

「スイッチング電源の基礎とノイズ・スペクトラム拡散技術」

目 次 2

★ スwitching電源の研究動向

3. 電源のノイズ・スペクトラム拡散

3-1 デジタル変調スペクトラム拡散技術

3-2 リニア変調スペクトラム拡散技術

3-3 クロックレス電源への適用

3-4 リニア変調時の出力リップル改善技術

4. パルスコーディング制御とノッチ特性

4-1 パルスコーディング制御

4-2 ノッチ周波数の解析

4-3 PWC方式スイッチング電源の実装

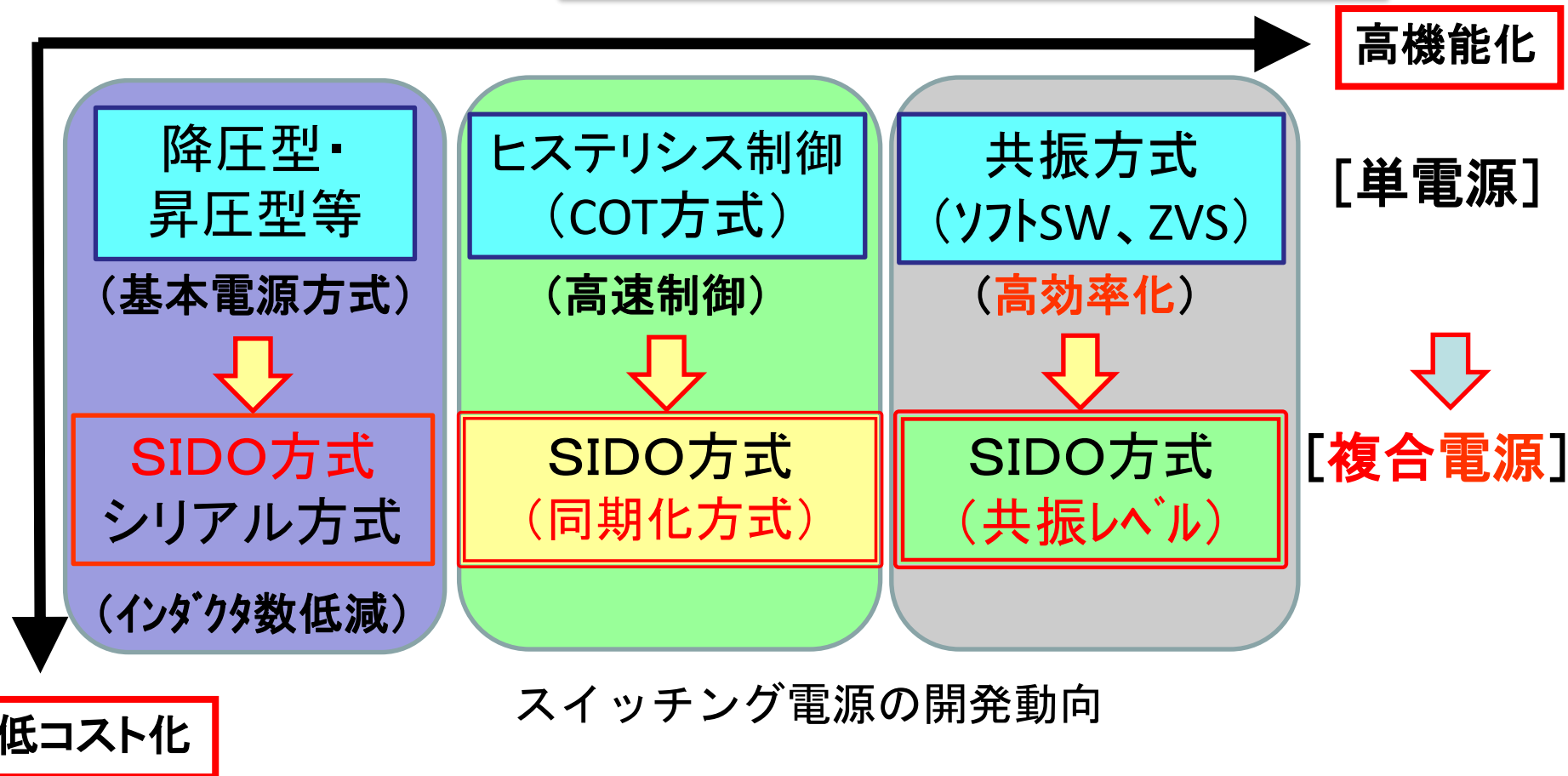
4-4 自動ノッチ発生方式

★スイッチング電源の研究動向

2-1

●電源の課題：

- 1) 低コスト化：回路・部品の削減
- 2) 高機能化：低リップル・高効率化



* SIDO : Single-Inductor Dual-Output
* COT : Constant ON Time

* ZVS: Zero Voltage Switching
* ZCS: Zero Current Switching

★ EMCとは

● **EMC=EMI+EMS**（電磁適合性＝電磁妨害＋電磁感受性）

電磁妨害を出さず、電磁波の影響を受けない[イミュニティ(immunity)]

● スイッチング電源とスペクトラム

* エネルギー（電圧・大電流）のスイッチング供給

⇒ 基本波（クロック周波数）と高調波に、大きいピークの線スペクトラム

⇒ **EMI（電磁妨害）**問題が発生：**電磁波＋電源ライン**

* EMI規制 ⇒ 規制値以下にスペクトラム・レベルの低減が必要

⇒ スペクトラム拡散技術（他の手法：フィルタ、シールド等）

★EMI対策：スペクトラム拡散技術

* 基本パルス（クロック、鋸歯状波、PWM信号）を、ランダムに位相（周波数）変調

* スペクトラム拡散技術

A) 従来デジタル拡散技術

・10ビット（1,024通り）以上の微小位相シフトのパルス群を発生し、
ランダムにセレクトして、電源に供給

B) アナログ・ノイズ拡散技術

・アナログノイズ（熱雑音等）により、クロック信号を変調して電源に供給

3. 電源のノイズ・スペクトラム拡散

2-3

3-1 デジタル変調スペクトラム拡散技術

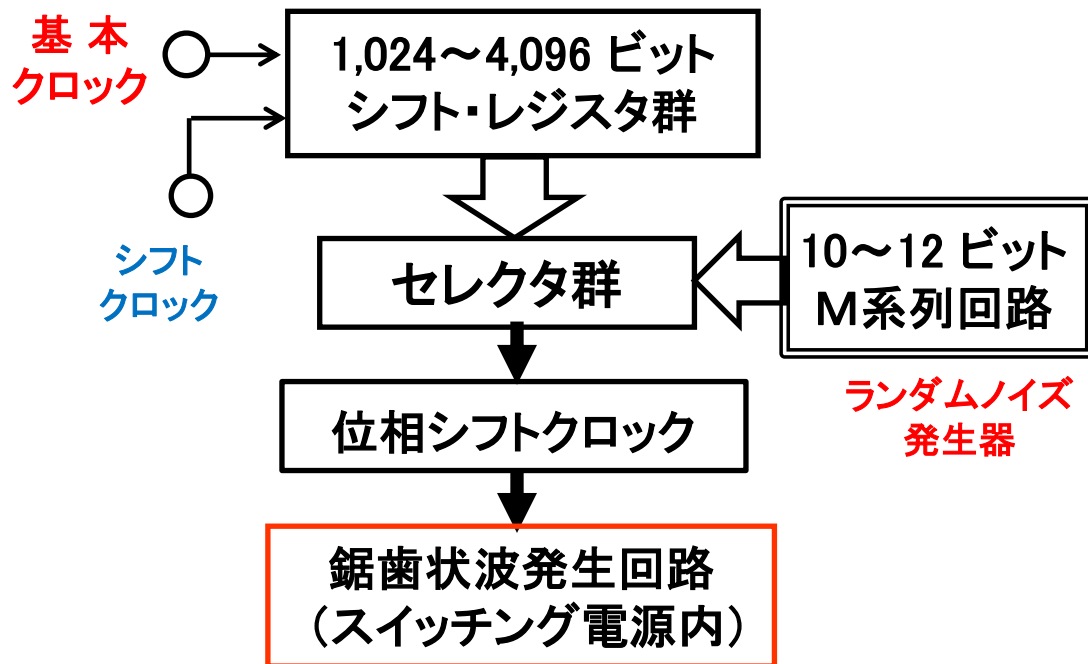
(1) 従来デジタル拡散技術

* 構成: 位相シフト回路(10~12ビット) + ランダム信号発生器 + セレクタ

* 特徴: 多数の(シフトレジスタ + セレクタ): 1,000~4,000個

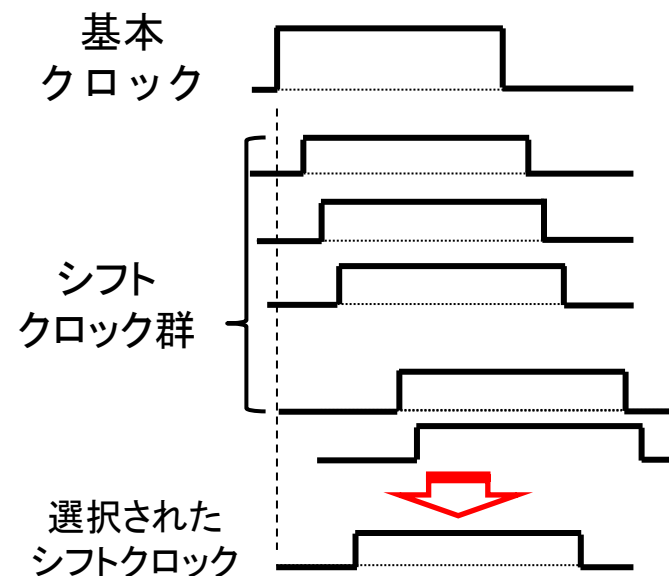
シフト用クロック周波数 = 電源クロック(200kHz) × 4,000 = 800 MHz (困難)

