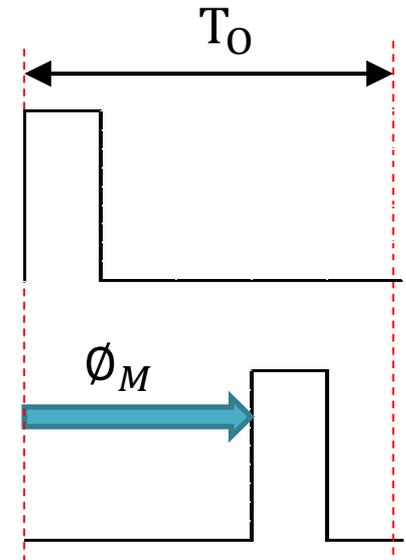


図3-8 PPC方式パルス

● ノッチ周波数の解析

$$|f(\omega)| = (2|\tau_L - \tau_H|) \left| \text{sinc} \left\{ (2|\tau_L - \tau_H|) \frac{\omega}{2} \right\} \right| \left| \sin \left(\frac{\omega}{2} W \right) \right|$$

ノッチ周波数 : 「**位相差**」と「**パルス幅**」に依存

3-3. 複合パルスコーディング(PWPC)方式

(a) 複合コーディング方式:

PWC+PPC方式 = PWPC

PWPC: Pulse Width & Phase Coding

● ノッチ周波数: **パルス幅差と位相差**に依存

$$|f(\omega)| = (2|\tau_L - \tau_H|) \left| \text{sinc} \left\{ (2|\tau_L - \tau_H|) \frac{\omega}{2} \right\} \right| \left| \text{sin} \left\{ (W_L - W_H) \frac{\omega}{2} \right\} \right|$$

* **多重ノッチ特性**

$W_2 - W_1 = 2|\tau_L - \tau_H|$ とすると

$$|f(\omega)| = \frac{\text{sin}^2 \left(\frac{\omega}{2} (W_L - W_H) \right)}{\omega/2}$$

* 条件: $W_L = 7\mu\text{s}$ 、 $W_H = 3\mu\text{s}$ のとき

$$f_N = 250 \text{ kHz}$$

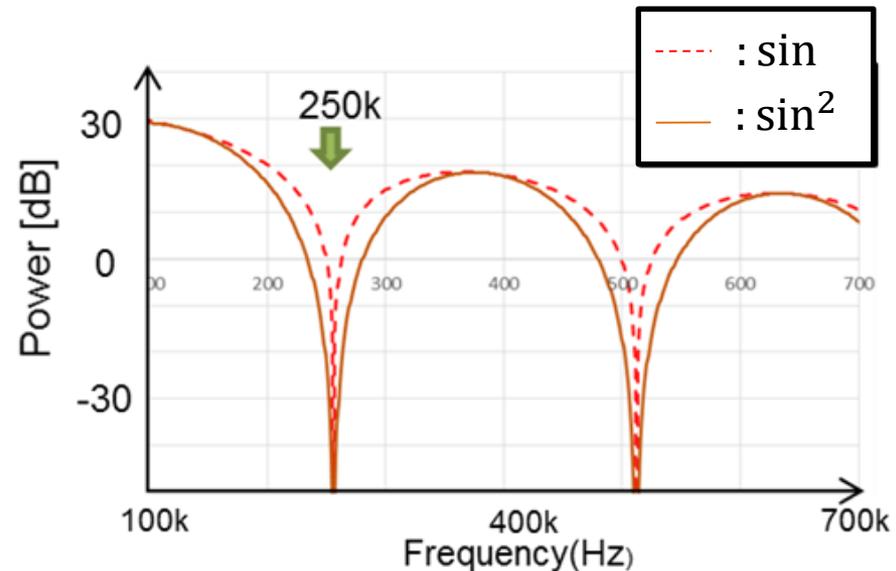
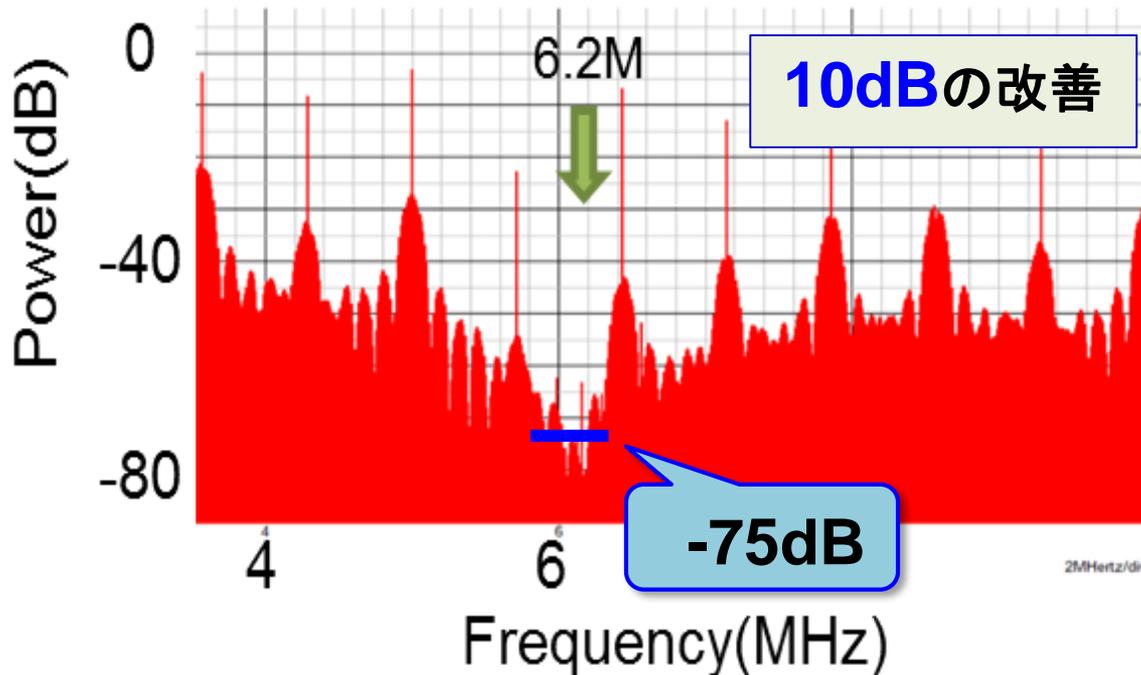


