

環境電磁工学研究会 (EMCJ) @機械振興会館

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

群馬大学 電子情報数理教育プログラム

小林研究室 修士2年

荒船拓也

t15804005@gunma-u.ac.jp



アウトライン

- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- パルスコーディング型電源回路の実装
- まとめ

アウトライン

- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- パルスコーディング型電源回路の実装
- まとめ

研究目的

目的

- ① クロックから発生する^[1]EMIの低減
- ② 特定周波数のノイズ除去

提案手法

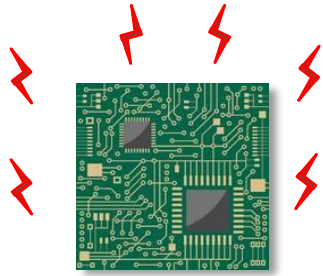
パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散方式



スイッチング電源回路

[1]EMI:Electro-Magnetic Interference(電磁波干渉)

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



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



高密度回路では不適

研究目的

EMIの低減と**拡散ノイズの制御**を兼ね備えたスペクトラム拡散

EMI:Electro-Magnetic Interference(電磁波干渉)

研究概要

問題: 従来法であるスペクトラム拡散技術では
拡散するノイズの制御不可

アナログ変調からデジタル変調へ

提案法: **パルスコーディング**というデジタル処理により
拡散ノイズを制御できるスペクトラム拡散を提案

今回の成果

- ノイズの制御式の導出 ⇒ 新方式の提案・検証
- 実測によるノイズ制御を確認

アウトライン

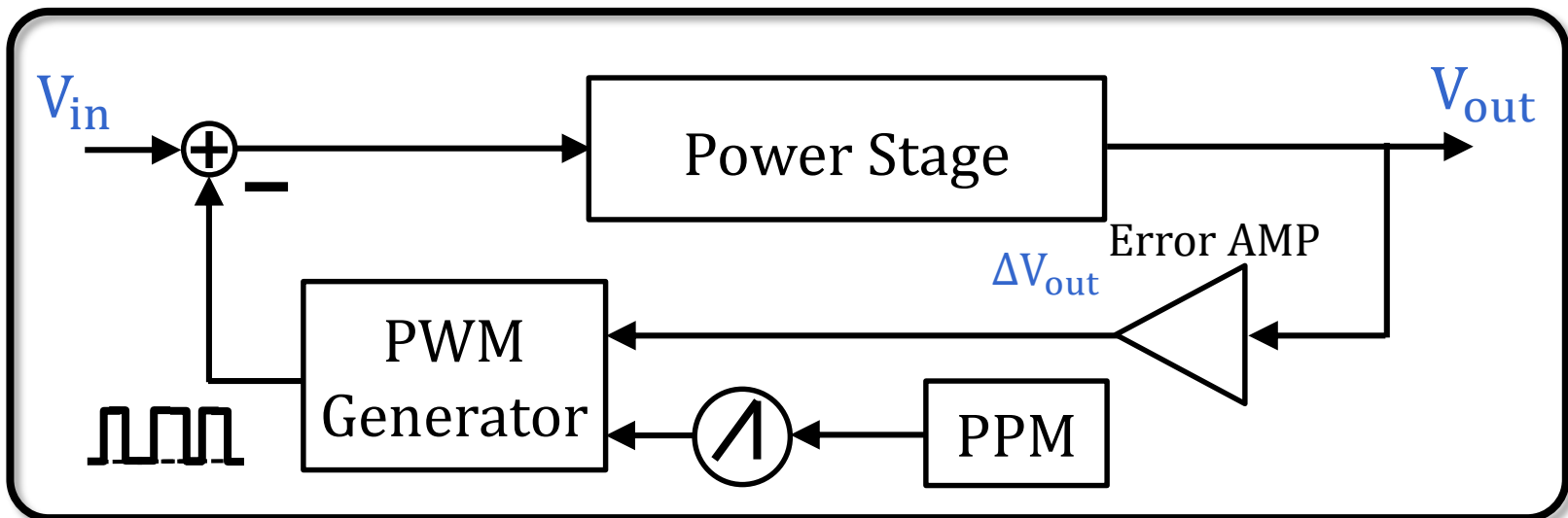
- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- パルスコーディング型電源回路の実装
- まとめ

従来スペクトラム拡散電源

Spread Spectrum

周期的なクロックを**連続変調**

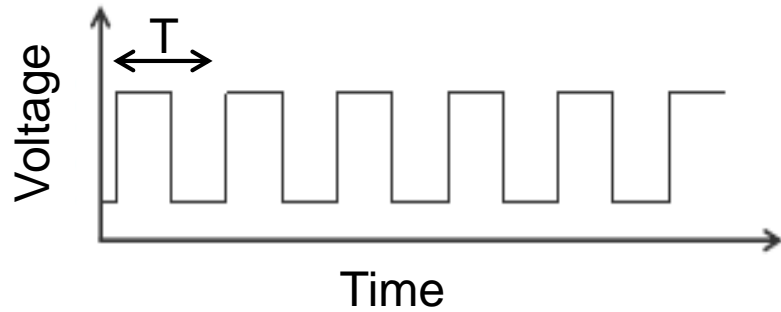
⇒基本周波数に集中した電磁ノイズを拡散低減



スペクトラム拡散

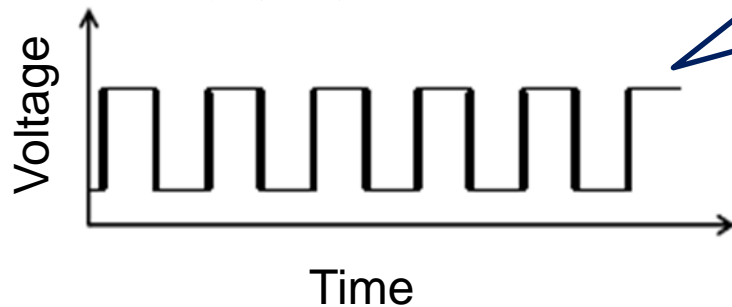
時間軸

周期クロック



↓ ランダム位相変調

非周期クロック



PPM(Pulse Phase Modulation)

位相変調は周期変調の1種類に分類

位相・周期変換式

$$T(k) = T + \{\tau(k) - \tau(k + 1)\}$$

T : パルス周期

$T(k), \tau(k)$: k番目の周期, 位相

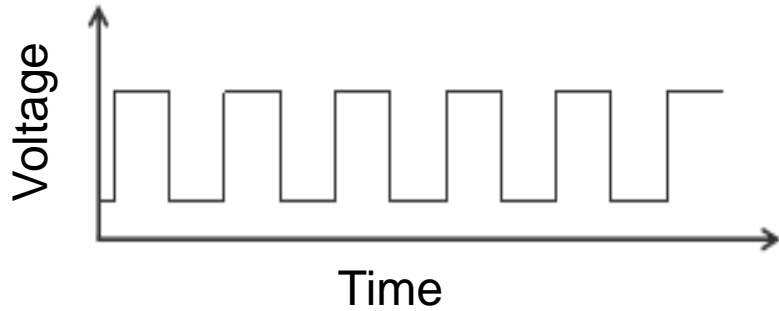
↓

各パルスで周波数が変化

スペクトラム拡散

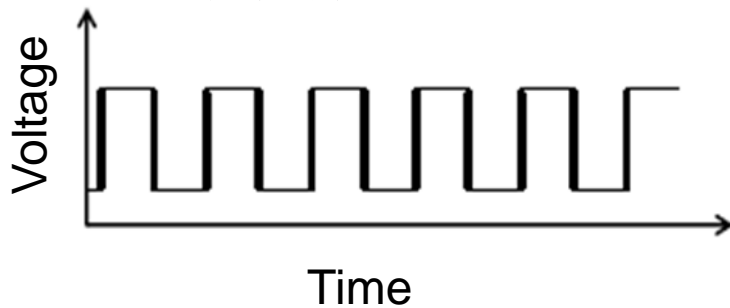
時間軸

周期クロック



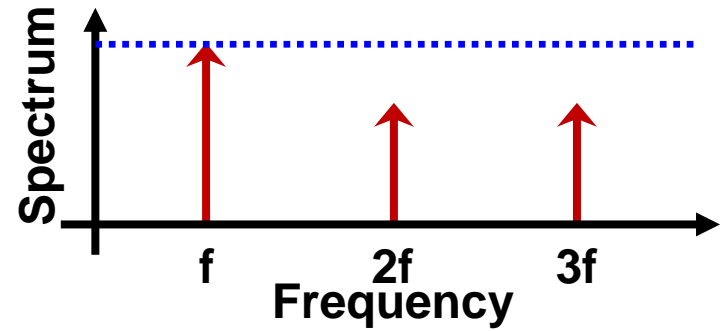
↓ **ランダム位相変調**

非周期クロック



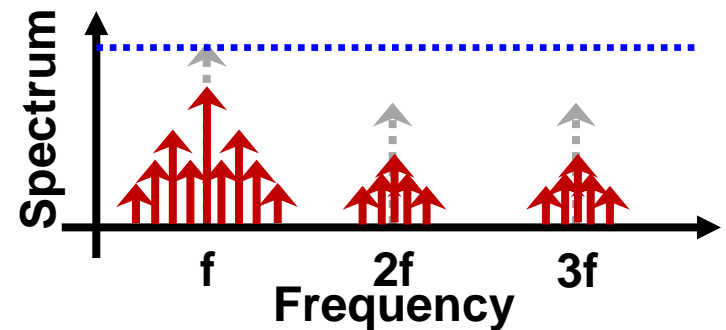
周波数軸

基本周波数及び高調波にピーク



↓ **EMIノイズが拡散**

EMIピークが低減

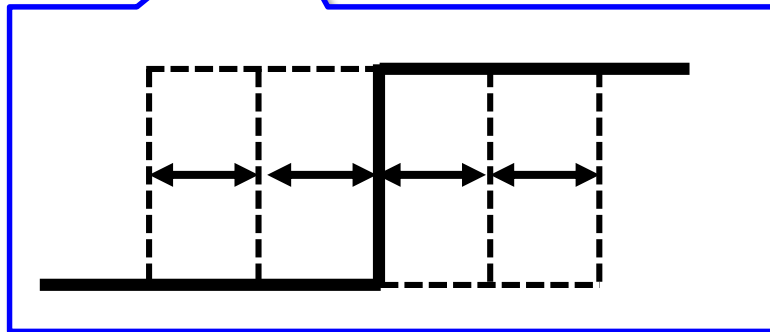
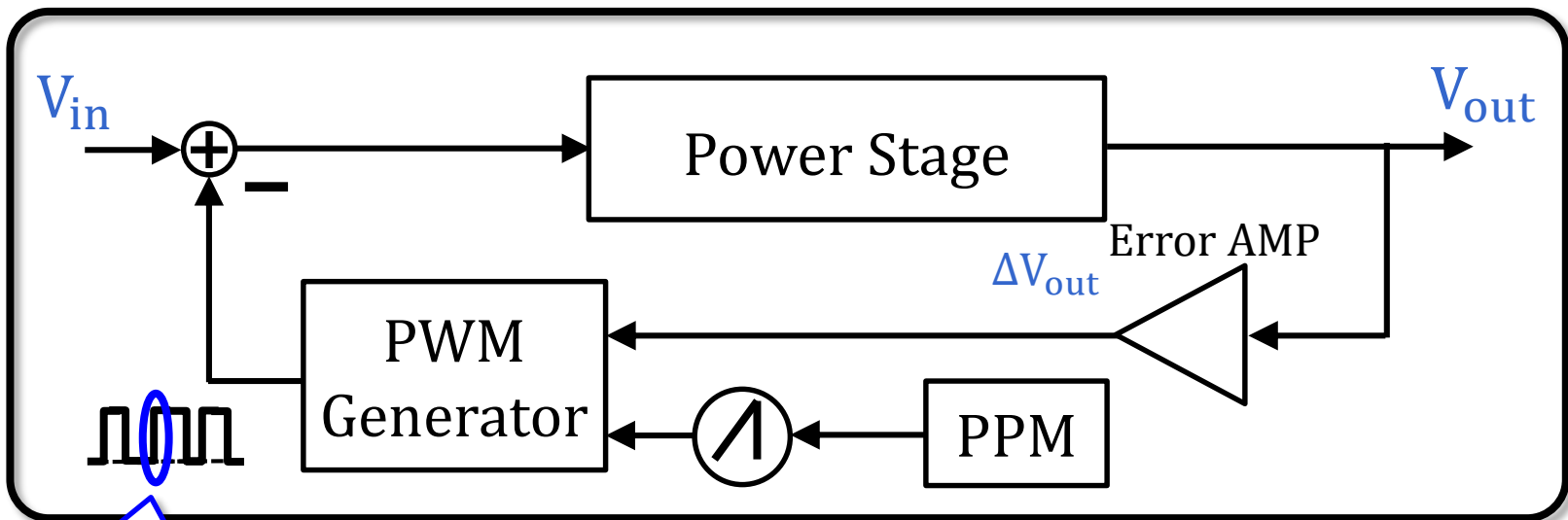


一般的なスペクトラム拡散電源

Spread Spectrum

周期的なクロックを**連続変調**

⇒基本周波数に集中した電磁ノイズを拡散低減

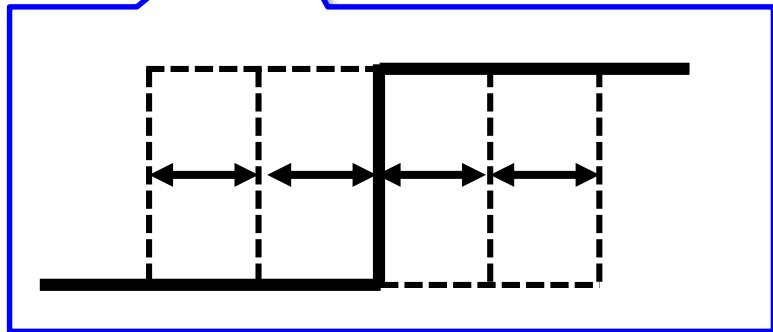
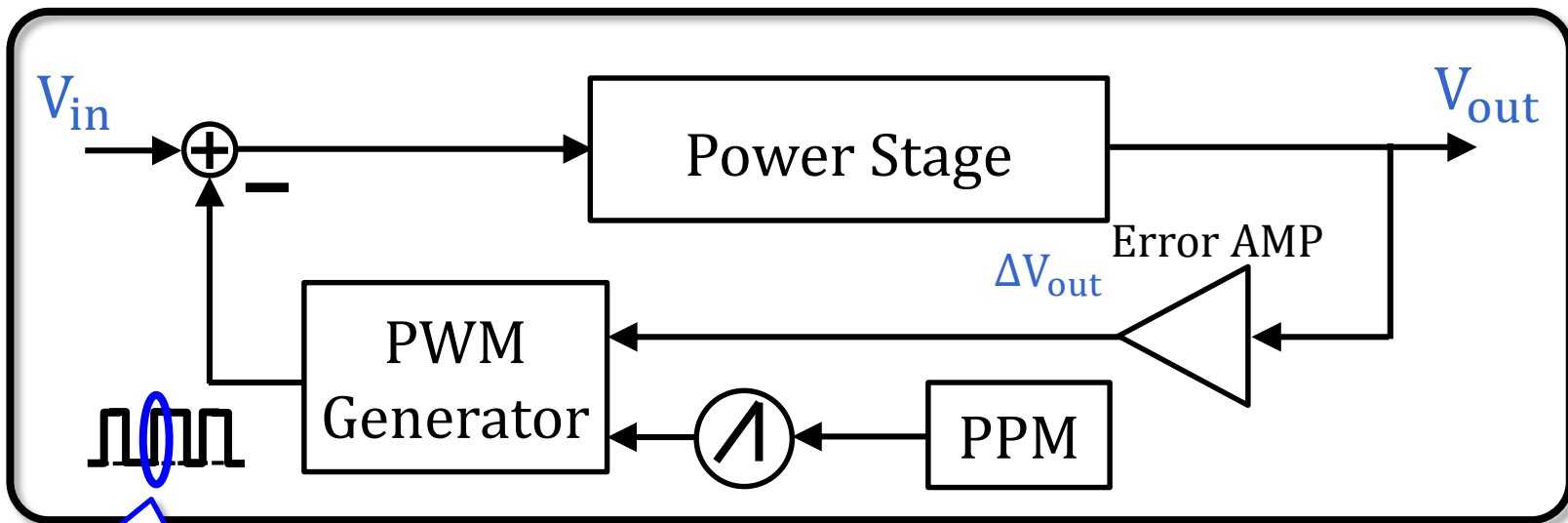


