

スイッチング電源のノッチ発生とEMI低減化,
フィボナッチSAR ADCおよびジッタ試験回路の研究

群馬大学大学院 電子情報部門

情報通信システム第二研究室

修士2年 荒船拓也



スイッチング電源のノッチ発生とEMI低減化,
フィボナッチSAR ADCおよびジッタ試験回路の研究

群馬大学大学院 電子情報部門
情報通信システム第二研究室
修士2年 荒船拓也



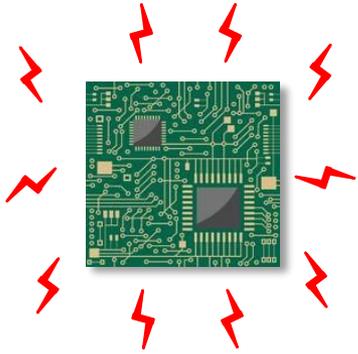
アウトライン

- 研究背景・概要
- 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
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- パルスコーディング型スイッチング電源
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

アウトライン

- 研究背景・概要
- 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
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- パルスコーディング型スイッチング電源
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

研究背景



電源回路の高周波化及び高密度化に伴い
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



高密度回路では不適

課題：EMI低減時に近傍周波数に悪影響



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)

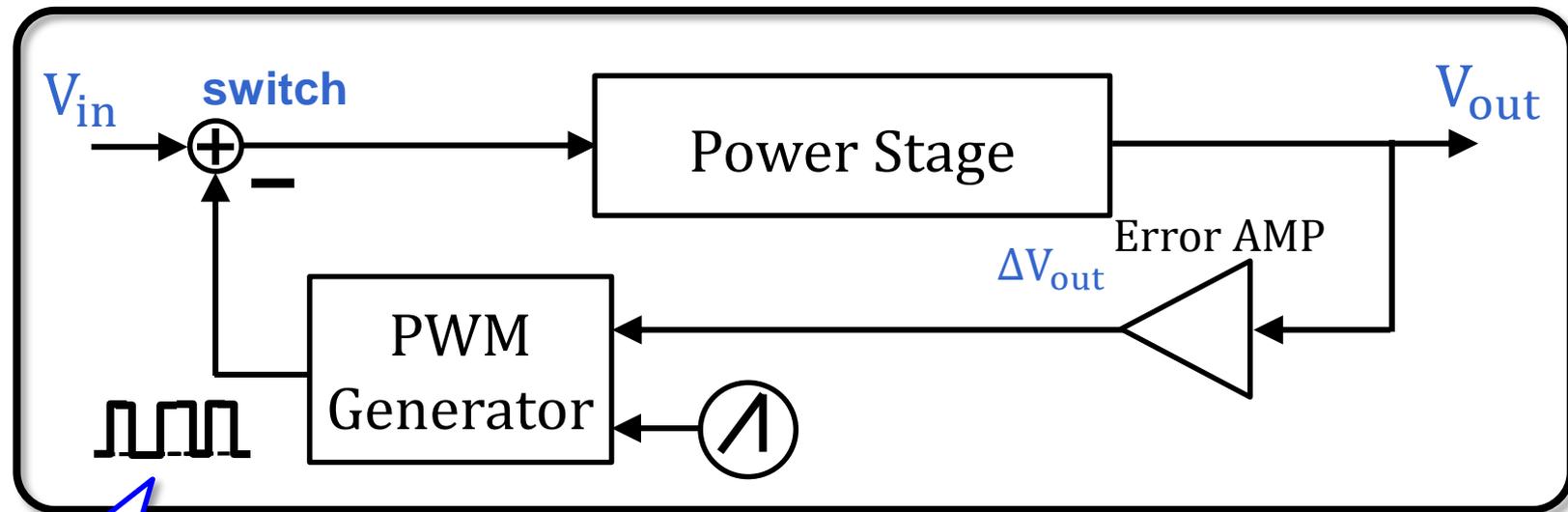
パルス幅変調型スイッチング電源

PWM制御方式

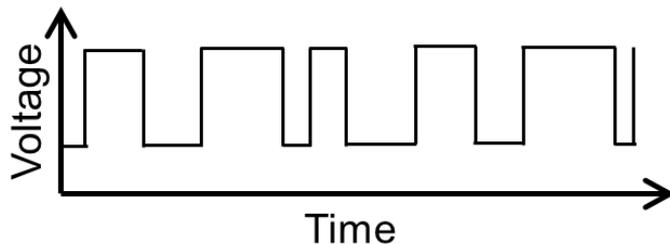
スイッチON/OFFの時比率(Duty比)を制御し, 出力電圧を調整

◆ 電力変換効率が高い

◆ 小型化・軽量化

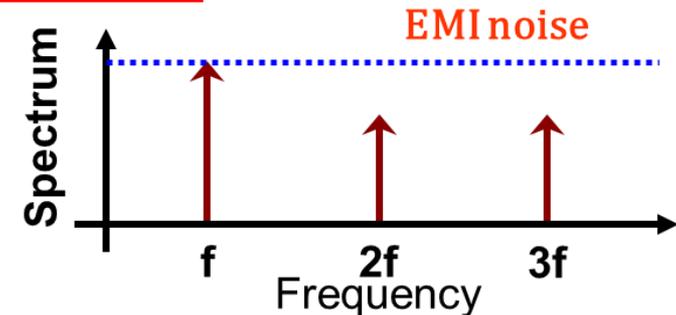


PWM信号



FFT

Problem



アウトライン

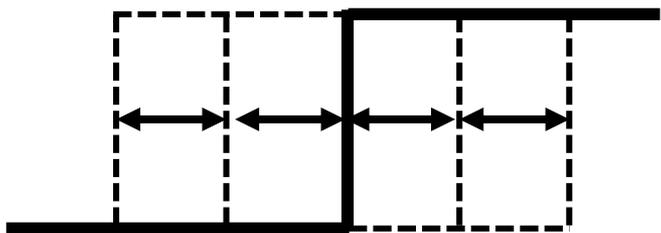
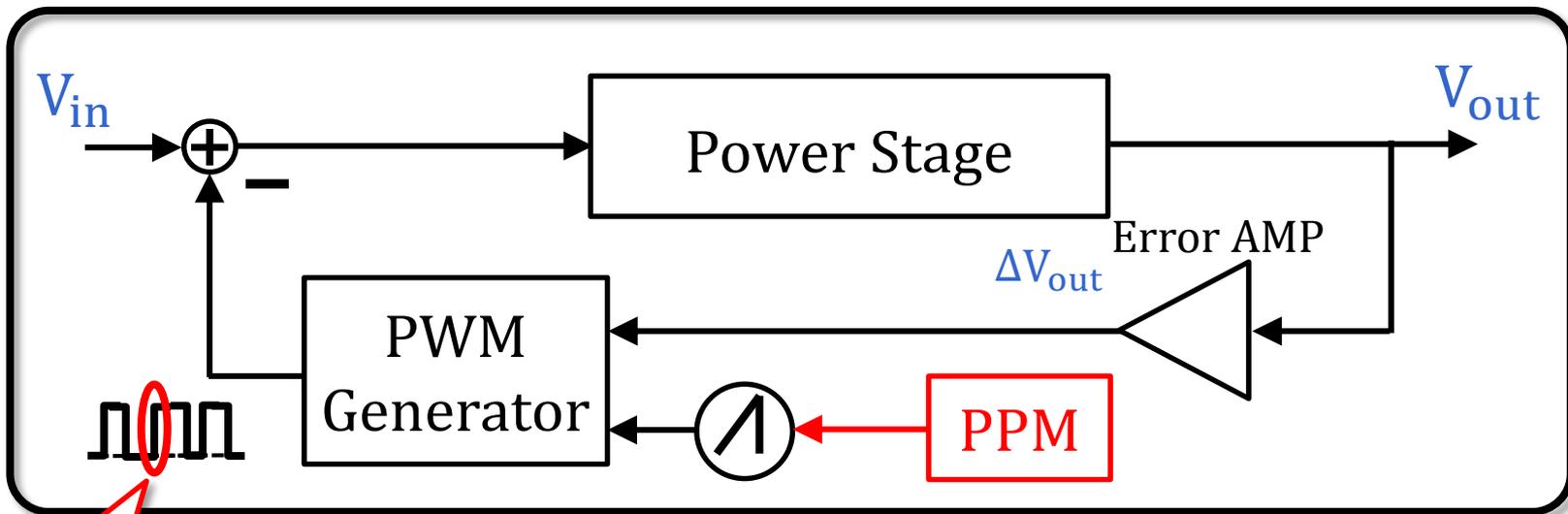
- 研究背景・概要
- スペクトラム拡散
- パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- パルスコーディング型スイッチング電源
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

一般的なスペクトラム拡散電源

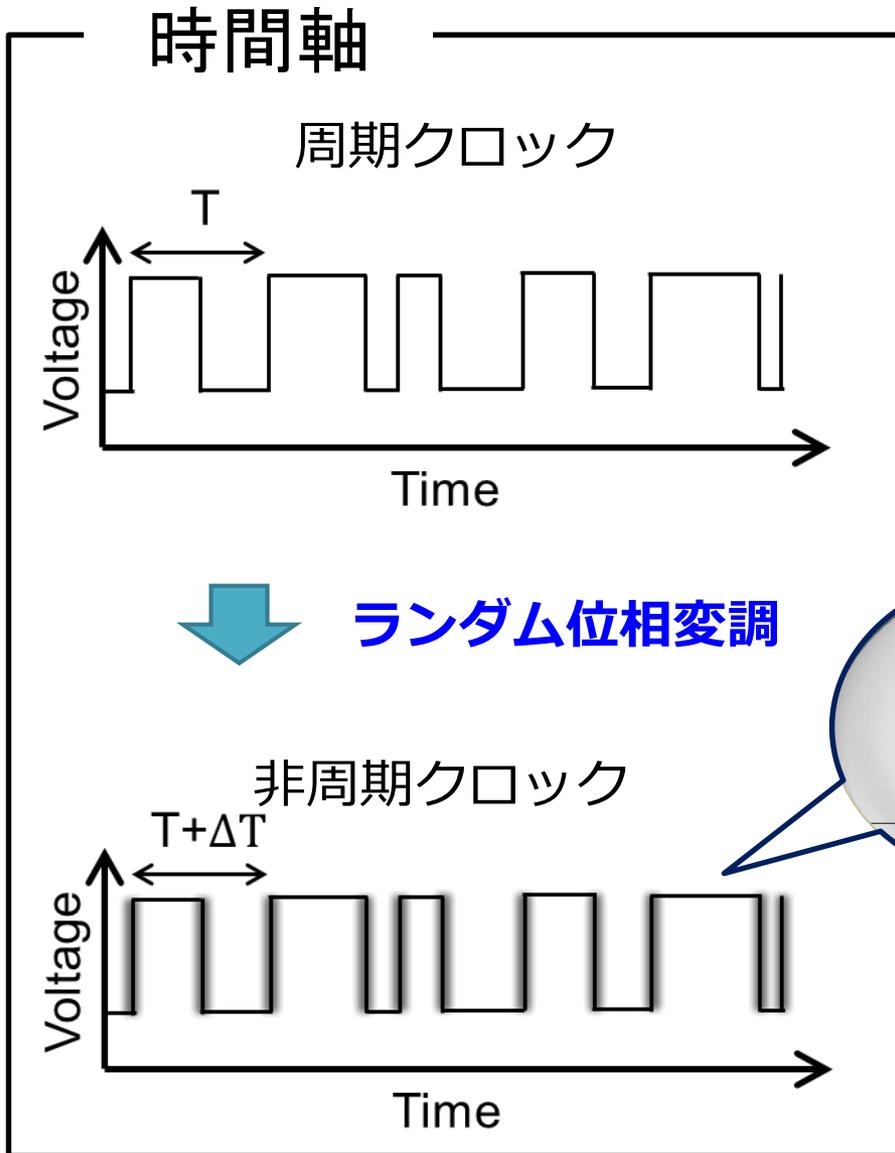
Spread Spectrum

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



スペクトラム拡散



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

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

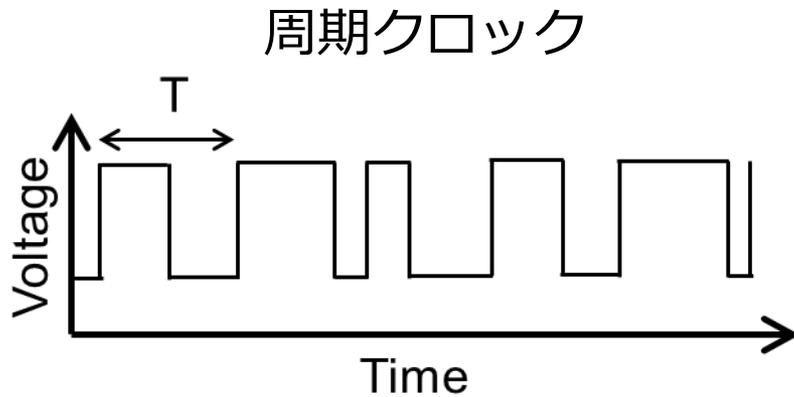
T : パルス周期

$T(k), \tau(k)$: k 番目の周期, 位相

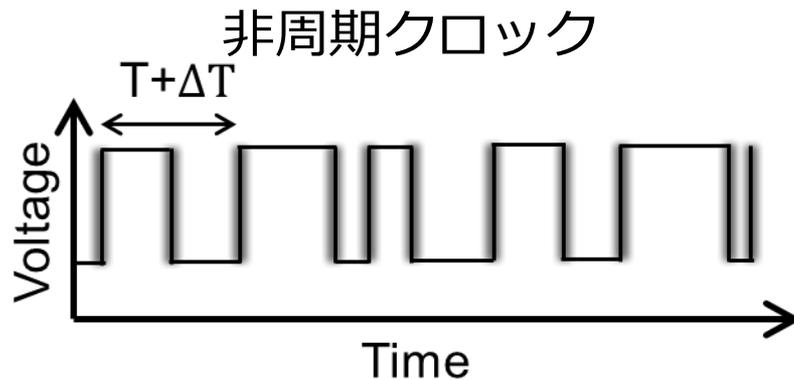
各パルスで周波数が変化

スペクトラム拡散

時間軸

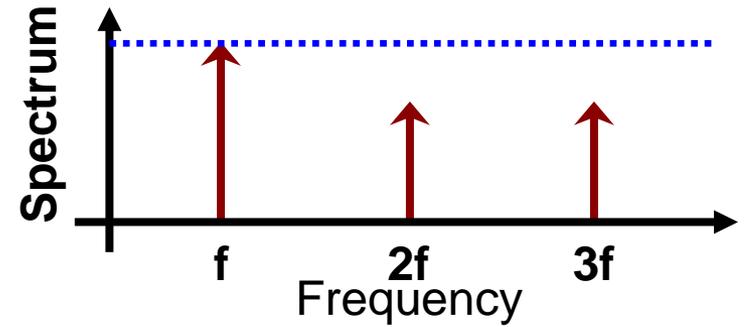


↓ ランダム位相変調

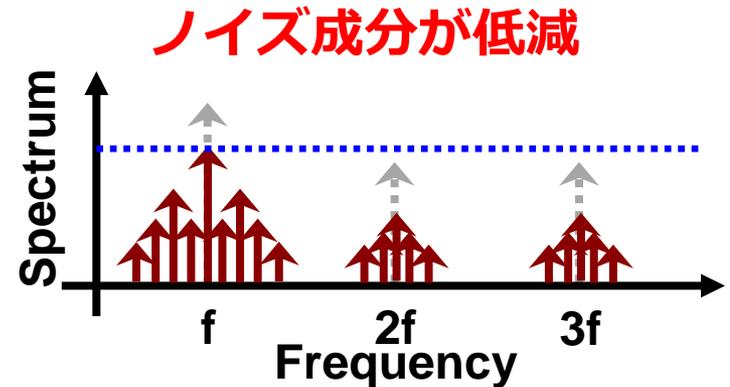


周波数軸

基本周波数及び高調波にピーク



↓ EMIノイズが拡散

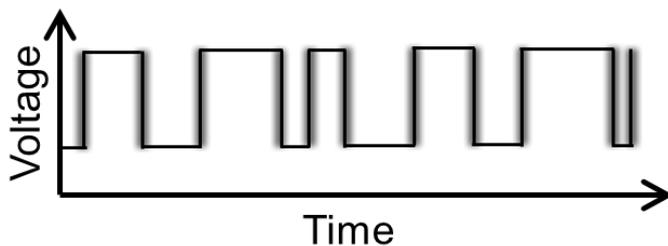
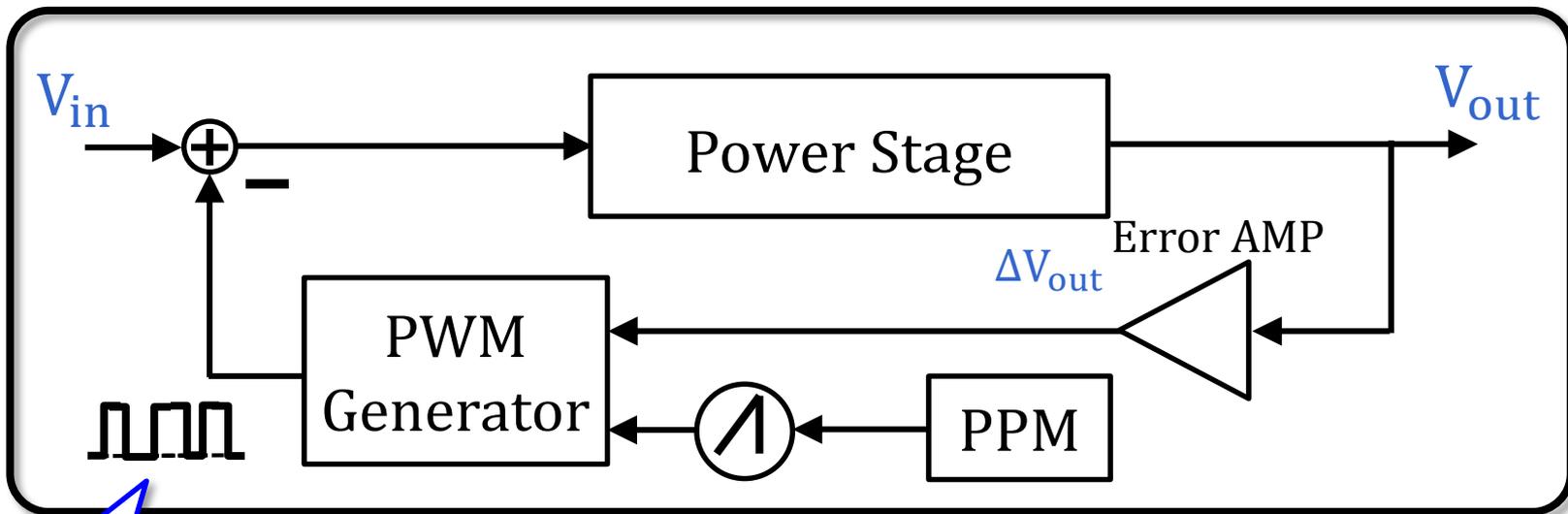