図3-9 PWPC方式2重ノッチ特性

● PWPC方式のノッチ周波数（2重ノッチ）

$$f_{notch} = \frac{n}{(W_L - W_H)} = \frac{n}{(480ns - 320ns)} = 6.25MHz \quad (\text{パルス幅差})$$

$$f_{notch} = \frac{n}{2|\tau_L - \tau_H|} = \frac{n}{2(80ns - 0ns)} = 6.25MHz \quad (\text{位相差})$$



入力 V_{in} : 10V
 出力 V_{out} : 5V
 インダクタ L : 200uH
 コンデンサ C : 470uF
 クロック f_{ck} : 1.4MHz
 変調幅 W_H : 320ns
 変調幅 W_L : 480ns
 変調位相 τ_H : 0ns
 変調位相 τ_L : 80ns

図3-10 PWPC方式のスペクトラム拡散

● 複合コーディング方式の応答特性

◎ シミュレーション条件

* $V_i=10V$, $V_o=5.0V$, クロック周波数 : 1.4MHz,

* 電流変化 : $I_o = 500mA / 250mA$ 、変動周波数 : 200Hz

◎ シミュレーション結果 : 電圧リップル=20mV @ $I_o=0.5A$

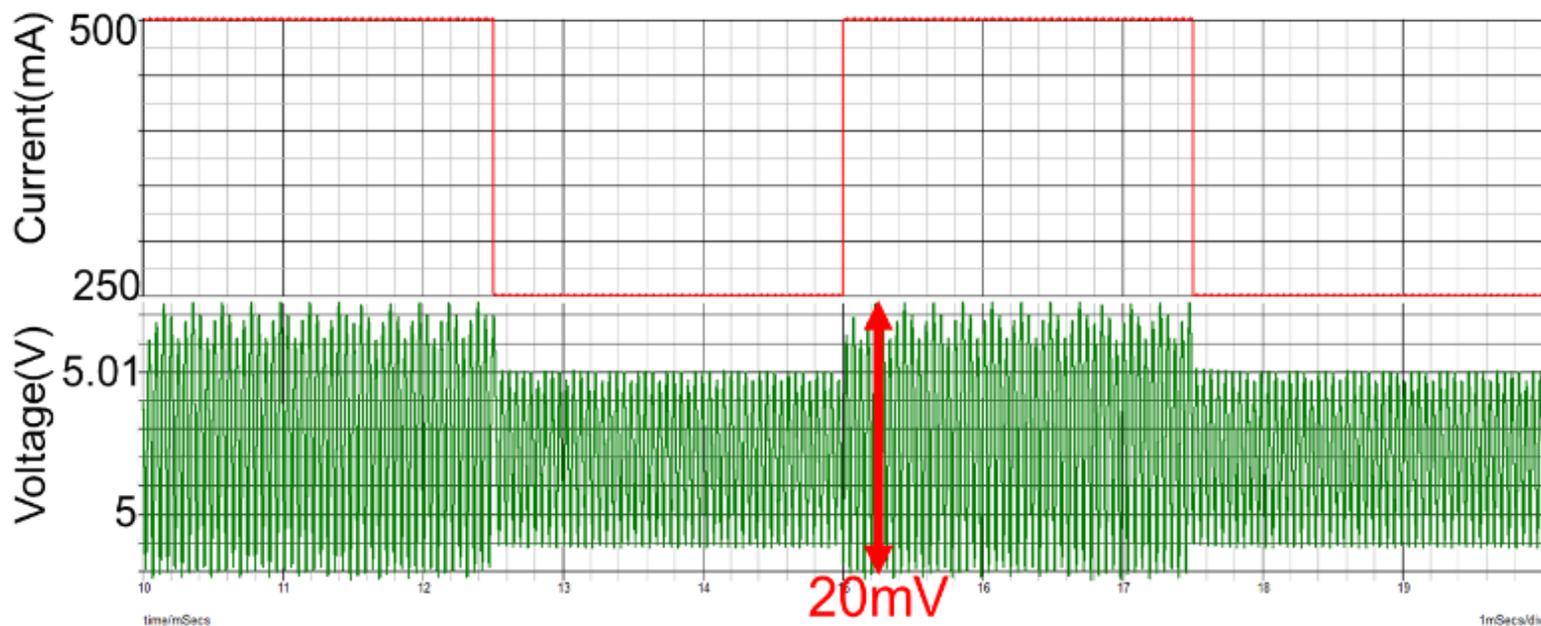


図3-11 PWPC方式の出力電圧応答特性

(b) EMI低減＋PWC方式 の複合化

●疑似アナログノイズによるEMI低減方式

* ノイズ拡散された部分に、ノッチ特性の発生は不適

⇒ **クロック高調波間**に、ノッチ特性を発生

* リニア掃引EMI低減方式は、高調波拡散範囲が広い(下図)

⇒ ノッチ特性の発生困難 (2.5MHz以上で全域にノイズ拡散)