⇒ **デジタル制御電源に最適**



PWM信号位相のランダ変調

デジタル・スペクトラム拡散回路



タイミング・チャート

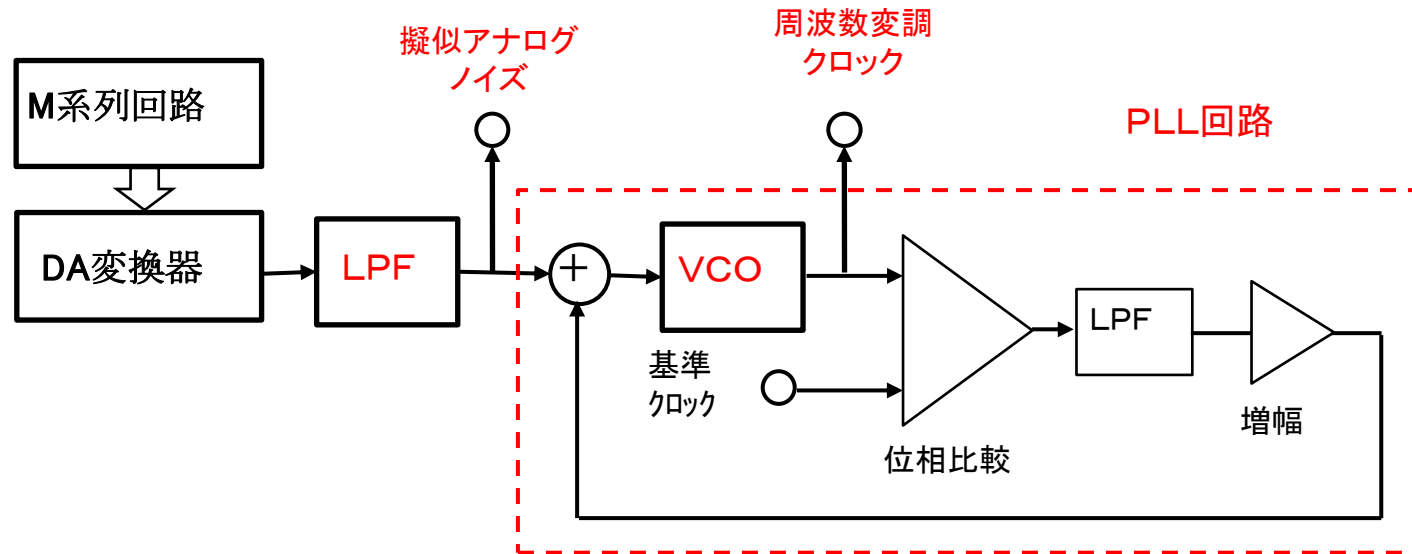
(2) 擬似アナログノイズ・スペクトラム拡散技術

2-4

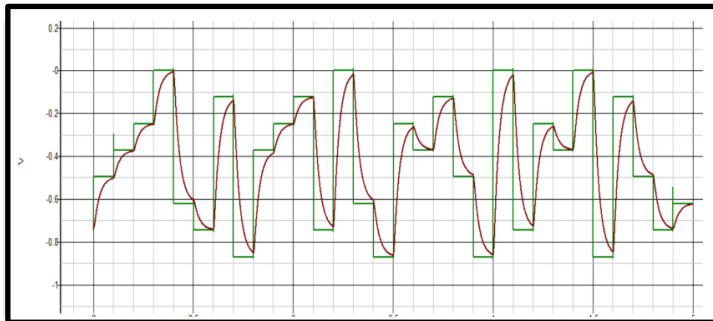
* 構成: M系列回路(ランダム信号) + (DAC+LPF) + PLL回路

* 特徴: 擬似アナログノイズ + 振動的PLL回路 ⇒ 非周期性

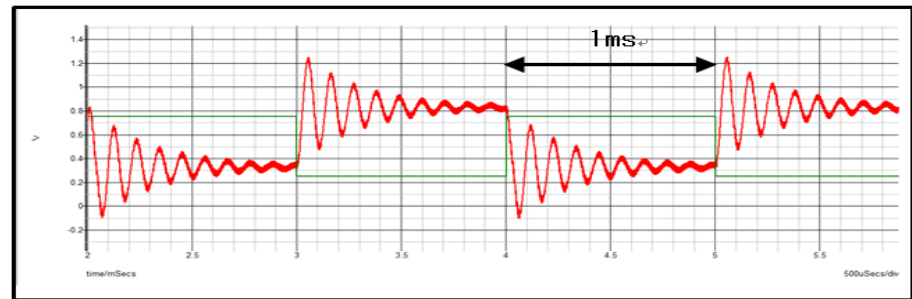
・アナログノイズ: 周期的信号 ⇒ 振動的PLL回路で **非周期的信号**へ



擬似アナログノイズ・スペクトラム拡散回路



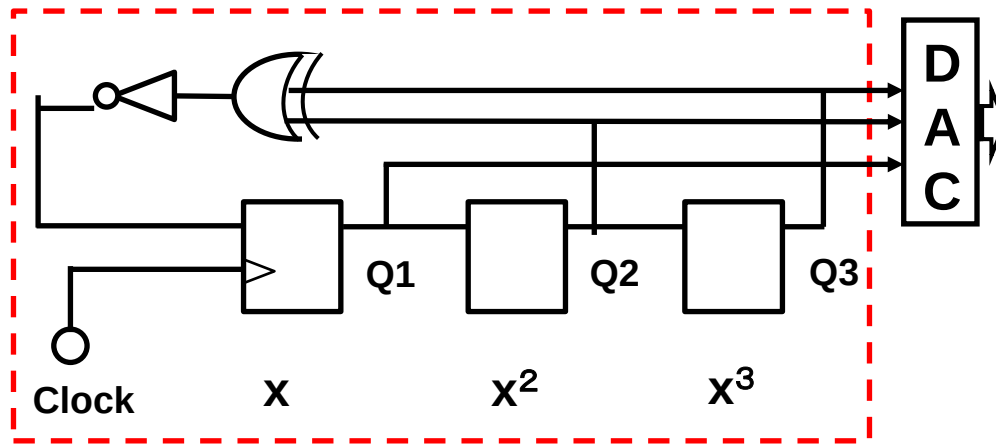
擬似アナログノイズ波形



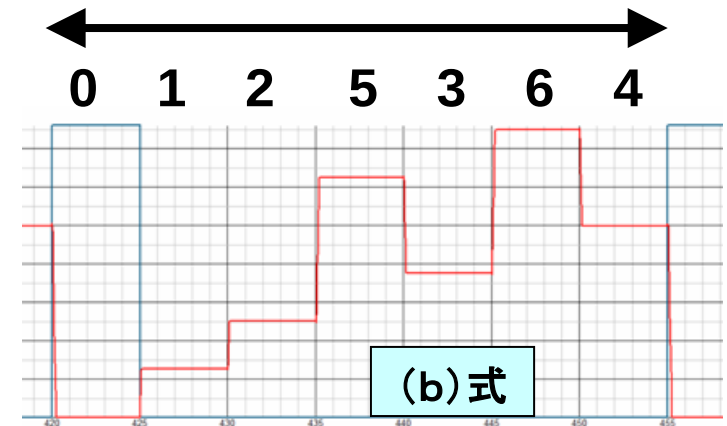
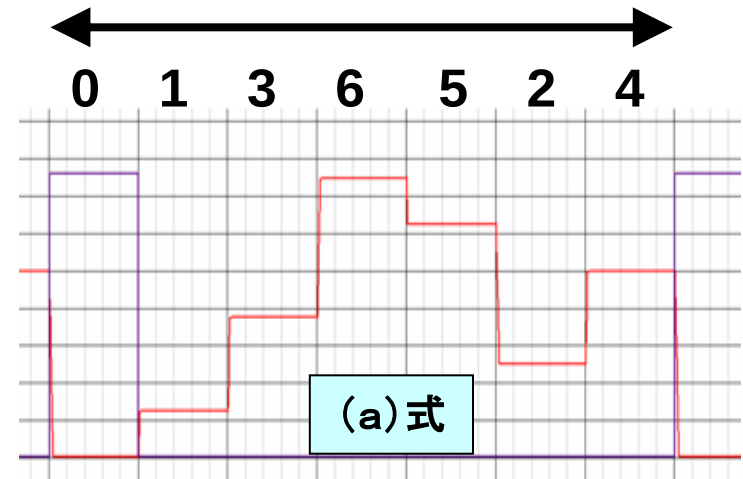
PLL回路応答特性

● ランダム信号発生器:M系列信号発生器

- * 構成: 原始多項式に基づいた
(シフトレジスタ+ブール代数の帰還)
- * 特徴: 各レベルが一度ずつランダムに出現
- * 原始多項式(3ビット)
 - (a) $G(s) = x^3 + x^2 + 1$
 - (b) $G(s) = x^3 + x + 1$
 ブール代数で、+1は反転を表わす
- * 出力信号: 基本7分周信号



原始多項式の一例: 式 (a)

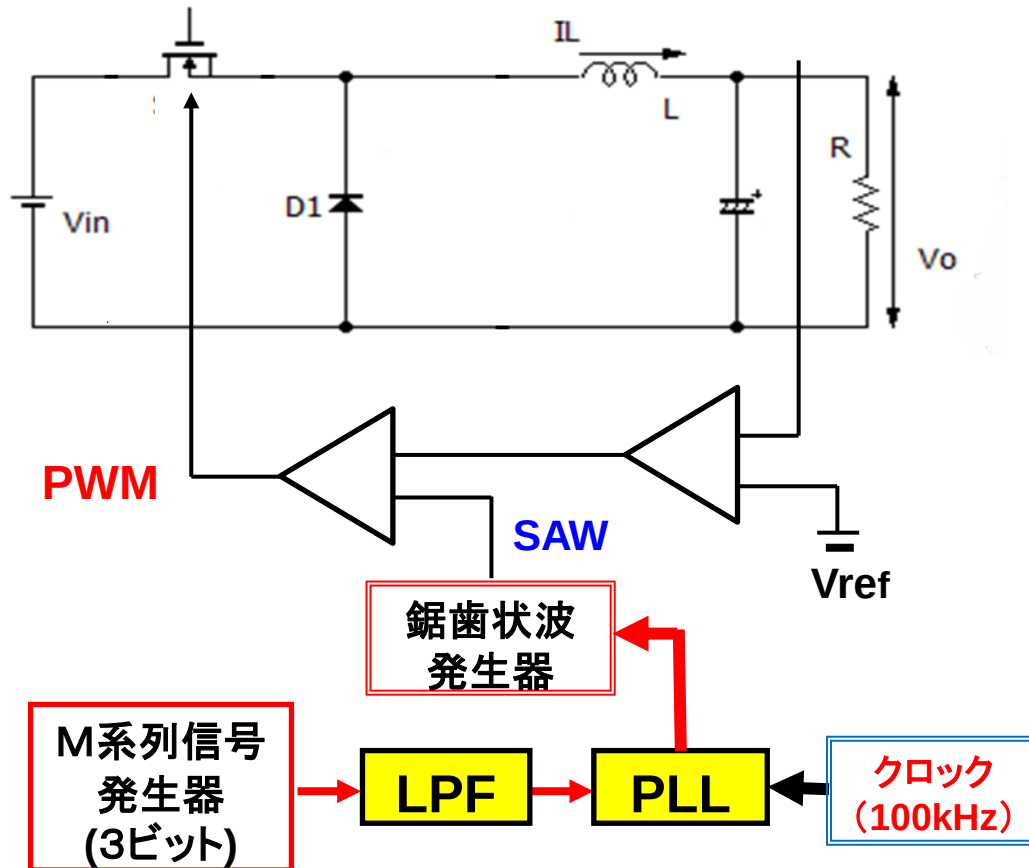


M系列回路の出力波形

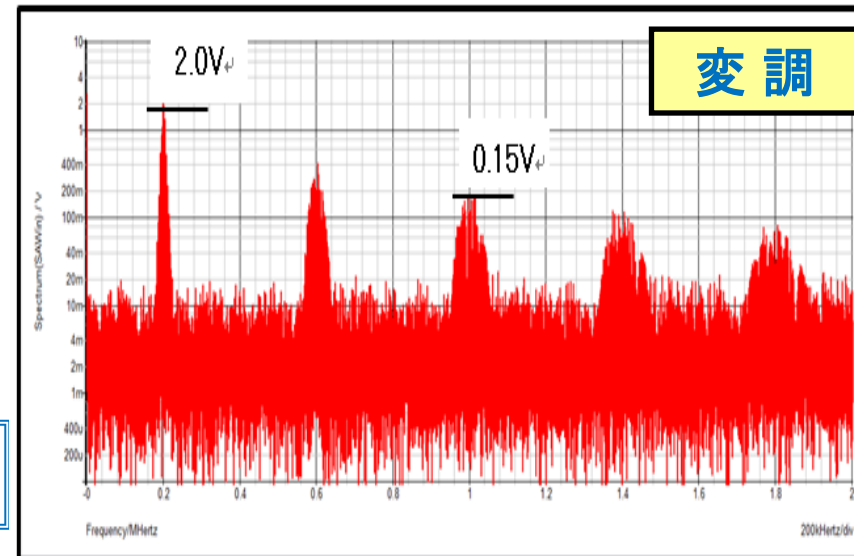
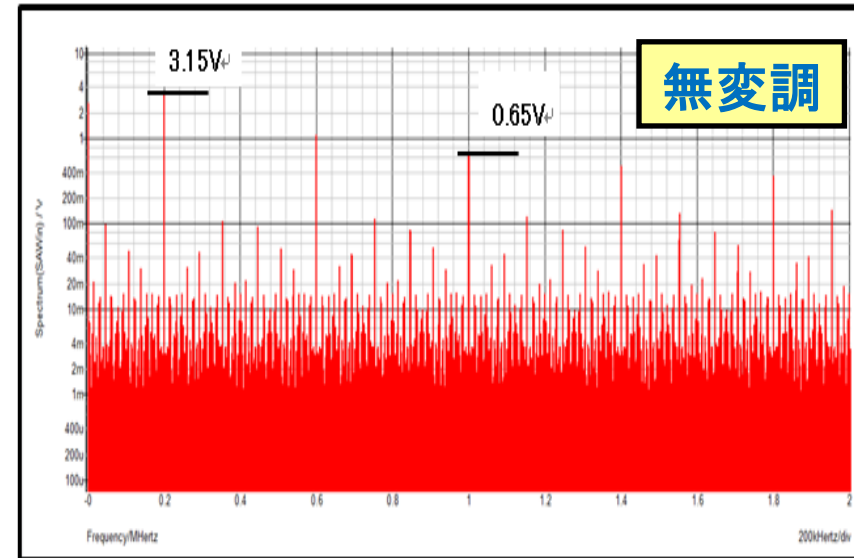
● スイッチング電源への適用: PWM信号のスペクトラム