一般的なスペクトラム拡散電源

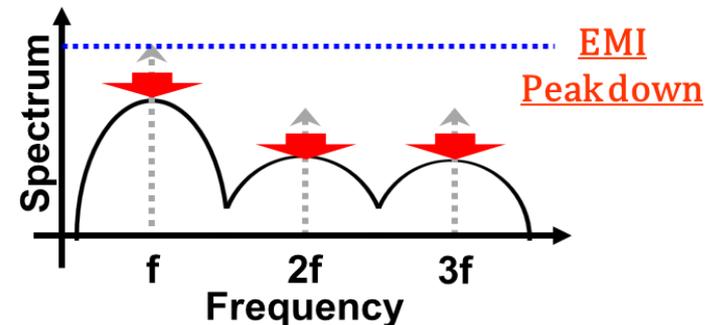
Spread Spectrum

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

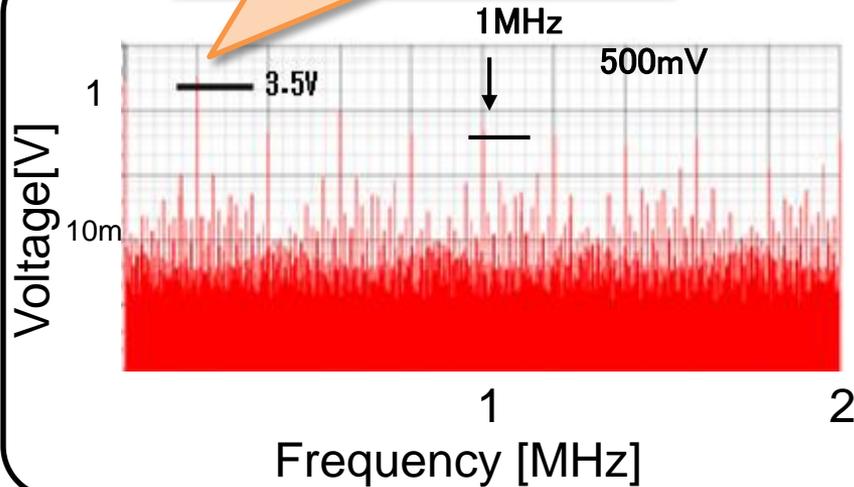


FFT



スペクトラム拡散の効果

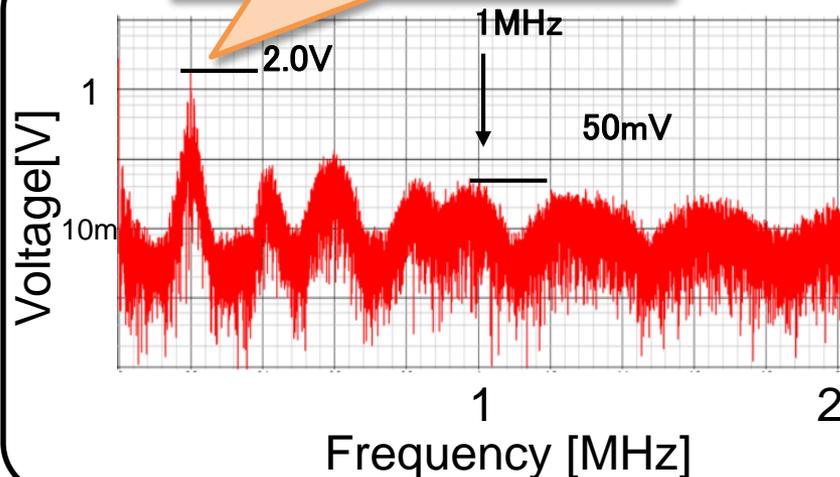
最大ノイズ **3.5V**



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**

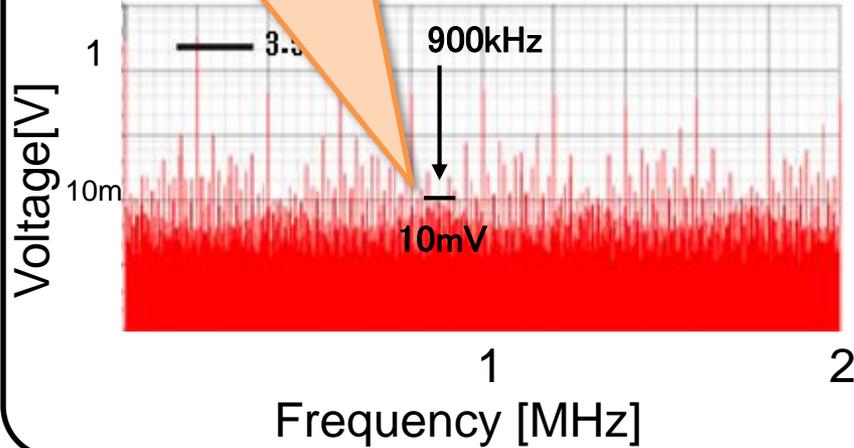


スペクトラム拡散電源

- EMIピークの低減を確認

スペクトラム拡散の課題

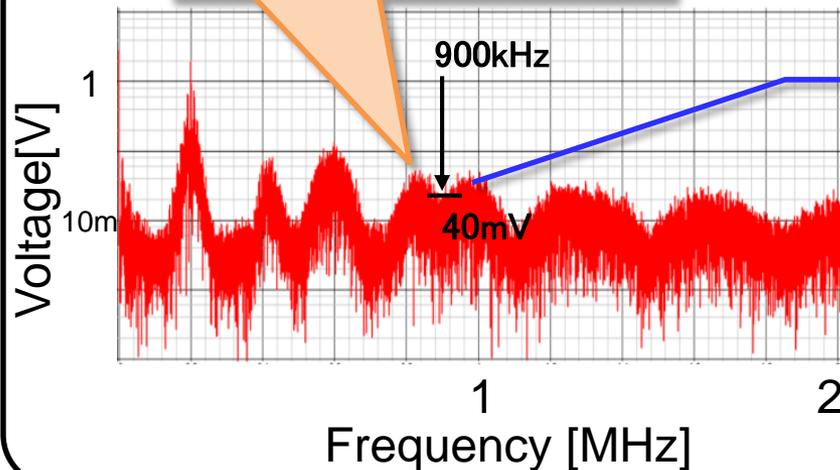
ノイズ **10mV**



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

ノイズ **40mV**



スペクトラム拡散電源

拡散によるノイズが集中

Problem

周波数によっては
ノイズが増加

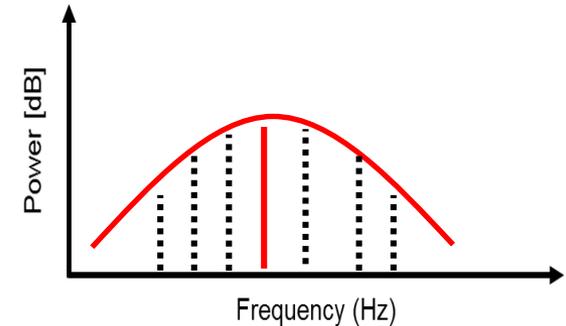
従来手法の考察

従来スペクトラム拡散

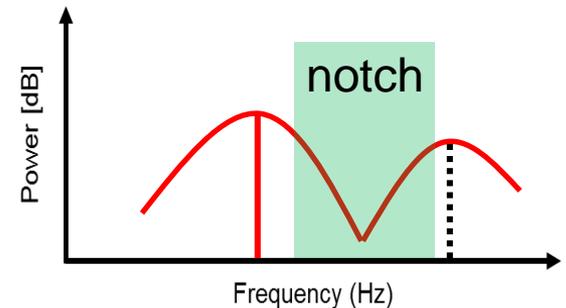


Problem

ノイズが一様（連続的）に拡散



ノイズが特定周波数（離散的）に拡散



ノッチ帯域が発生

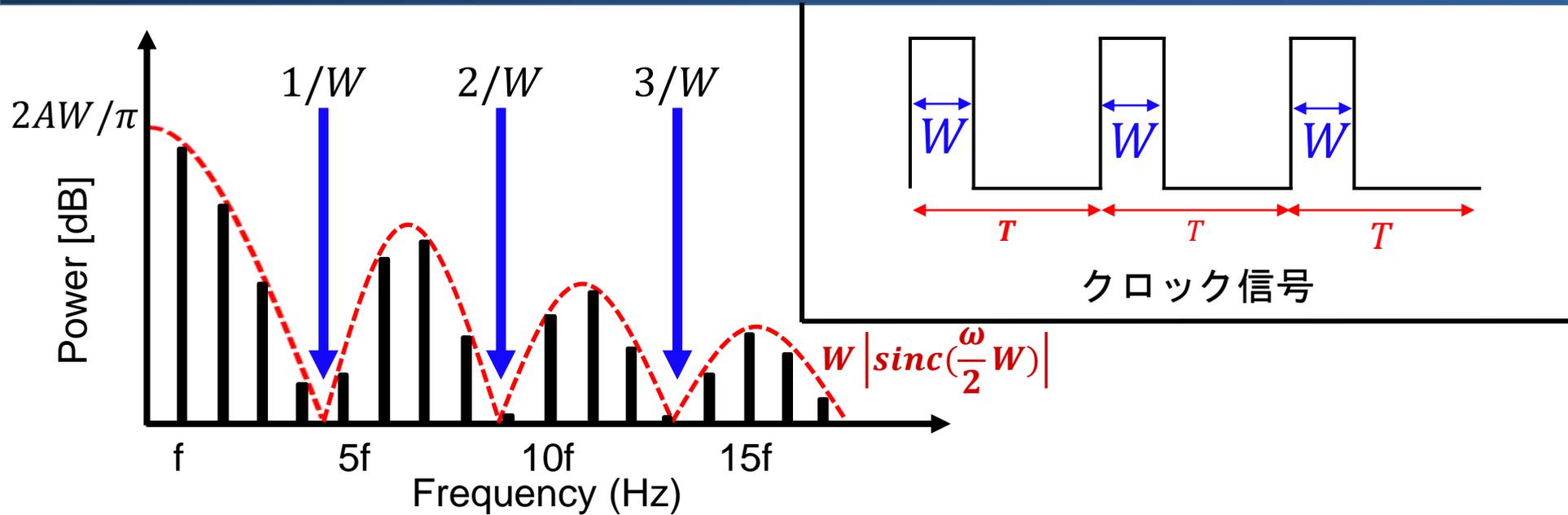


- EMIの低減
- 拡散ノイズの制御可能

アウトライン

- 研究背景・概要
- 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**
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- **パルスコーディング型スイッチング電源**
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

クロック信号の周波数特性



「ノッチ=SINC関数の零点」を制御

$$f_{\text{notch}} = \frac{n}{W} \quad (n=1,2,3\dots)$$

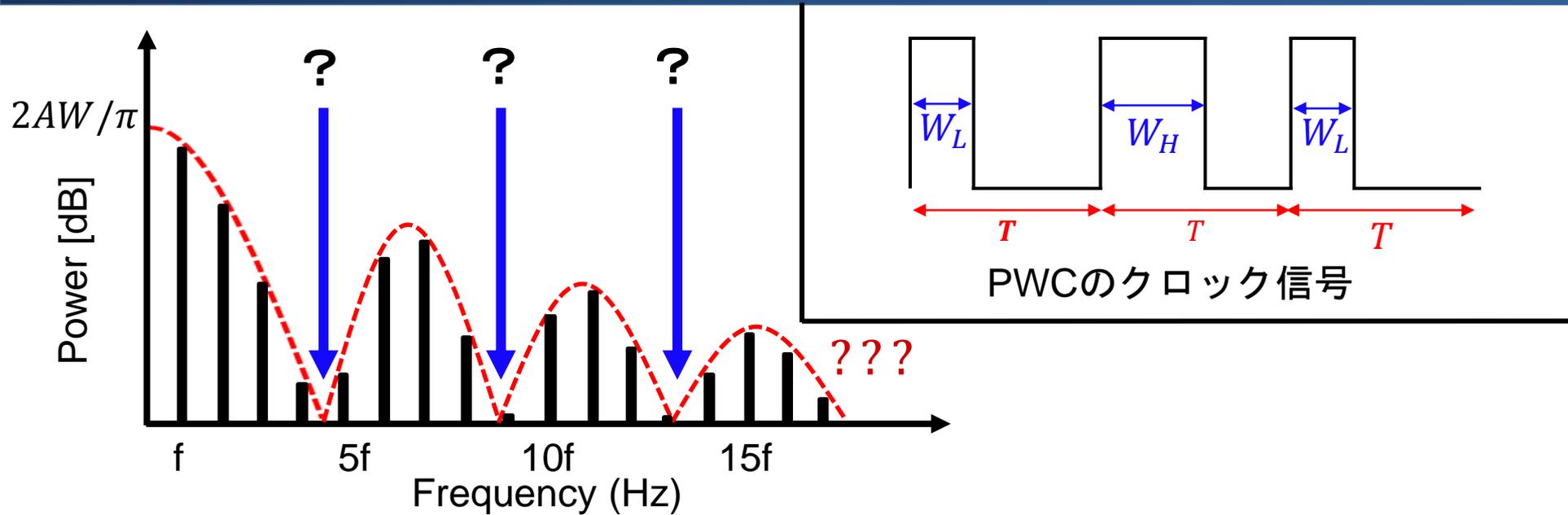


- デジタル変調を行い、2種類の矩形波を発生
- パルス幅依存のため、パルス幅を任意に設定すれば周波数領域にて制御可能

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

PWC信号の周波数特性



「ノッチ=SINC関数の零点」を制御

$$f_{notch} = ???$$



- デジタル変調を行い、2種類の矩形波を発生
- パルス幅依存のため、パルス幅を任意に設定すればノッチを制御できる可能性有り

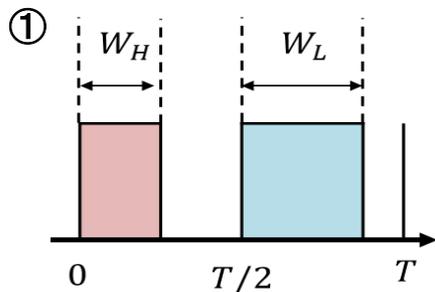
Process

コーディング信号をフーリエ変換することで検証可能

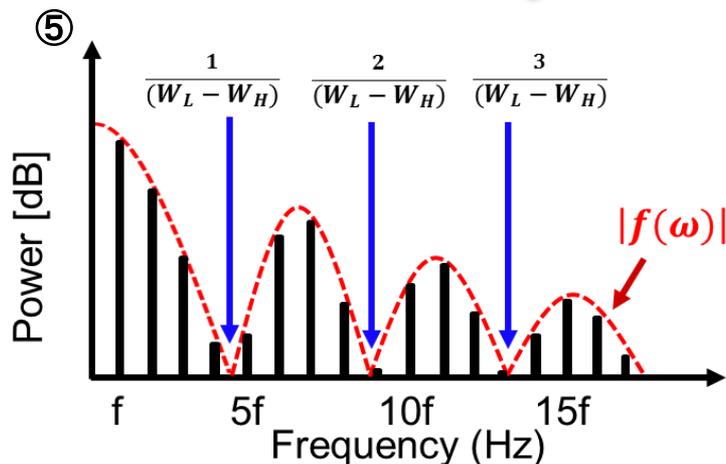
PWC波形の式解析

フーリエ解析手順

- ① 解析波形の定義
- ② 定義波形をフーリエ変換
- ③ 絶対値を取る
- ④ 定義波形のスペクトラム特性を算出
- ⑤ スペクトラム特性から、零点を算出



フーリエ
変換



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

$$\textcircled{3} \quad |f(\omega)| = \frac{1}{\omega} \sqrt{2 - 2\cos(\omega W_H - \omega W_L)}$$

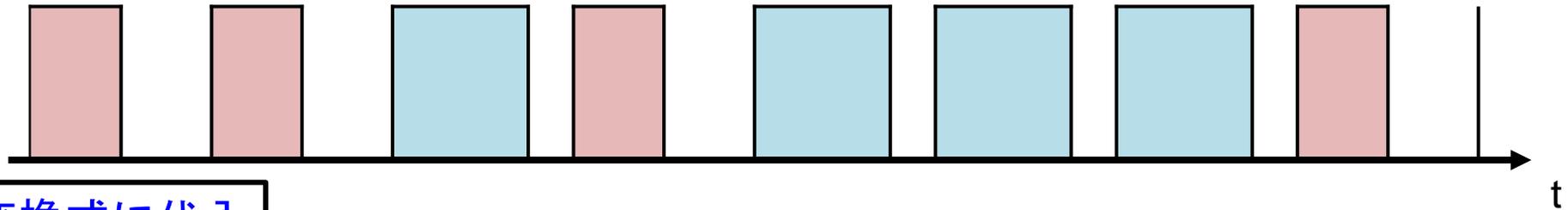
↓ 倍角の定理より

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

$$\textcircled{4} = (W_L - W_H) \left| \text{sinc}\left\{\frac{\omega}{2}(W_L - W_H)\right\} \right|$$

PWC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

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

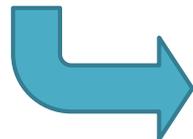
絶対値を取る

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

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

ノッチ特性

振幅特性



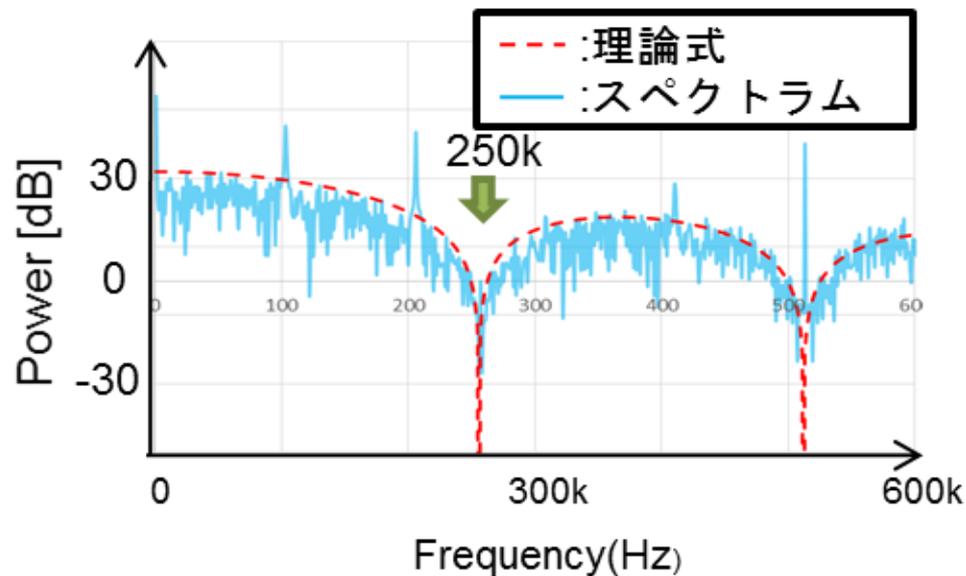
変換パルス数及び順列に非依存

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



理論式とシミュレーション結果の包絡線が一致

位相コーディング方式 (PPC)