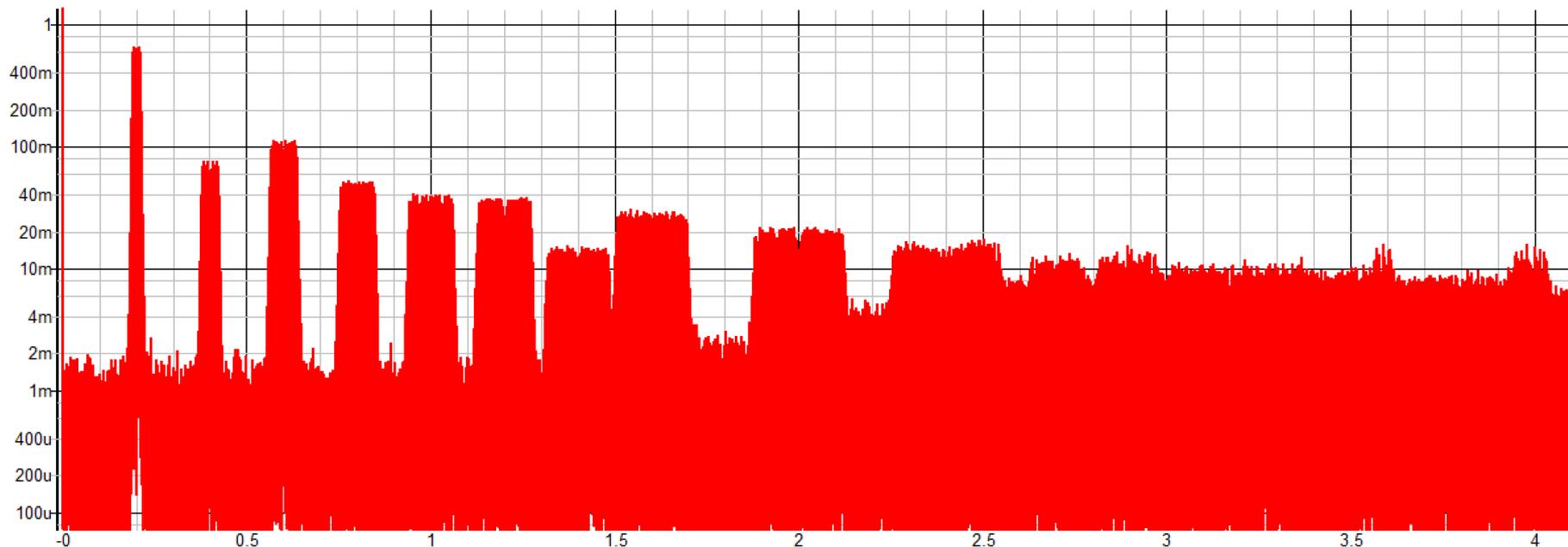


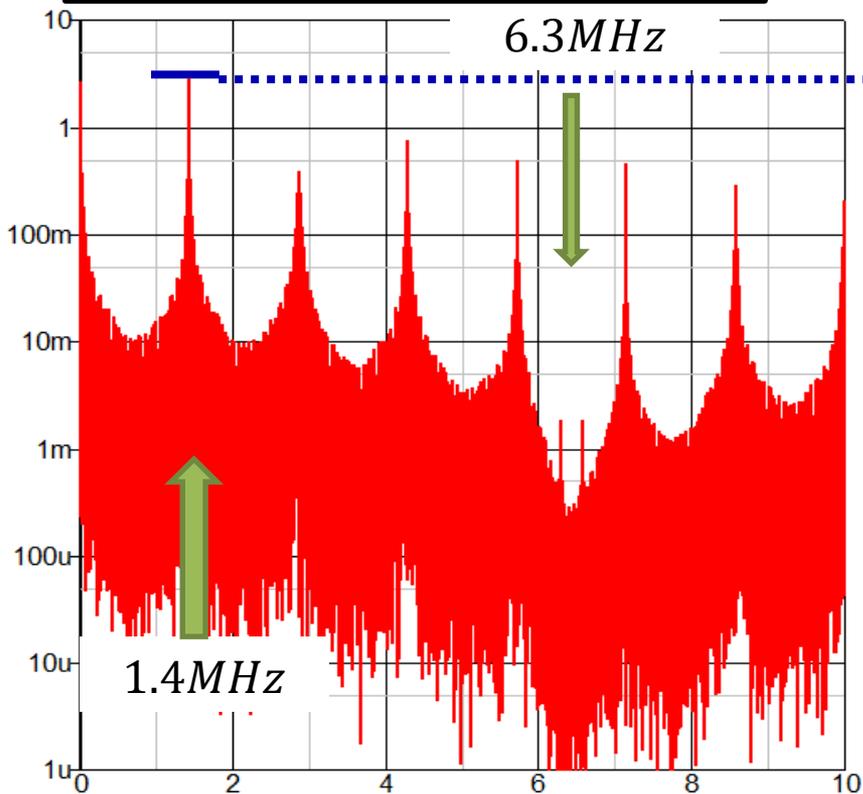
図3-12 リニア掃引方式のスペクトラム (掃引条件: $F=500\text{Hz}$ 、 $V=0.5\text{V}/4\text{V}$)

(b) EMI低減 + PWC方式

- 疑似アナログノイズによるEMI低減方式にPWCを複合化

* 条件: $F_{ck} = 1.4 \text{ MHz}$, $F_N = 6.3 \text{ MHz}$

PWC方式単体



EMI低減

EMI低減 + PWC方式

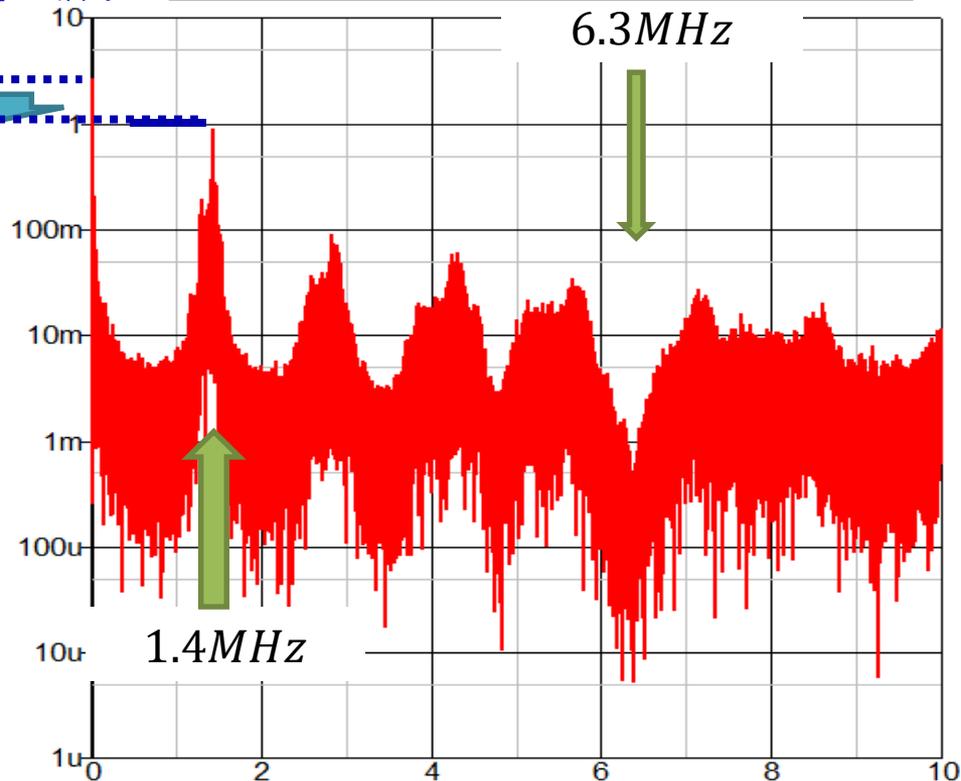


図3-13 PWC方式単体のスペクトラム

図3-13 EMI低減 + PWCスペクトラム

アウトライン

1. 研究背景と目的
2. スイッチング電源とスペクトラム拡散
 - 2-1. DC-DC降圧形コンバータ
 - 2-2. スペクトラム拡散技術
3. パルスコーディング方式電源
 - 3-1. パルス幅コーディング(PWC)方式
 - 3-2. パルス位相コーディング(PPC)方式
 - 3-3. 複合パルスコーディング(PWPC)方式
4. **パルス幅コーディング方式電源の実装結果**
5. まとめ