一般的なスペクトラム拡散電源

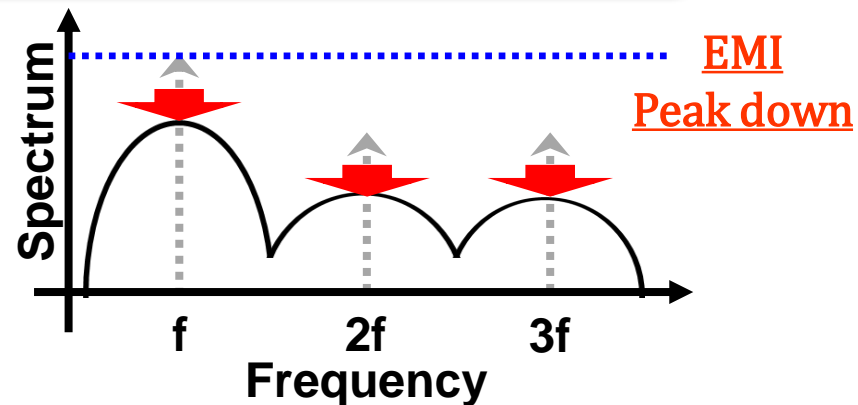
Spread Spectrum

周期的なクロックを**連続変調**

⇒基本周波数に集中した電磁ノイズを拡散低減

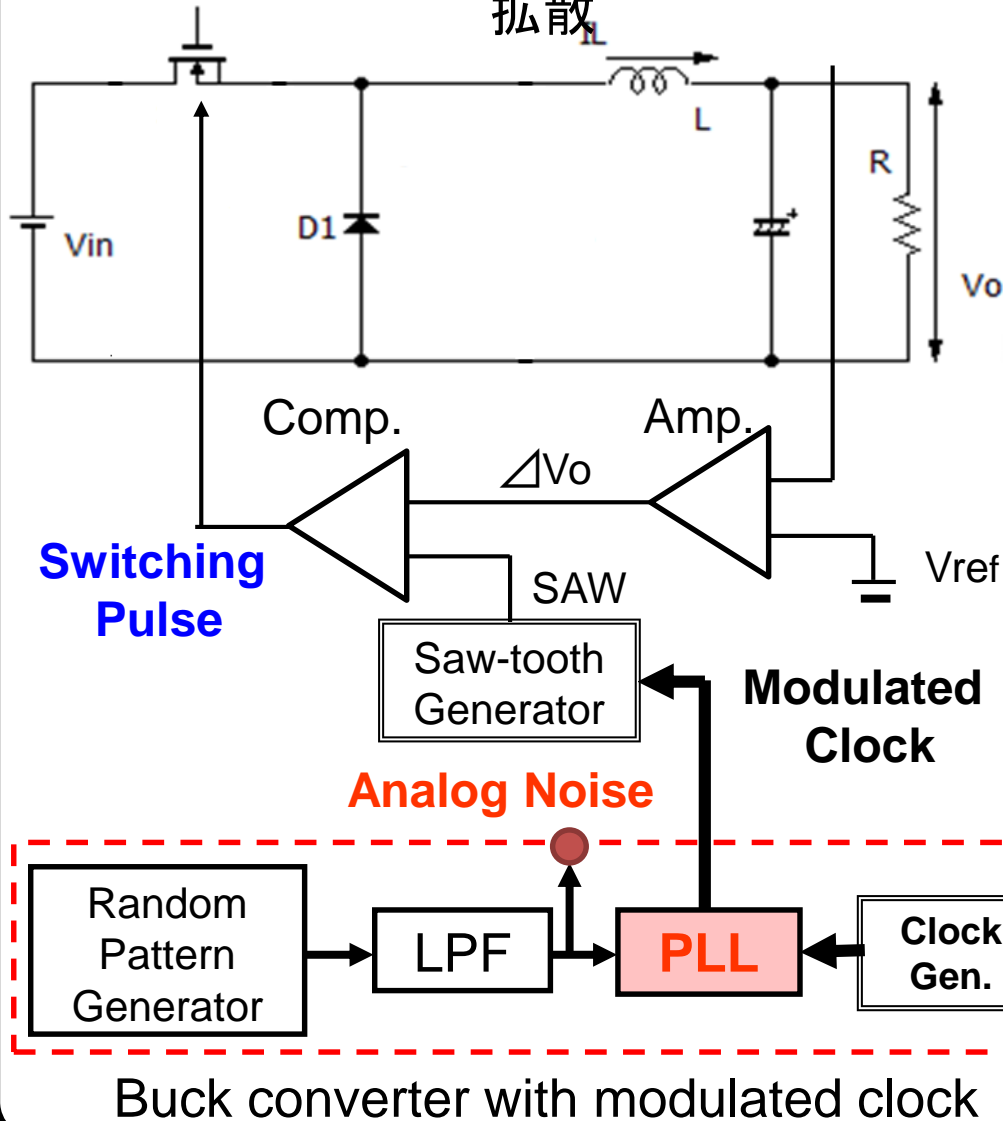


FFT



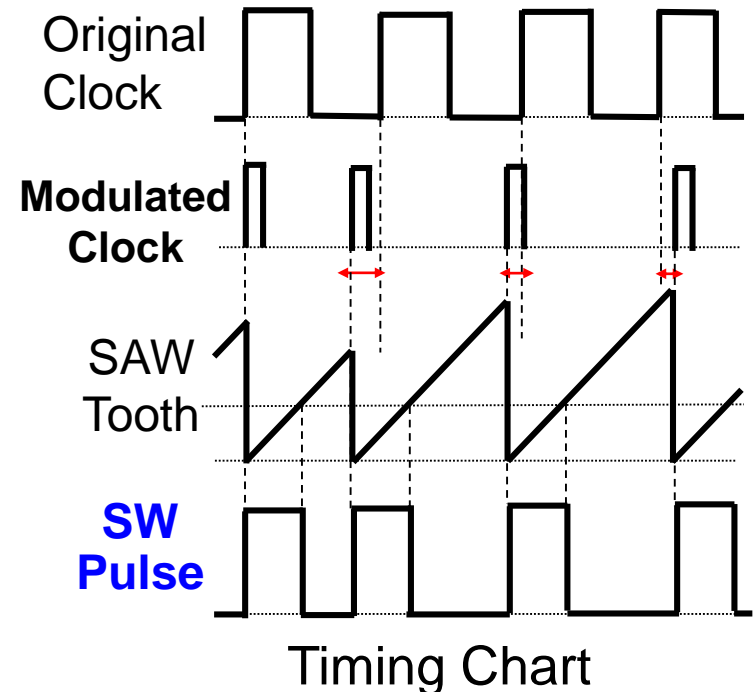
スペクトラム拡散によるEMI低減の確認

擬似アナログノイズを用いたスペクトラム
拡散



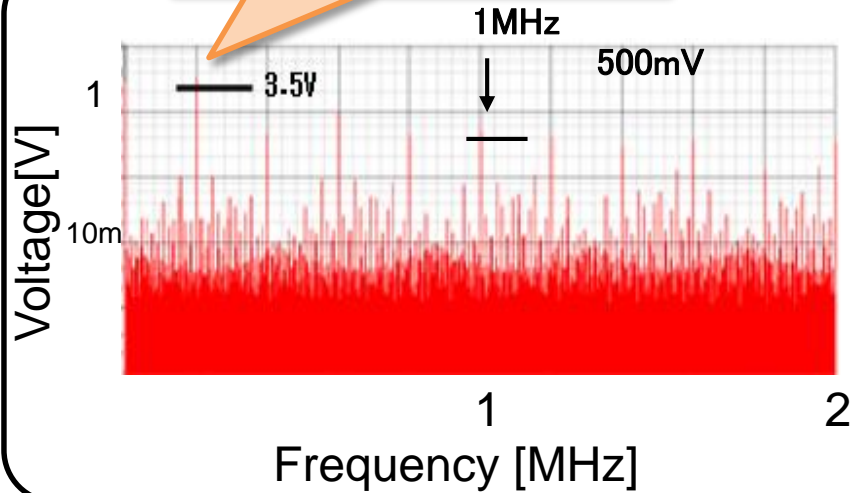
アナログノイズと**PLL**を用いて
クロックの位相をランダム的に変調

◎シミュレーション条件
 Input : 12V
 Output : 6V
 Clock frequency : 200kHz



スペクトラム拡散の効果

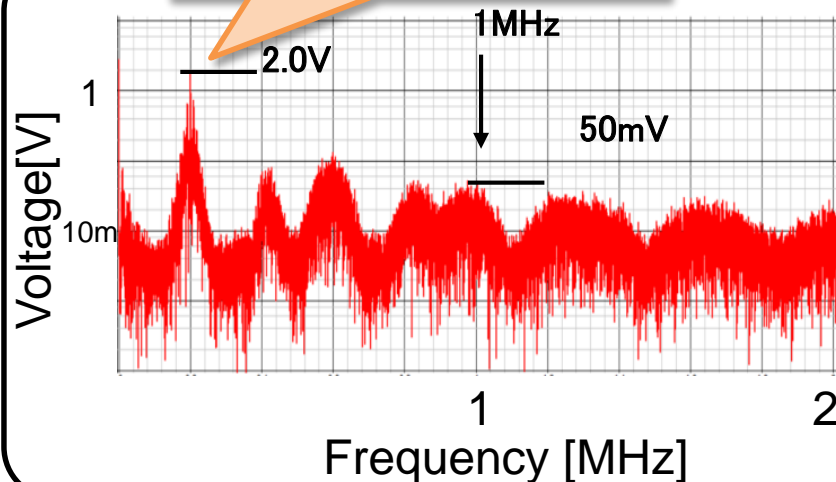
最大ノイズ **3.5V**



一般的なPWM型電源

- 基本周波数及び高調波にノイズが集中

最大ノイズ **2.0V**

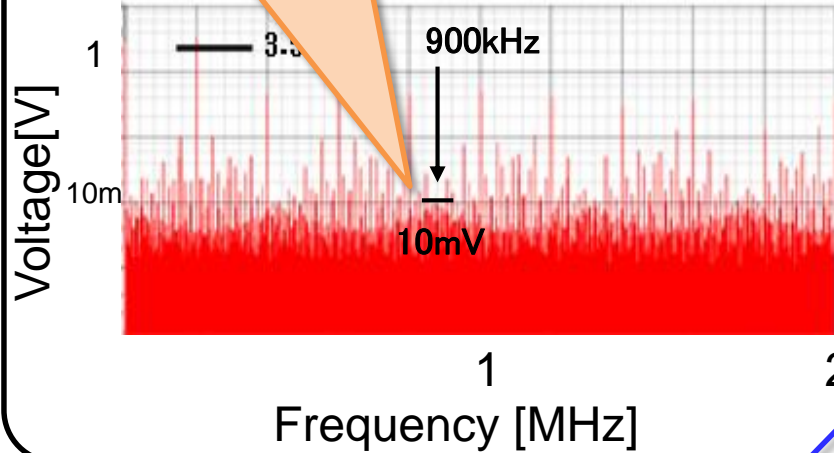


スペクトラム拡散電源

- EMIピークの低減を確認

スペクトラム拡散の課題

ノイズ **10mV**

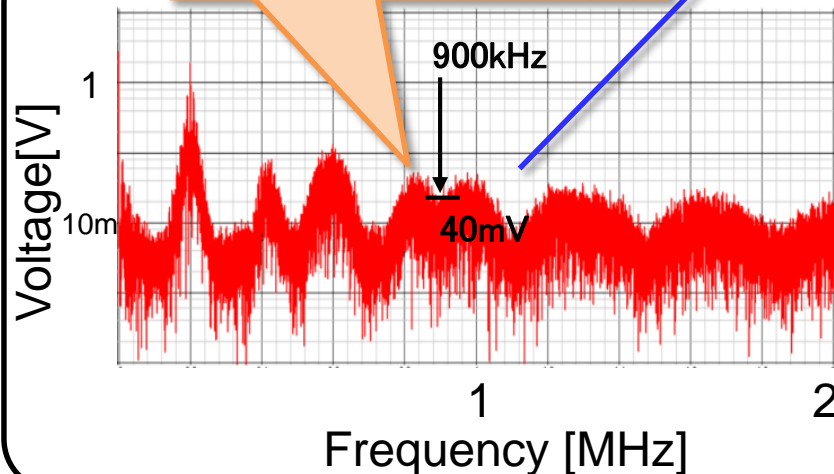


一般的なPWM型電源

- 基本周波数及び高調波にノイズが集中

拡散によるノイズが集中

ノイズ **40mV**



スペクトラム拡散電源

- EMIピークの低減を確認

Problem

周波数によっては
ノイズが増加

従来手法のまとめ

従来スペクトラム拡散

↓ アナログ変調を使用

Problem

ノイズが一様（連続的）に拡散

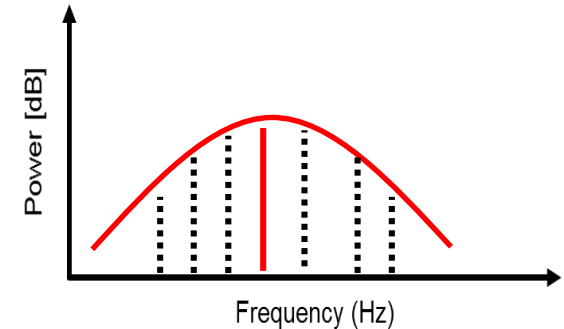


重要周波数にもノイズ拡散
通信信号やラジオ放送にノイズ重畳



Solution

ノイズの拡散周波数を制御できる
アルゴリズムの提案



アウトライン

- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- **パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散**
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- パルスコーディング型電源回路の実装
- まとめ

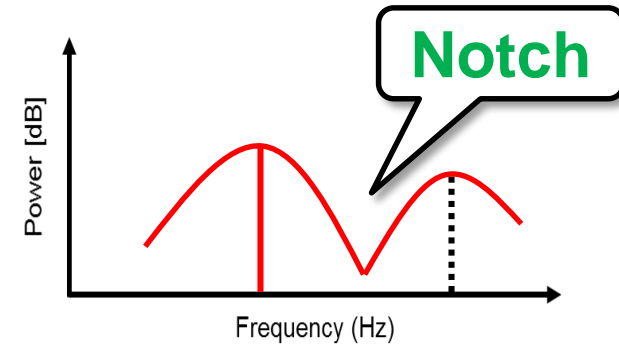
デジタル変調での拡散

Proposed

パルスコーディングを用いた
スペクトラム拡散



デジタル変調を使用



ノイズが**特定周波数（離散的）**に拡散



ノイズが拡散しない
周波数帯域

重要周波数帯域に**ノッチ帯域**が発生



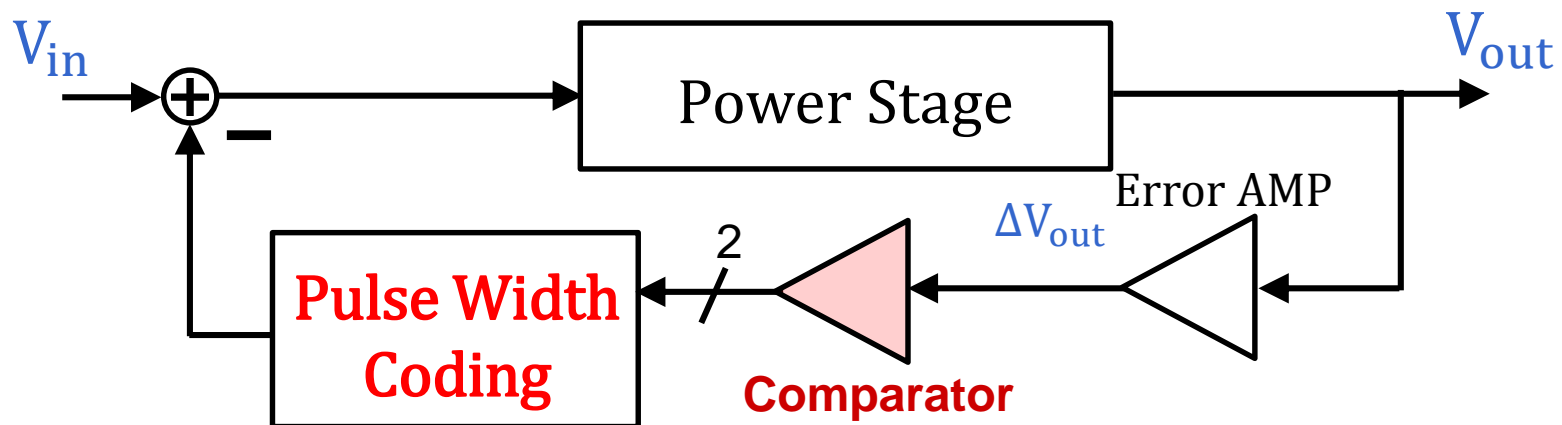
- EMIの低減
- 拡散ノイズの制御可能

コーディング型スペクトラム拡散電源

Spread Spectrum

周期的なクロックを**離散変調**

⇒基本周波数に集中した電磁ノイズを拡散低減



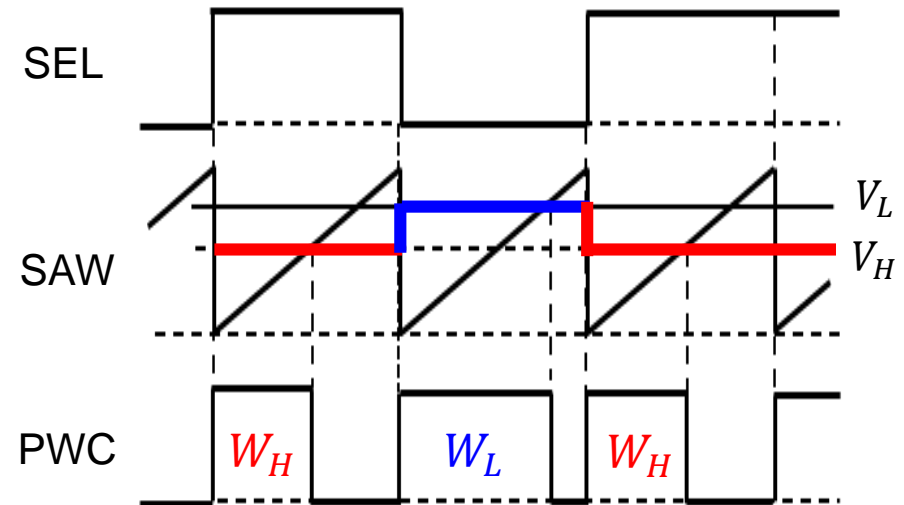
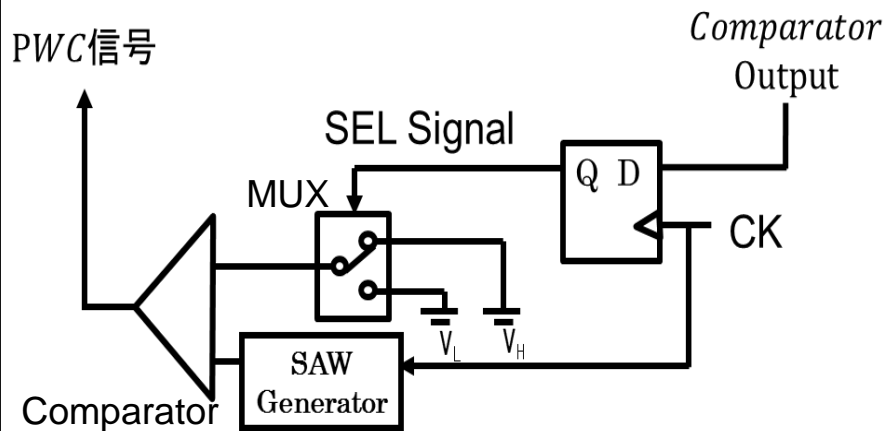
変更点は2点だけ！