2-6

- * 構成: 鋸歯状波発生器のクロックに適用
- * 変調周波数の選定 ($F=100/7=14\text{kHz}$)
- * 拡散結果: -1.15V (-2.0dB)@ 200kHz
 -0.5V (-6.4dB)@ 1.0MHz



アナログノイズを利用した降圧形電源



スペクトラム拡散結果

(3) 新M系列ノイズ拡張技術

● アナログノイズの周期性の拡大

・3ビットパターンの組合わせ:

$$N = {}_7P_7 = 5,040 \text{ 通りもある}$$

* 周期拡大手法:

(A) 原始多項式の切換え: $\times 2$

2つの原始多項式の交互入替え

(B) ビット反転手法(右表): $\times 8 \Rightarrow \times 16$ 倍

・3ビット・カウンタの出力を周期毎に反転

【ビット反転例】

0) 反転無し : 0-1-3-6-5-2-4-

1) Q1反転 : 1-0-2-7-4-3-5-

2) Q2反転 : 2-3-1-4-7-0-6-

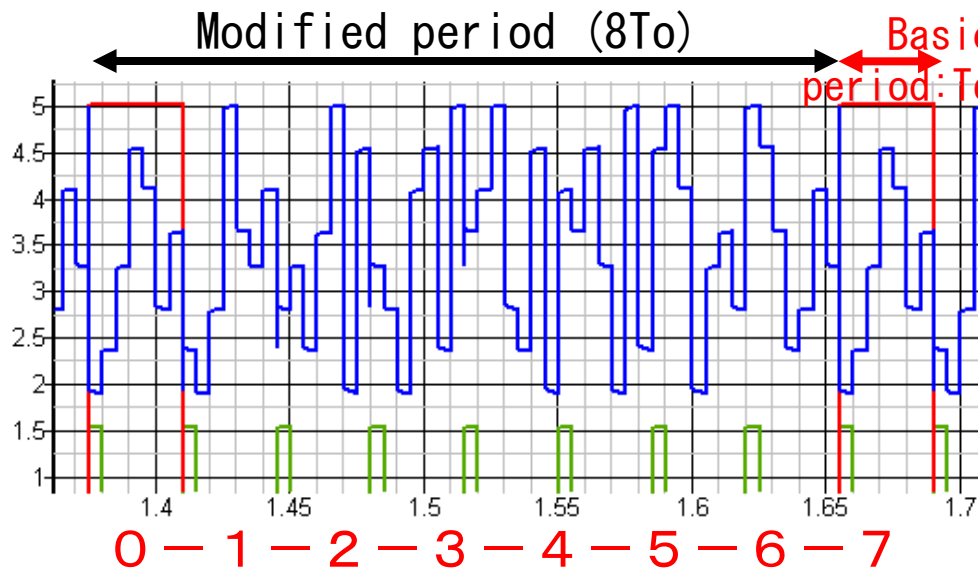
3) Q1Q2反転: 3-2-0-5-6-1-7-

4) Q3反転 : 4-5-7-2-1-6-0-

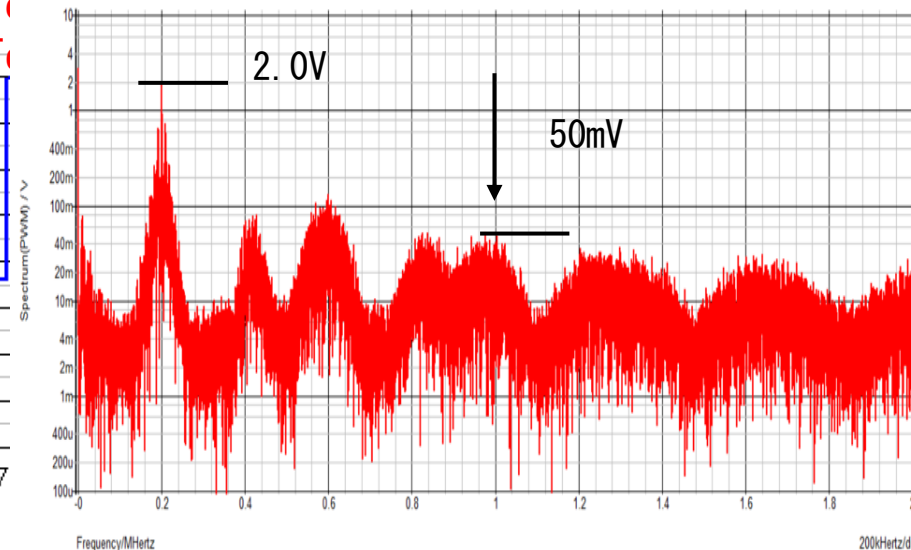
5) Q3Q1反転: 5-4-6-3-0-7-1-

6) Q2Q3反転: 6-7-5-0-3-4-2-

7) 全部反転 : 7-6-4-1-2-5-3-



新M系列によるスペクトラム拡散(ビット反転)



電源の出力電圧リップル

(C) ビット入替手法(右表)

×6倍:⇒ ×96倍周期= **672 パターン長**

◎スペクトラム拡散結果:

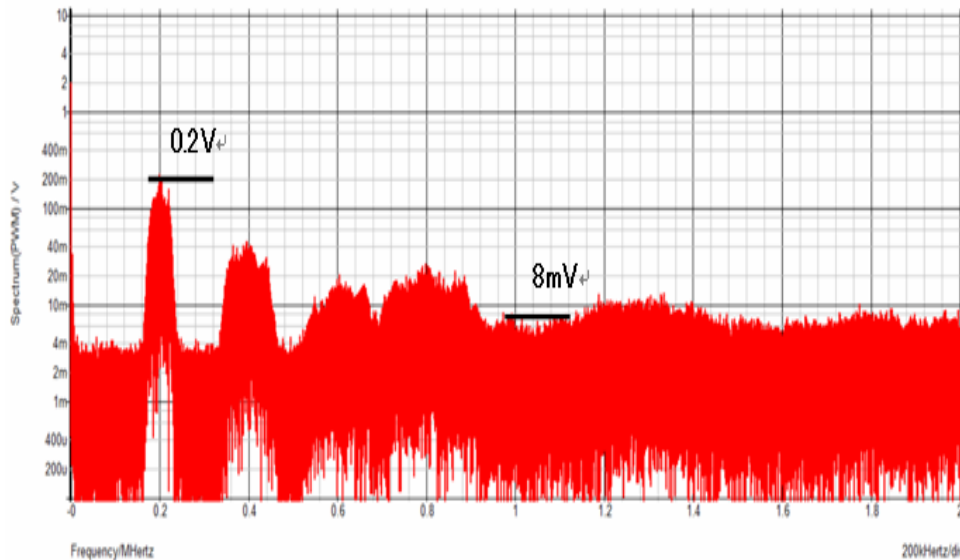
基本波: 0.2 V [/3.15] (−12.0 dB)

高調波: 8 mV [/650mV] (−19.1 dB)

リップル: 13 mVpp

* 非周期的なリップルを確認

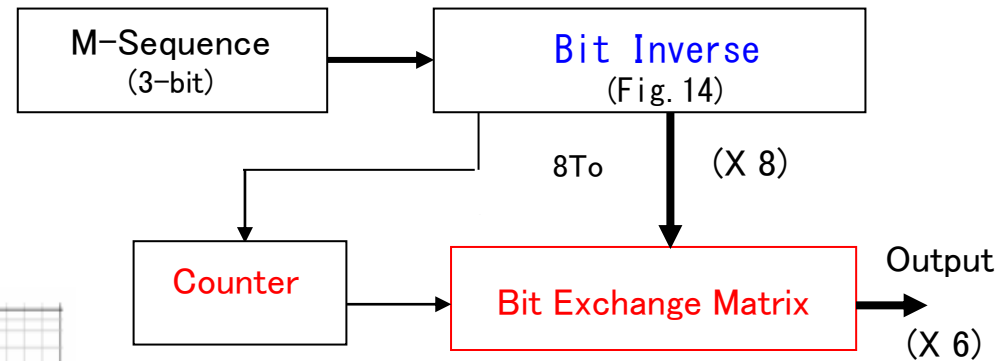
★変化レベル数ではなく
レベル変化が重要



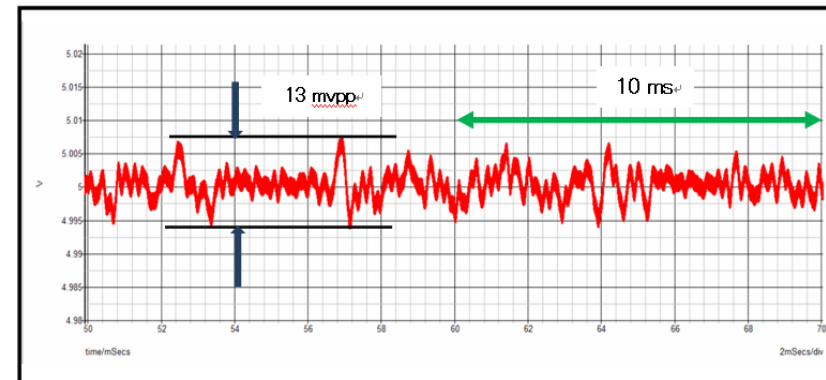
新M系列によるスペクトラム拡散

【ビット入替例】

- 0) $Q_1Q_2Q_3$: 0-1-3-6-5-2-4-
- 1) $Q_1Q_3Q_2$: 0-1-5-6-3-4-2-
- 2) $Q_2Q_1Q_3$: 0-2-3-5-6-1-4-
- 3) $Q_2Q_3Q_1$: 0-4-5-3-6-1-2-
- 4) $Q_3Q_1Q_2$: 0-2-6-5-3-4-1-
- 5) $Q_3Q_2Q_1$: 0-4-6-3-5-2-1-