4. パルス幅コーディング方式電源の実装結果

(a) 実装条件1 : $V_i=10V$, $V_o=5.0V$, $I_o=0.25A$, $F_{ck}=160\text{ kHz}$,

★ノッチ理論式:
$$f_{notch} = \frac{n}{(W_L - W_H)} = \frac{n}{(4.0\mu s - 1.1\mu s)} = 344.8\text{ kHz}$$

* ノッチ周波数 :

$$F_{N1} = 350\text{ kHz}$$

$$F_{N2} = 700\text{ kHz}$$

* パルス条件 :

$$W_L = 4.0\ \mu s,$$

$$W_H = 1.1\ \mu s$$

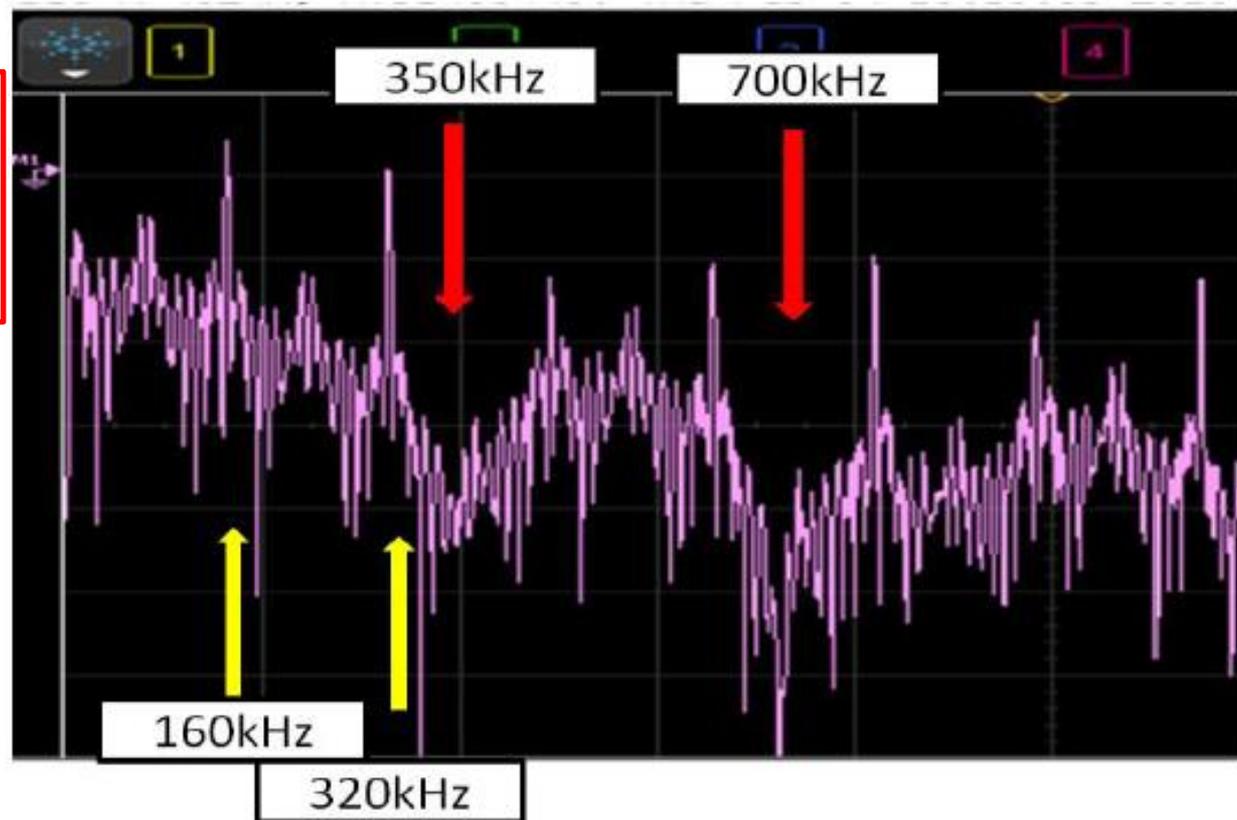


図4-1 PWC方式の実装スペクトラム

(b) 出力電圧リップル(過渡応答特性)

◎ 実装条件 :

* $V_i=10V$, $V_o=5.0V$, $I_o = 0.23A/0.53A$, $F_{SW} = 500 \text{ Hz}$

◎ 測定結果 :

* 定常リップル= 8 mVpp , オーバーシュート $< 10 \text{ mV}$

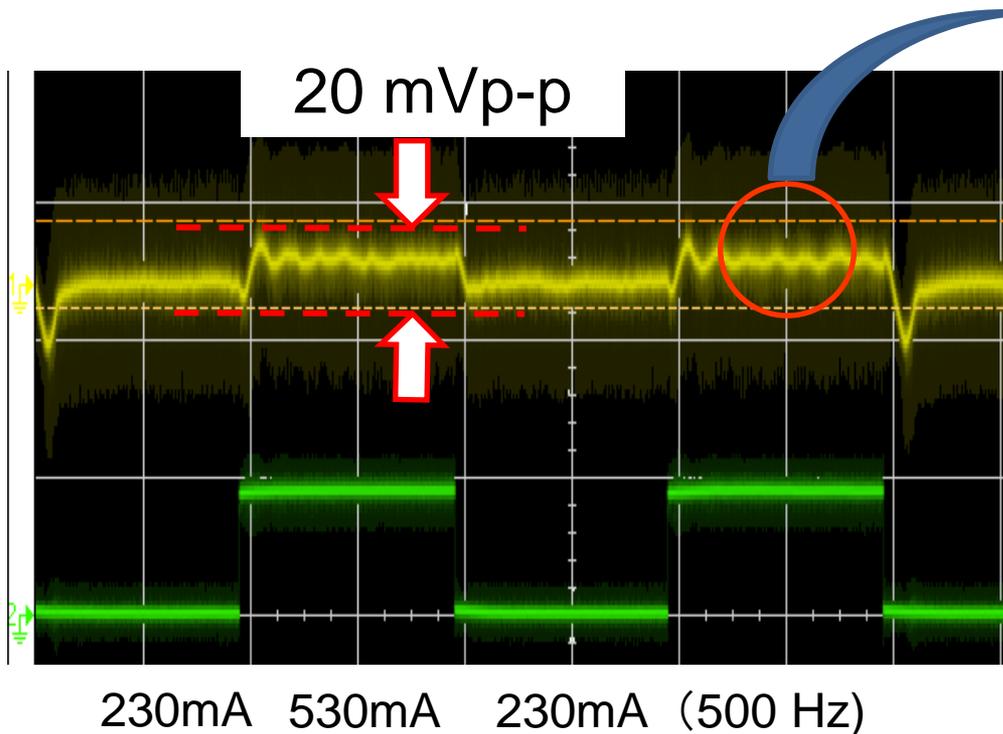
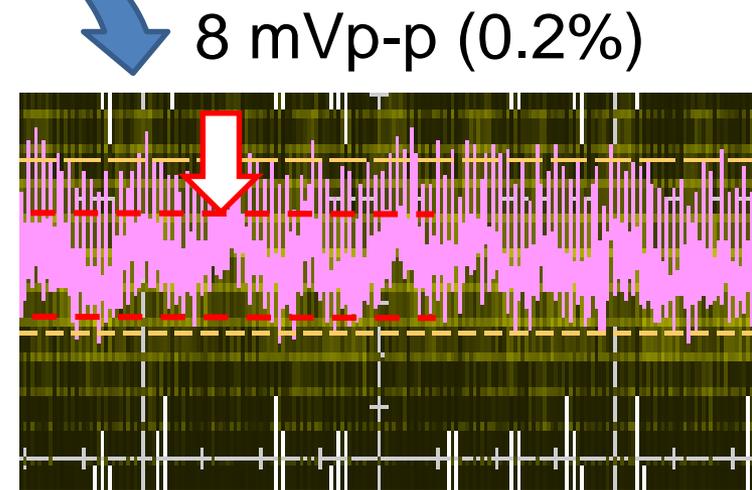