位相コーディング方式

- デジタル値に応じてパルスの位相を変調する。

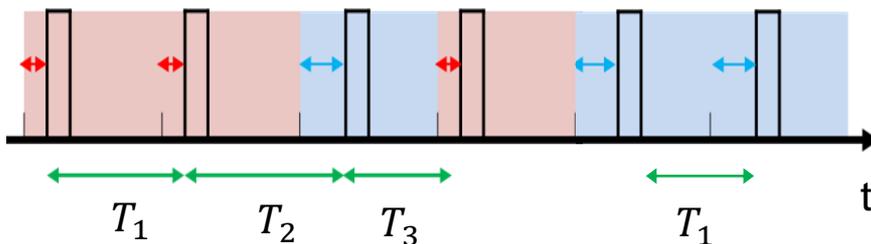
PPC方式の理論式

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

➡ 「位相差」と「パルス幅」に依存したスペクトラム特性

ランダムPPC方式

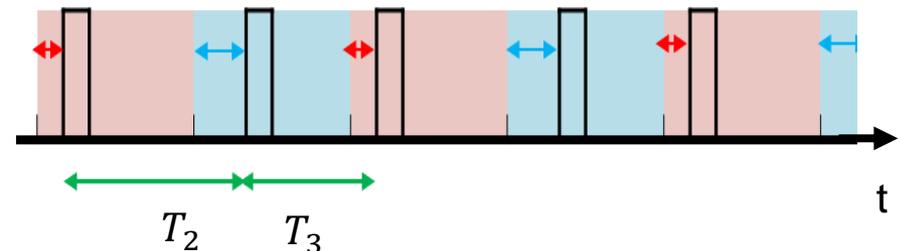
- 誤差電圧依存のコーディング



3種類の周期が発生

サイクリックPPC方式

- クロック信号依存の制御方式 (交互に0/1コーディング)



2種類の周期が発生

位相コーディング方式 (PPC)

位相コーディング方式

- デジタル値に応じてパルスの位相を変調する。

位相・周期変換式

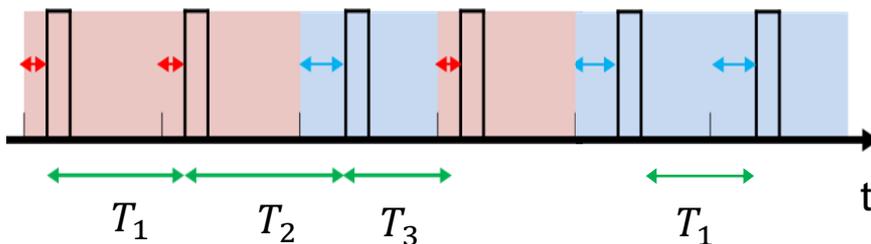
$$T(k) = T + \{\tau(k) - \tau(k - 1)\}$$

T : パルス周期

$T(k), \tau(k)$: k 番目の周期, 位相

ランダムPPC方式

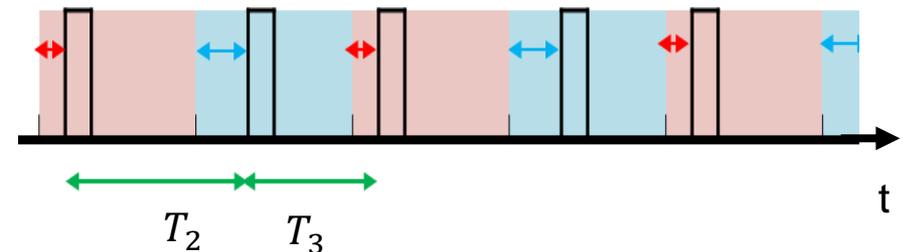
- 誤差電圧依存のコーディング



3種類の周期が発生

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

複合コーディング方式

PPC+PWC複合コーディング方式

- デジタル値に応じてパルスの位相と幅を変調する。

PWC+PPC方式の理論式

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

➡ 「位相差」と「パルス幅の差」の2種類のsinc特性を有する

$W_2 - W_1 = 2|\tau_L - \tau_H|$ とすると

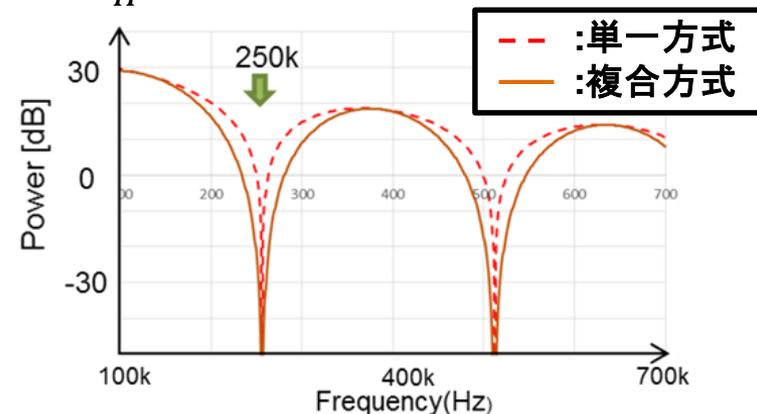
$$|f(\omega)| = \frac{\sin^2 \left(\frac{\omega}{2} (W_L - W_H) \right)}{\omega/2}$$

高精度なノイズ制御可能

◎条件

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

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



アウトライン

- 研究背景・概要
- 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**
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- **パルスコーディング型スイッチング電源**
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

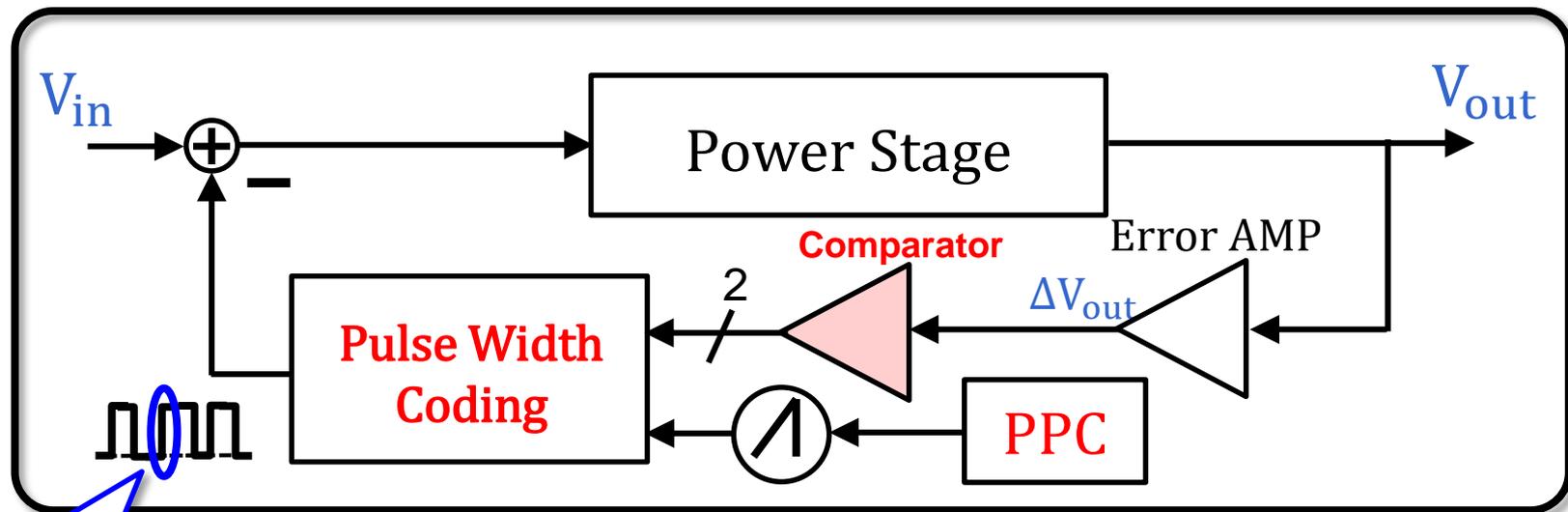
コーディング型スペクトラム拡散電源

パルスコーディング

周期的なクロックを**離散変調**

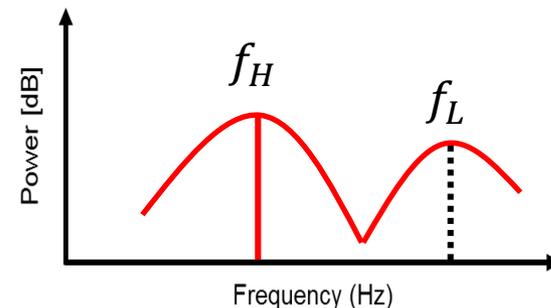
⇒H/L信号のみでパルス幅を制御し、ノイズ拡散周波数を限定

- ◆ Comparatorの挿入
- ◆ 各種変調回路をコーディング回路に変更

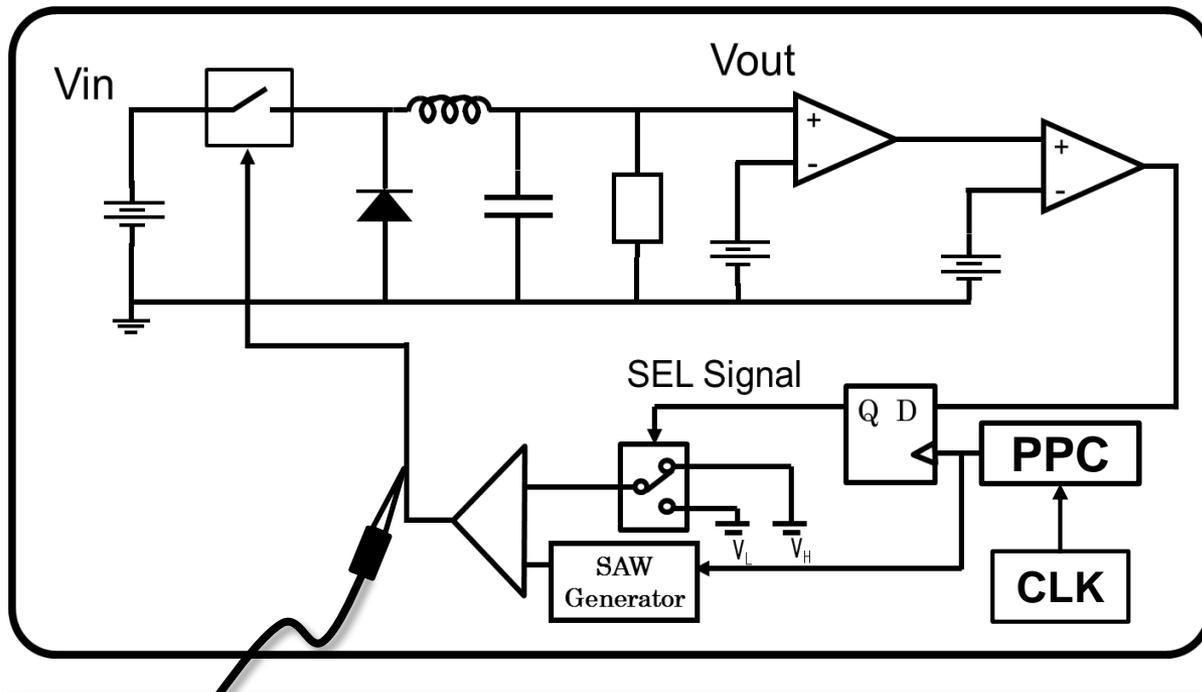


Low High

FFT



複合コーディング方式の検討



◎ 条件

※シミュレータ
SIMPLIS使用

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

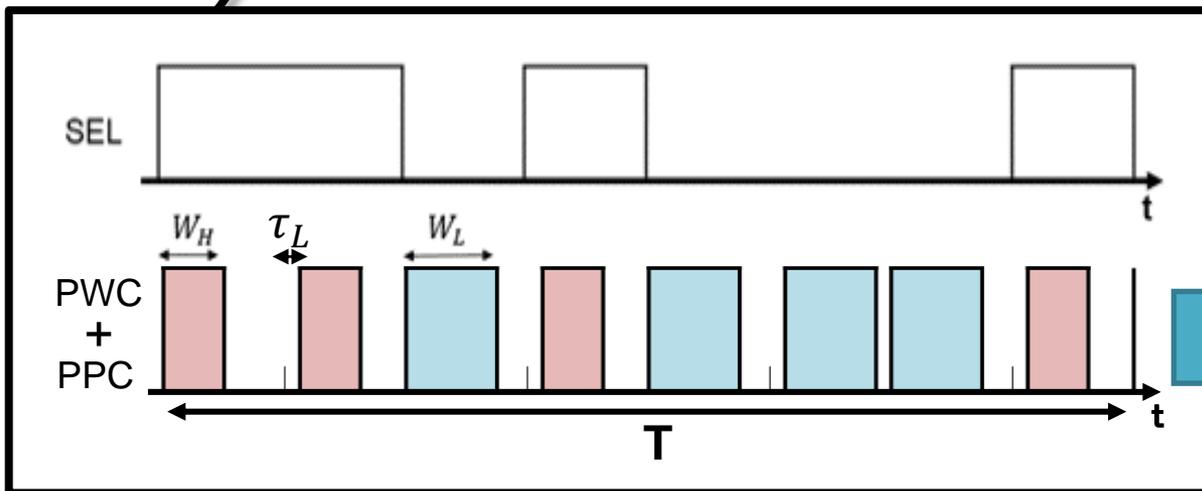
変調幅 W_H : 320ns

変調幅 W_L : 480ns

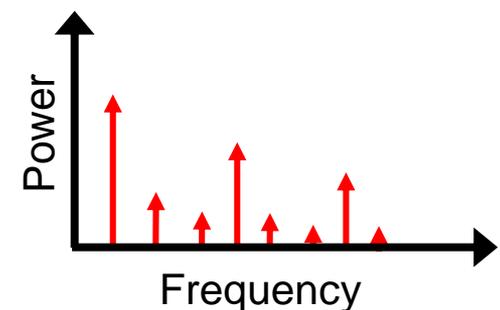
変調位相 τ_H : 0ns

変調位相 τ_L : 80ns

サイクルクPPCを使用



ノッチ特性の
変化を確認



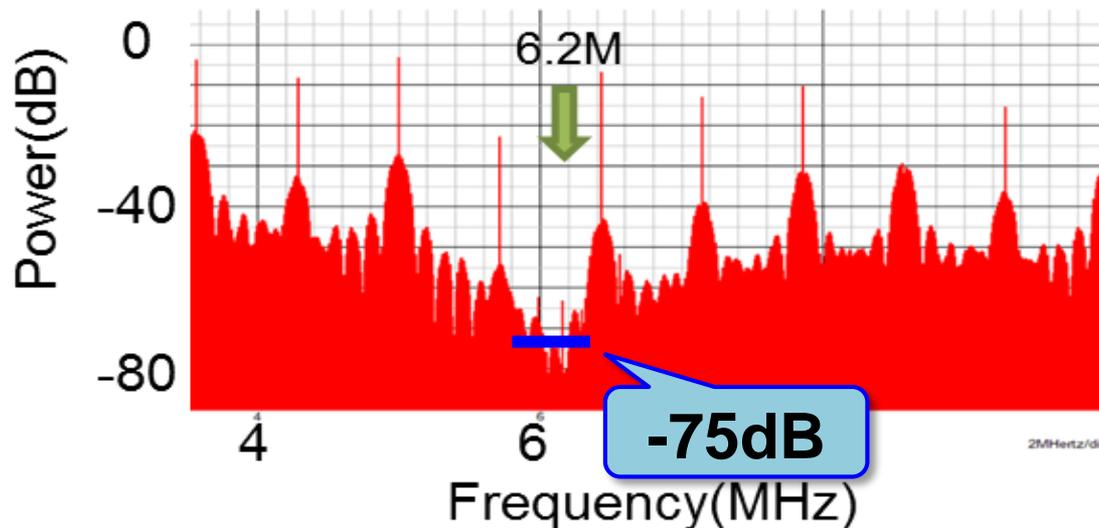
複合コーディング方式のスペクトラム

各方式の理論式

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

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

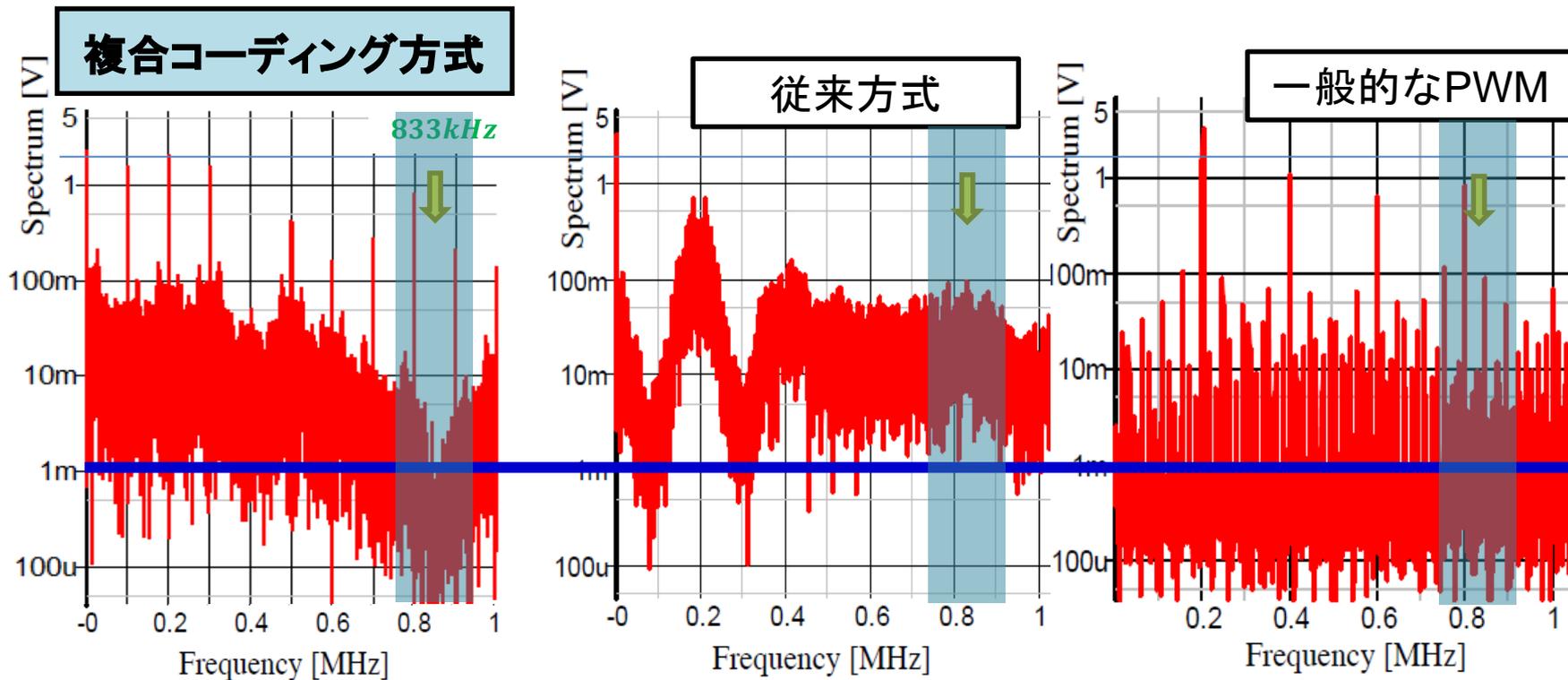
理論式とスペクトラムが一致



指定周波数にてノイズの低減を確認

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!!**

アウトライン

- 研究背景・概要
- 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
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- **パルスコーディング型スイッチング電源**
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