ビット操作回路ブロック図



出力電圧リップル

(1) 降圧形電源のリニア変調方式

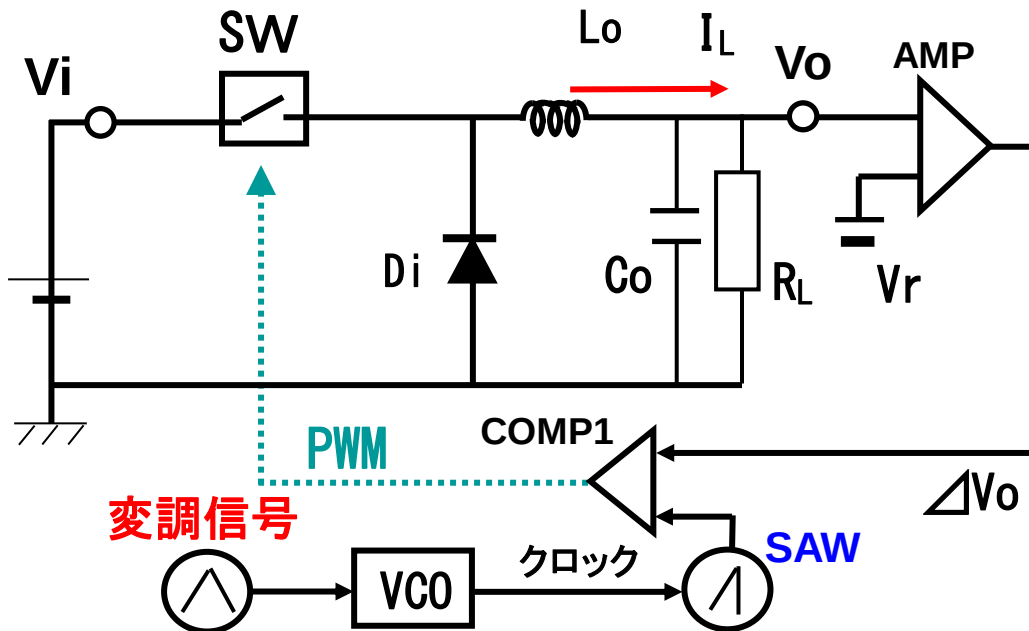
(A) 回路構成・動作原理

＊ 構成: クロック発振器として、電圧制御発振器VCOを使用

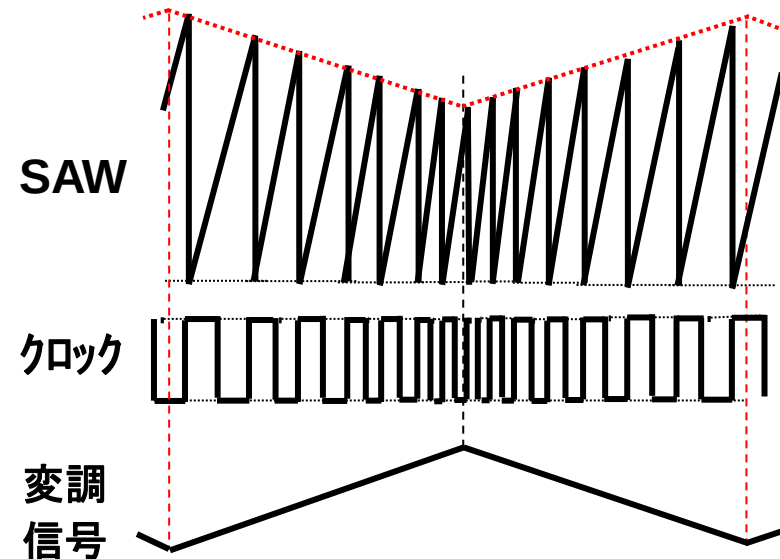
低周波の三角波信号で連続的に周波数変調

＊ 動作: VCO出力信号は、基本周波数を中心に、上下に比例的に変調

鋸歯状信号で包絡線で、周波数変化を確認。逆三角形状に変化



リニア変調方式の構成



タイミング・チャート

(B) シミュレーション結果1

* 条件: $V_i=12\text{V}$, $V_o=5.0\text{V}$, $I_o=0.5\text{A}$

$F_{ck}=200\text{ kHz}$

* 変調信号:

$V_m=\pm 0.5\text{V}$, $F_m=2\text{ kHz}$

* 結果:

- ・線スペクトラムは無くなり
高域では平坦に減衰

- ・ F_{ck} のスペクトラム・レベル

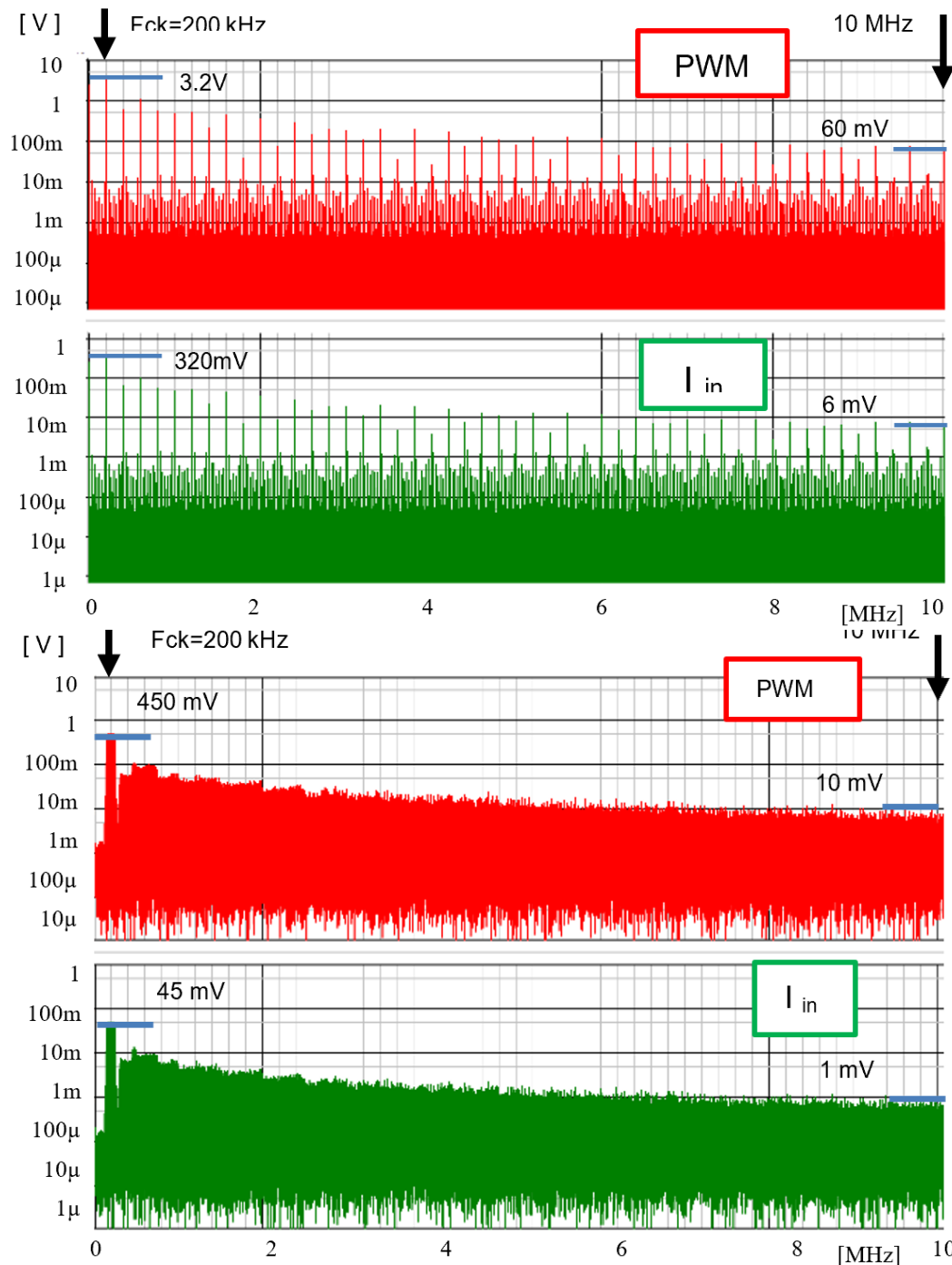
PWM: $3.2\text{V} \Rightarrow 0.45\text{mV}$ (-17dB)

I_{in} : $320\text{mV} \Rightarrow 45\text{mV}$ (-17dB)

- ・ 1 MHz のスペクトラム・レベル

PWM: $60\text{mV} \Rightarrow 10\text{mV}$ (-16dB)

I_{in} : $6\text{mV} \Rightarrow 1\text{mV}$ (-16dB)



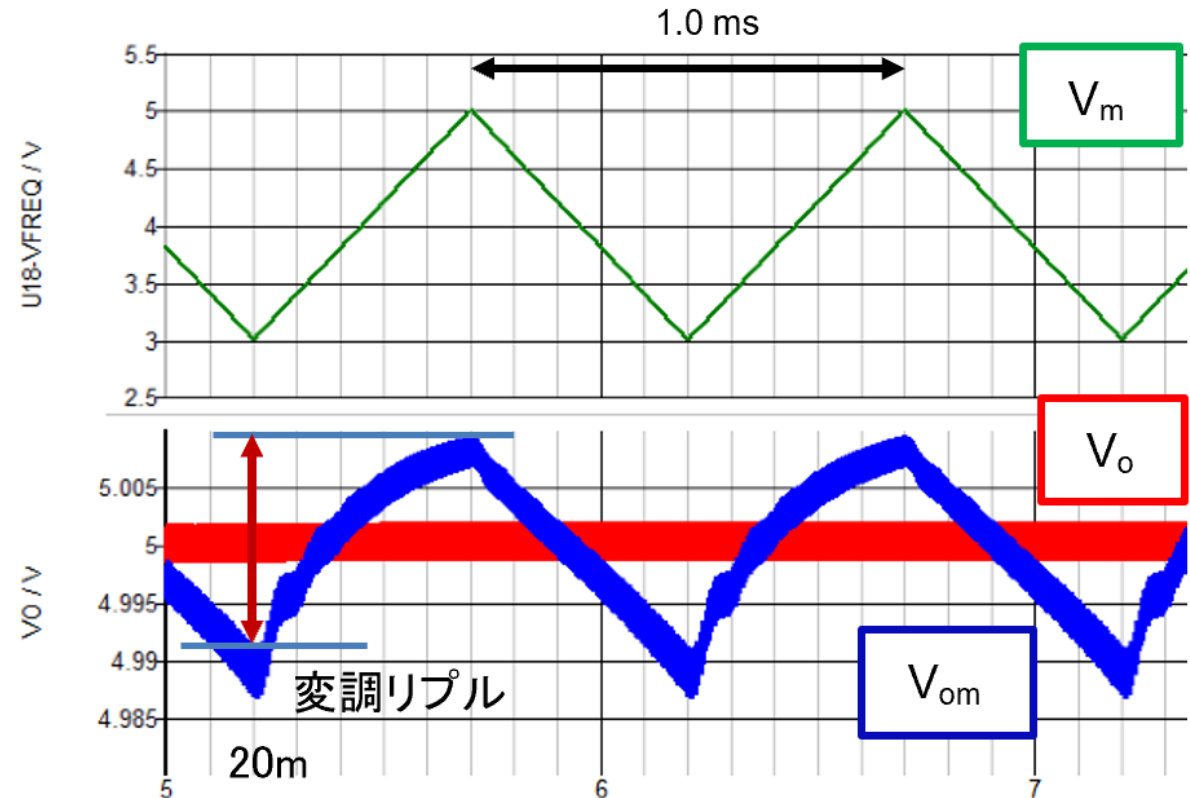
(B) シミュレーション結果2

* 結果: 出力電圧リプル

- ・ 定常時の出力リプル = 3 mV (赤信号)
- ・ 変調時の出力リプル = 20 mV (青信号)