- Comparatorの挿入
- 各種変調回路をコーディング回路に変更

Pulse Width Coding

PWC回路

入力のH/Lに対応して**長短2種類のパルス**を生成するデジタル回路



High入力時

- ① SELが**High**
- ② MUXが V_L を選択
- ③ Comparatorで幅が**短いパルス**を生成

Low入力時

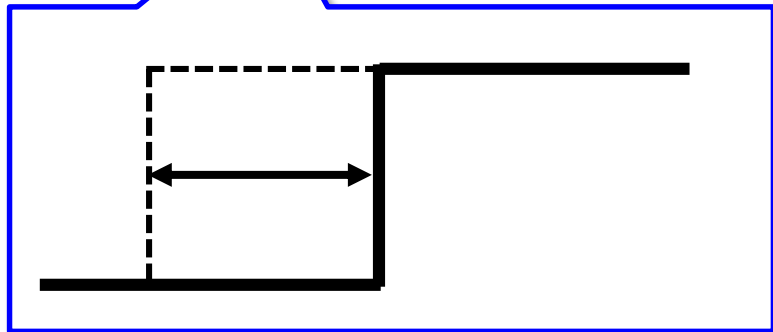
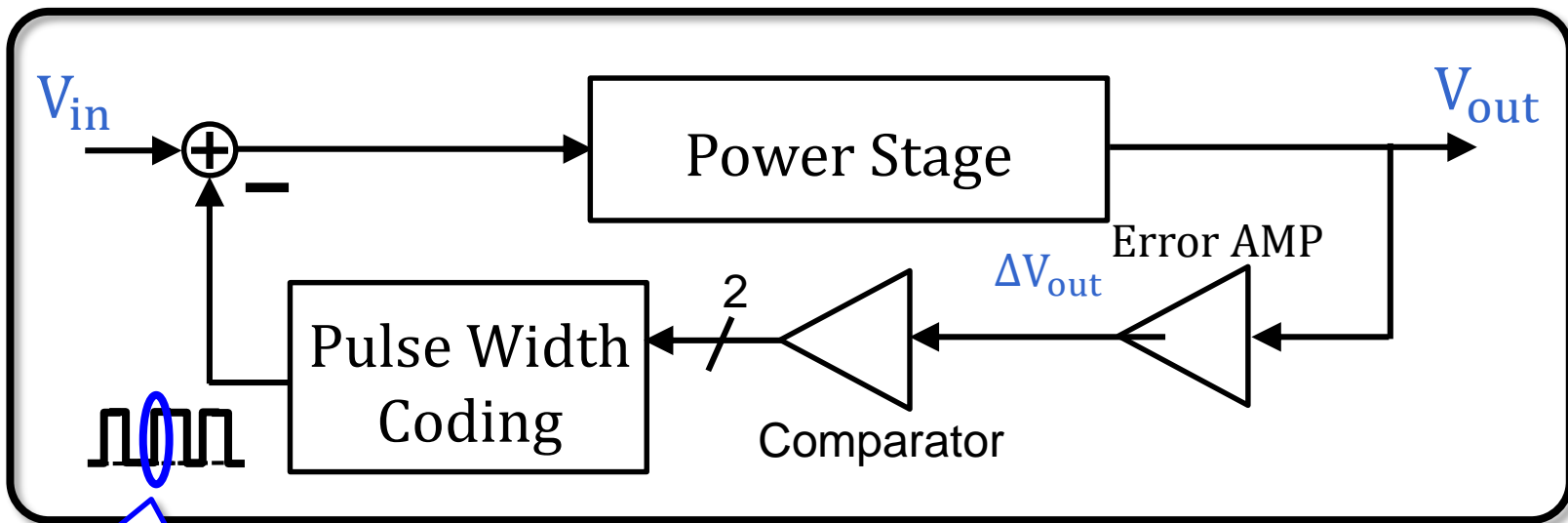
- ① SELが**Low**
- ② MUXが V_H を選択
- ③ Comparatorで幅が**長いパルス**を生成

コーディング型スペクトラム拡散電源

Spread Spectrum

周期的なクロックを**離散変調**

⇒基本周波数に集中した電磁ノイズを拡散低減

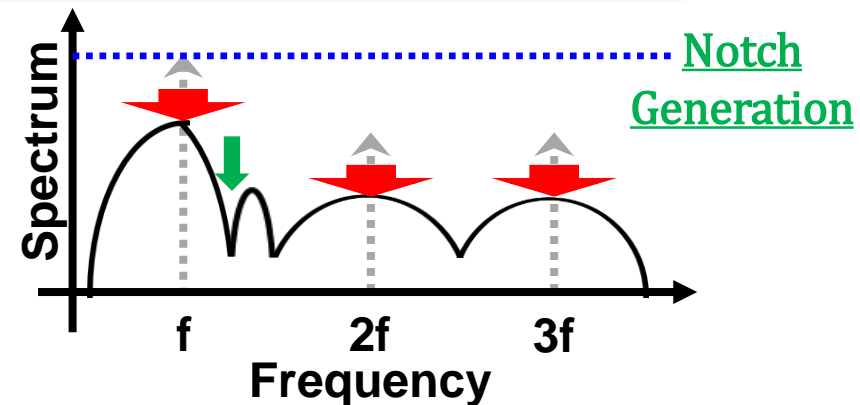
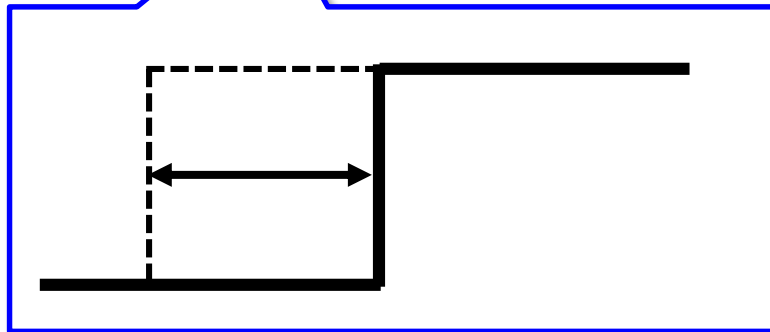
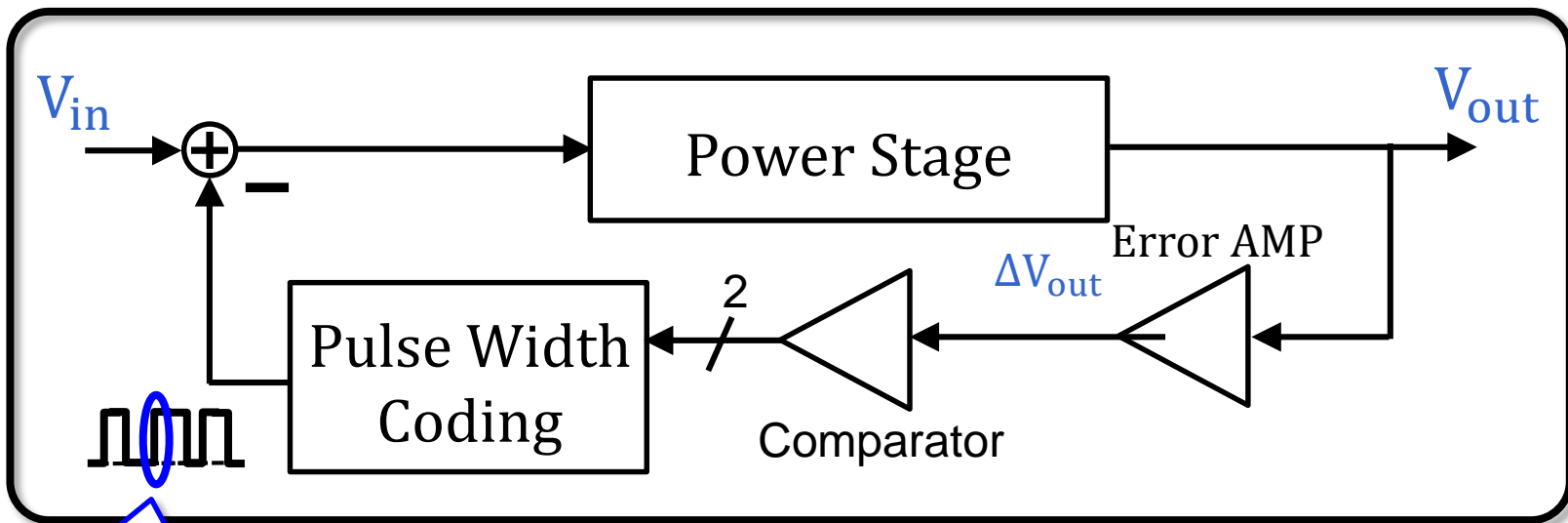


コーディング型スペクトラム拡散電源

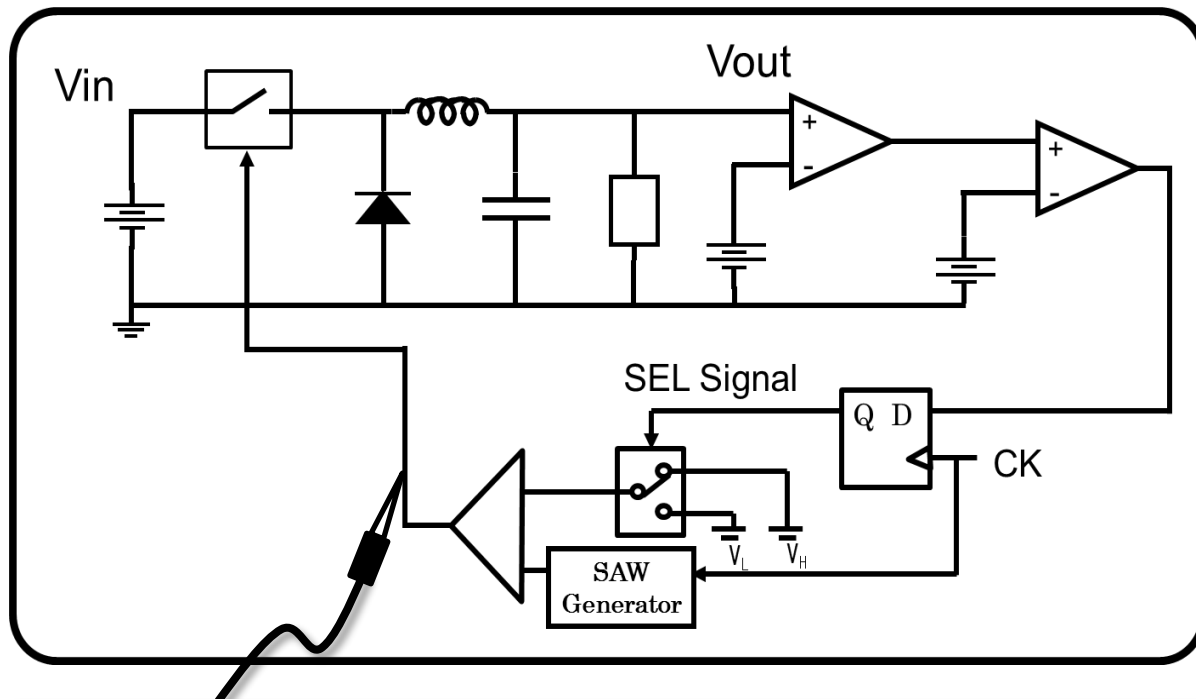
Spread Spectrum

周期的なクロックを**離散変調**

⇒基本周波数に集中した電磁ノイズを拡散低減

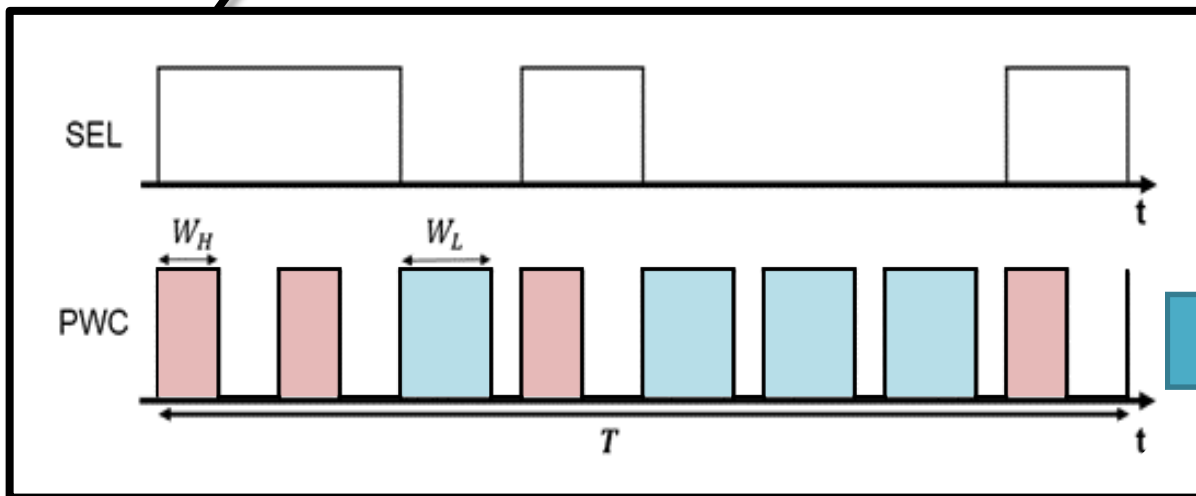
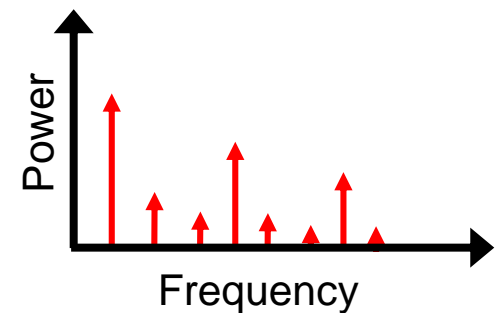


シミュレーション条件



◎ 条件

降圧型DC-DCコンバータ

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} : 1.4MHz変調幅 W_H : 320ns変調幅 W_L : 480nsPWC信号の
スペクトラムを確認