PWC方式実装結果のノッチ確認

理論式

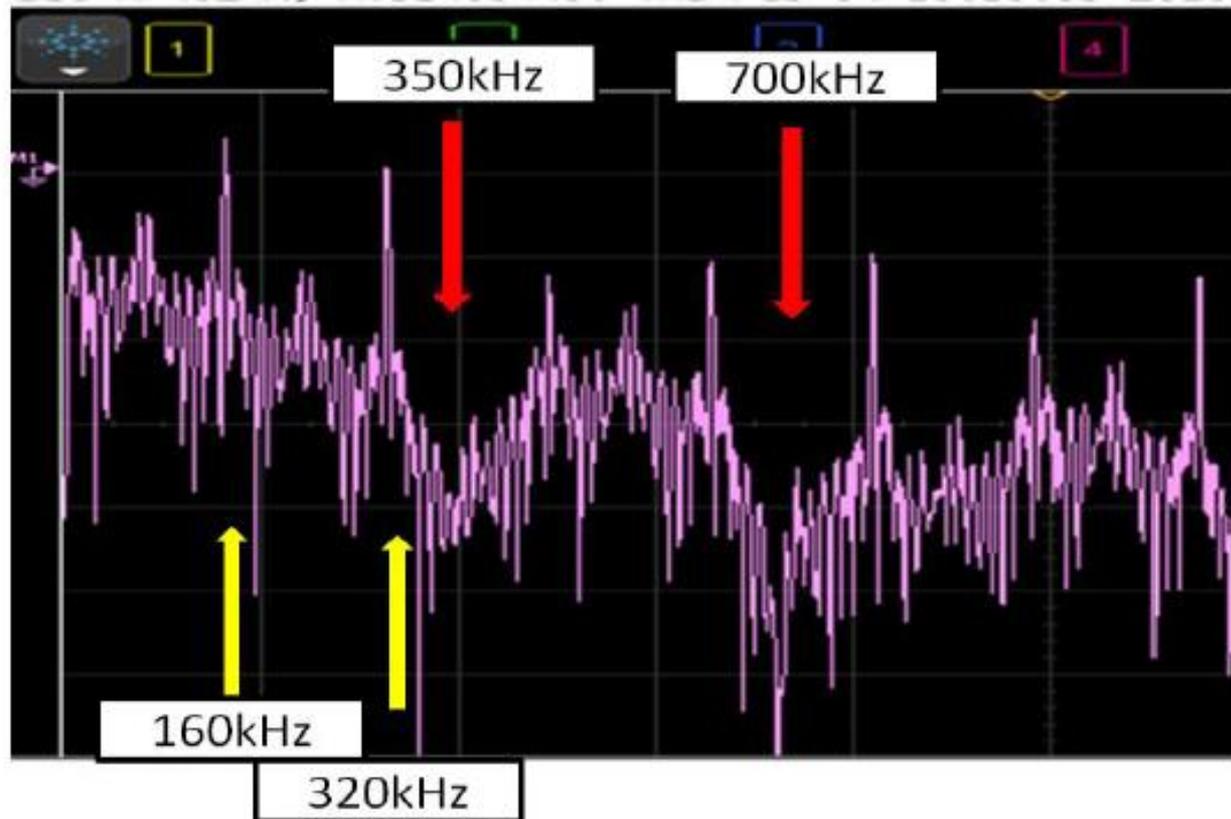
$$f_{notch} = \frac{n}{(W_L - W_H)} = \frac{n}{(4.0\mu s - 1.1\mu s)} = 344.8\text{kHz}$$

◎条件

$$W_L = 4.0\mu s$$

$$W_H = 1.1\mu s$$

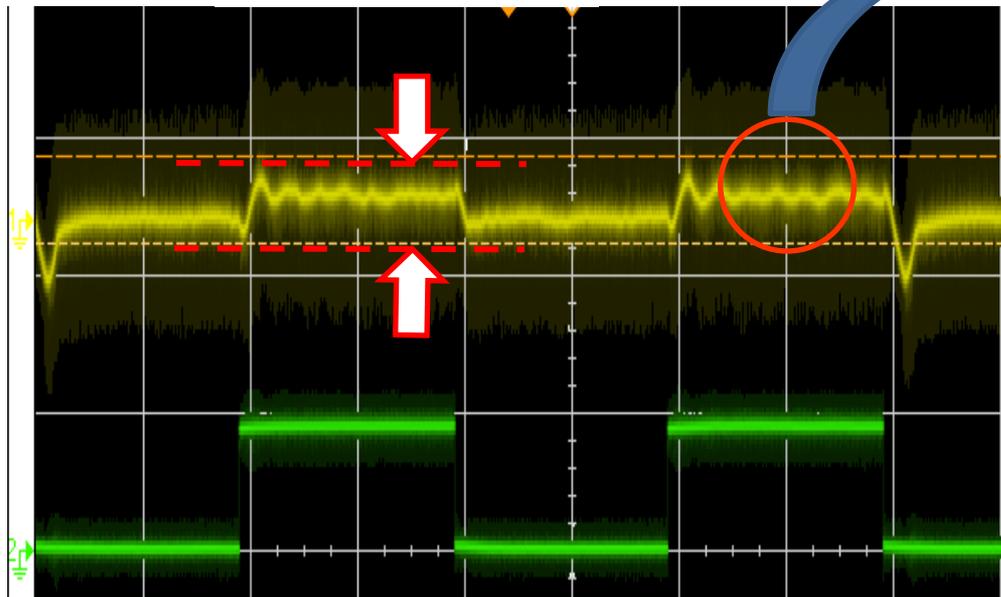
$$f_{clock} = 160\text{kHz}$$



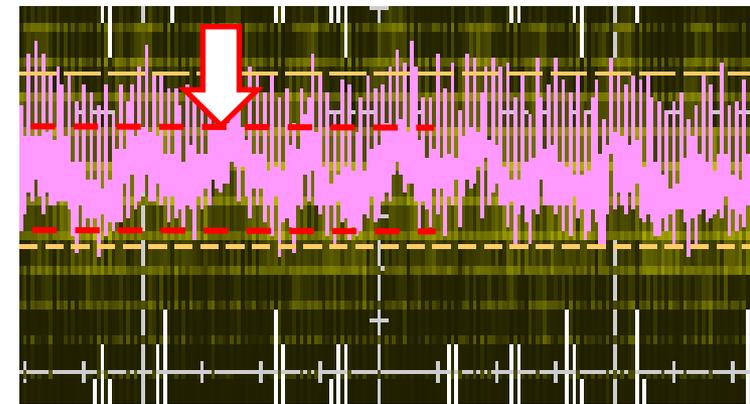
PWC方式実装結果2

* 出力電圧リップル(過渡応答特性)

20 mVp-p



8 mVp-p (0.2%)



出力電圧リップル
(2.0MHzで帯域制限)

スイッチング電源として正常動作

アウトライン

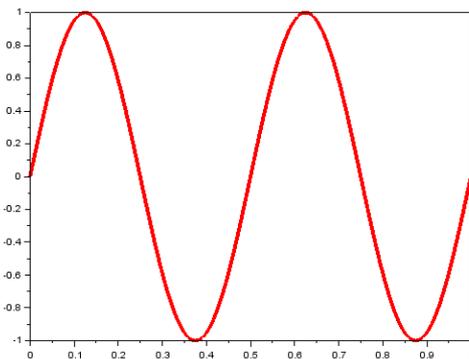
- 研究背景・概要
- スペクトラム拡散
- パルスコーディングを用いたスペクトラム拡散
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- **パルスコーディング型スイッチング電源**
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

$\Delta\Sigma$ 変換回路

$\Delta\Sigma$ 変換器

- Δ (差分) と Σ (積分) によりアナログ信号を
少ビットで高精度な変換をするAD変換器

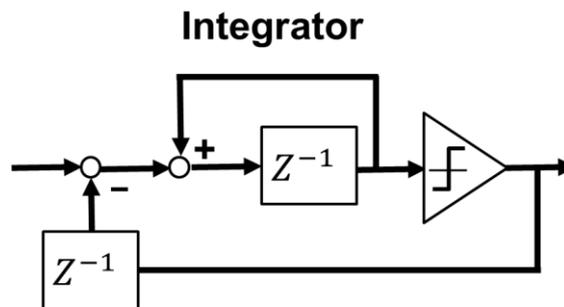
- 特徴** {
- ◆ 回路規模が小
 - ◆ 高性能変換
- ◆ 小bit数変換
 - ◆ ノイズシェーピング



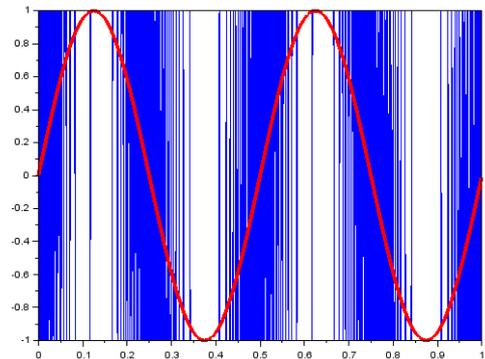
電圧振幅

入力信号振幅：大

入力信号振幅：小



$\Delta\Sigma$ 変調器回路

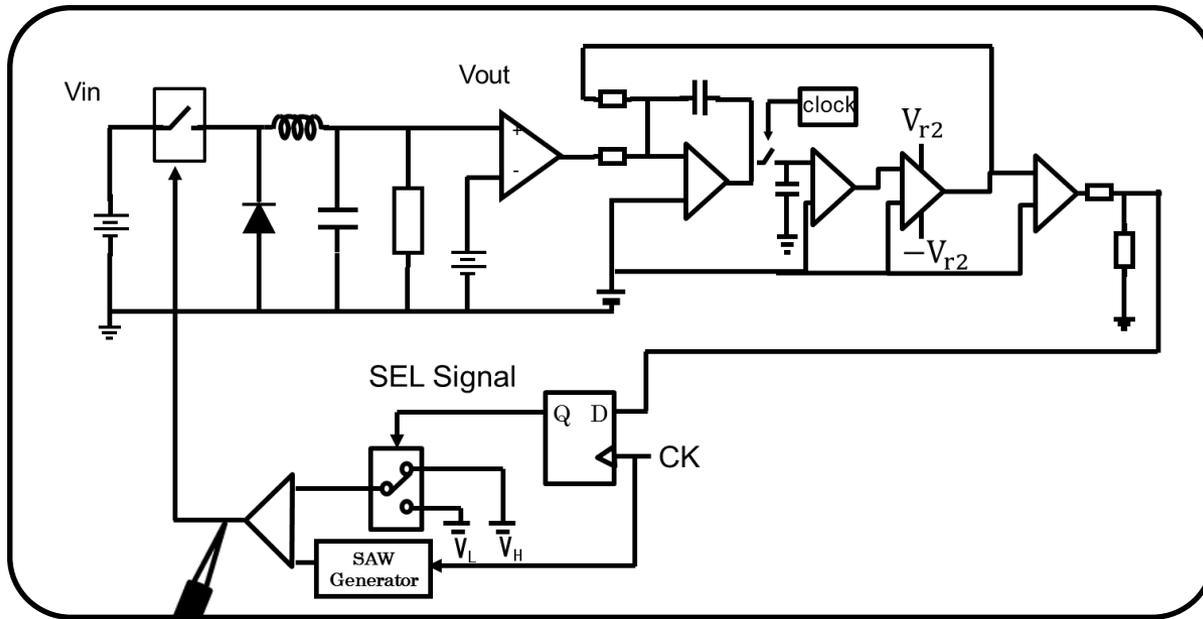


パルス密度

Highの割合多

Lowの割合多

ΔΣPWC方式スイッチング電源回路構成



◎ 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} : 500kHz

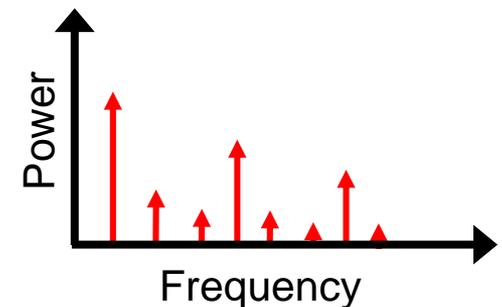
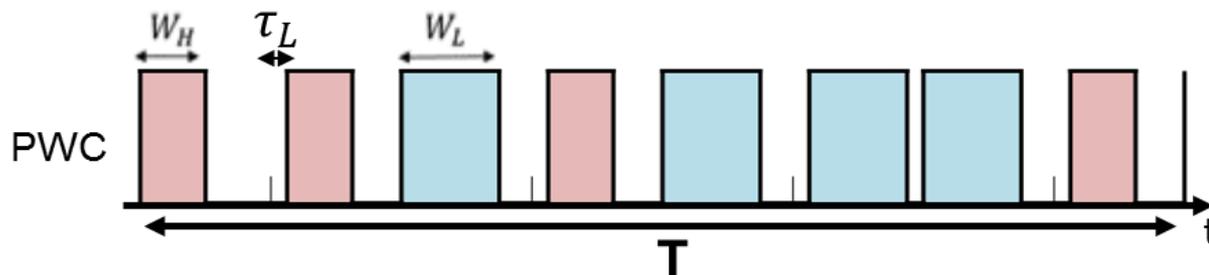
変調幅 W_H : 1.6 μ s

変調幅 W_L : 0.3 μ s

変調位相 τ_H : 0ns

変調位相 τ_L : 80ns

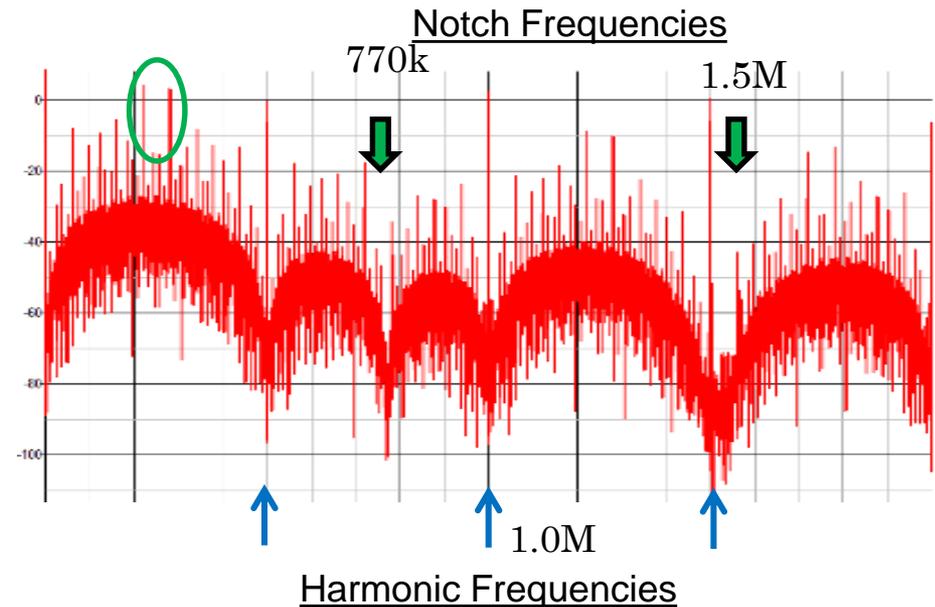
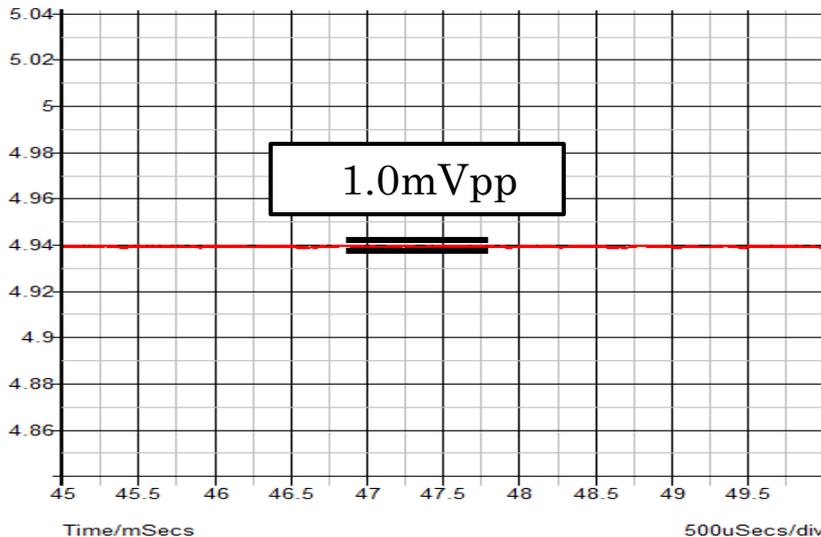
出力電圧及びスペクトラム確認



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 \Rightarrow 1mVpp
 - オフセット : 10mV \Rightarrow -60mV
- スペクトラム
 - スペクトラムレベル : -1.5dB
 - ノッチ発生 : $f_{\text{notch}} \cong 770\text{kHz}, 1.5\text{MHz}$

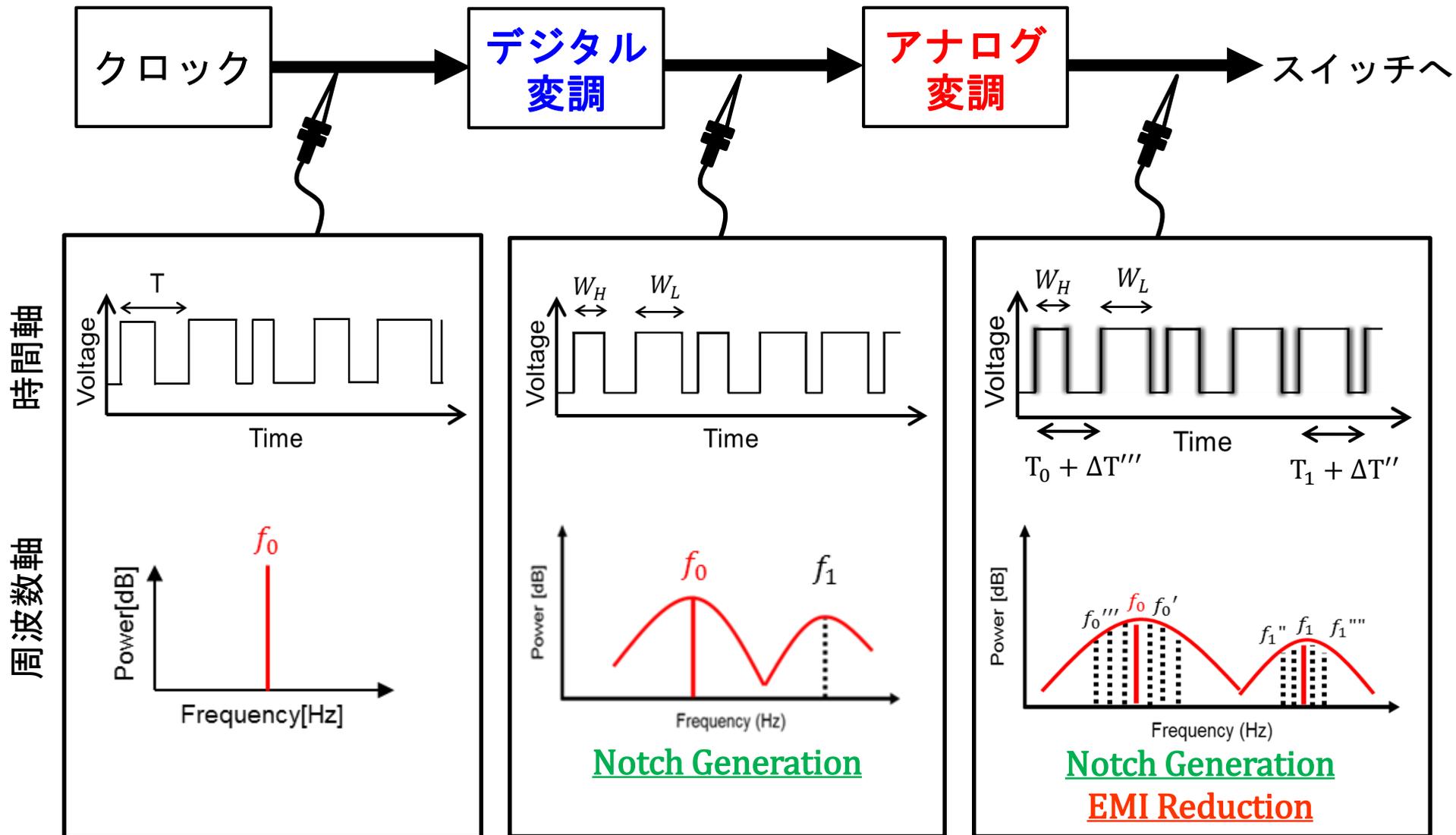


アウトライン

- 研究背景・概要
- 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
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- **パルスコーディング型スイッチング電源**
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