変調信号に同期した大きなリプル発生

⇒ リプル補正方法
の検討必要



クロック変調 有無による出力電圧リプル

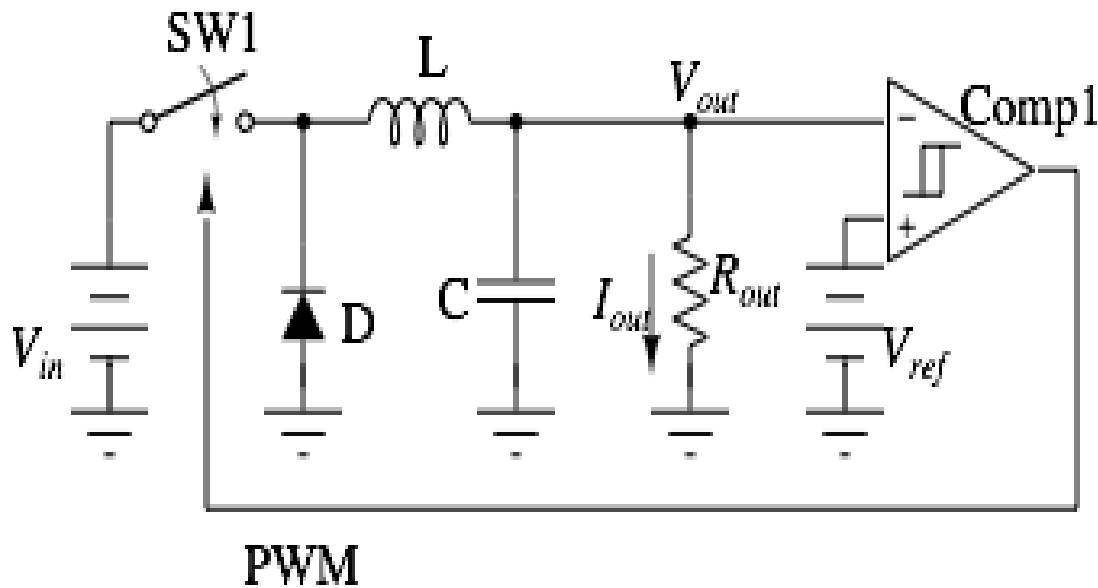
(1) リプル制御(ヒステリシス制御)電源への適用

(A) リプル制御電源の概要

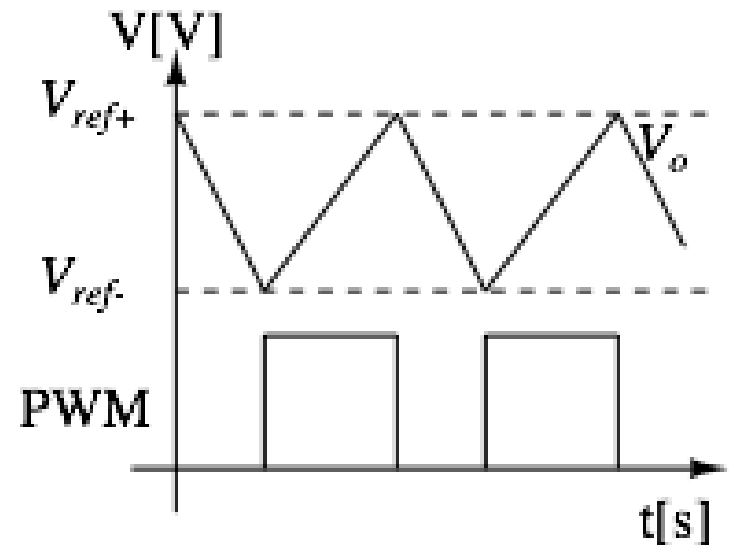
＊構成: 出力電圧を、直接 基準電圧と比較 $\Rightarrow$ SWを制御

＊動作: 上下2つの閾値の間で、出力電圧 V_o を挟み込んで制御

- ・出力電圧 V_o を 基準電圧 V_{ref} と直接 比較して、その出力でPWM発生
- ・ $V_o < V_{ref-} \Rightarrow \text{PWM} = \text{「H」} \Rightarrow \text{SW} = \text{ON} \Rightarrow \text{IL上昇} \Rightarrow V_o \text{ 上昇}$
- ・ $V_o > V_{ref+} \Rightarrow \text{PWM} = \text{「L」} \Rightarrow \text{SW} = \text{OFF} \Rightarrow \text{IL減少} \Rightarrow V_o \text{ 下降}$



従来リプル制御電源1の構成



タイミング・チャート

* 特徴:

【メリット】・クロックが無いので、高速制御が可能

- ・Vref 間の電位差で、動作速度・出力電圧リップルの調整可能
- ・常に安定であり、位相補償が不要

【デメリット】・出力電流に応じて、動作周波数が大きく変化

- ・適度な出力リップルあるいはヒステリシス付きコンパレータが必要
- ・ループゲインが小さい

* 対策1:直接的な対策

- ① ESRの大きいコンデンサの使用 ⇒ 低リップル仕様に反する
- ② ヒステリシス付きコンパレータの使用 ⇒ やや コストアップ

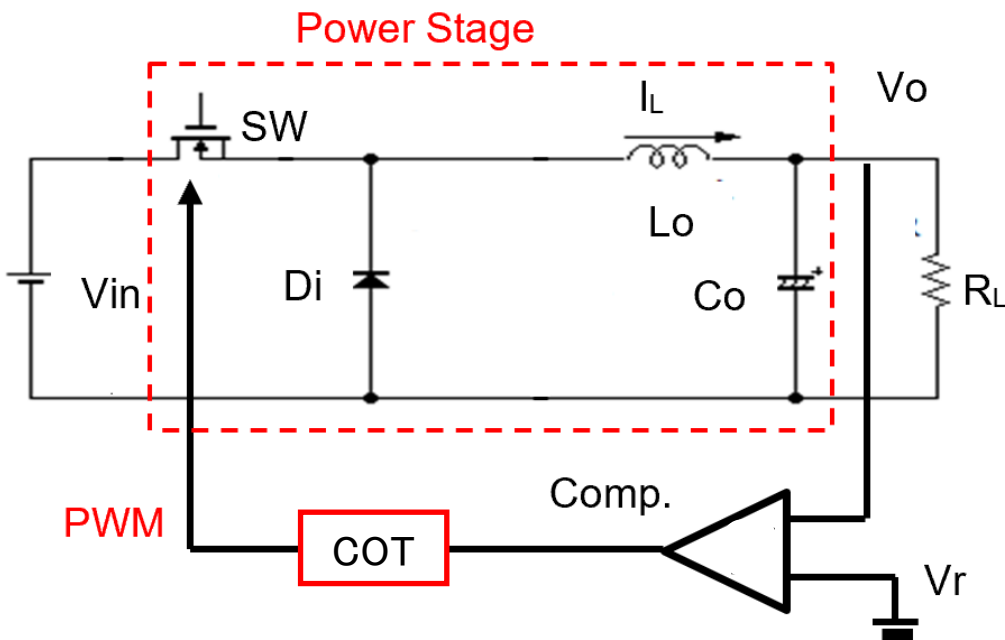
* 対策2:外部回路による方式変更

⇒ ① COT 方式、 ② リプル注入方式

◆ 片側閾値の制御方式も多い:この場合、SAW信号と V_o の比較方式

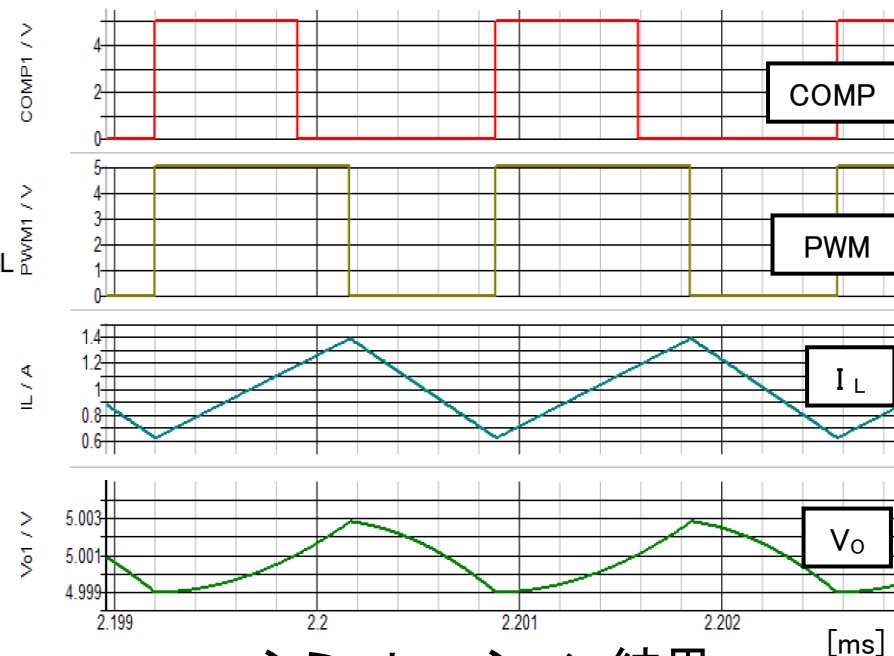
(B) COT方式リプル制御電源

- * 構成: コンパレータ出力の「H」端で、一定幅パルスが発生しスイッチを制御
あるいは、「L」端で一定幅パルスが発生
- * 特徴: $D=V_o/V_i$ の関係より、定常時の動作周期が一定
ただし、過度応答時は通常の高速動作
- * 動作周期 T_{op} : $T_{on}=D \cdot T_{op}$ より $T_{op} = T_{on}/D = (V_i/V_o) \cdot T_{on}$
 V_{in} の変化により、デューティが変化



COT方式リプル制御電源の構成

* $V_{in}=9.0V$, $V_o=5.0V$, $I_o=1.0A$, $T_{COT} \doteq 1\mu s$

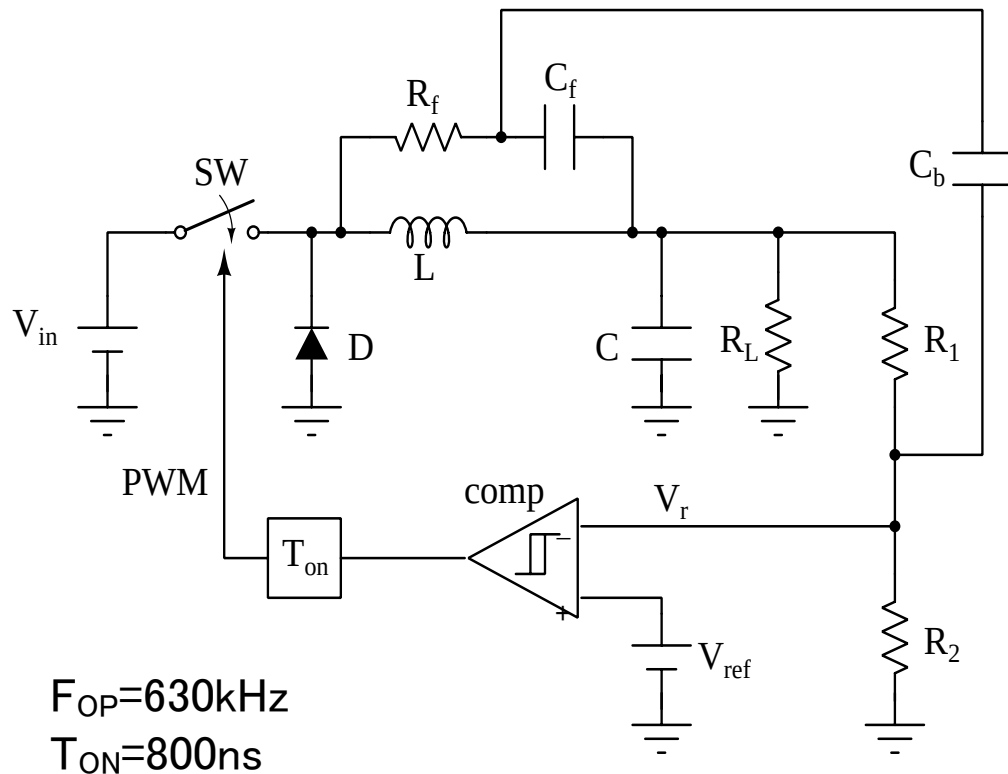


シミュレーション結果

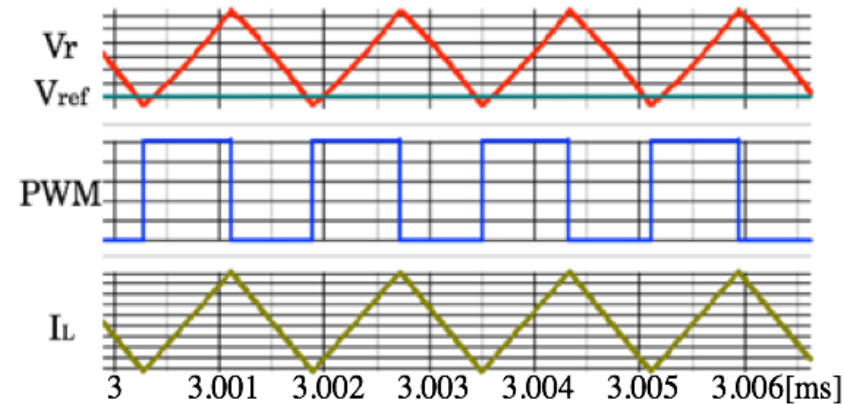
(C) リプル注入方式ヒステリシス制御電源

- * 構成: インダクタ電圧をCR積分したリプルを、基準電圧との比較部に注入
電流制御 $\Rightarrow$ 高速応答だが周波数不定 $\Rightarrow$ COT方式の導入