図4-2 PWC方式の過渡応答特性



出力電圧リップル
(2.0MHzで帯域制限)

図4-3 PWC方式の実装リップル

(b) 実装結果2

(b) 実装条件2 : パルス幅 $t_1=0.40 \mu\text{s}$, $t_2=1.46 \mu\text{s}$

* ノッチ周波数 : $F_N=1/(1.48-0.40)\mu\text{s} = 920 \text{ kHz}$

- ・ $F=1,620 \text{ kHz}$ にノッチ特性？
- ・ $F_N= 2.7 \text{ MHz}$ (3次高調波あり)

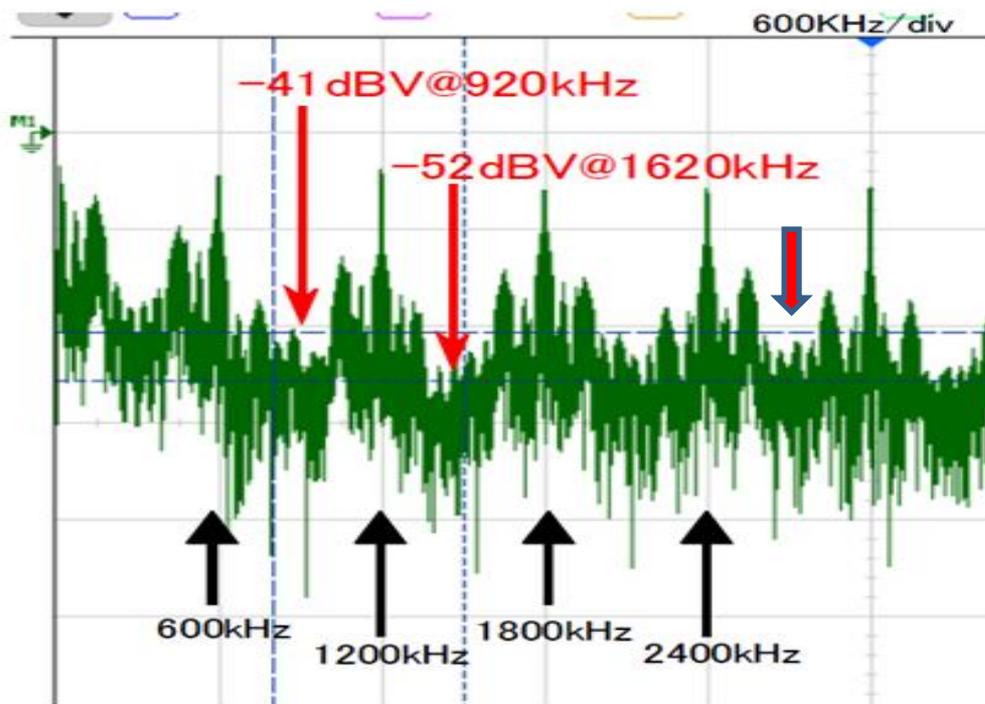


表 4-1 実装条件2

入力電圧 E	出力電圧 Vo	出力電流 Io
10 V	5 V	330 mA /530mA
周期	パルス幅 t1	パルス幅 t2
1.67 μs	0.40 μs	1.46 μs
L	C	負荷変動周期
100 μH	610 μF	0.02ms

図4-4 PWC方式の実装スペクトラム2

5. まとめ

- 1) クロックの摺動によるEMI低減方式
 - * 疑似アナログノイズによるEMI低減
 - * リニア掃引クロックによるEMI低減
- 2) パルスコーディング方式の提案
 - * パルス幅コーディング(PWC)方式の提案
 - * 複合PWPC方式のシミュレーション確認
 - * ノッチ周波数の理論解析と確認
- 3) PWC方式の実装確認