シミュレーション回路のスペクトラム

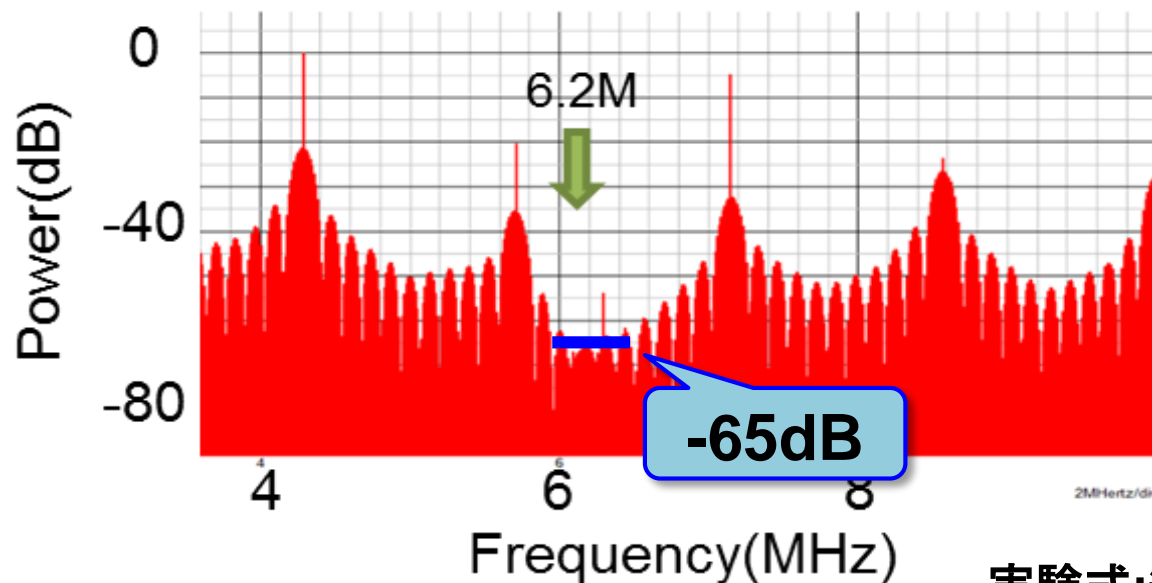
ノッチ周波数の実験式

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

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

式との整合性有り

Notchの発生を確認

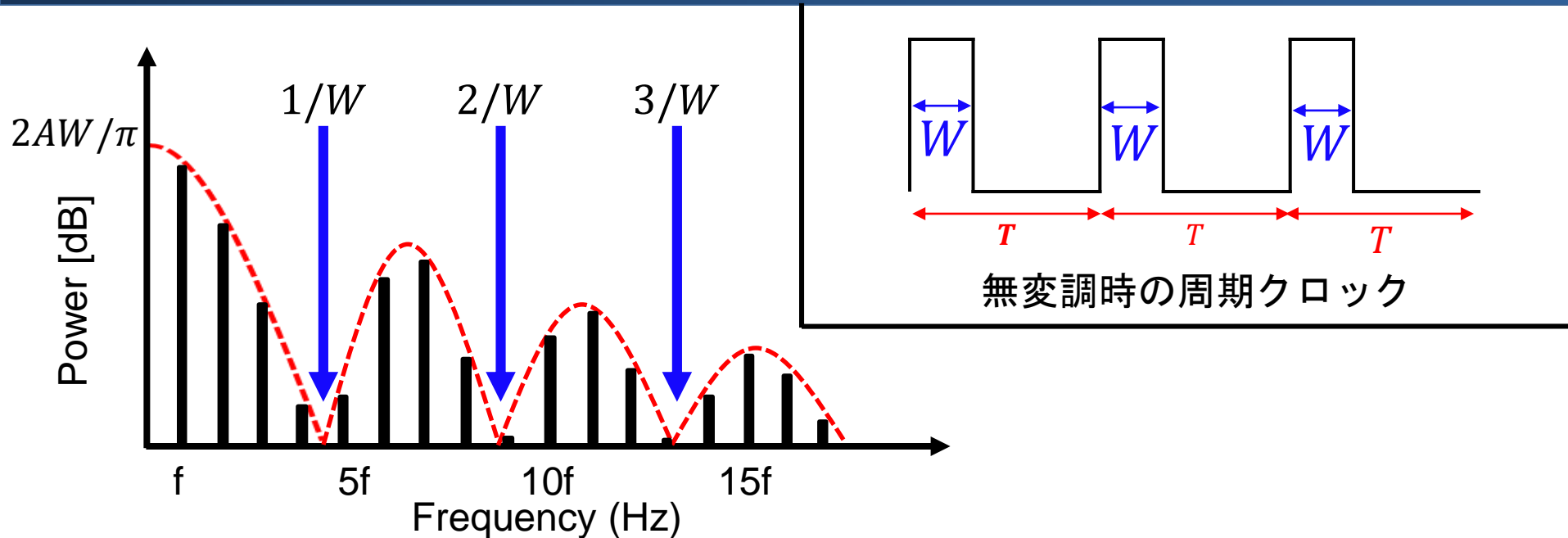


実験式: 経験的に求めた式

アウトライン

- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- **パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散**
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- パルスコーディング型電源回路の実装
- まとめ

ノッチ発生原因の推測



ノッチ発生理由の推測

- 矩形波のスペクトラム特性はパルス幅に依存するSINC関数
- 提案手法ではデジタル変調を行い、2種類の矩形波を発生
- コーディング後のSINC特性は変化している可能性有り

➤ 「ノッチ=SINC関数の零点」ではないかと推測

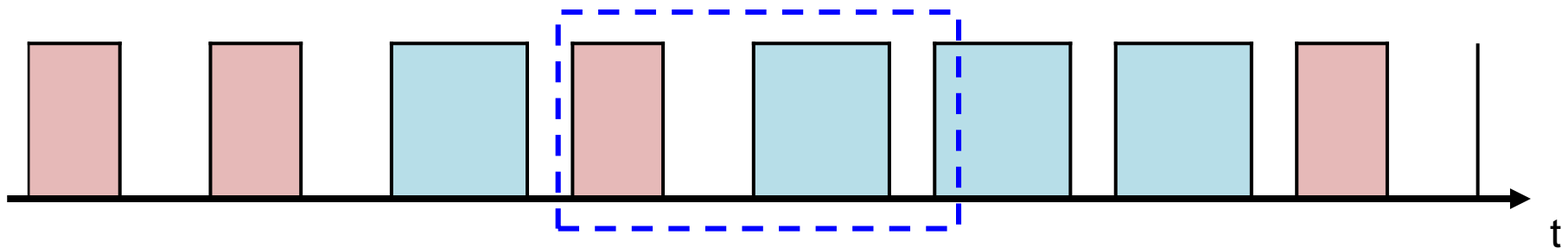
Process

コーディング信号をフーリエ変換することで検証可能

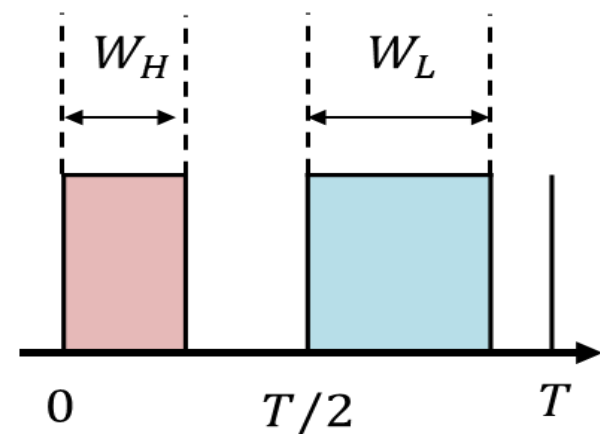
ノッチ特性の解析

解析手順

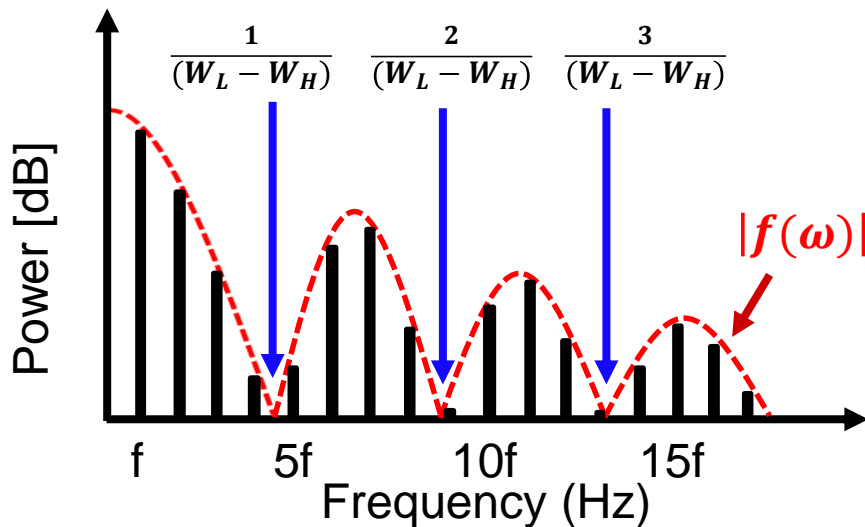
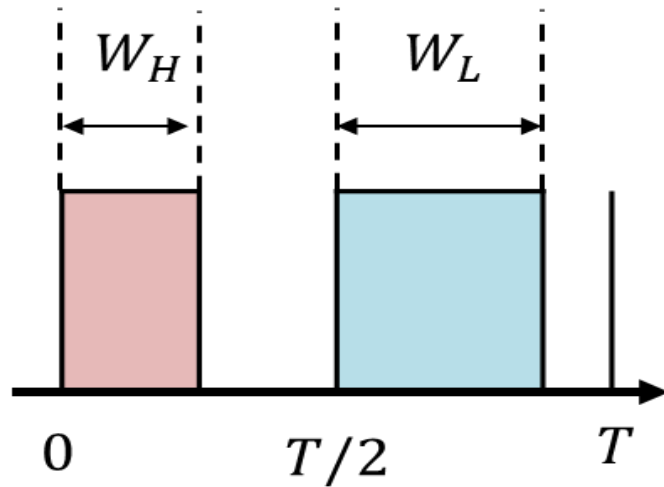
- ① 解析波形の定義
- ② 定義波形をフーリエ変換
- ③ 絶対値を取り、定義波形のスペクトラム特性を算出
- ④ スペクトラム特性から、零点を算出



周期 T 分(D;H \Rightarrow L)を抜粋



コーディング波形の式解析



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

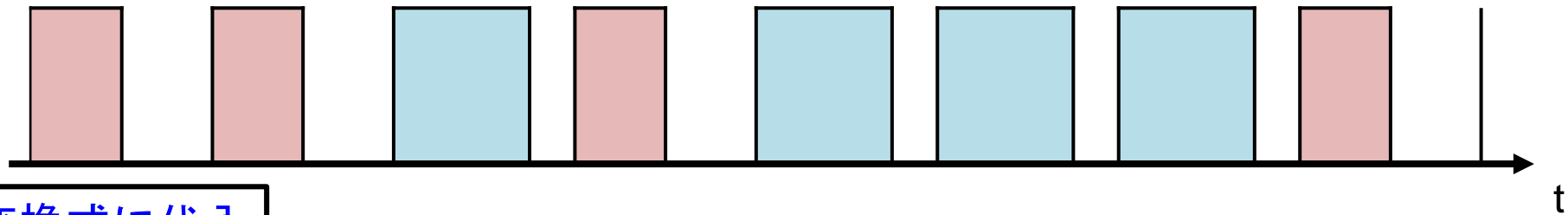
$$|f(\omega)| = \frac{1}{\omega} \sqrt{2 - 2\cos(\omega W_H - \omega W_L)}$$

↓ 倍角の定理より

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\omega} \sqrt{4\sin^2\{(\omega W_L - \omega W_H)/2\}} \\
 &= \frac{(W_L - W_H) \left| \sin\left\{\frac{\omega}{2}(W_L - W_H)\right\} \right|}{\frac{\omega}{2}(W_L - W_H)} \\
 &= (W_L - W_H) \left| \text{sinc}\left\{\frac{\omega}{2}(W_L - W_H)\right\} \right|
 \end{aligned}$$

コーディング波形2の式解析

PWC波形のパルス8列を周期Tと仮定し、フーリエ変換すると



変換式に代入

$$\begin{aligned}
 f(\omega) = & \int_0^{W_H} e^{-j\omega t} dt + \int_{T/8}^{W_H+T/8} e^{-j\omega t} dt + \int_{T/4}^{W_H+T/4} e^{-j\omega t} dt + \int_{3T/8}^{W_H+3T/8} e^{-j\omega t} dt \\
 & + \int_{T/2}^{W_L+T/2} e^{-j\omega t} dt + \int_{5T/8}^{W_L+5T/8} e^{-j\omega t} dt + \int_{3T/4}^{W_L+3T/4} e^{-j\omega t} dt + \int_{7T/8}^{W_L+7T/8} e^{-j\omega t} dt
 \end{aligned}$$

絶対値を取る

$$|f(\omega)| =$$

$$= \underbrace{(W_L - W_H) |\text{sinc}\{\pi f(W_L - W_H)\}|}_{\text{ノッチ特性}} \sqrt{\underbrace{\{6 + 4\cos(\pi/4) + 4\cos(\pi/2) + 4\cos(3\pi/4)\}}_{\text{振幅特性}}}$$

ノッチ特性

振幅特性



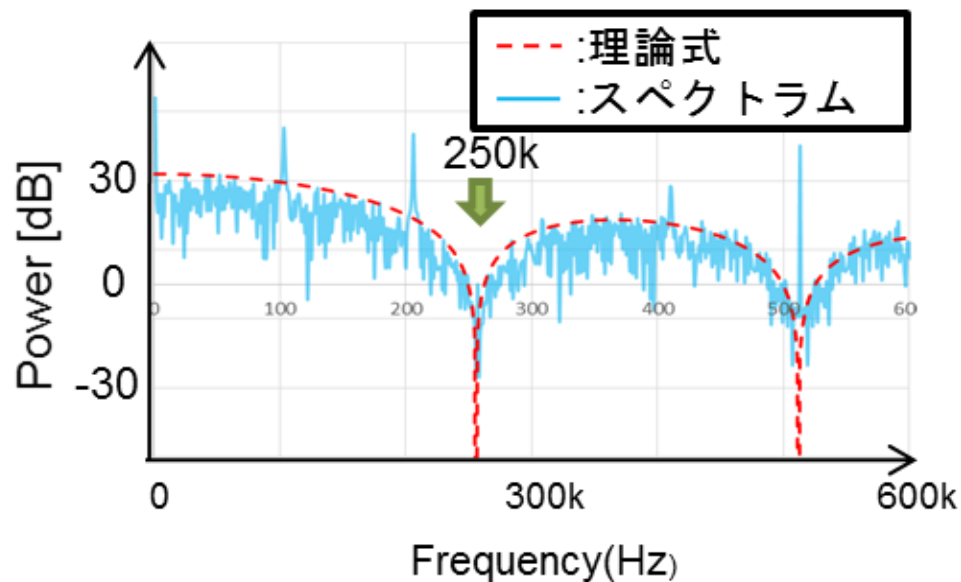
変換パルス数及び順列に非依存

PWC方式でのノッチ理論式

理論式

$$f_{notch} = \frac{n}{(W_L - W_H)} = 250k, 500k, \dots \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N)$$

理論式とスペクトラムが一致



ノッチ発生周波数は「パルス幅の差」にのみ依存

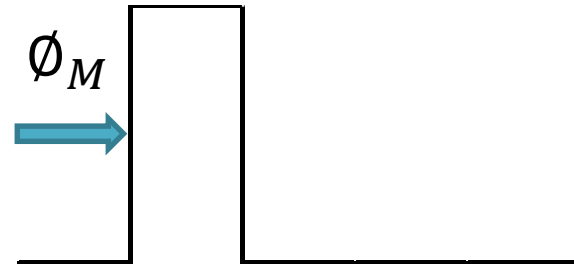
位相コーディング方式 (PPC)

Pulse Position Coding

- デジタル値に応じてパルスの位置を変調する。



Digital Value=「0」



Digital Value=「1」

PPC方式の理論式

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

➡ 「位相差」と「パルス幅」に依存したスペクトラム特性

複合コーディング方式の理論式

PPC+PWC複合コーディング方式

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

$W_2 - W_1 = 2|\tau_L - \tau_H|$ とすると

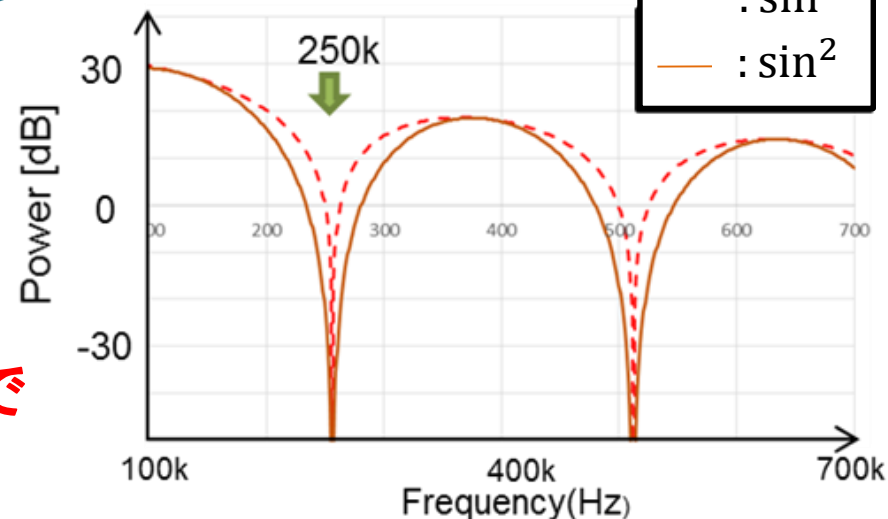
$$|f(\omega)| = \frac{\sin^2 \left(\frac{\omega}{2} (W_L - W_H) \right)}{\omega/2}$$