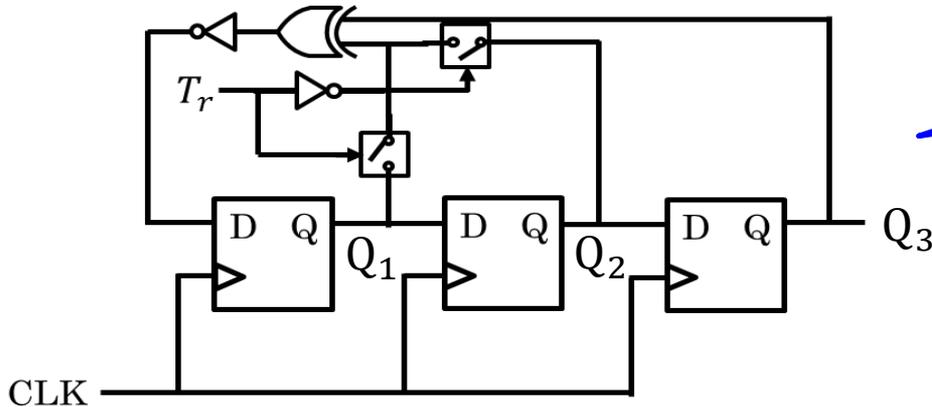
提案手法でのEMI低減

パルスコーディングでのEMI低減化



擬似アナログノイズの生成

ランダムパターン信号生成器



EXORとシフトレジスタで
簡単にランダム性の高い信号生成可

◎SIM条件

CLK: 66.6kHz

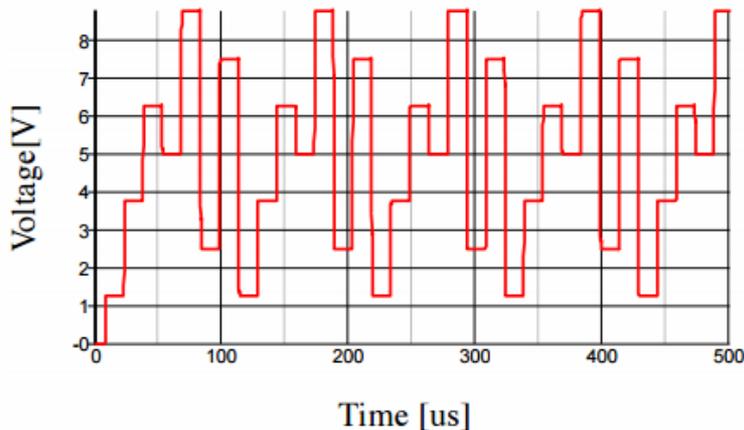
(Q1.Q2.Q3)は(0.0.0)を除く7通りを出力

Trigger信号で帰還タップの位置を制御

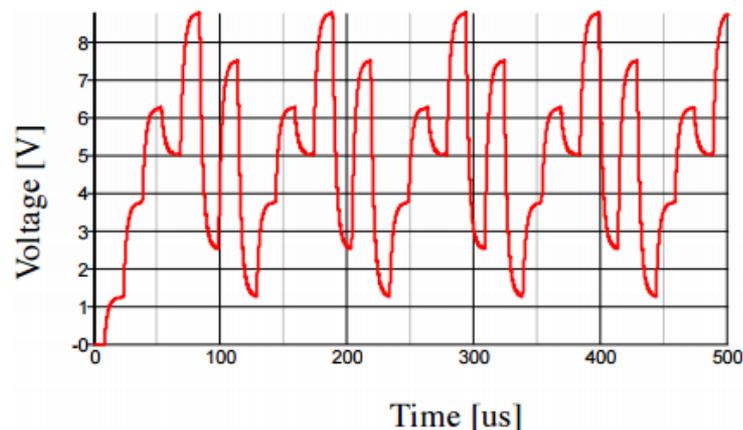
(Q1.Q2.Q3)
ビット変換

カウンタ回路使用

3-bit 擬似アナログ乱数信号



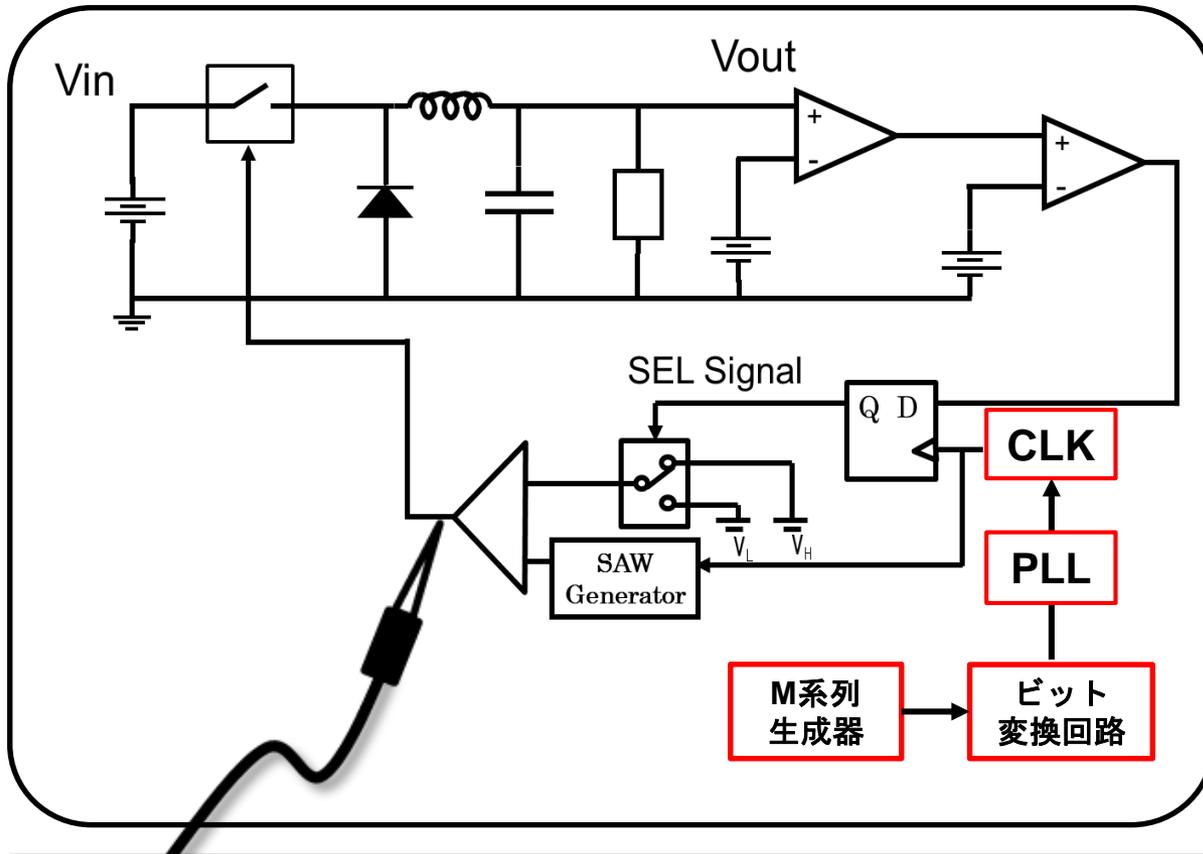
LPF



PLL

位相変換

パルスコーディング型擬似アナログ拡散電源回路



◎ 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

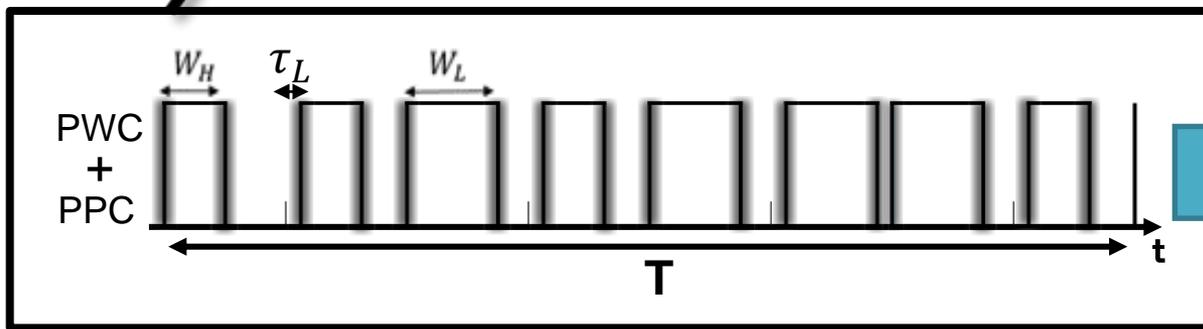
変調幅 W_H : 320ns

変調幅 W_L : 480ns

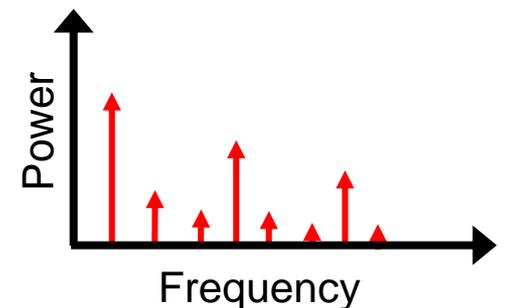
変調位相 τ_H : 0ns

変調位相 τ_L : 80ns

サイクリックPPCを使用
3-bit アナログ乱数使用

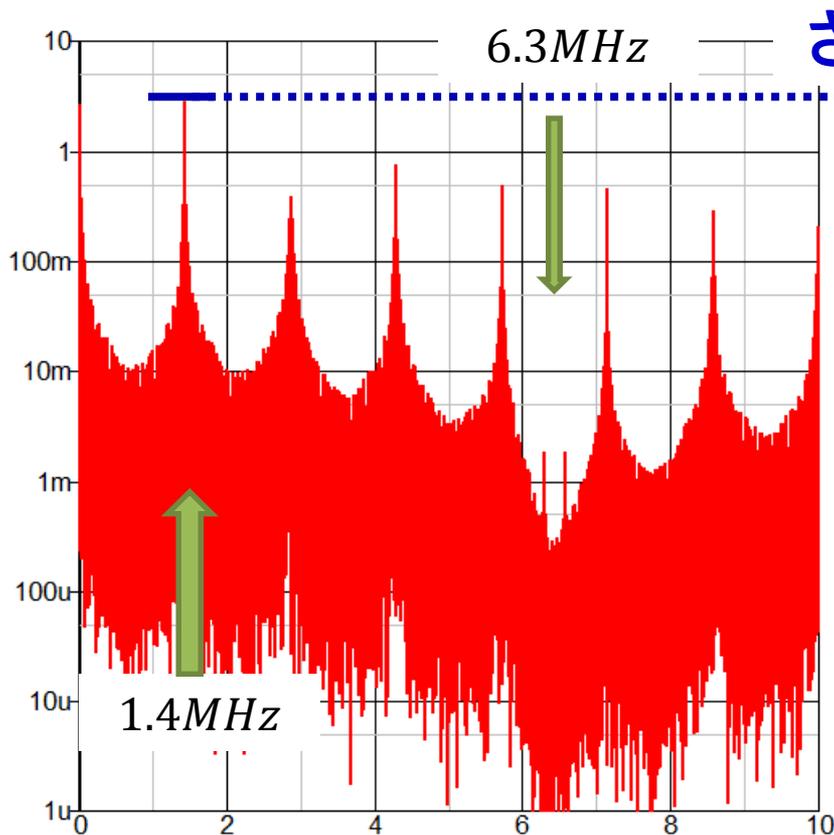


周波数領域で確認

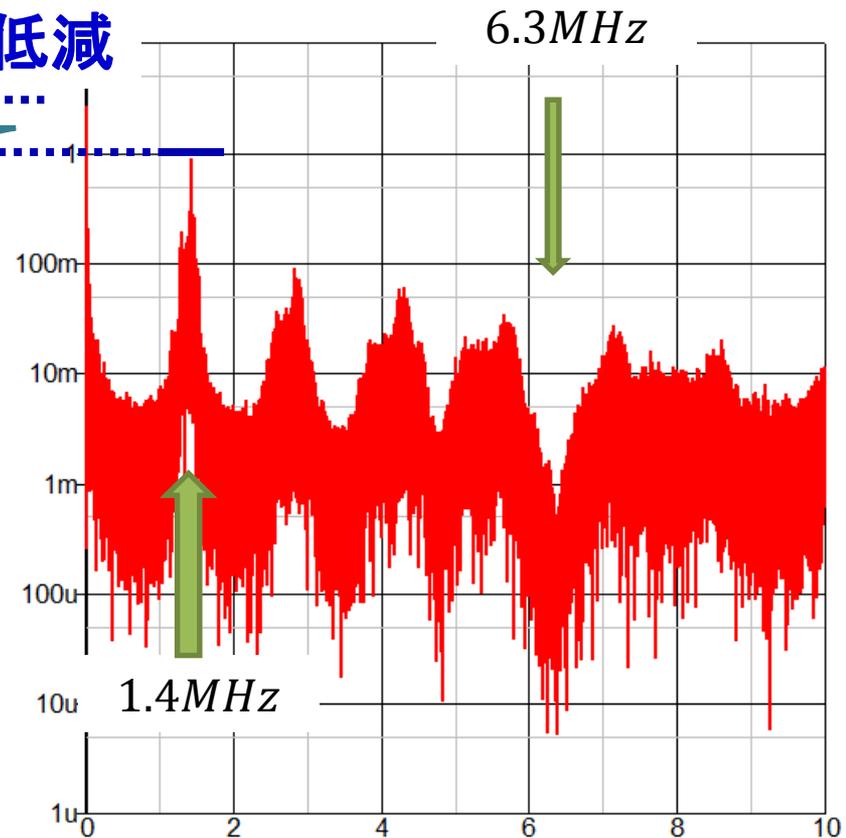


ランダム変調有無の比較

複合コーディング方式



アナログノイズ適用



ノッチの発生とEMIの大幅低減が可能！！

アウトライン

- 研究背景・概要
- 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
 - パルスコーディング方式とノッチ特性
 - コーディング方式スイッチング電源
- パルスコーディング型スイッチング電源
 - パルスコーディング型電源回路の実装
 - リップル特性の改善
 - コーディング方式でのEMI低減
- まとめ

まとめ

拡散周波数を限定するという考えのもと、ノイズ制御可能なスペクトラム拡散方式を提案し、理論解析を行った。

電源への適用を試みSIM及び実装にて下記の検証結果が得られた。

➤ ノッチ特性

- コーディング変数の差分で表現可能
任意周波数にノッチを発生することができる
- ノッチはsinc関数の零点
複合コーディングによるノイズ低減率向上が期待できる

➤ 出力特性

- リップル特性は一般的なPWM方式と比べると劣るが、 $\Delta\Sigma$ 変調器と併用することで改善できる

➤ 併用技術による性能向上

- 擬似アナログノイズ
ノッチを発生した上で更なるEMI低減を実現できる

EMI低減に加え、拡散ノイズを制御できるスペクトラム拡散を実現可能

Q & A ①

質問) 今回の提案手法では負荷応答特性に何か問題は発生しないのか？

回答) 提案手法の負荷応答特性を実測した際に電源回路として正常動作していましたので問題ないと思います。回路動作の問題ではないのですが、発表でも申しましたように一般的なPWM方式と比べてリップル特性が悪化してしまいます。

質問) 複数の周波数でのニーズがあった場合はどうするのか？

回答) 今回提案した複合コーディング方式は2種類のsinc関数に基づいたスペクトラム特性を持っていました。これを応用すれば2種類の周波数までなら、ノッチを発生させることができます。

質問) 以前学会発表で聞いたときは実験式でしたが、今回の理論式とは理論的に証明したということですか？

回答) その通りです。今回は式を用いた解析によって得た式ですので理論式と紹介させていただきました。

質問) 電源効率はどうなる？

回答) 効率に関する検討は行っておりません。断言できませんが、リップル特性が劣化していることを考慮すると悪くなると推測されます。

Q & A ②

質問)数十MHz帯域のノッチを発生させる場合、どのような問題があると思いますか？

回答)理論式よりノッチ周波数はコーディングパラメータの差分の逆数の位置に発生することが分かりました。もしも、MHz帯域のノッチを発生させるとなると生成するパルスを非常に小さくすると考えています。すなわち、パルスを如何に高精度に生成できるかが重要になってくると思います。

質問)理論式の各パラメータを同値にすると、算出値が無限大になってしまうので、式に条件を追加するべきではないか？数学的に不自然な式になってしまうと思う。

回答)その通りです。条件が必要だと思います。

質問)今回の研究は $\Delta\Sigma$ 変調器と、非常に相性が良いと感じました。 $\Delta\Sigma$ 変調器にはノイズシェーピングがあり、これを利用してバンドパスフィルタを作製することができる。すなわち、この特性をこの研究と合わせてみたら面白いのではないか？

回答)アドバイスをありがとうございます。今後検討課題のひとつとして研究方針に入れたいと思います。

付録

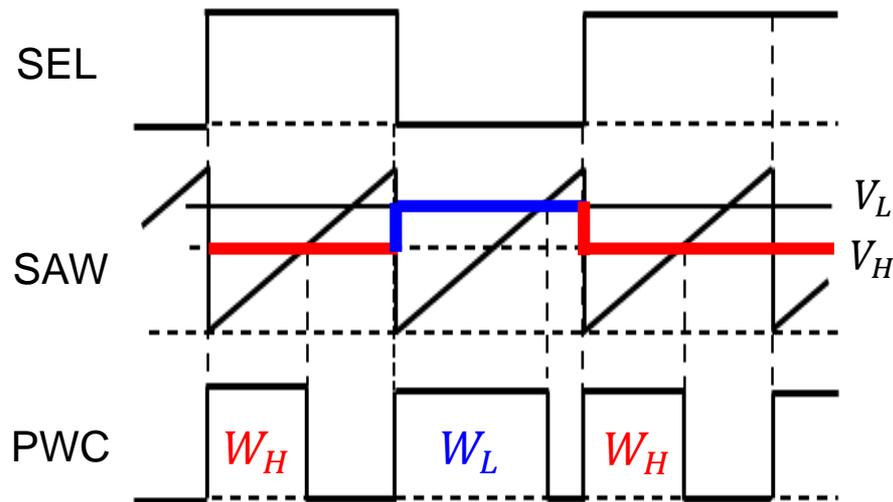
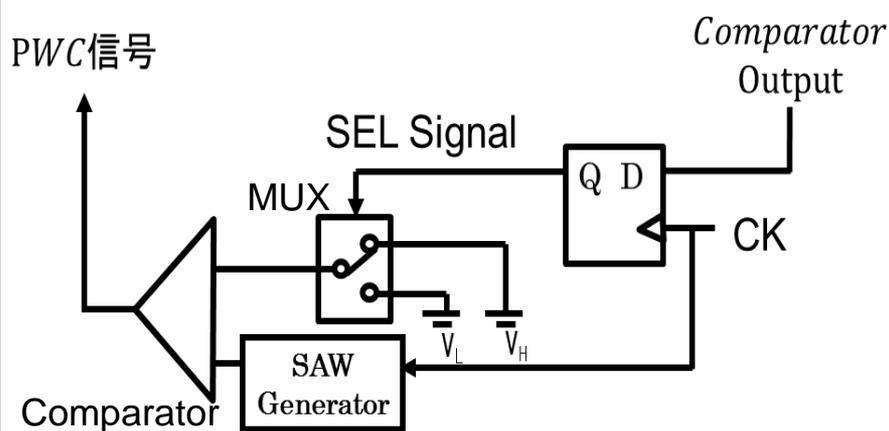
付録