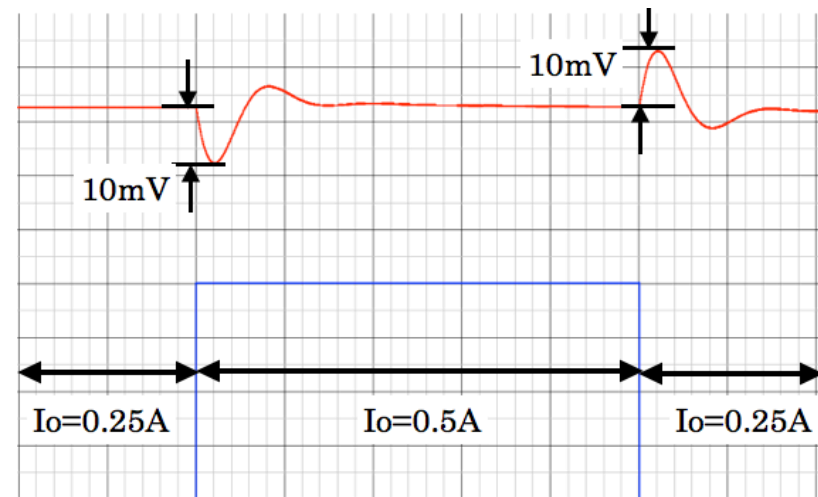
- * 特徴: 出力リプル不要。シュミット不要
リプル周波数 $\propto T_{ON} + \tau_{CR}$



リプル注入ヒステリシス制御電源の構成



タイミング・チャート



出力電圧リプル

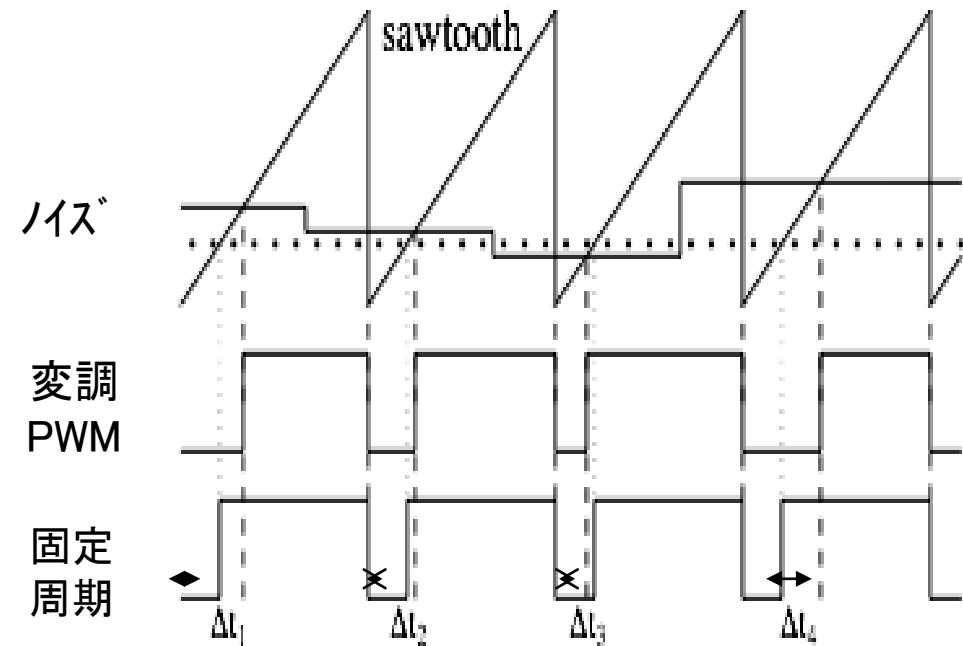
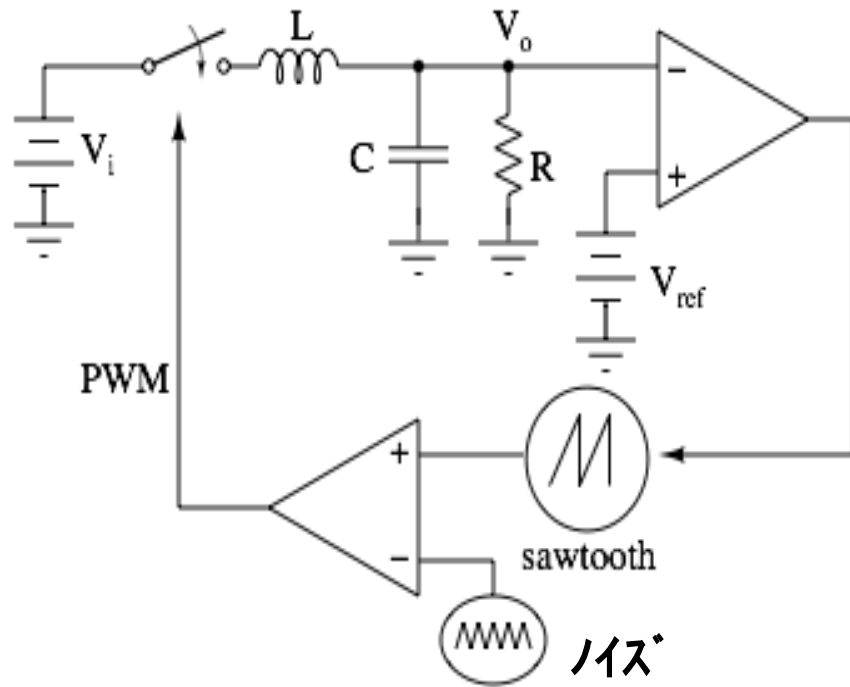
(D)EMI低減スペクトラム拡散

* 構成:コンパレータ出力パルスより、鋸歯状波を発生

アナログノイズと比較し、エッジをランダムに位相変調 $\Rightarrow$ 遅延発生

* 対策:シュミットレベルを削除し、シュミット相当分の遅延範囲でシフト

* 特徴:両エッジにも変調可能

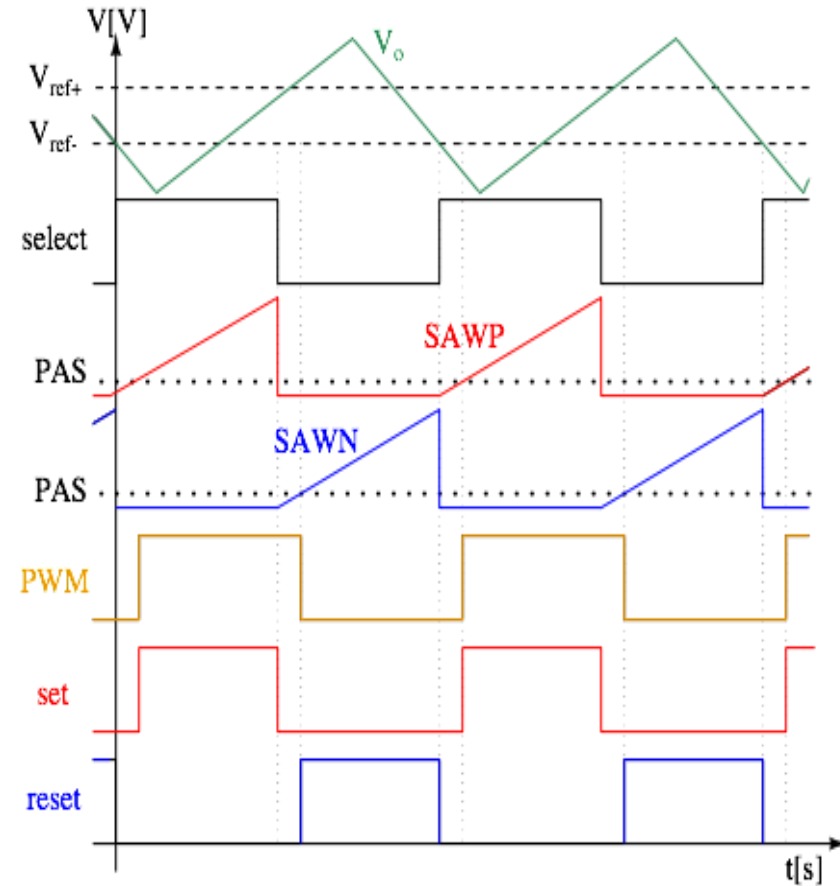
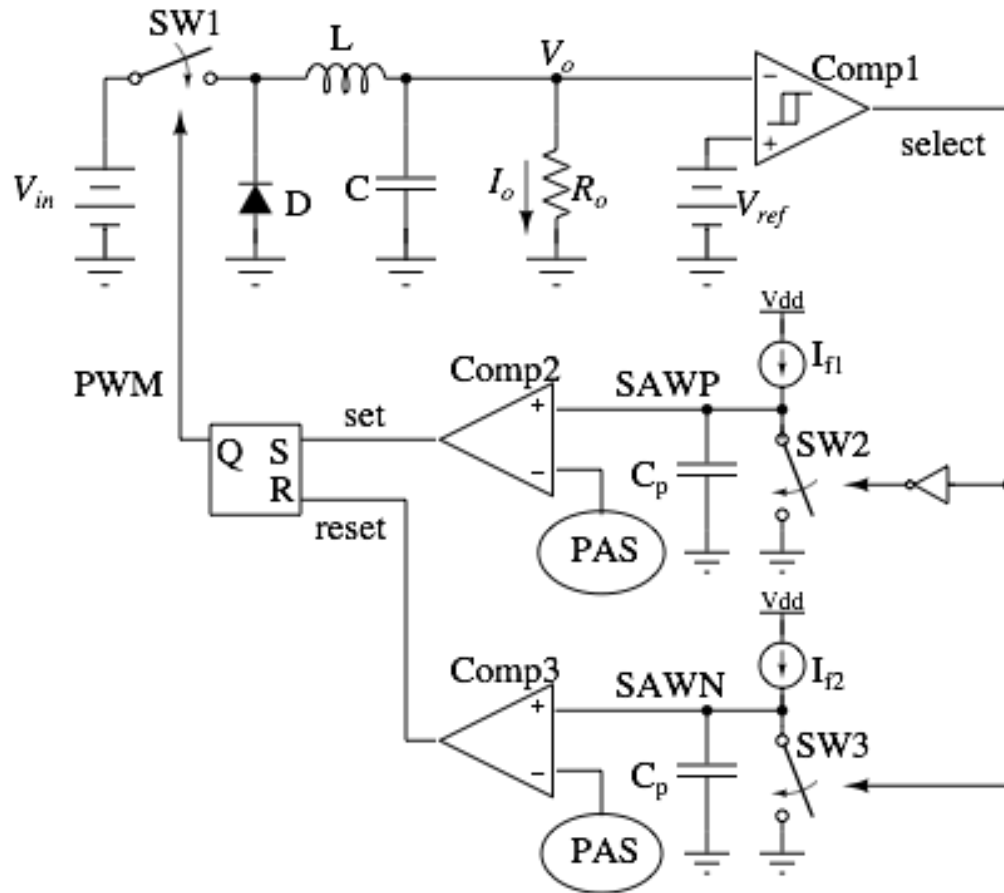


EMI低減電源の構成(単エッジ変調)

タイミング・チャート

●シミュレーション回路(ダブルエッジの位相変調方式)

* 構成: コンパレータ出力パルスの両エッジを、アナログノイズでランダム変調
変調出力でフリップ・フロップを駆動



EMI低減電源の構成(両エッジ変調)

タイミング・チャート

● シミュレーション結果

* 回路条件:

$V_i=10\text{V}$ 、 $V_o=5.0\text{V}$ 、 $I_o=0.5\text{A}$

$L=10\mu\text{H}$ 、 $C=470\mu\text{F}$

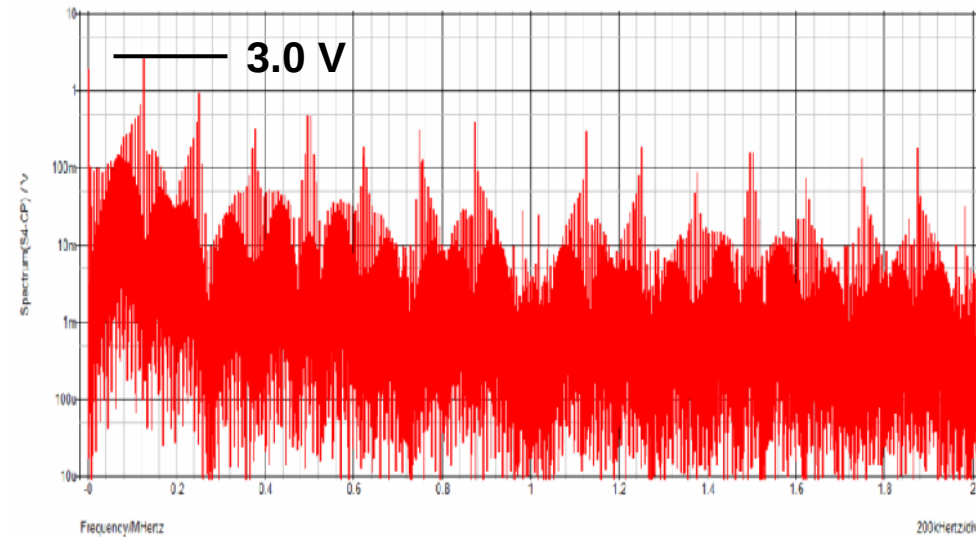
$F_{op}=185\text{ kHz}$

* スペクトラム拡散結果:

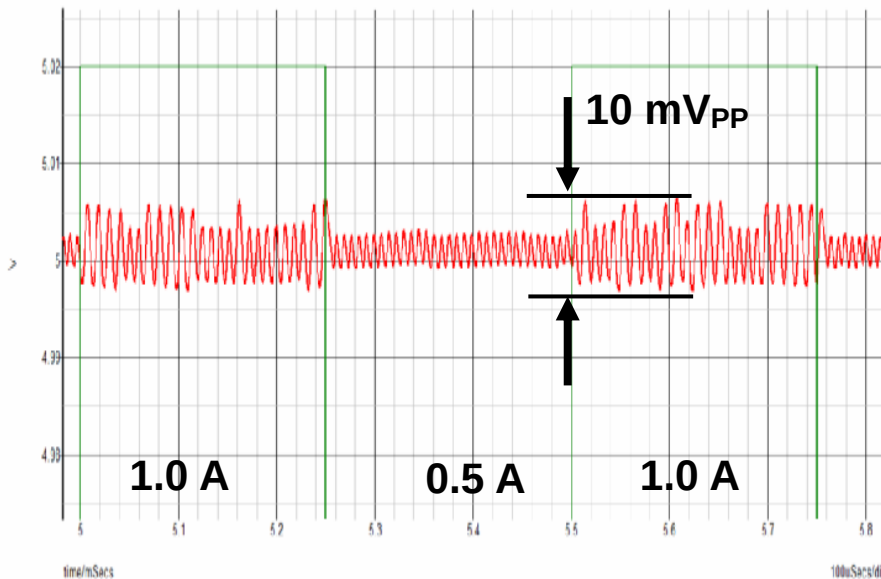
-0.7V (-12 dB) @ 185kHz

* 出力電圧リップル

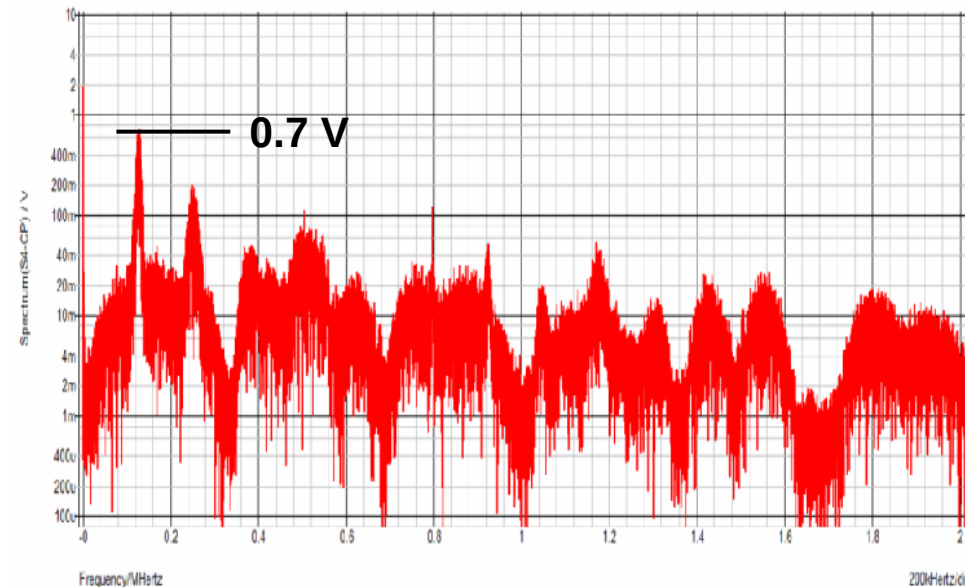
$\Delta V=10\text{ mV}_{PP}$ @ $\Delta I_o=0.5\text{ A}$



リップル制御電源のスペクトラム(従来)



リップル制御電源の出力リップル



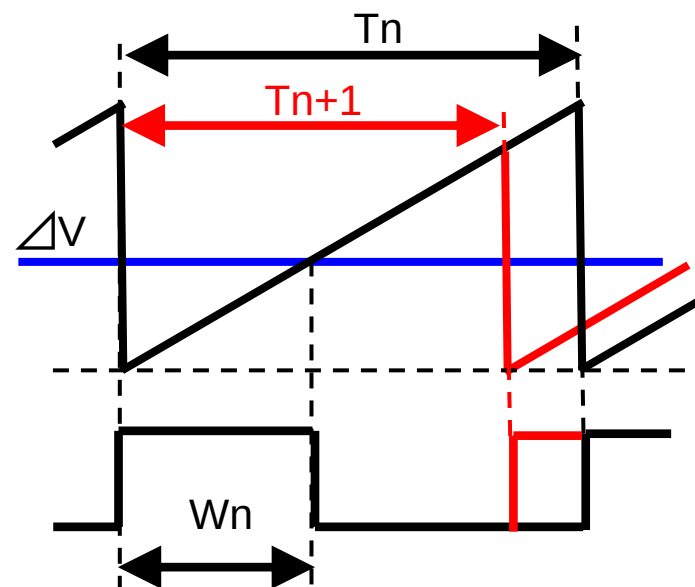
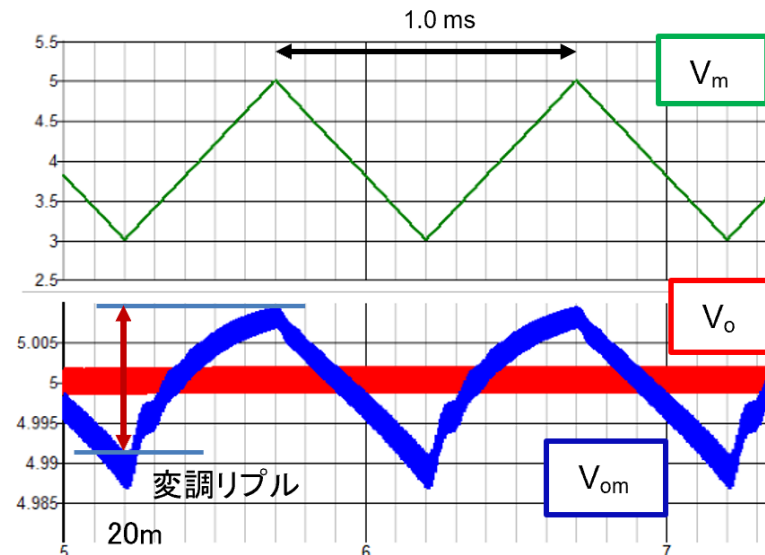
リップル制御電源のスペクトラム(EMI拡散)

3-4 リニア変調時の出力リップル改善技術

2-19

(A) リニア変調時のリップル変化検討

- * 変調三角波 V_m に同期してリップル変化
- * V_m 上昇時のPWMデューティ検討
 - ・ $t=n$ 時の周期を T_n とし、このときのデューティを D_n とすると
 - ・ 次の周期 $t=n+1$ では、周波数が少し上昇して、周期 T_{n+1} は短くなる
 - ・ しかし、ループ特性は追従できず誤差出力電圧 ΔV は変化せずPWMのパルス幅 W_n もほぼ同じ
 - ・ 結果、デューティ D_{n+1} は小さくなる
- * スwitchのON/OFF および インダクタ電流 I_L の増減を考える
 - ・ ON時間は等しいが、OFF時間は短くなり、結果的に平均電流は微増する
 - ・ 故に 出力電圧は「微増」し、リップルは上昇



(B) 変調時のデューティ変化と補正検討

* 周期変化: $T_{n+1} = T_n - \Delta T$ とすると

・デューティ変化: PWMパルス幅を W とすると

$$D_{n+1} = W_n / T_{n+1} = W_n / (T_n - \Delta T)$$

$$= (W_n / T_n) / (1 - \alpha) \quad \text{ただし } \alpha = \Delta T / T_n$$

$$\therefore D_{n+1} = D_n / (1 - \alpha) \doteq D_n \cdot (1 + \alpha)$$

・よって リプルは ($\alpha = \Delta T / T_n$) で微増

(C) リプル補正方式

* デューティ変化の補正

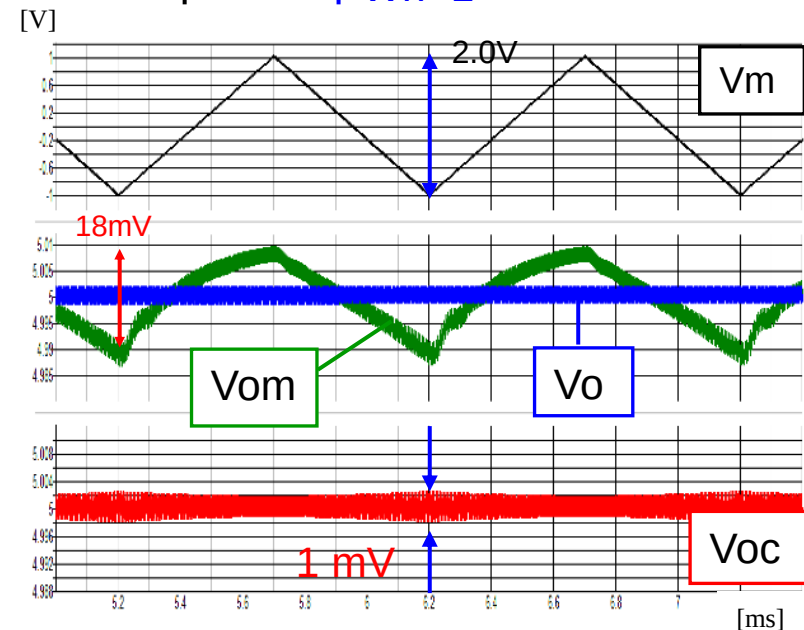
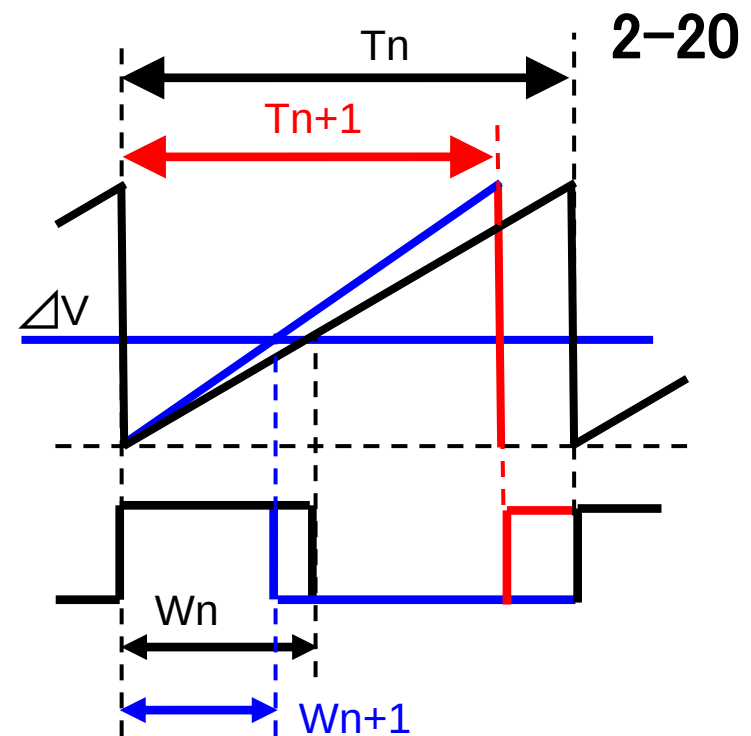
・鋸歯状波SAWの傾きを適切にUPさせ
等価的に デューティ変化をキャンセル