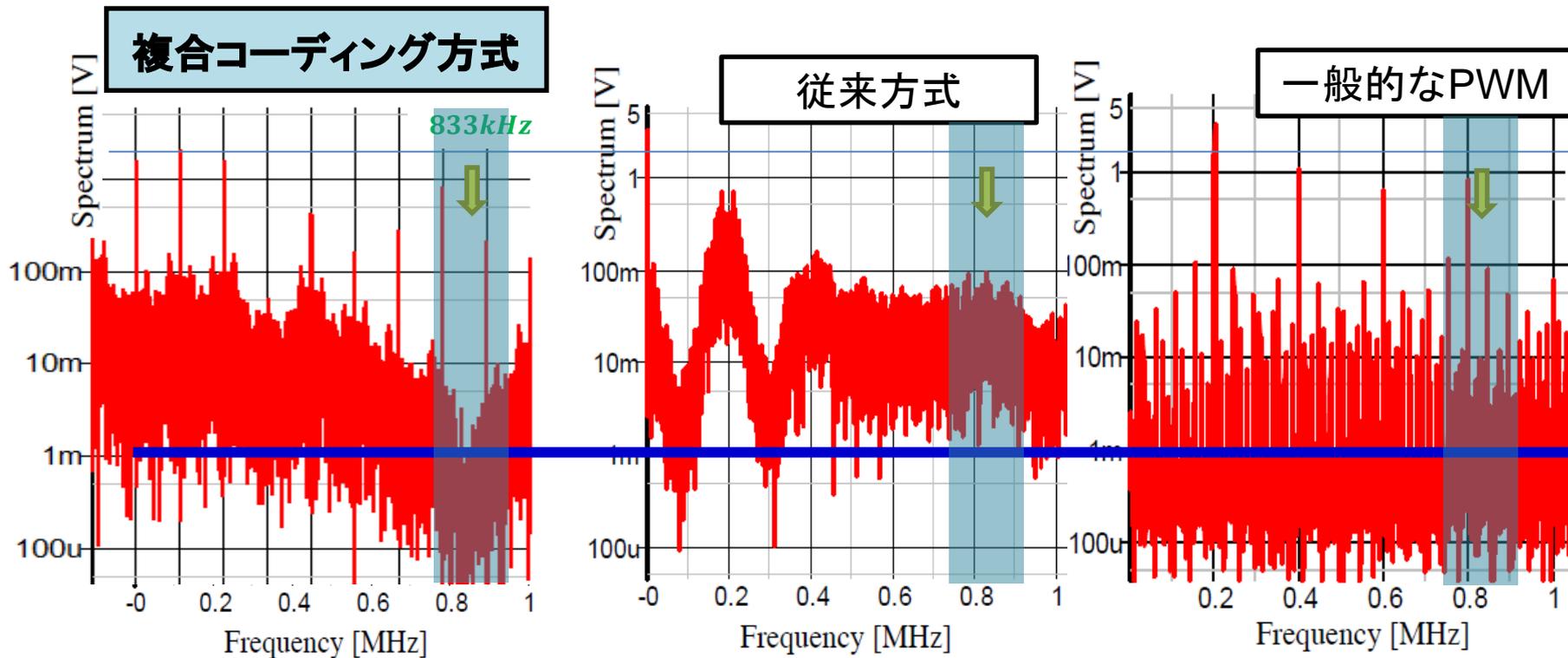
今後の課題

- * 各種複合パルスコーディング方式の検討
- * ノッチ特性の高周波化、広帯域化

ご清聴
ありがとうございます
御座居ました。

● 従来方式とのスペクトラム比較

- 設定周波数において提案手法が**一番低減**



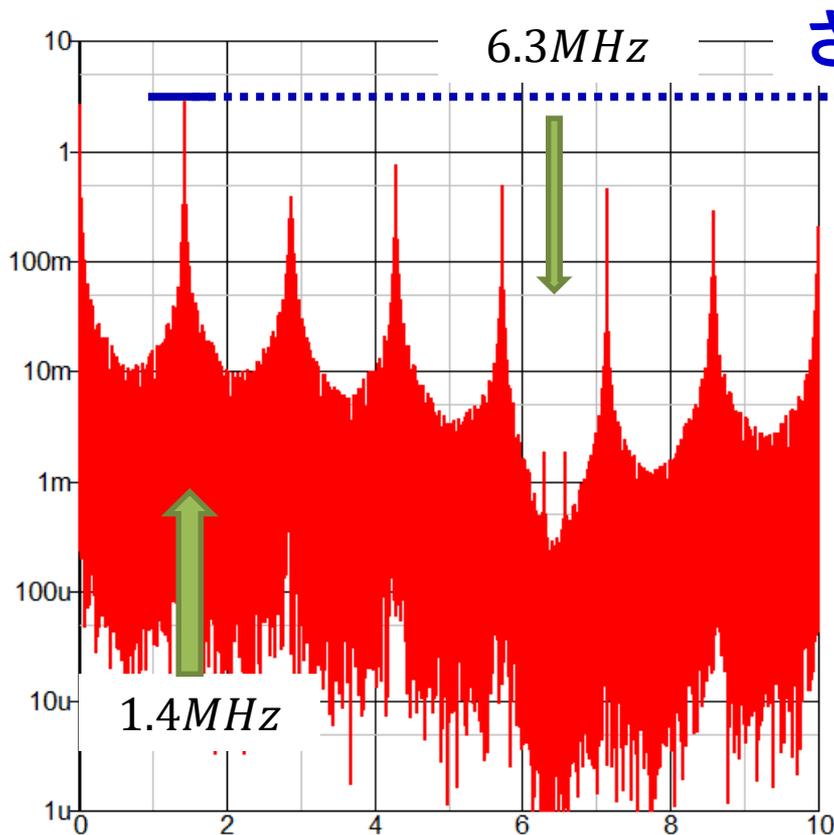
$$f_{clock} = 200\text{kHz}$$

$$f_{notch} = 833\text{kHz}$$

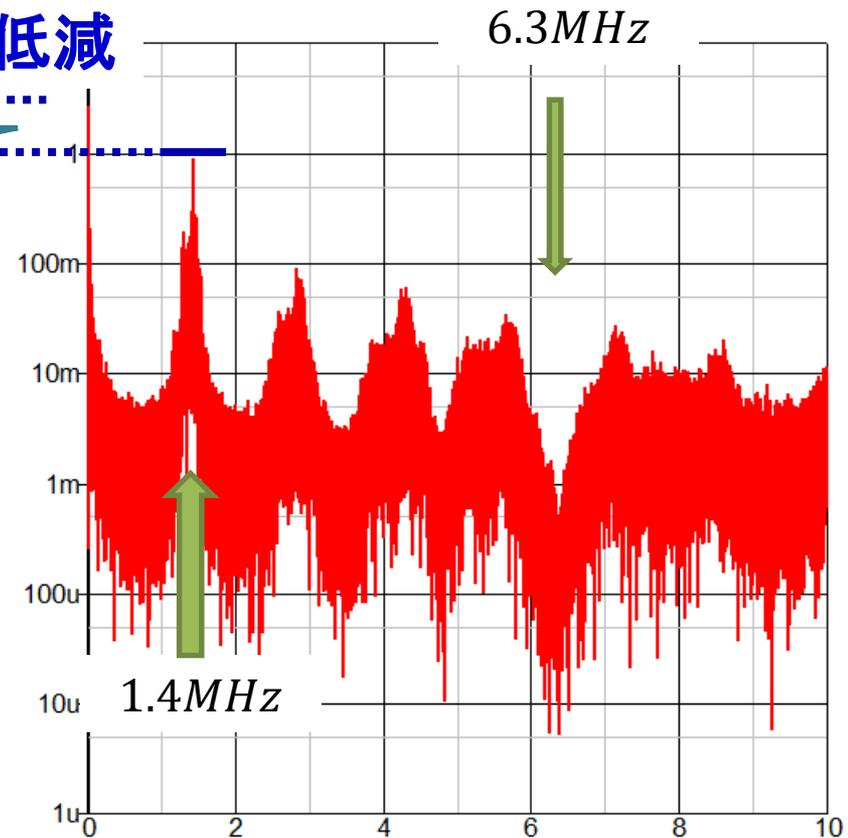
従来方式と比較して1/100に低減!!