- 単コーディング方式
 - PWC方式
 - PCC方式
- 複合コーディング方式
- 数値計算結果
- アナログノイズ回路
- その他

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



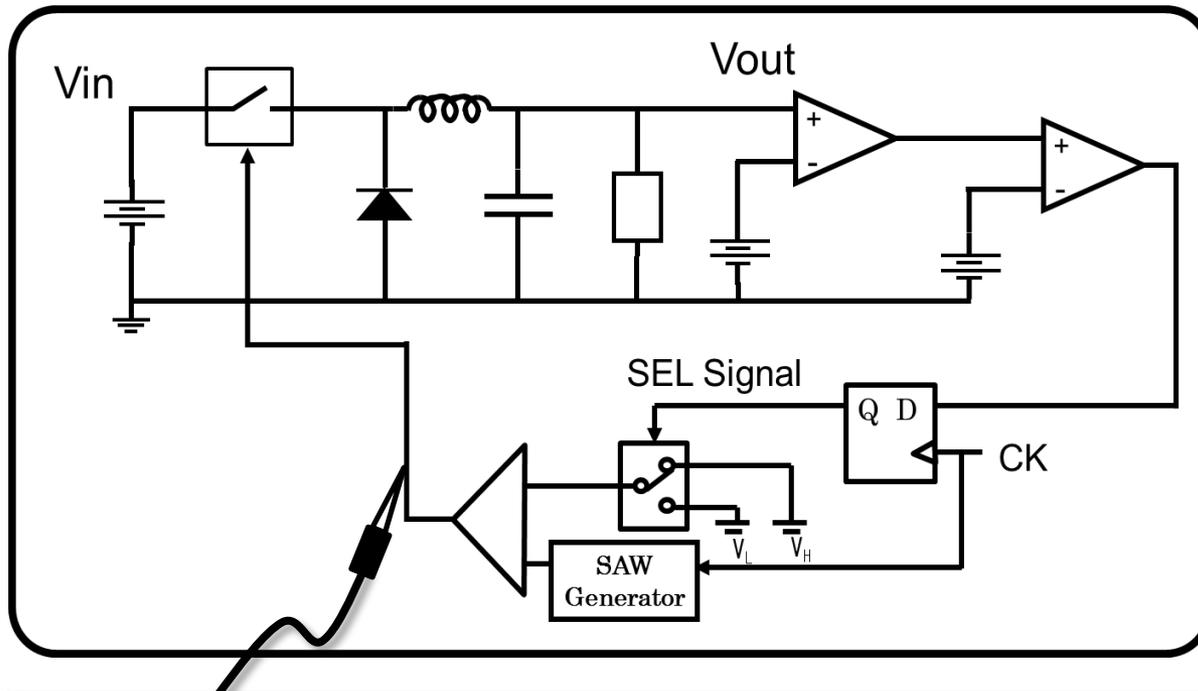
High入力時

- 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

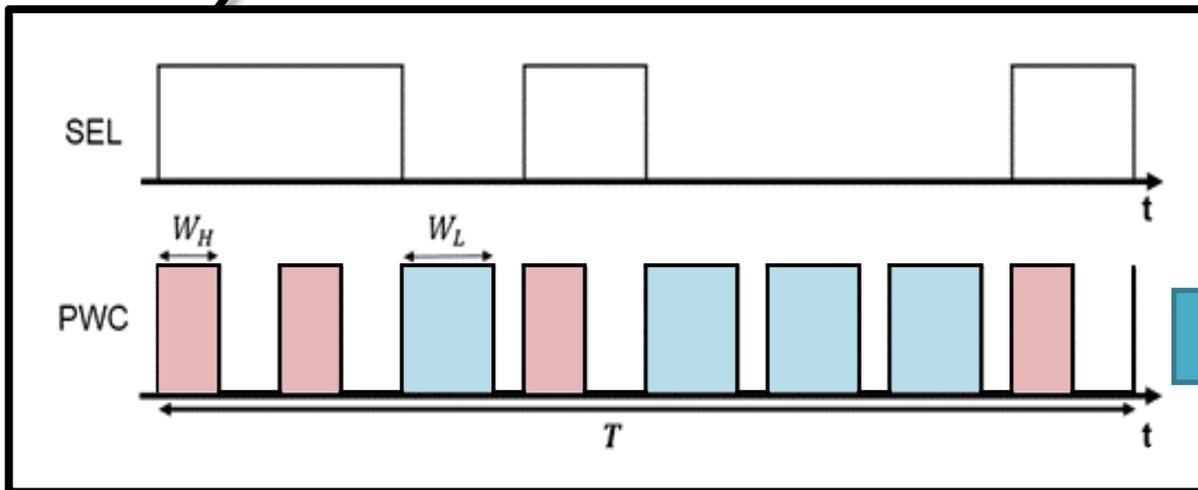
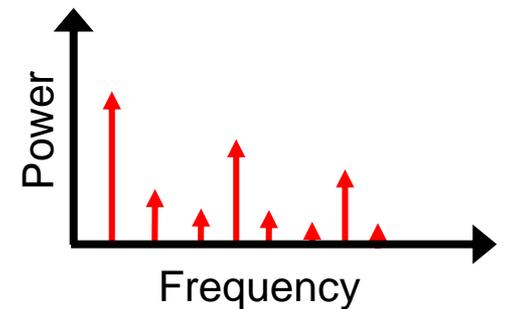
- ① SELがLow
- ② MUXが V_H を選択
- ③ Comparatorで幅が長いパルスを生成

シミュレーション条件

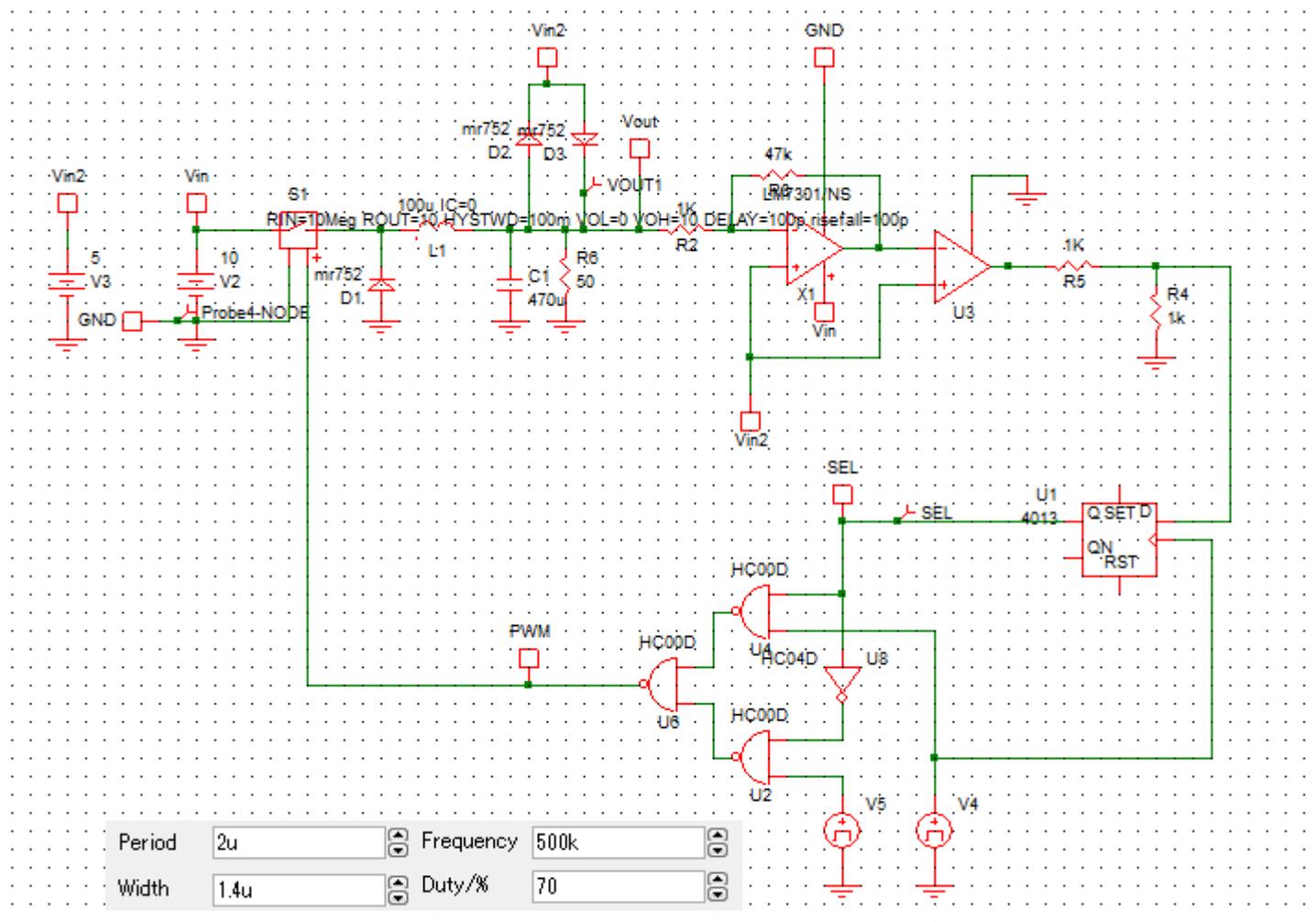


◎ 条件

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

PWC回路



Period	2u	Frequency	500k
Width	1.4u	Duty/%	70

Period	2u	Frequency	500k
Width	600n	Duty/%	30

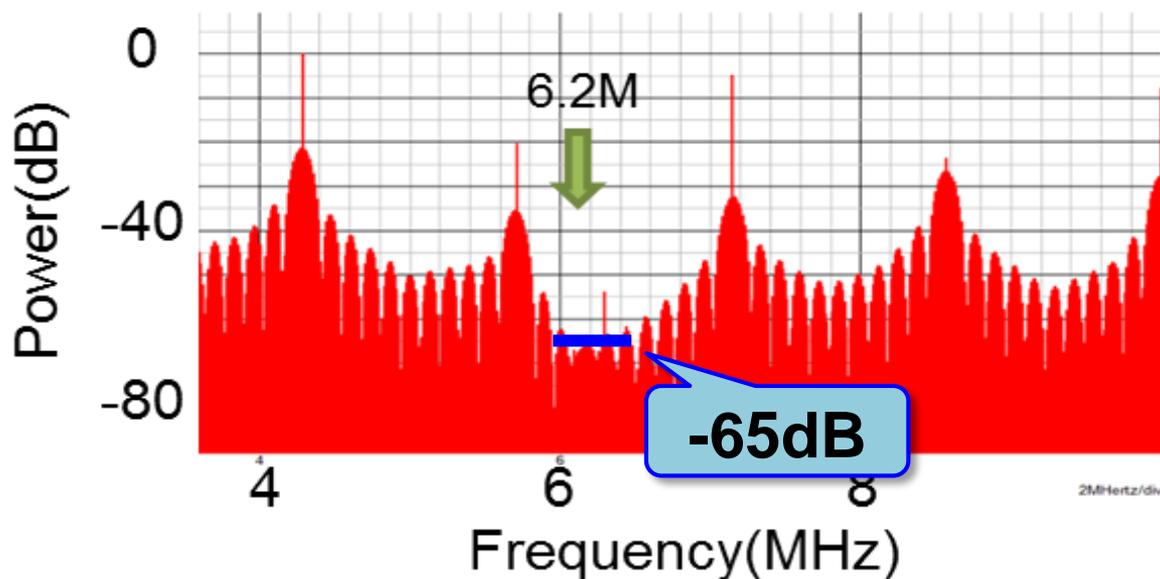
シミュレーション回路のスペクトラム

ノッチ周波数の理論式

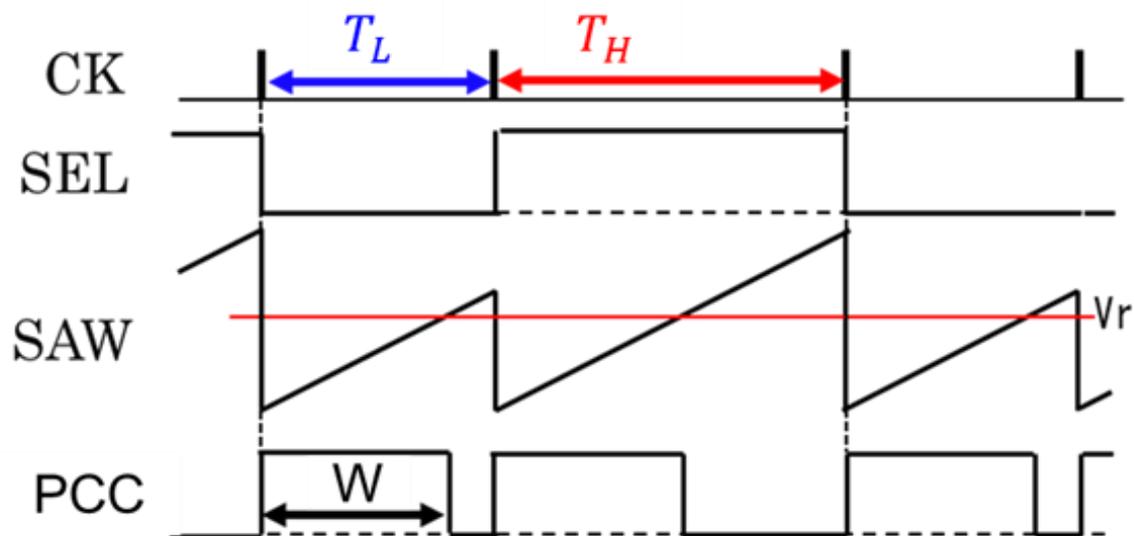
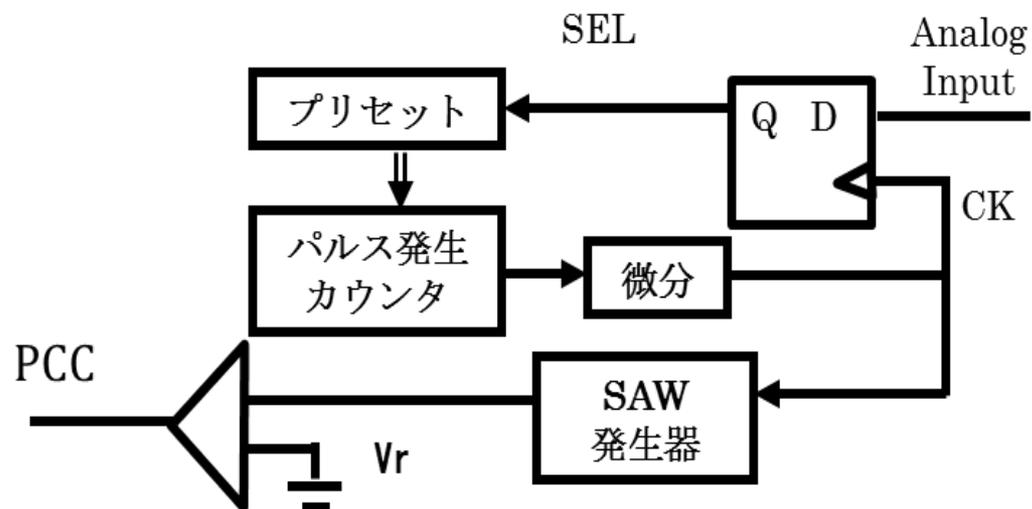
$$f_{\text{notch}} \cong N \times \frac{1}{(W_L - W_H)} \quad [n = 1, 2, 3, \dots, N]$$
$$= N \times \frac{1}{(480\text{ns} - 320\text{ns})} = \mathbf{6.25\text{MHz}}$$

式との整合性有り

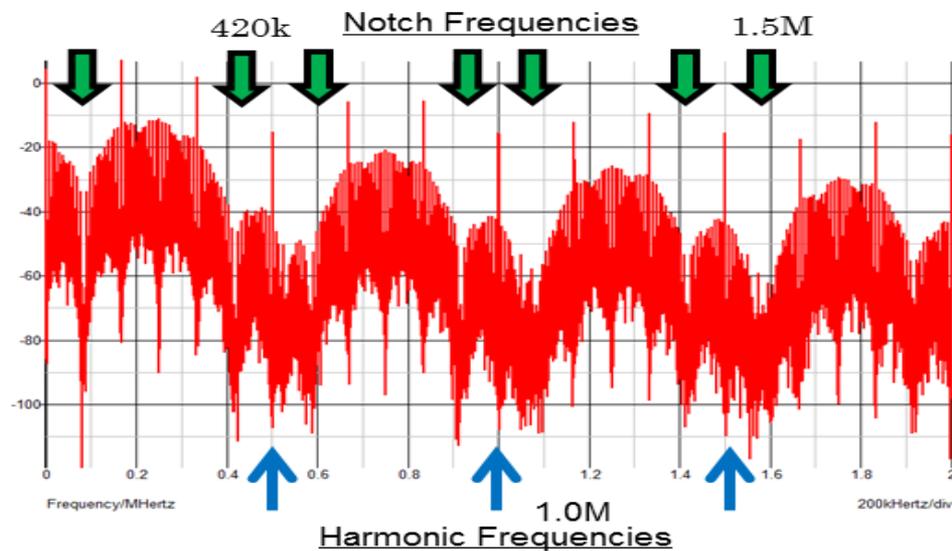
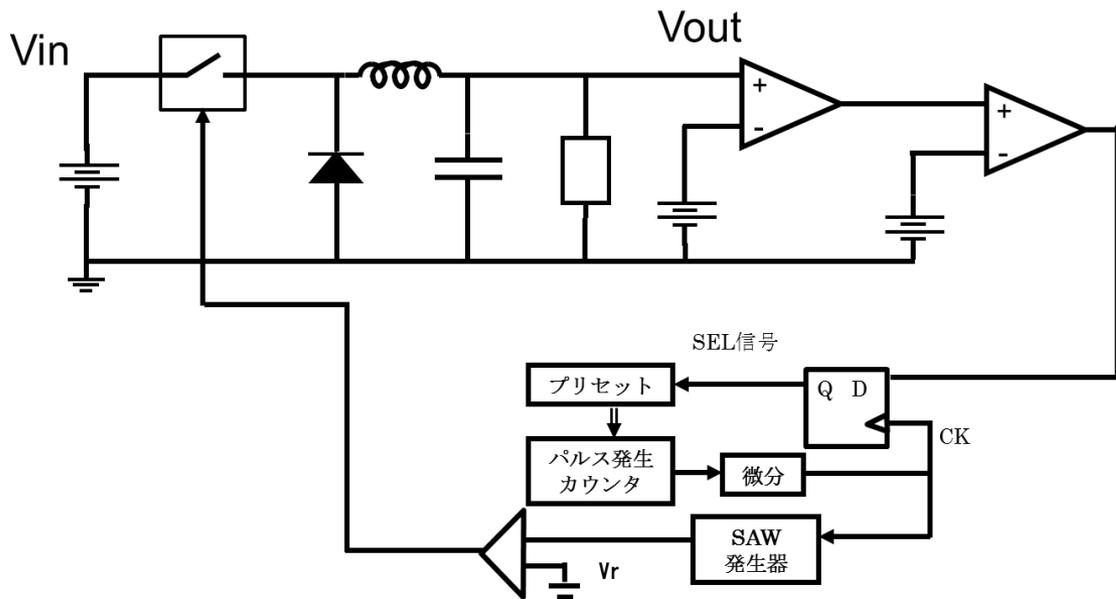
Notchの発生を確認