\sin の 2乗項

◎条件

$$W_L = 7\mu\text{s}$$

$$W_H = 3\mu\text{s}$$



コーディング値を調整することで
ノッチ特性を向上可能

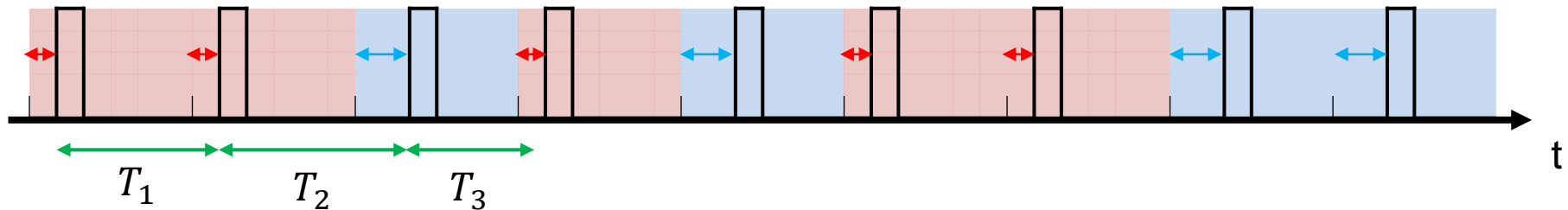
アウトライン

- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- **パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散**
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- パルスコーディング型電源回路の実装
- まとめ

PPCの制約条件

ランダムPPC方式

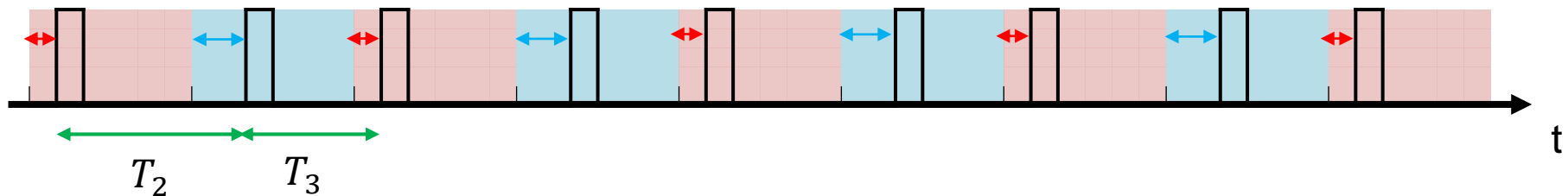
➤ 誤差電圧依存のコーディング



3種類の周期が発生 ➡ ノッチが出現しづらい

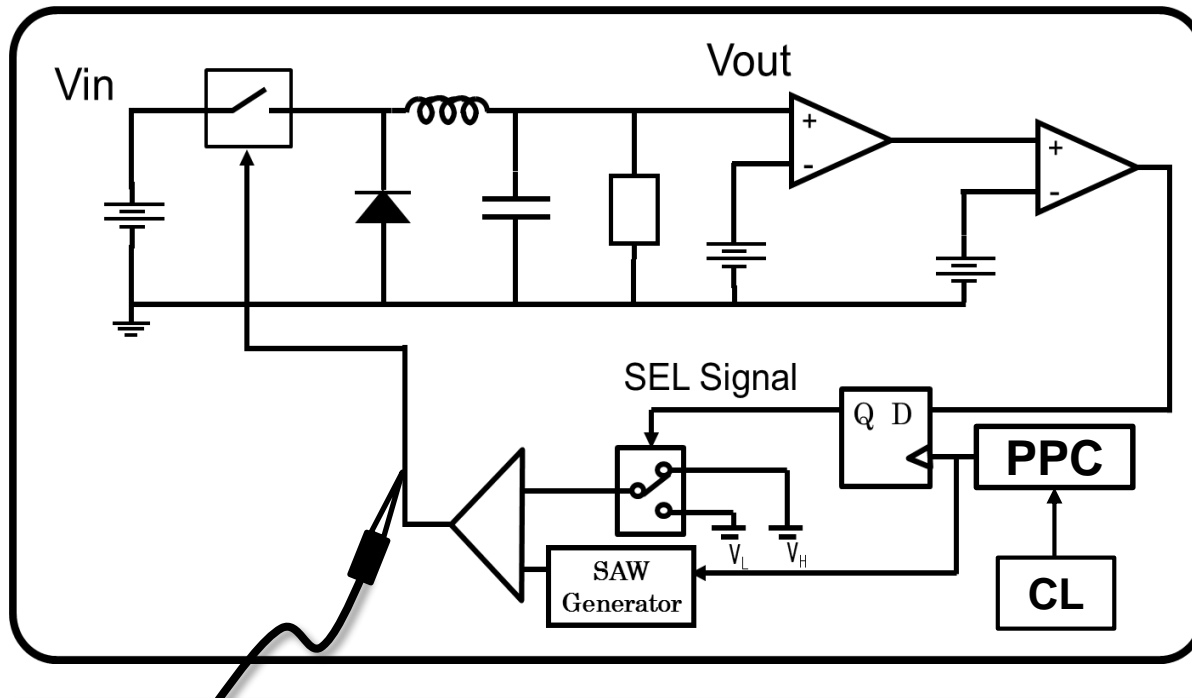
サイクリックPPC方式

➤ 交互制御クロック依存 (交互に0/1コーディング)



2種類の周期が発生 ➡ ノッチが出現やすい

複合コーディング方式の検討



◎ 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} : 1.4MHz

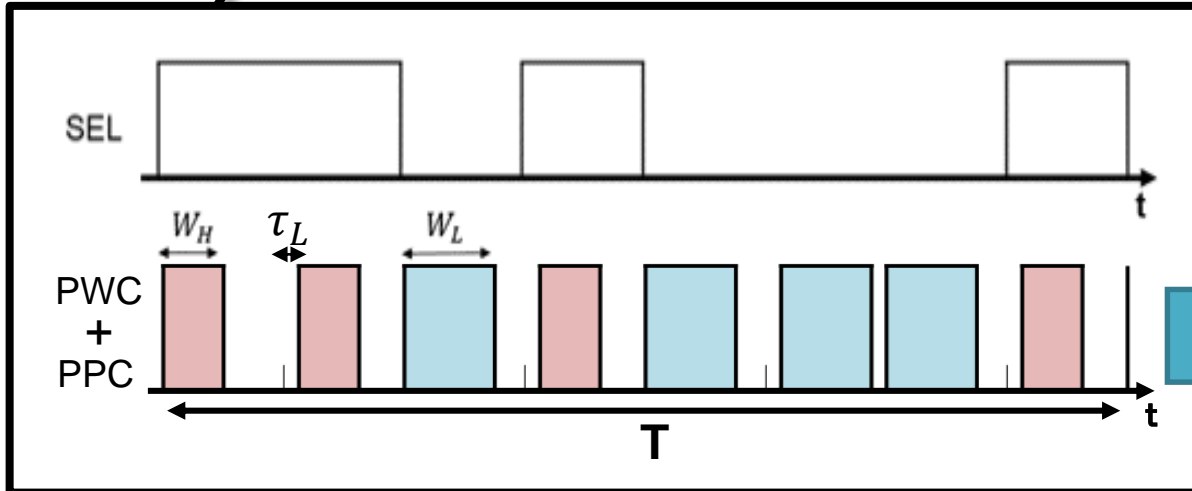
変調幅 W_H : 320ns

変調幅 W_L : 480ns

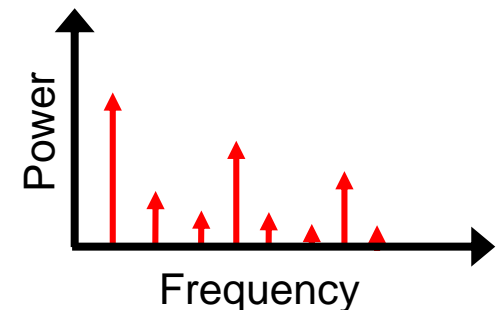
変調位相 τ_H : 0ns

変調位相 τ_L : 80ns

PPCは交互コーディング



ノッチ特性の
変化を確認



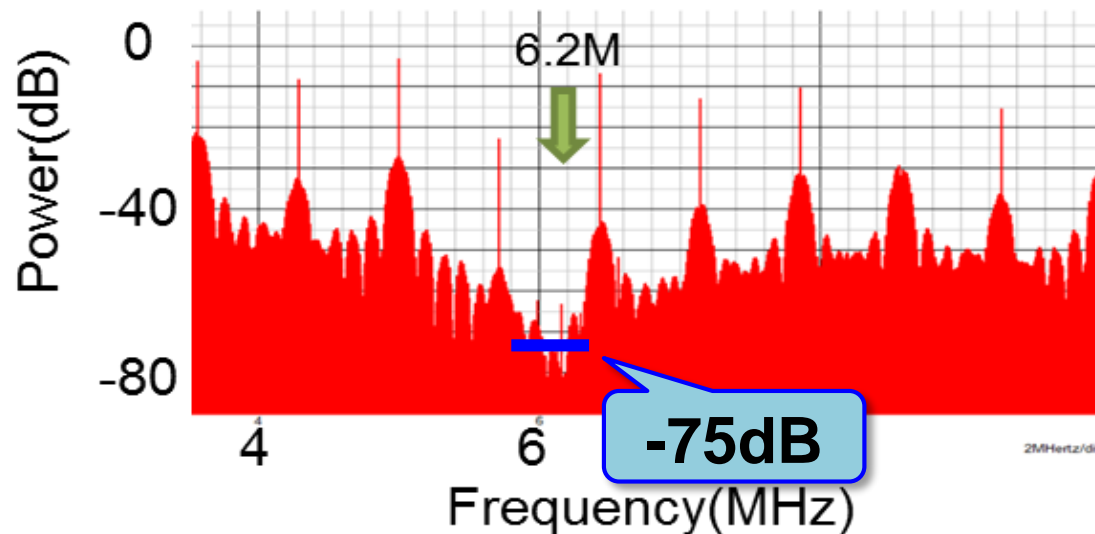
複合コーディング方式のスペクトラム

理論式

$$f_{notch} = \frac{n}{(W_L - W_H)} = \frac{n}{(480ns - 320ns)} = 6.25MHz$$

$$f_{notch} = \frac{n}{2|\tau_L - \tau_H|} = \frac{n}{2(80ns - 0ns)} = 6.25MHz \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N)$$

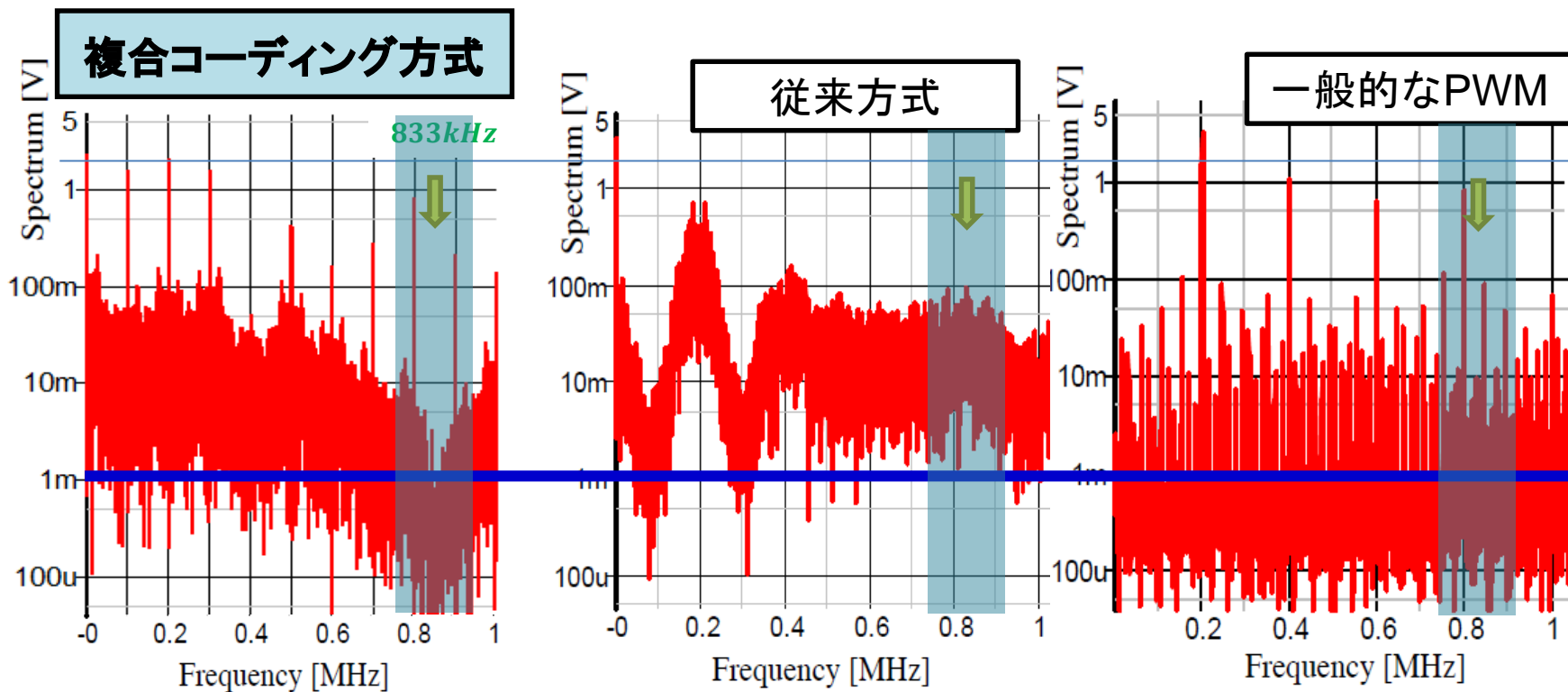
理論式とスペクトラムが一致



単コーディング方式よりもノッチ特性が**10dB**向上

従来方式とのスペクトラム比較

- AMラジオへの影響を抑制することを想定
⇒850kHz付近にノッチを発生
- 設定周波数において提案手法が**一番低減**



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

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

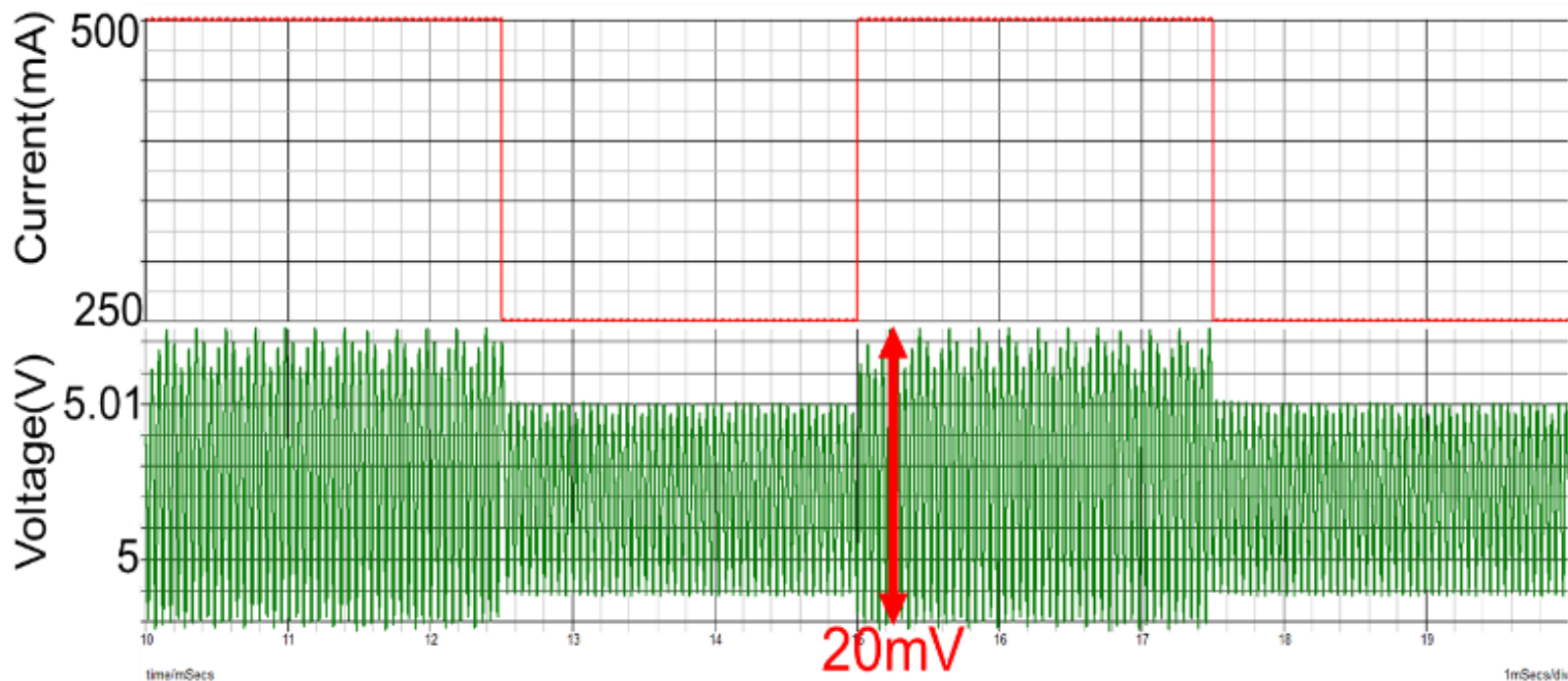
従来方式と比較して1/100に低減!!