ランダム変調有無の比較

提案スペクトラム拡散



今後の方針



ノッチの発生と**EMIの大幅低減**が可能！！

EMI低減法

EMI reduction method

回路規模が大

スペクトラム拡散, シールドの設置 等...

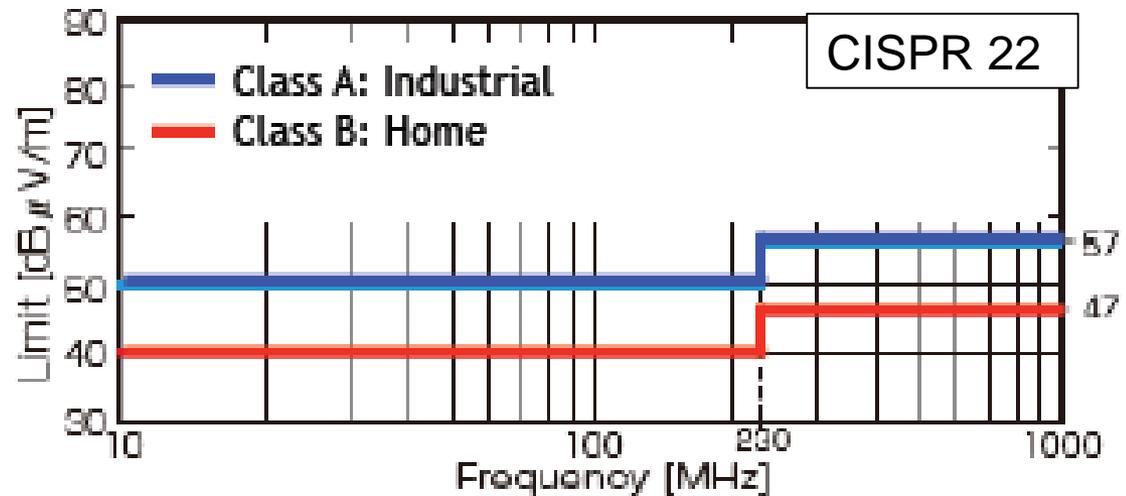


小規模化・低コスト化

基本スペクトラム成分を低減



EMI規定を
満たす



EMI: Electro-Magnetic Interference

各種コーディング方式

単コーディング方式

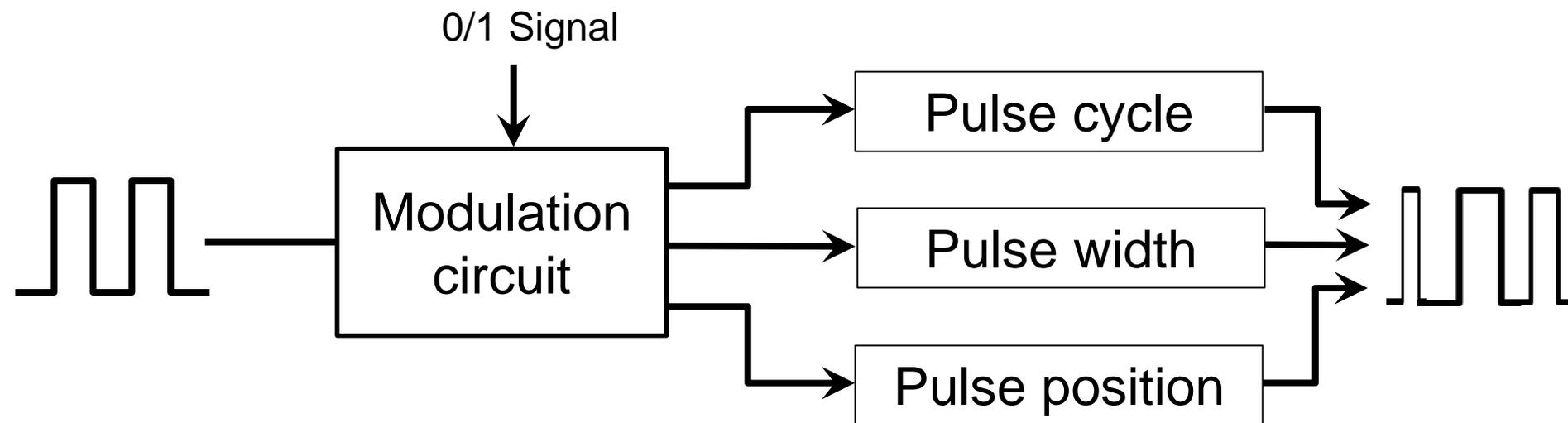
パルス幅・周期・位置の中のいずれかを任意選択して変調

- PWC方式
- PCC(Pulse Cycle coding)方式
- PPC方式

複合コーディング方式

パルス幅・周期・位置の中の複数を任意選択して変調

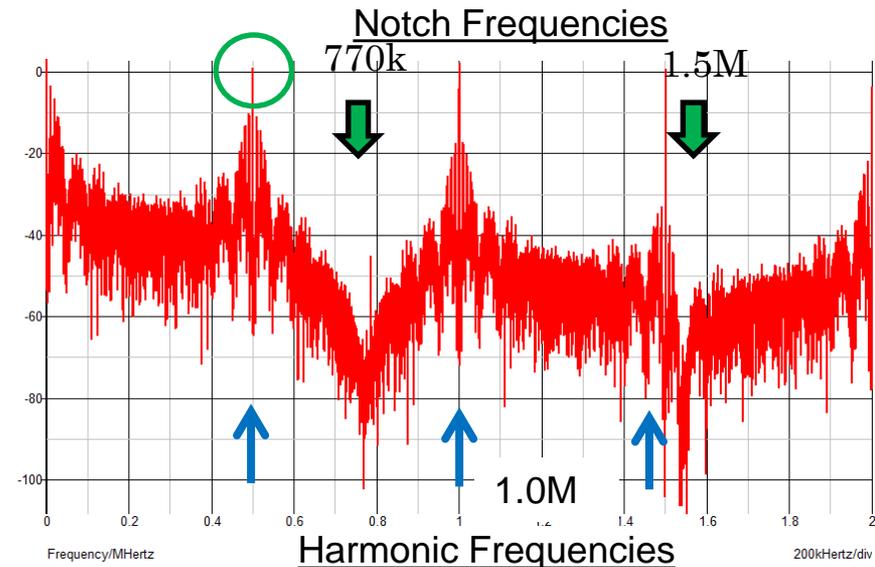
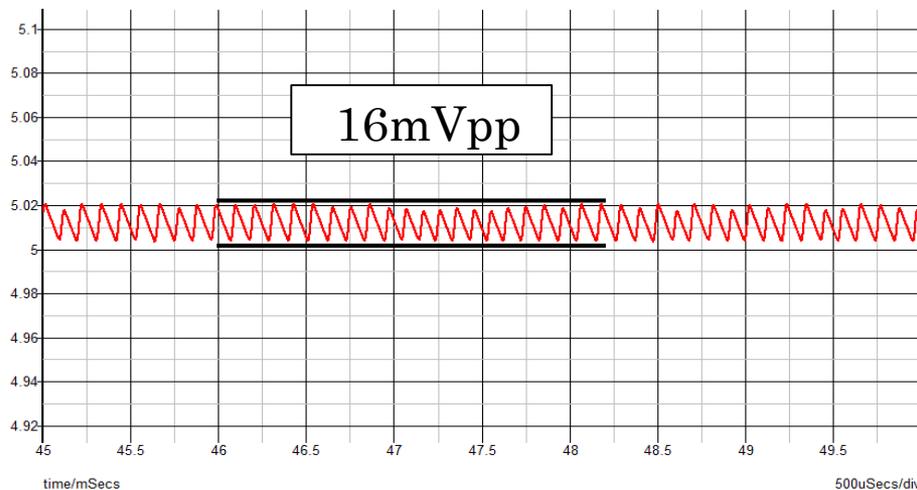
- ASM (PWC+PCC) 方式
- DPM (PWC+PCC) 方式