PCC方式



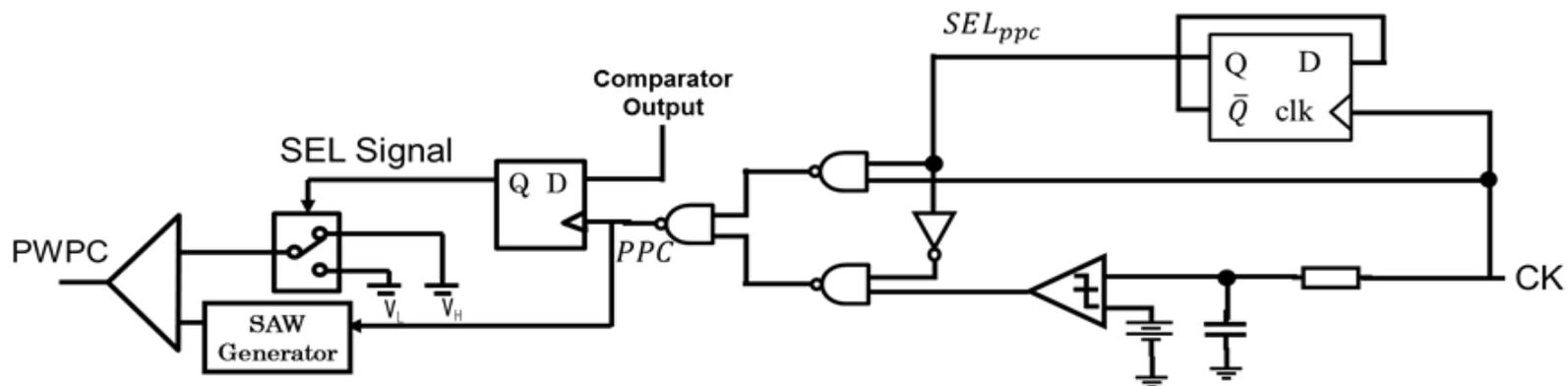
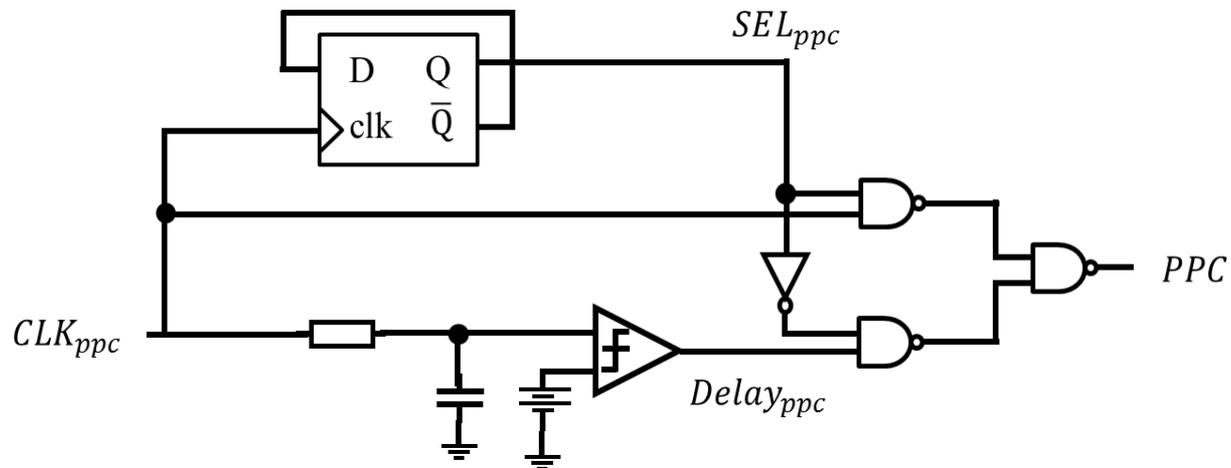
PPCの結果



付録

- 単コーディング方式
 - PWC方式
 - PCC方式
- 複合コーディング方式
- 数値計算結果
- アナログノイズ回路
- その他

PPC回路及びPWPC回路

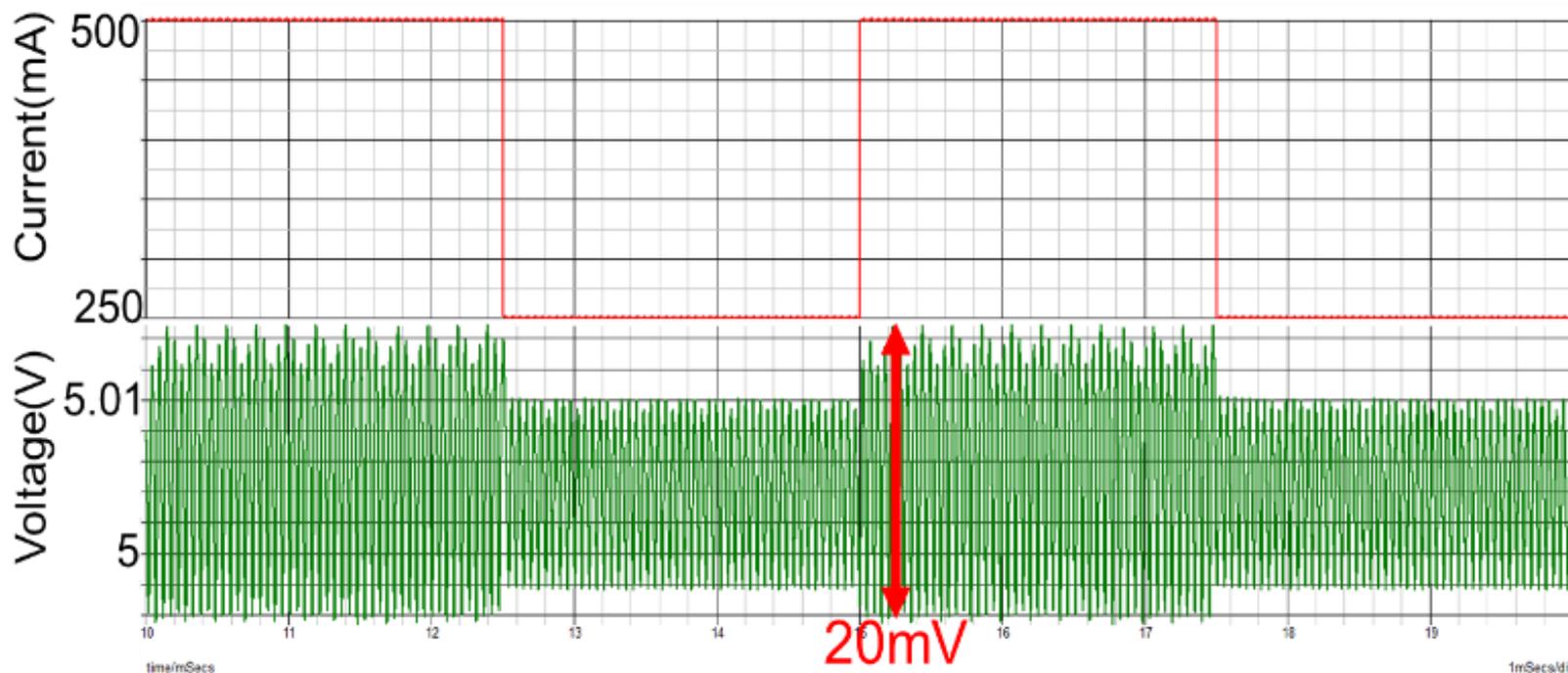


複合コーディング方式の出力電圧

◎条件

電流変動 I_0 : 500mA / 250mA

変動周波数 : 200Hz

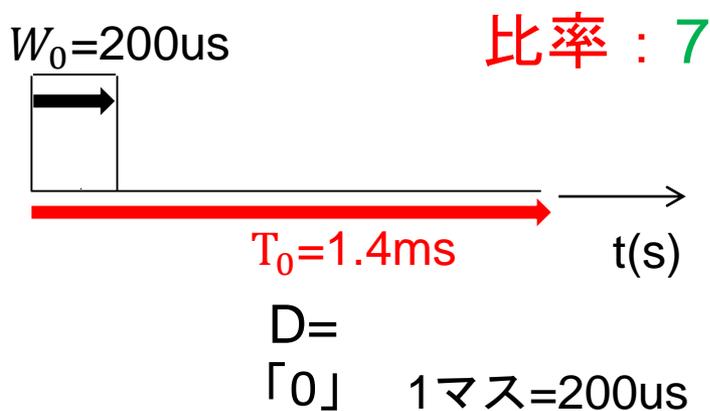
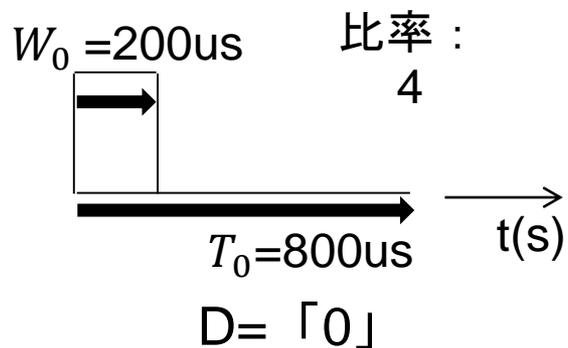


オーバー/アンダーシュートはない⇒優れた応答特性

付録

- 単コーディング方式
 - PWC方式
 - PCC方式
- 複合コーディング方式
- 数値計算結果
- アナログノイズ回路
- その他

PCM方式 (基準波形変更)



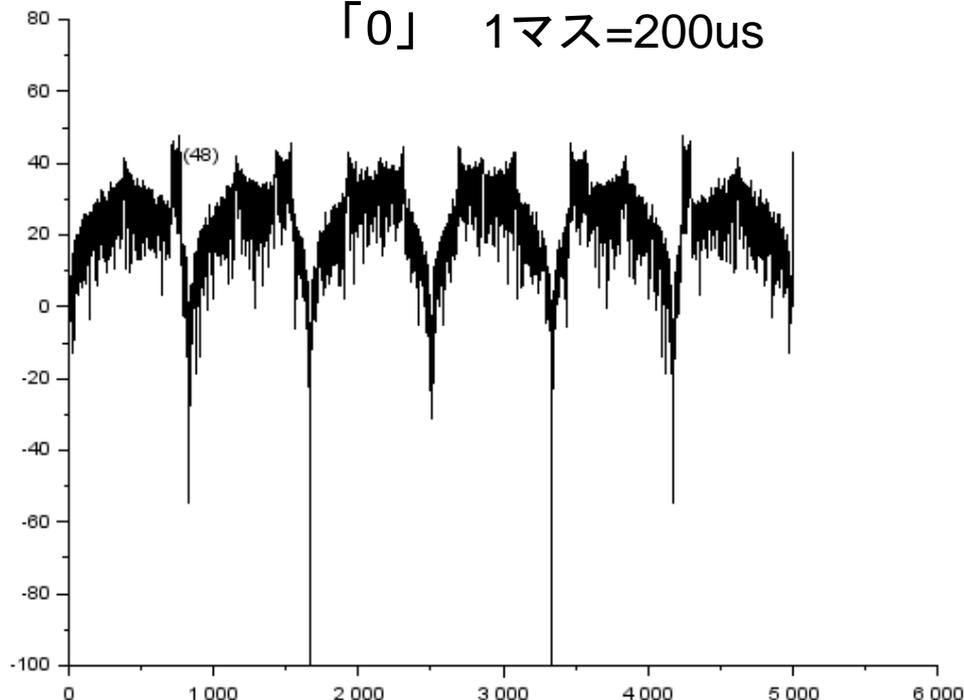
無変調時 : $T_0 = 1.4ms, W_0 = 200\mu s$
 変調時 : $T_M = 2.6ms, W_M = 200\mu s$

$\Delta T = 1.2ms$
 平均周期 :
 2.0ms

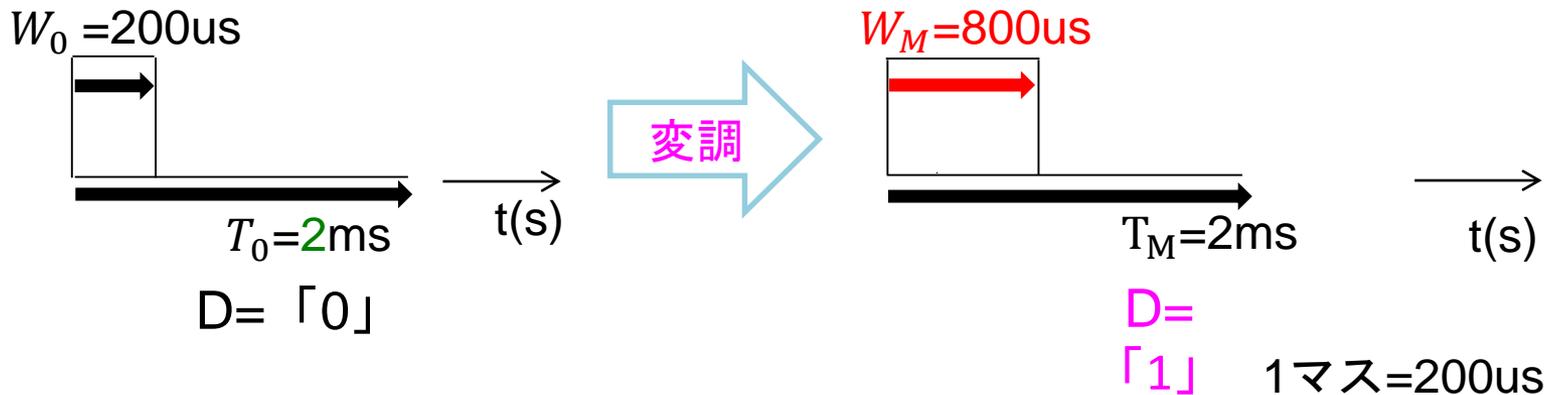
$$f_{\text{notch}} = K \times \frac{1}{1.2ms}$$

$$= 833, 1666, 2500, 3333, 4133, 5000 \dots$$

一致



PWM方式(基準周期変更)



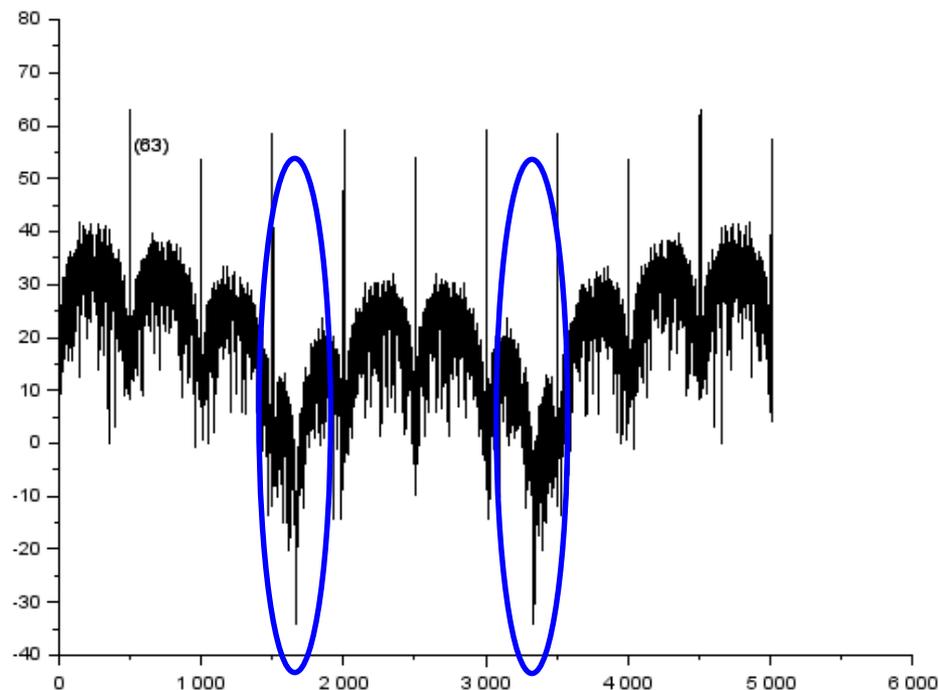
無変調時 : $T_0 = 2\text{ms}, W_0 = 200\mu\text{s}$
 変調時 : $T_M = 2\text{ms}, W_M = 800\mu\text{s}$

$\Delta W = 600\mu\text{s}$
 平均周期 : 2ms

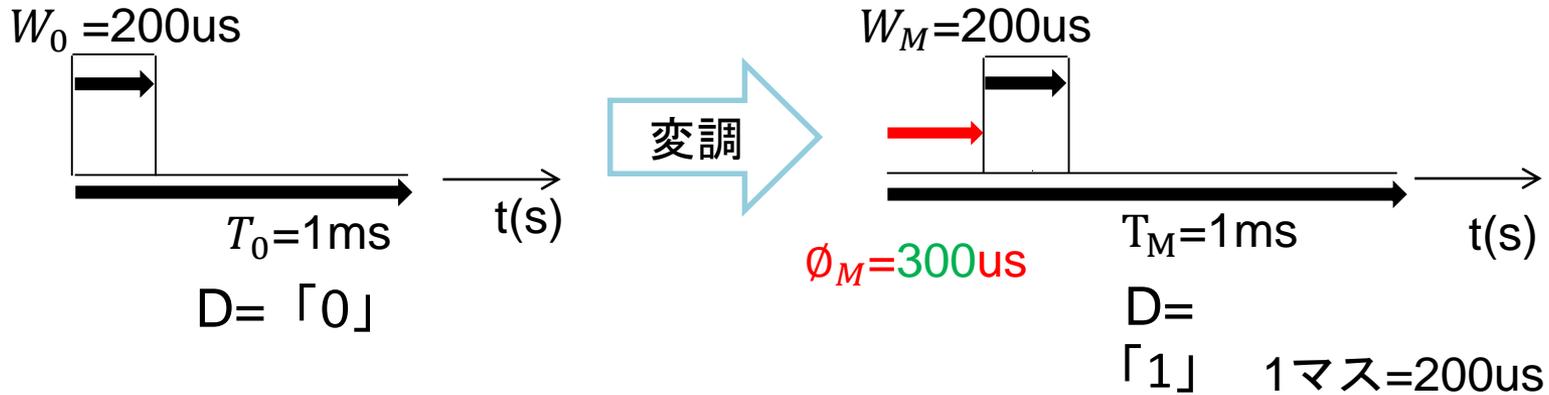
$$f_{\text{notch}} = K \times \frac{1}{600\mu\text{s}}$$

$$= 1666,3333, \dots$$

一致



PPM方式



無変調時 : $T_0 = 1\text{ms}, W_0 = 200\mu\text{s}$

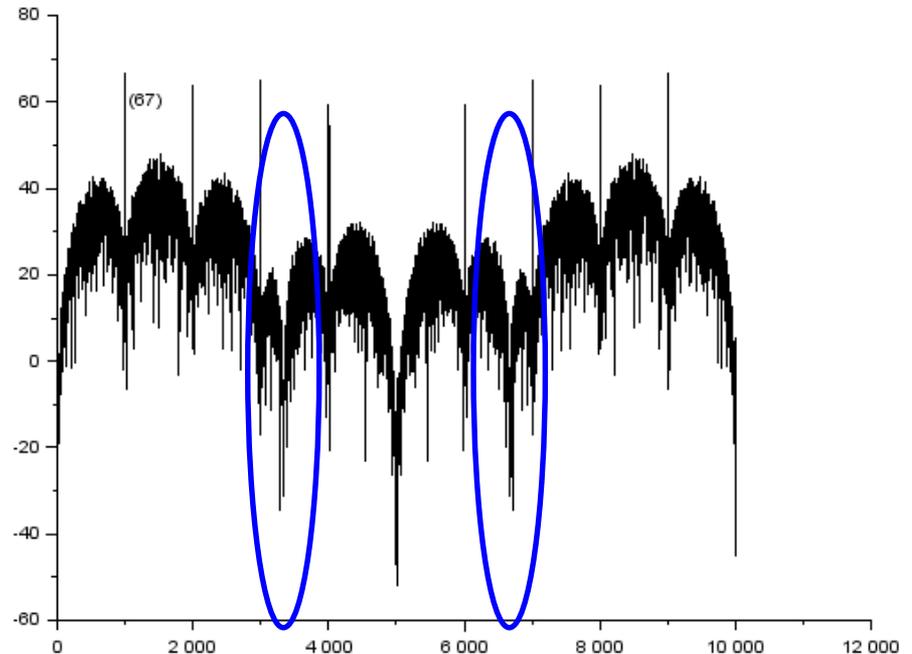
変調時 : $T_M = 1\text{ms}, W_M = 200\mu\text{s}$