複合コーディング方式の出力電圧

◎条件

電流変動 I_0 : 500mA / 250mA

変動周波数 : 200Hz



オーバー/アンダーシュートはない⇒優れた応答特性

アウトライン

- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- **パルスコーディング型電源回路の実装**
- まとめ

実装結果のノッチ確認

理論式

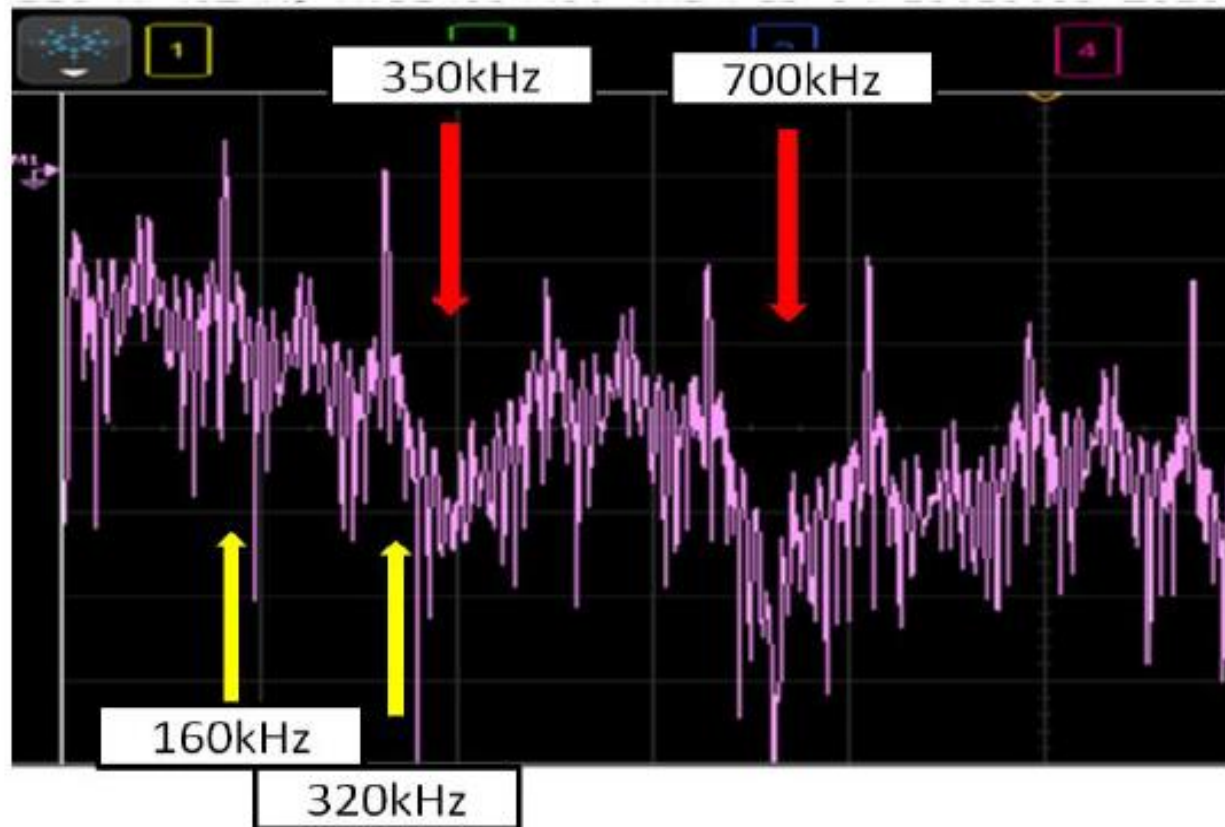
$$f_{notch} = \frac{n}{(W_L - W_H)} = \frac{n}{(4.0\mu s - 1.1\mu s)} = 344.8\text{kHz}$$

◎条件

$$W_L = 4.0\mu s$$

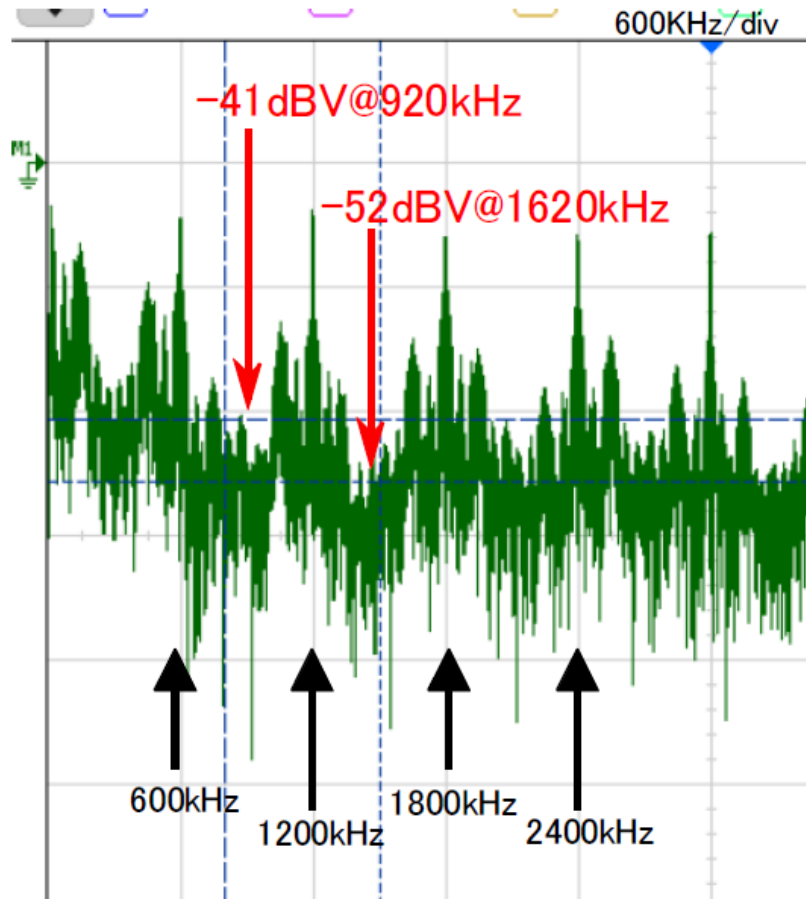
$$W_H = 1.1\mu s$$

$$f_{clock} = 160\text{kHz}$$



PWC方式実装結果1

- 実測スペクトラム1 (出力電流: 330mA)



実装回路によるスペクトル

表1.

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
1.67μs	0.40μs	1.46 μs
L	C	負荷変動周期
100μH	610μF	0.02ms

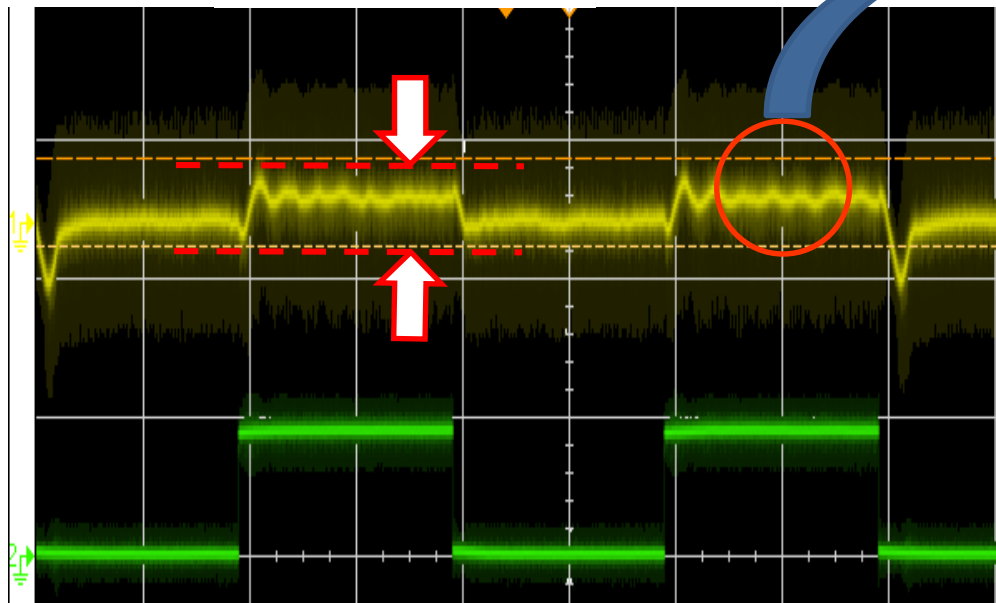
$$f_{notch} = 943 \text{ kHz}, 1.9\text{MHz} \dots$$

理論値にノッチの生成を確認

PWC方式実装結果2

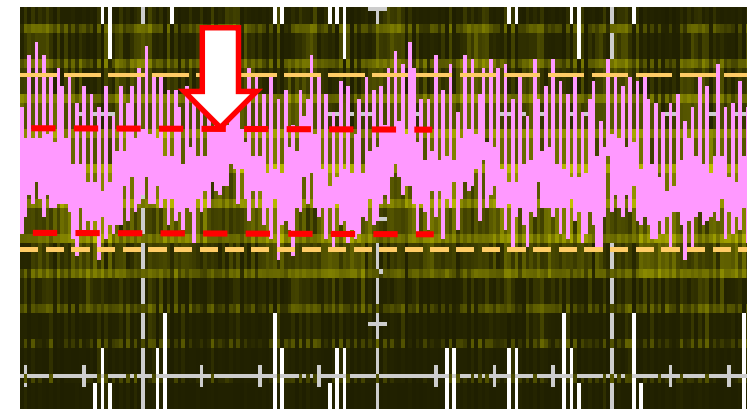
* 出力電圧リップル(過渡応答特性)

20 mVp-p



230mA 530mA 230mA (500 Hz)

8 mVp-p (0.2%)



出力電圧リップル
(2.0MHzで帯域制限)

一般的なPWM方式と同程度の特性

アウトライン

- 研究背景・概要
- 従来スペクトラム拡散
- パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散
 - 従来コーディング方式
 - ノッチ特性の解析
 - 提案コーディング方式
- パルスコーディング型電源回路の実装
- まとめ

まとめと今後の課題

まとめ

- ノッチ特性を有するスペクトラム拡散を解析
 - ノッチ特性の解析によって理論式を導出
- 複合コーディング方式の検証
 - 最も良いノッチ特性
 - 理論式との整合性有り
- 単コーディング方式の実装
 - 提案回路の安定動作を確認
 - 実測でのノッチ発生を確認



従来手法に新特性を追加
従来の課題に大きく貢献

今後の課題

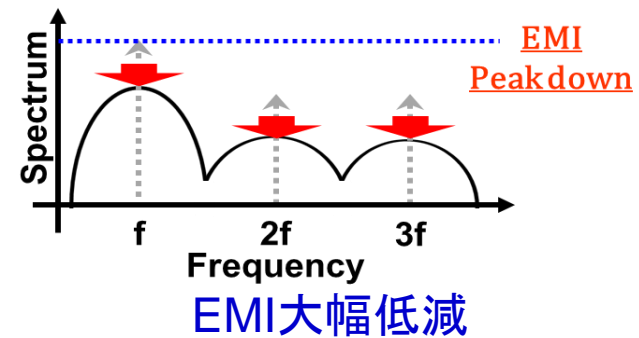
- 提案手法でのEMI低減
 - ノッチ周波数の発生とEMIの大幅低減
 - ノッチ特性とEMI低減の関係式の導出