- PWPC (PWC+PPC) 方式



PWC方式シミュレーション結果

シミュレーション結果

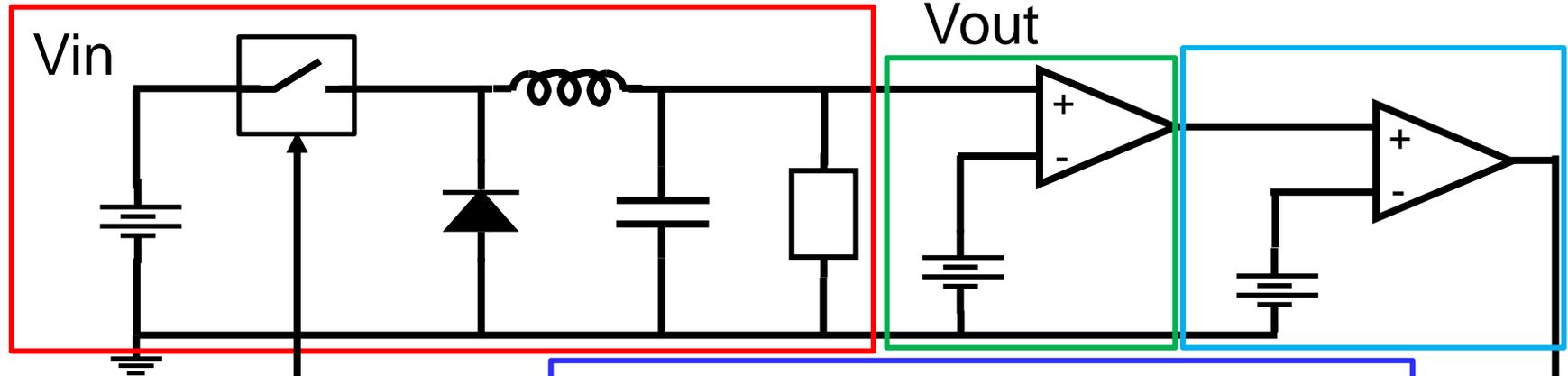
- 出力の安定性
 - リップル : 16mVpp (0.3%)
 - オフセット : 10mV
- スペクトラム
 - スペクトラムレベル : -5dB
 - ノッチ発生 : $f_{\text{notch}} \cong 770\text{kHz}, 1.5\text{MHz}$



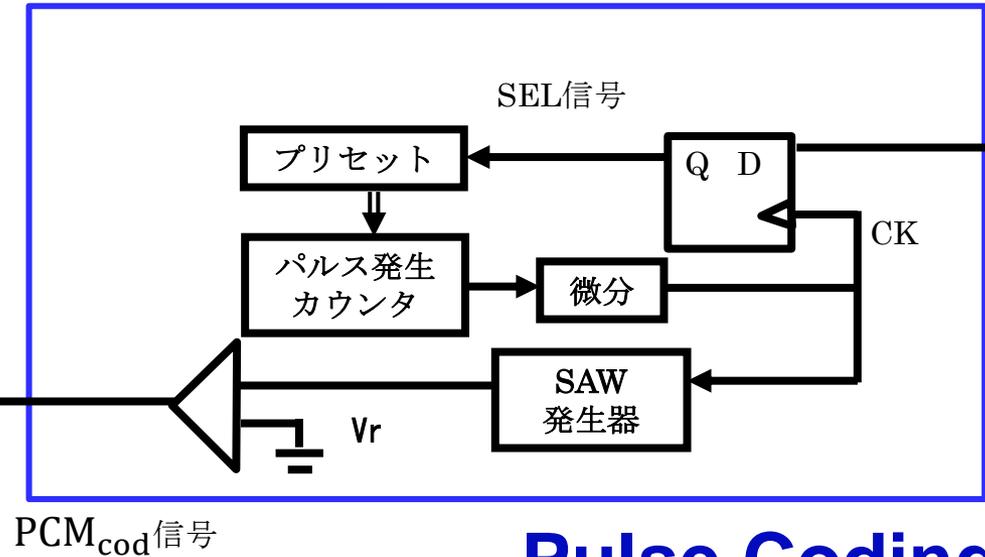
PCC提案手法の回路図

Power Stage

Error Detect ADC Part



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



Pulse Coding

PCC方式のシミュレーション結果

シミュレーション結果

- 出力電圧
 - リップル : 13mVpp (peak to peak)
 - オフセット : 0mV
- スペクトラム
 - ノッチの発生確認 : 多数
 - 最大ノイズ低減 : -13dB