$\Delta\phi = 300\mu\text{s}$
 平均周期 : 1ms

$$f_{\text{notch}} = K \times \frac{1}{300\mu\text{s}}$$

$$= 3333,6666 \dots$$

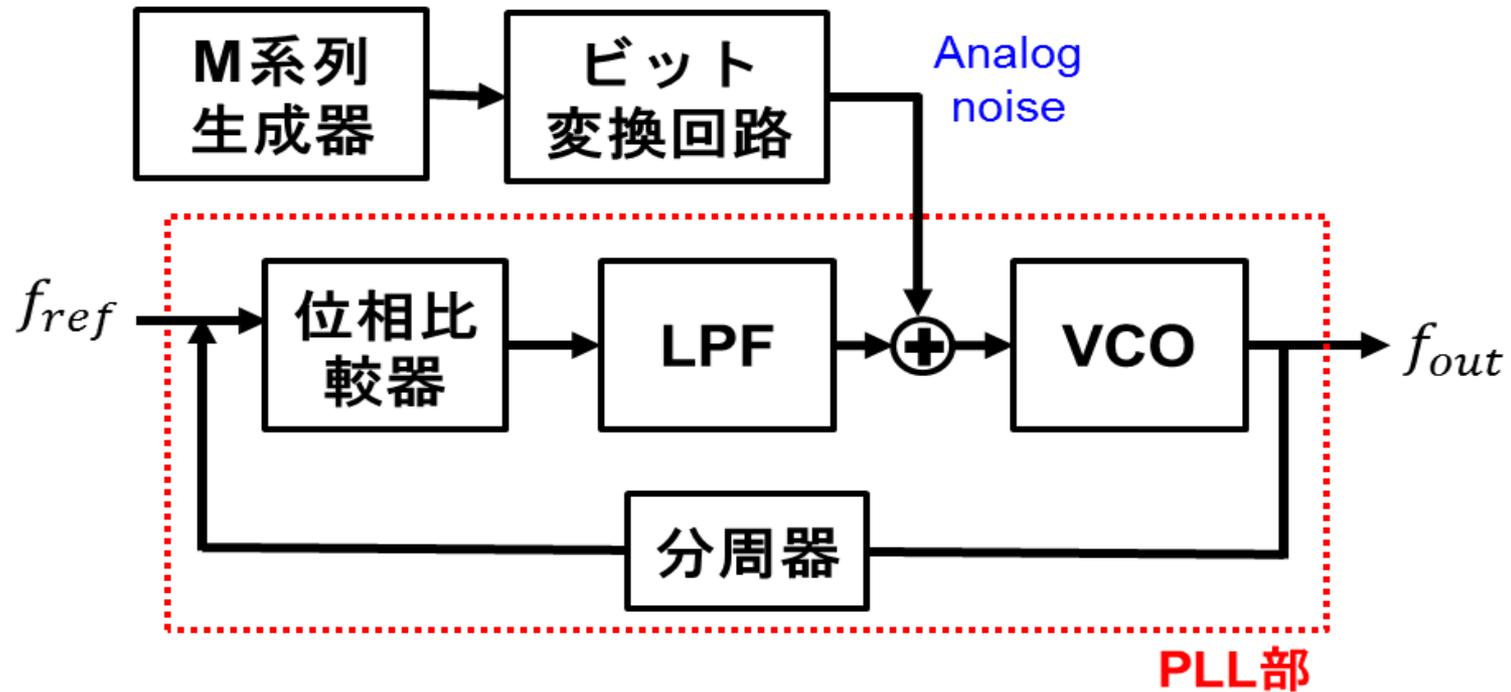
一致



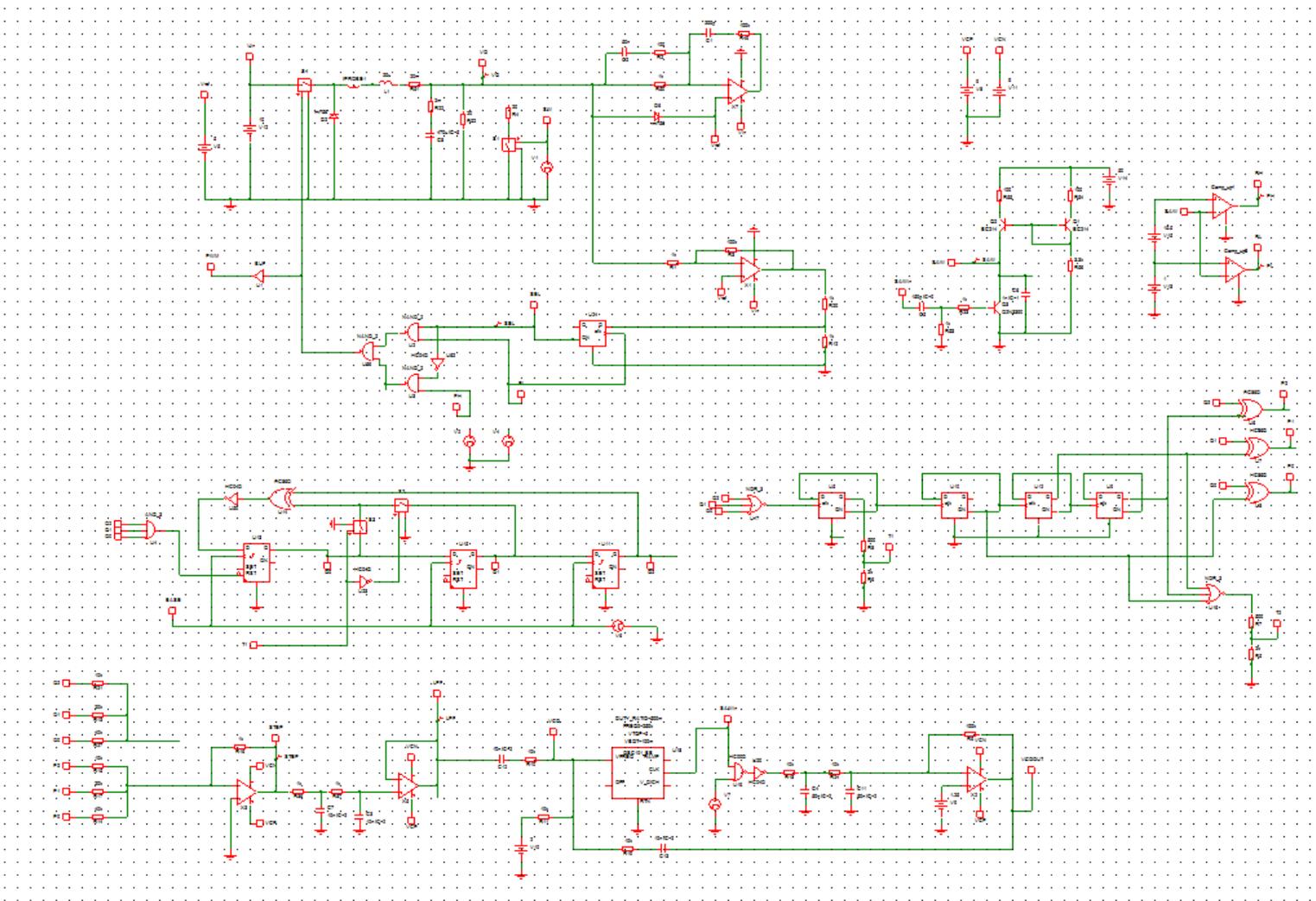
付録

- 単コーディング方式
 - PWC方式
 - PCC方式
- 複合コーディング方式
- 数値計算結果
- アナログノイズ回路
- その他

擬似アナログ信号生成のブロック図

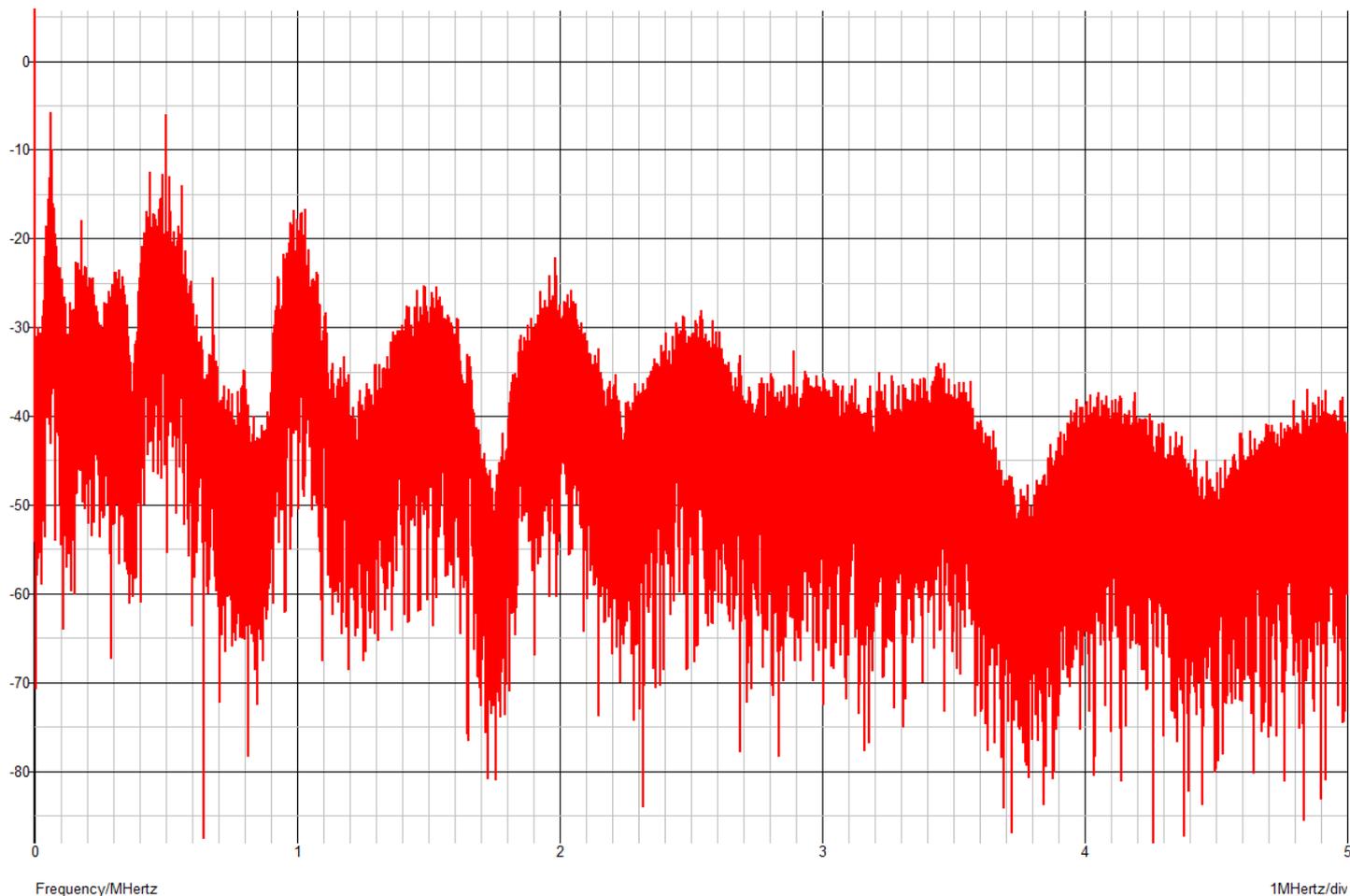


PWM回路+アナログノイズ



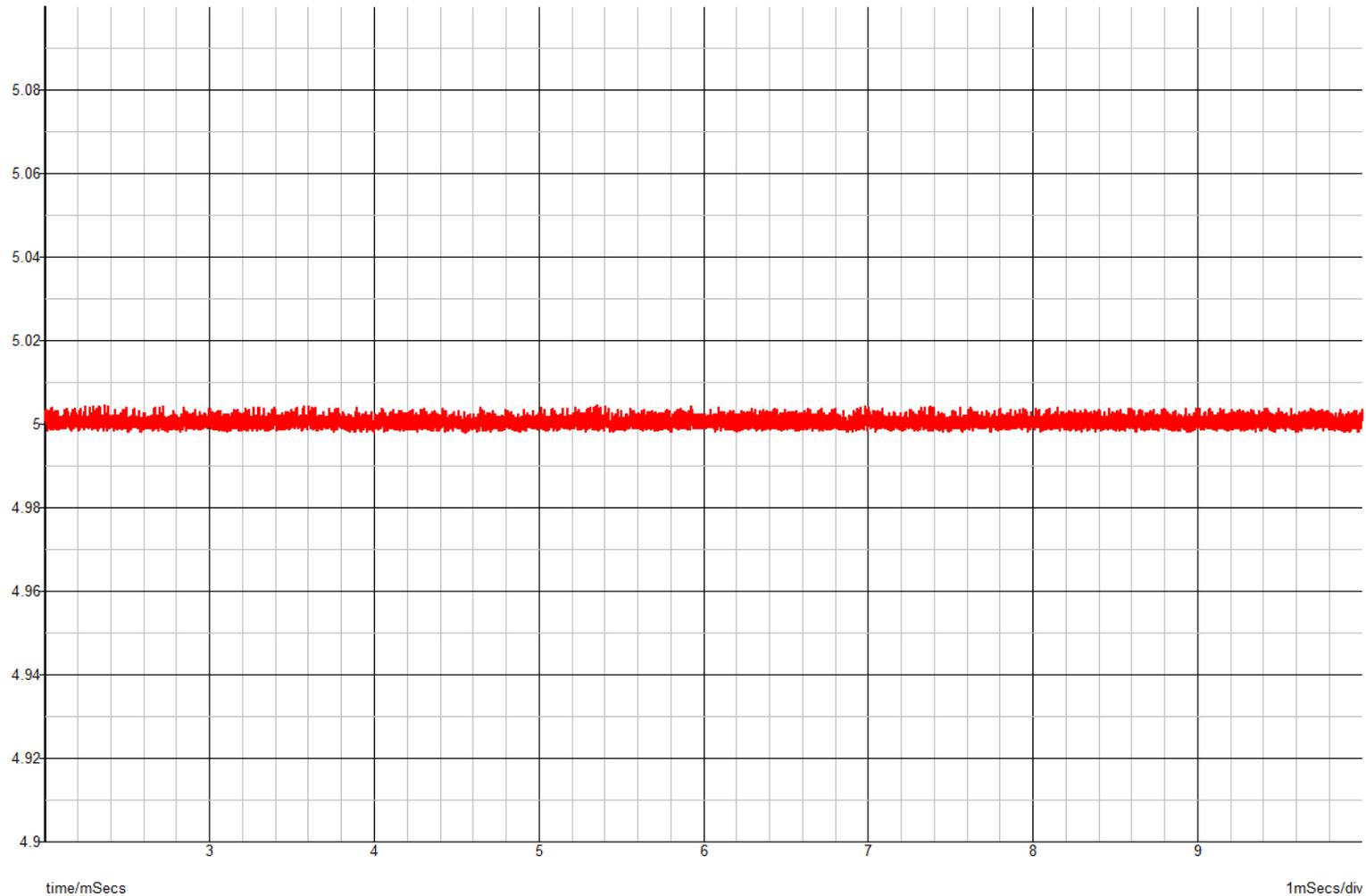
1k, 10k, 20k, 40k

アナログノイズを調整した。



PCMのときとノッチの深さ・ピークスペクトラムは変わらない!

出力波形



リップル : 6mVpp
オフセット : 2mV

付録

- 単コーディング方式
 - PWC方式
 - PCC方式
- 複合コーディング方式
- 数値計算結果
- アナログノイズ回路
- その他

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...

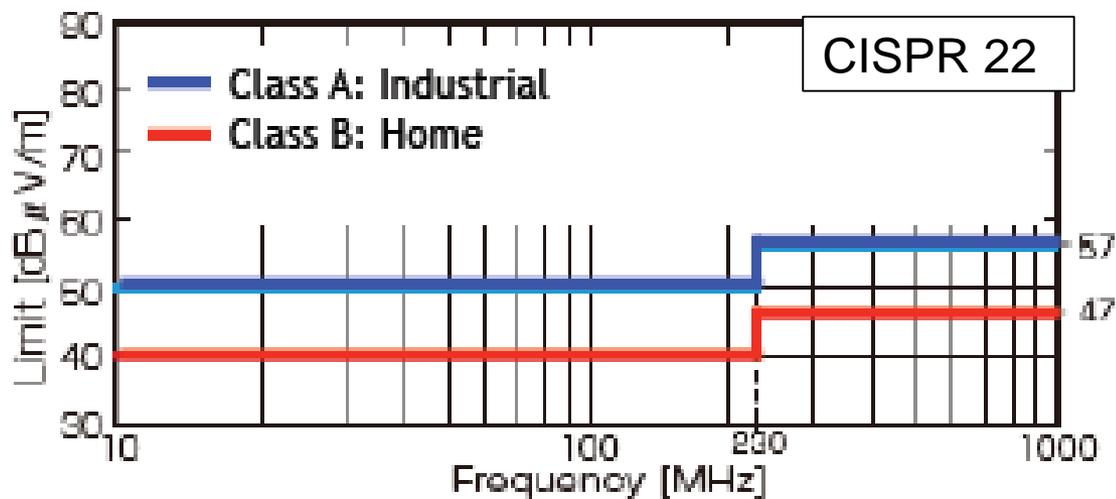


小規模化・低コスト化

基本スペクトラム成分を低減



EMI規定を
満たす



EMI: Electro-Magnetic Interference