提案手法でのEMI低減

従来スペクトラム拡散

クロック

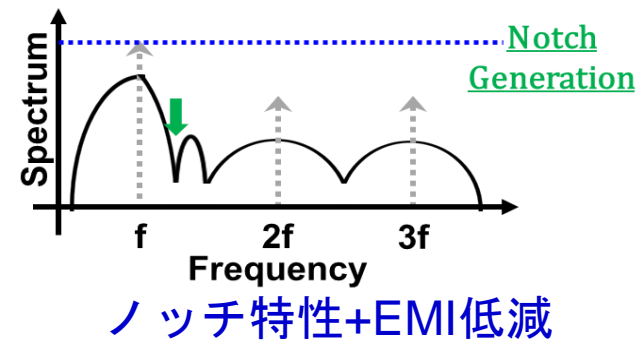
ランダム
変調



提案スペクトラム拡散

クロック

デジタル
変調

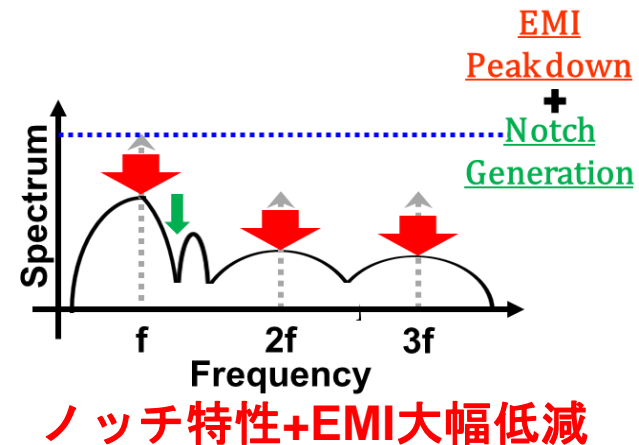


今後の方針

クロック

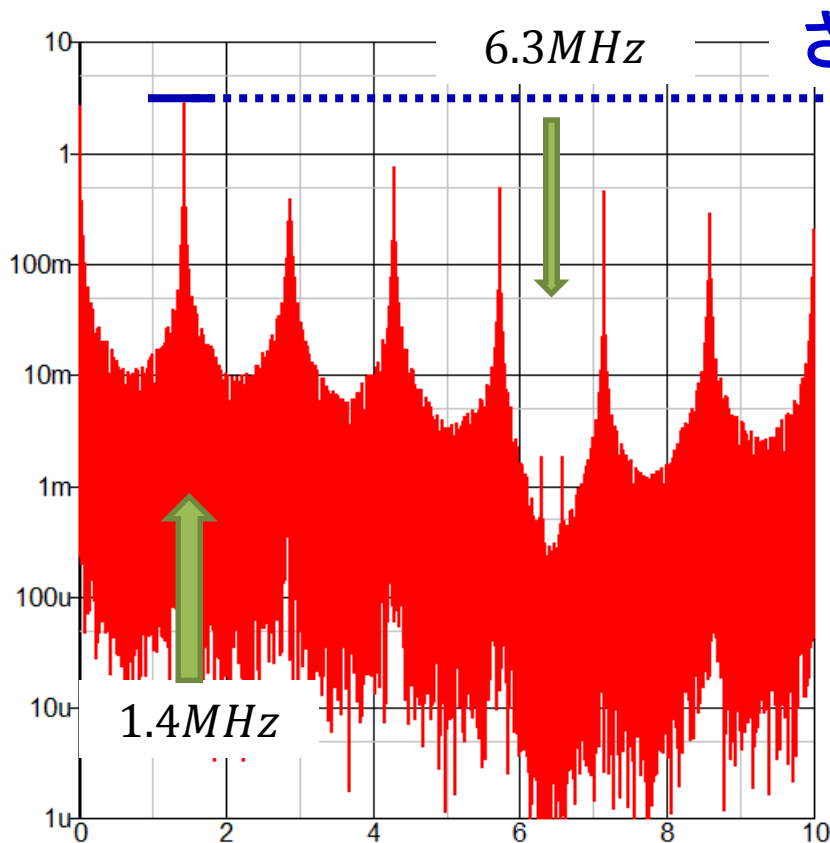
ランダム
変調

デジタル
変調



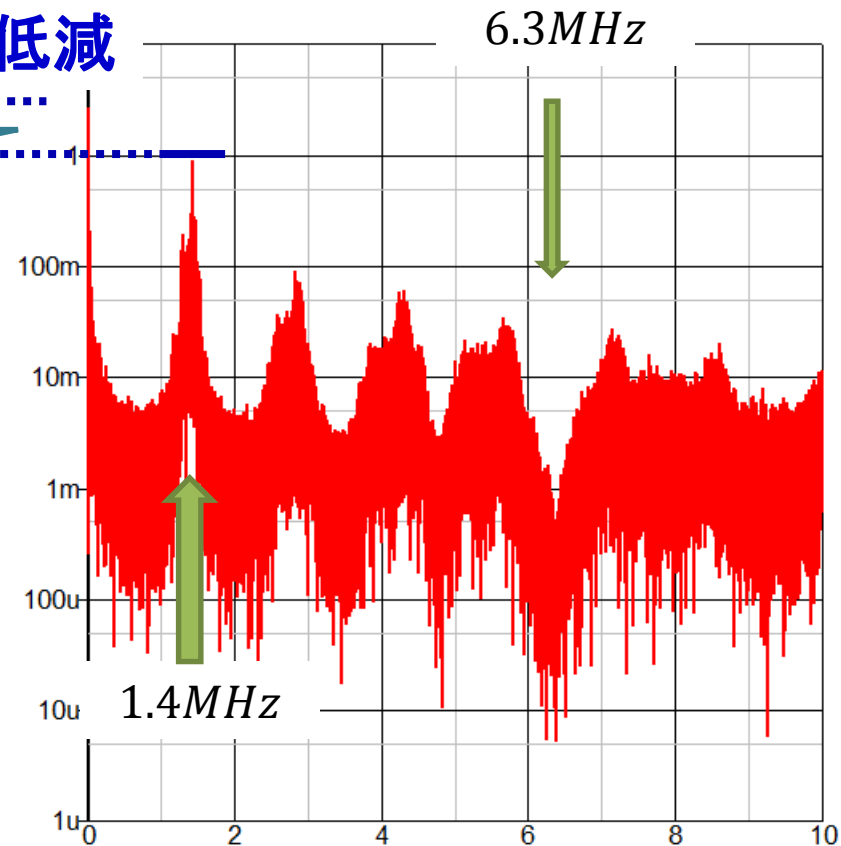
ランダム変調有無の比較

提案スペクトラム拡散



さらに低減

今後の方針



ノッチの発生と**EMIの大幅低減**が可能！！

Q & A

Q & A

Q. 今回の研究は遠方の電磁波というよりも近傍の電磁波を想定しているのか？

A. その通りです。近傍の回路内クロックや通信周波数等を想定しています。本発表では一例としてAMラジオ選局周波数を挙げました。

Q. 複合方式(1bit+1bit)を行うメリットは単方式(2bit)と比較して良くなるのか？

A. 現在は1bitの検討しかしていませんので、2bitとの比較に関しましては何とも言えません。しかし、単方式(1bit)に対しては複合方式(1bit+1bit)が良いということが今回の研究で分かりました。2bitに関しましては今後の検討課題の一つとさせていただきます。

Q. 今回DC-DCコンバータを想定しているが、DC-DCコンバータ以外にも応用できるのだろうか？

A. 本研究はクロックの変調方法の改善であるため、クロックを使用する回路や方式であれば、応用できる可能性は十分にあります。

Q & A

Q.評価シート等は作成しているのか？

A.作成していません。現在はEMIピークとノッチの発生周波数及びその深さのみを検討しております。

Q.各パルスでピークは発生する。広いレンジで見ると平均化されて低減しているように見える。そのため、時間軸でも検討してみてください。

A.素晴らしいご意見ありがとうございます。今後の検討課題とさせていただきます。

Q.パルスの理論式を導出しましたが、パルスのスペクトラムと比較して、どの程度の精度があるのでしょうか？

A.まだ、精度の検討は行っておりませんが、実測では約 $\pm 10\text{kHz}$ くらいの誤差でした。

Q.高周波になればなるほど、誤差は大きくなるのか？

A.はっきりと申し上げられませんが、ノッチ特性は等周波数ごとに発生するため、周波数が大きくなれば誤差も大きくなると考えられます。

付録

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...

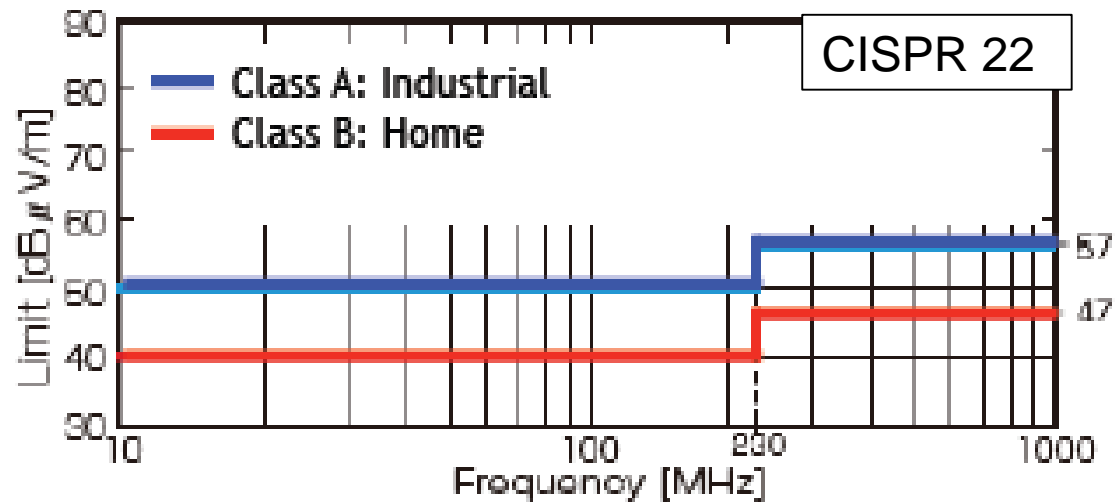


小規模化・低コスト化

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

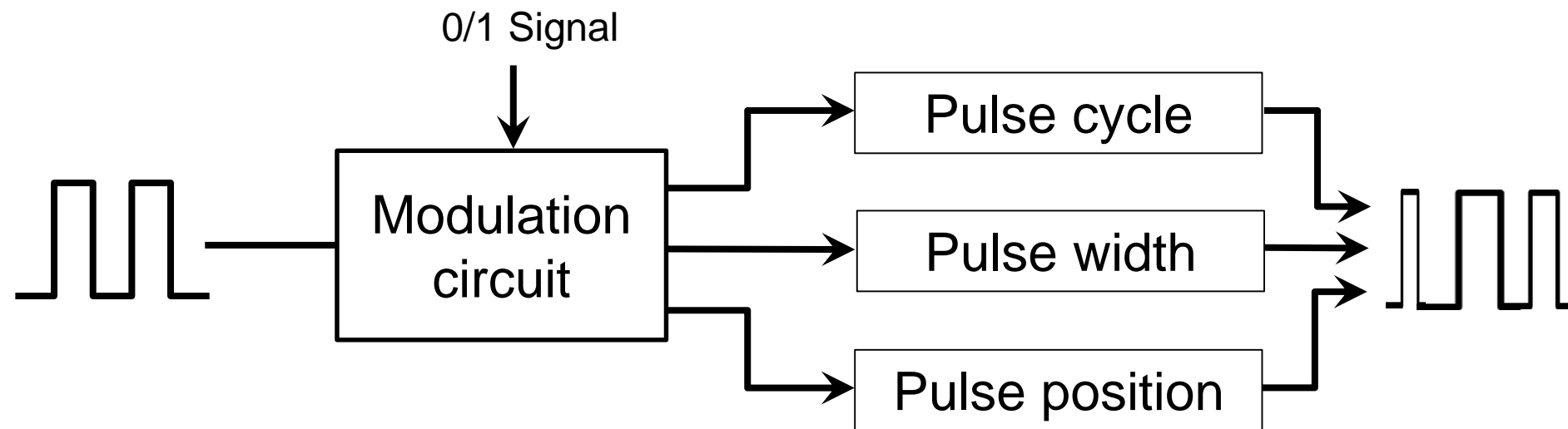
パルス幅・周期・位置の中のいずれかを任意選択して変調

- 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回路の動作1

①基準<出力のとき

SEL信号はHigh
 V_L を選択



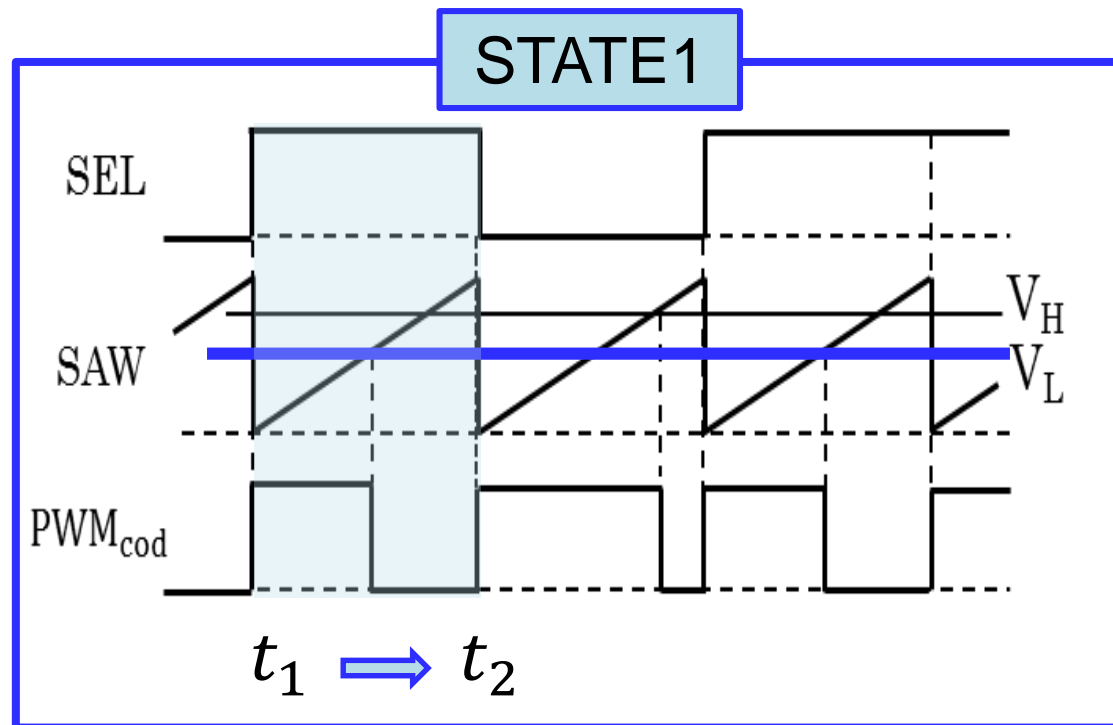
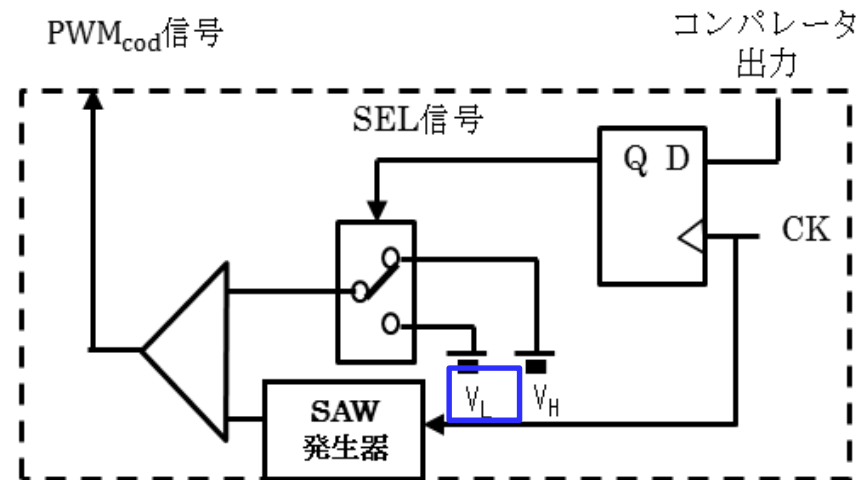
V_L と鋸歯状波とを比較



Duty Ratio : 小



周期全体の出力電圧 : 減少



PWC回路の動作2

②基準 > 出力のとき

SEL信号はLOW
 V_H を選択



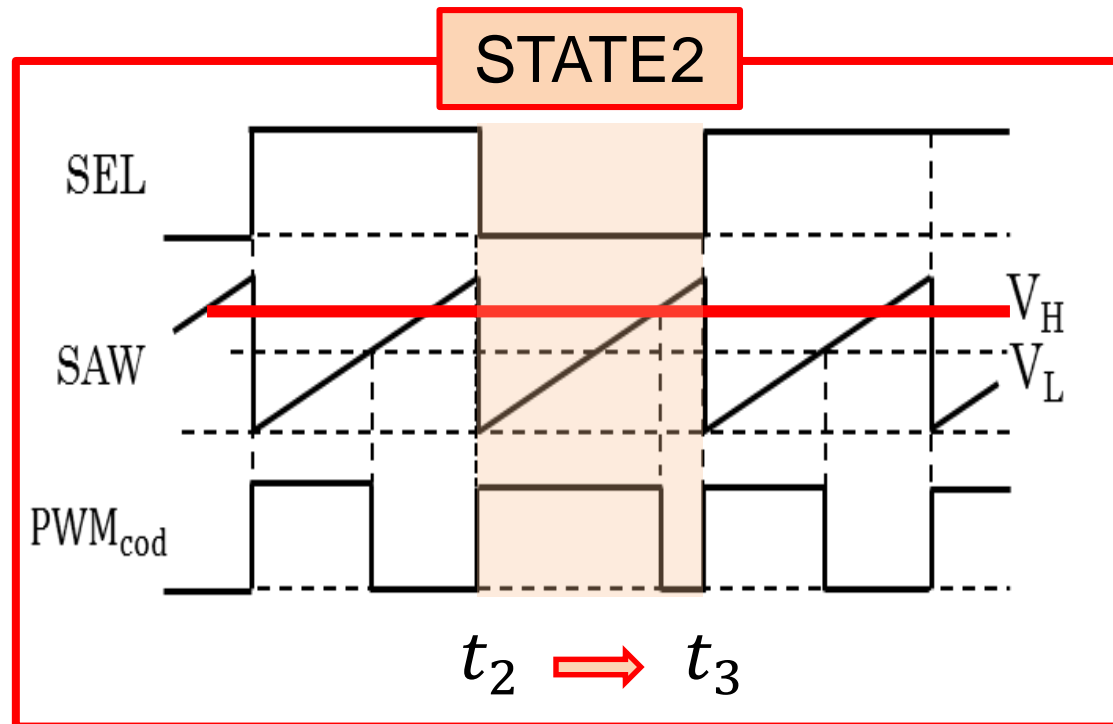
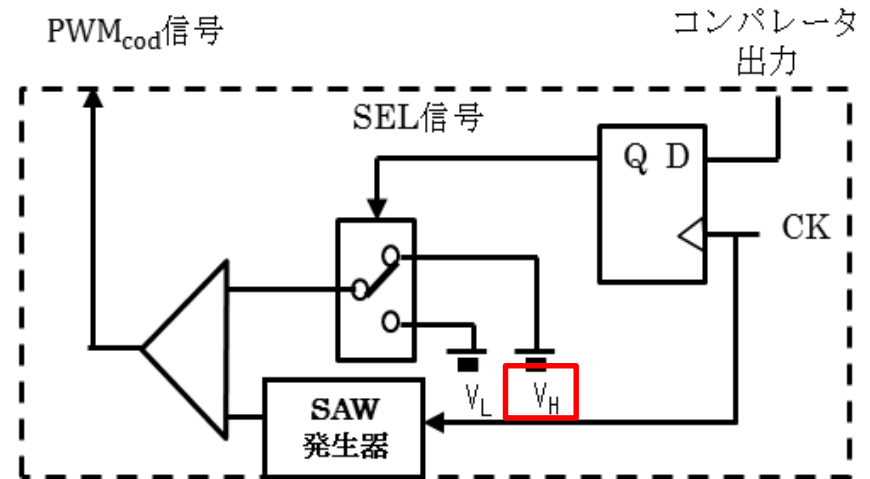
V_H と鋸歯状波とを比較



Duty Ratio : 大



周期全体の出力電圧 : 増大



PWC回路の動作3

③基準<出力のとき

SEL信号はHigh
 V_L を選択



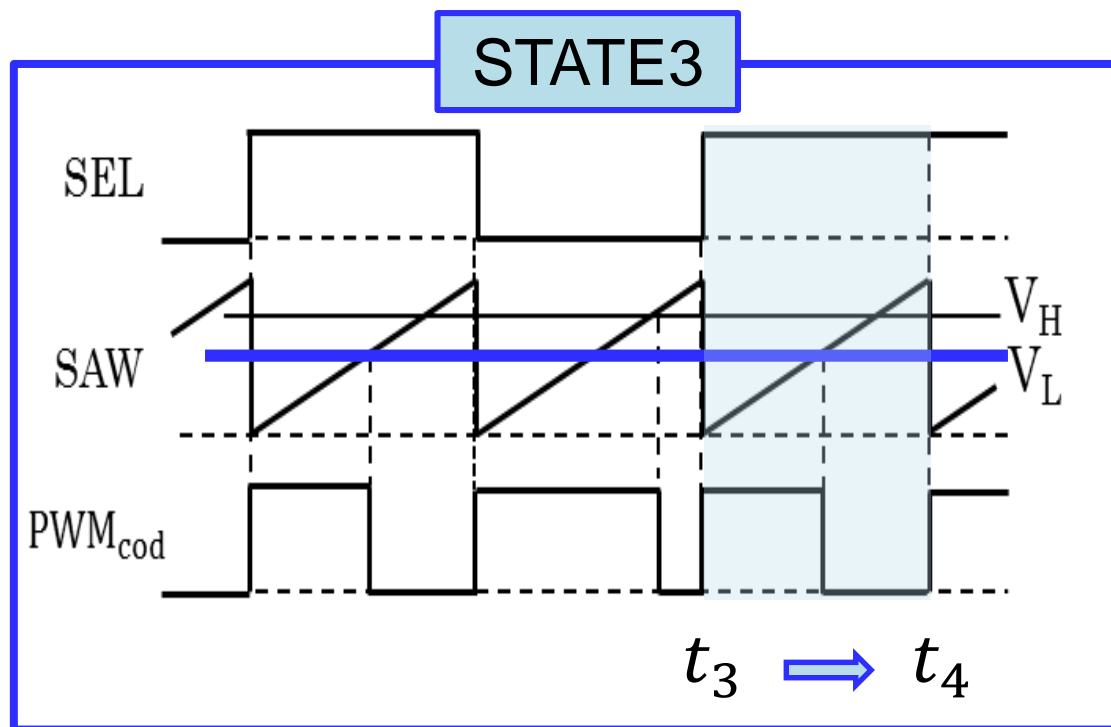
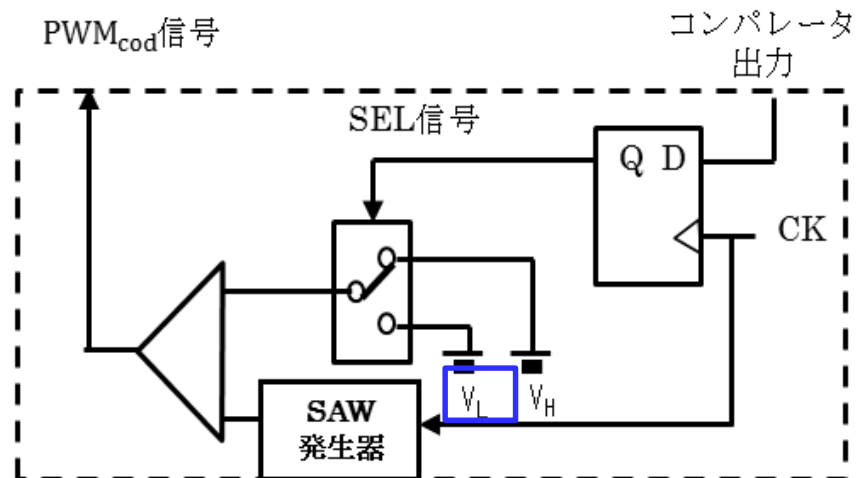
V_L と鋸歯状波とを比較



Duty Ratio : 小



周期全体の出力電圧 : 減少



出力応答特性の改善

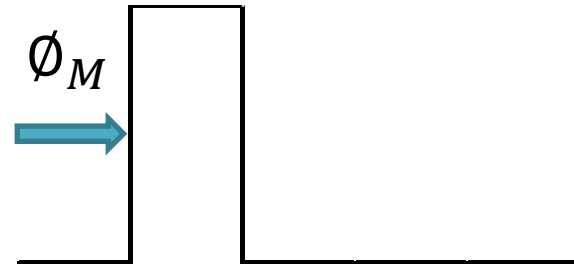
位相コーディング方式 (PPC)

Pulse Position Coding

- デジタル値に応じてパルスの位置を変調する。



Digital Value=「0」



Digital Value=「1」

【特徴】

- 簡単なデジタル回路を付加するのみで実現できる。
- 原理的にはパルス周期変調の1種。
- High/Low信号で3種類の周期を生成できる。
- 位置を変調するためDuty比が変化しない。

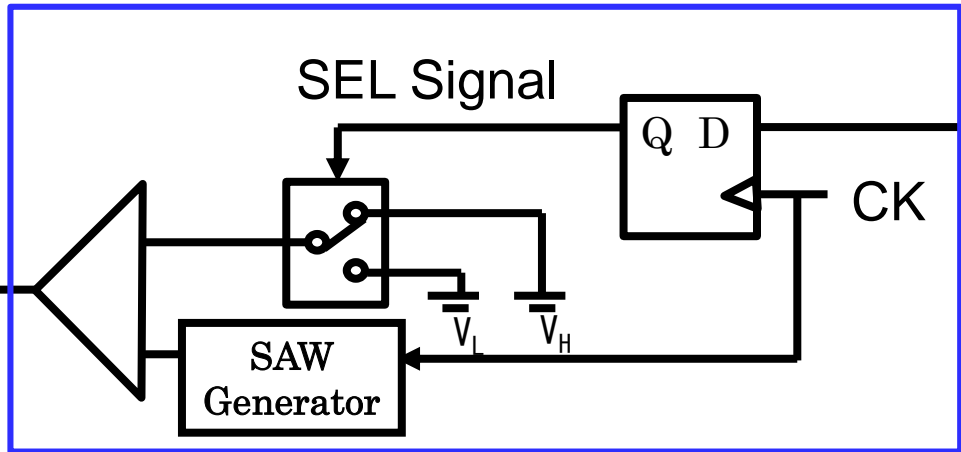
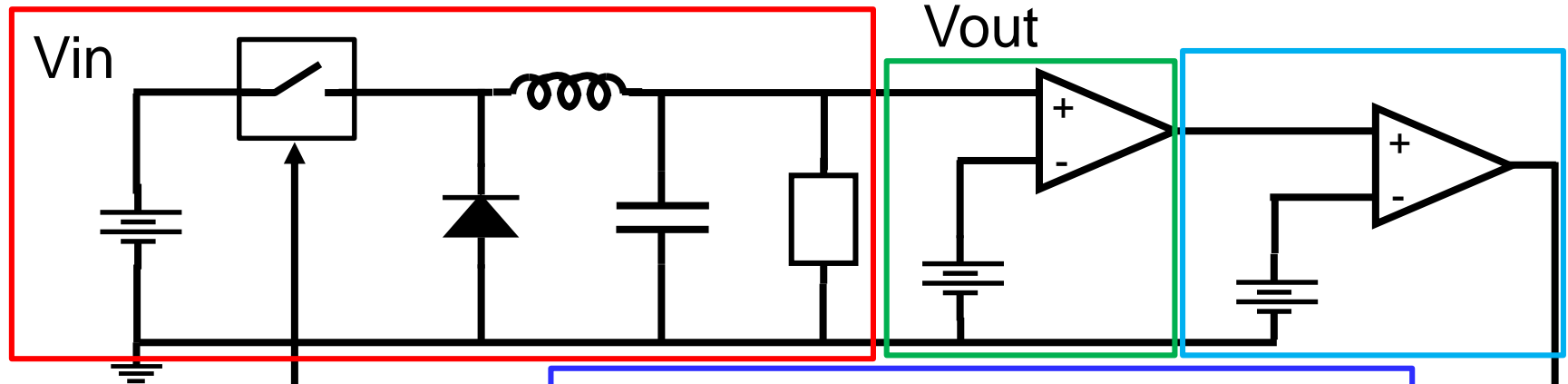


電源回路ではPWCと組み合わせて使用

$\Delta\Sigma$ 型PWCコーディング方式

Power Stage

Error Detect ADC Part



Pulse Coding

実験式

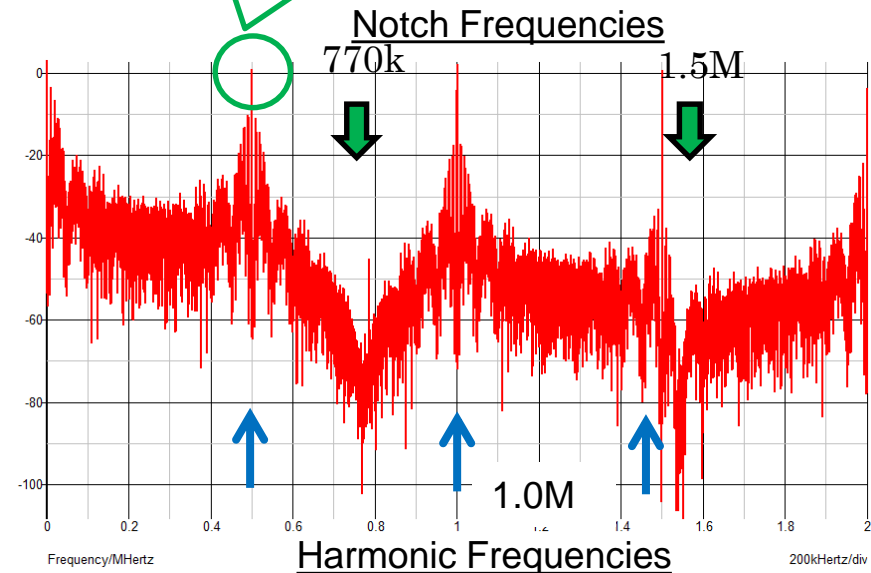
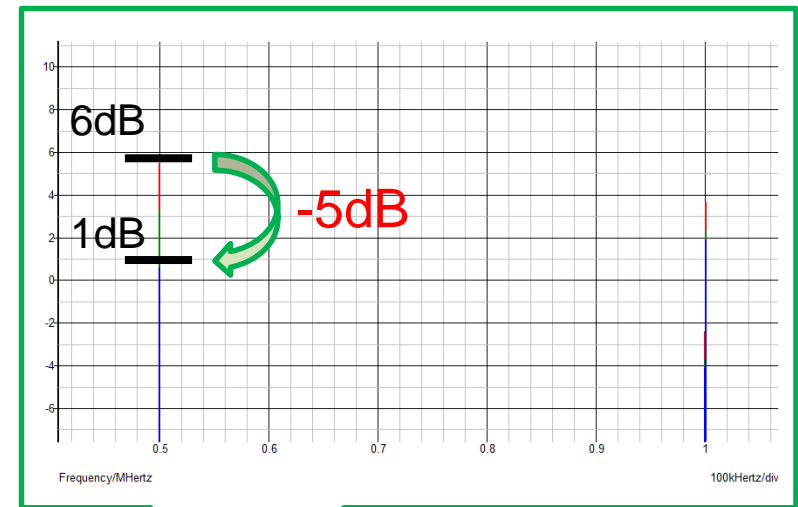
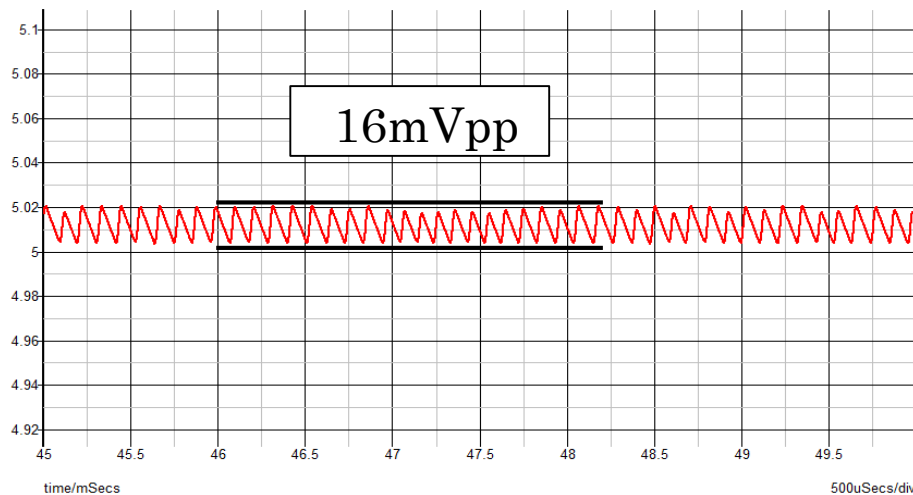
$$f_{\text{notch}} \cong K \times \frac{1}{(1.6\mu - 0.3\mu)} = 770\text{kHz}, 1.5\text{MHz}$$

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

シミュレーション結果

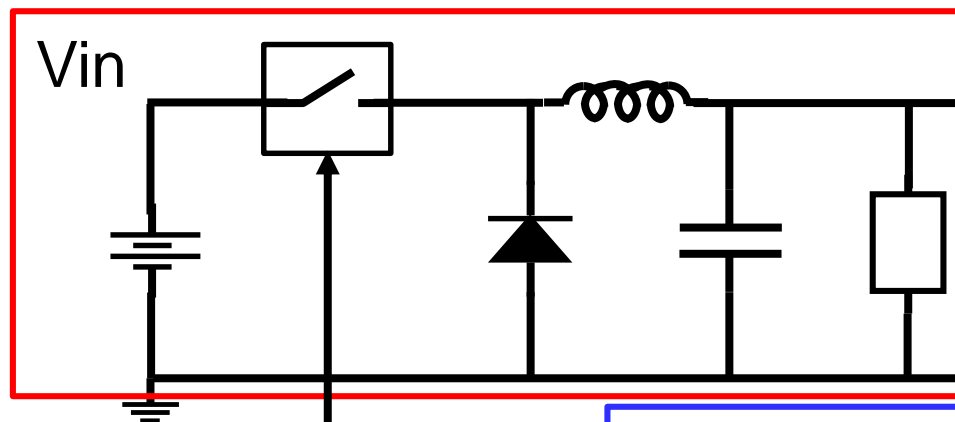
シミュレーション結果

- 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 : $f_{\text{notch}} \cong 770\text{kHz}, 1.5\text{MHz}$

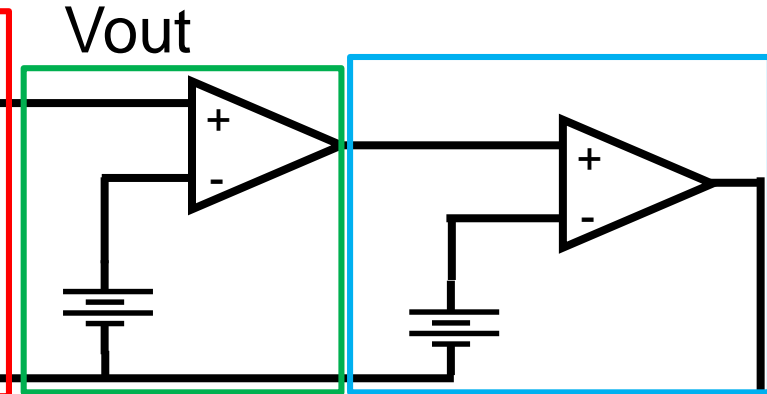


PCC提案手法の回路図

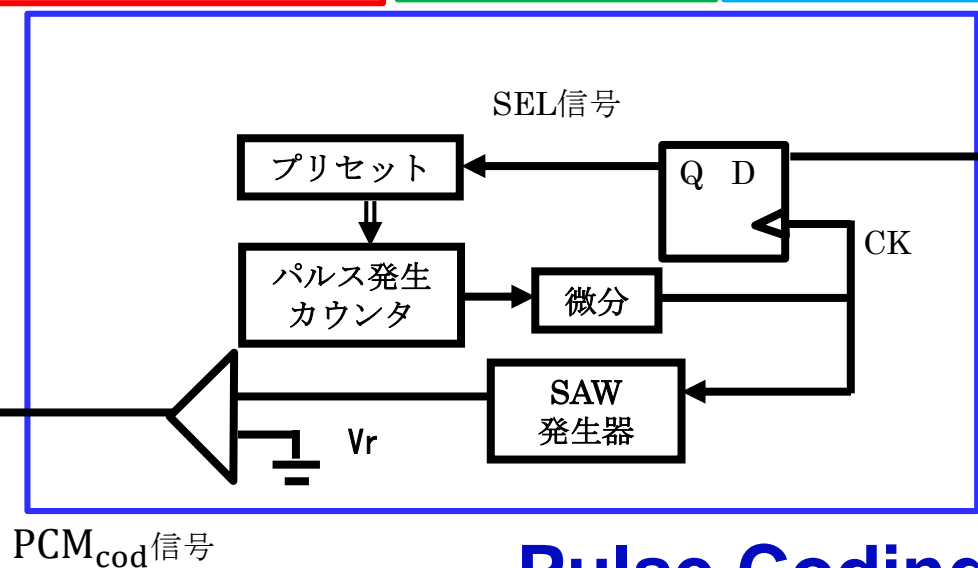
Power Stage



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