・ $D_{n+1} = W_{n+1} / T_{n+1} = W_n / T_n$ とすれば良い
よって $W_{n+1} = W_n \cdot (T_{n+1} / T_n)$

・周期変化率は、変調信号の傾きに等しい

◆ 補正結果

ほぼ、無変調時と同等レベル(1mV)に改善



4-1 パルスコーディング制御

(1) パルスコーディング技術とは

* 概要: パラメータの異なる多種のパルスを、出力信号により切換えて出力

・パラメータ: パルス幅、パルス位相(位置)、パルス周期 等

* 単パルスコーディング技術

1) パルス幅コーディング : PWC (Pulse Width Coding)

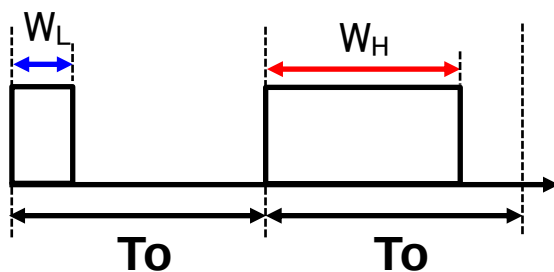
2) パルス位相(位置)コーディング : PPC (Pulse Phase/Position Coding)

3) パルス周期コーディング : PCC (Pulse Cycle Coding)

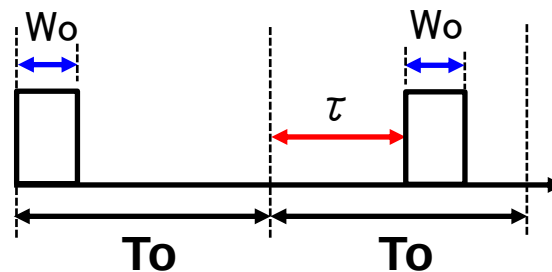
* 複パルスコーディング技術

1) パルス幅位相コーディング : PWPC (Pulse Width Phase Coding)

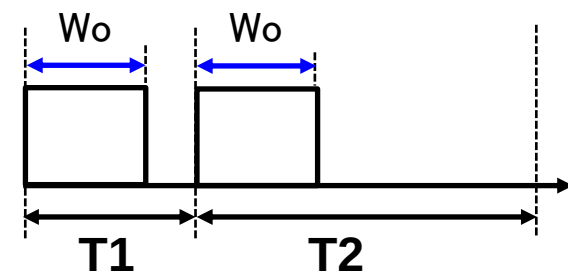
2) パルス周期幅コーディング : PWCC (Pulse Width Cycle Coding) 等



(a) PWC



(b) PPC



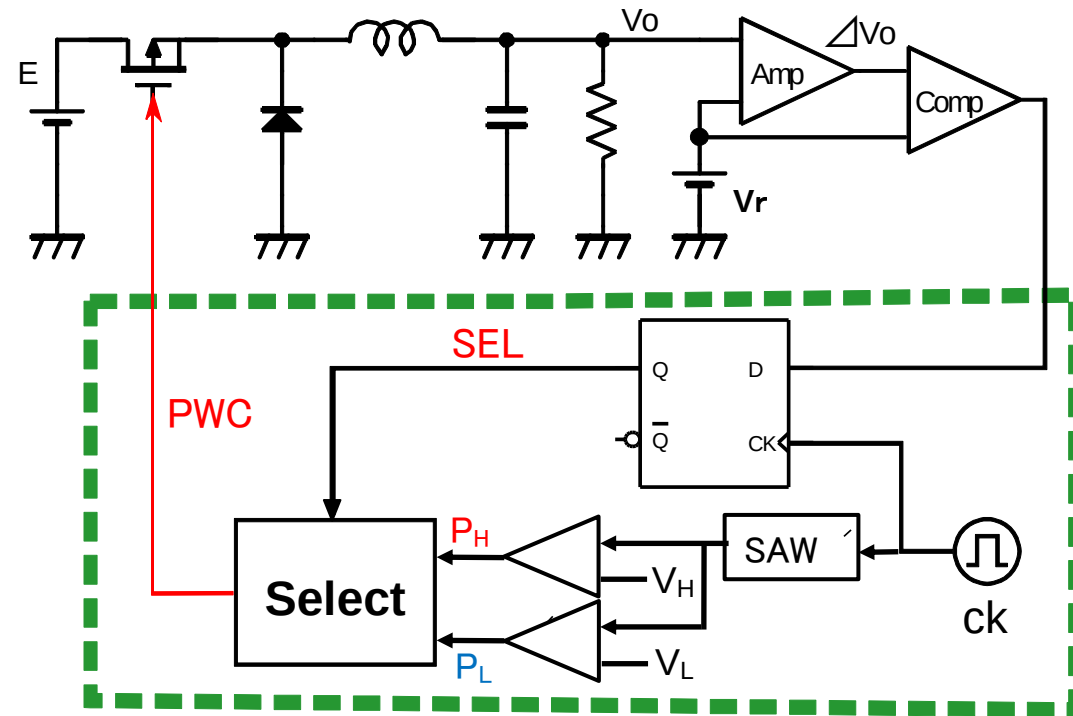
(c) PCC

各種 単パルスコーディング波形

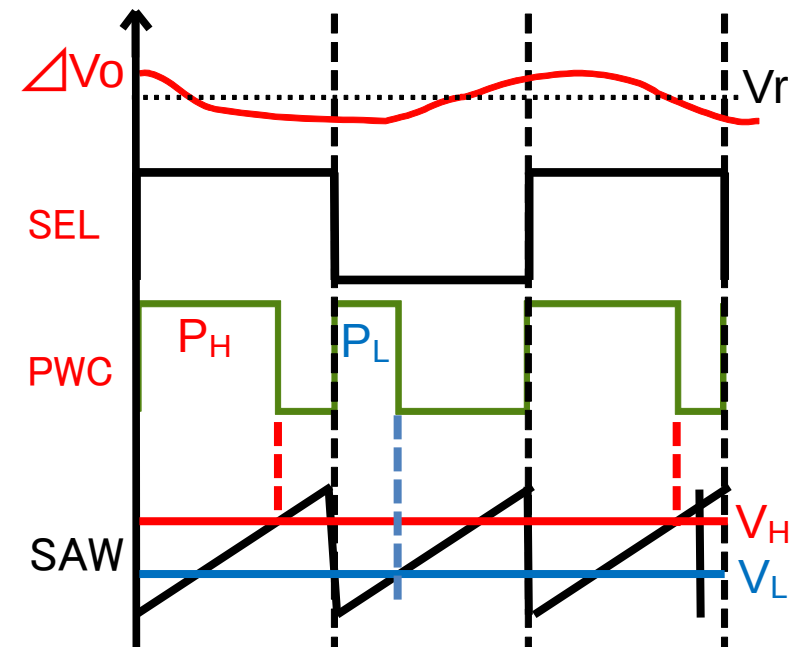
(2) コーディング・パルス発生回路

* パルス発生方法：鋸歯状波と基準電圧の比較

- ・PWC制御：一定周期のクロックで鋸歯状波を発生し、2値基準電圧と比較
- ・PCC制御：周期終了時のSEL信号で、次の基準電圧を設定し周期を決定



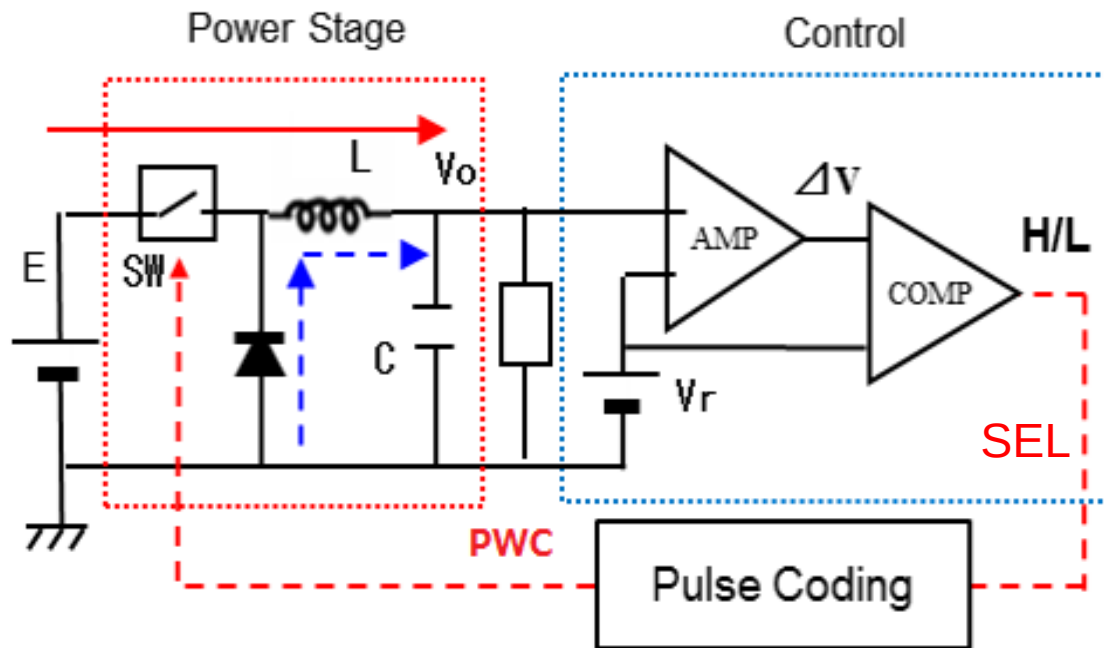
PWCパルス発生回路



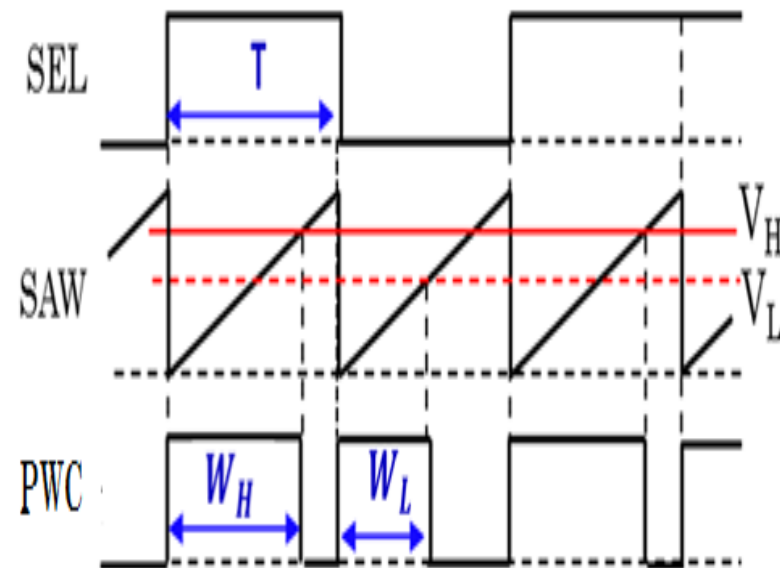
PWCパルス波形図

(3) パルスコーディング制御電源

- * 構成: PWM信号の代わりに、コンパレータで2値の制御信号出力 (**SEL信号**)
SEL信号により、コーディングパルスを高速で切換出力してSWを駆動
- * 条件: パルスのデューティDは、次式の制御可能な関係であること
 $D_H > D_O > D_L$ ただし $D_O \doteq V_O/V_i$
- * 特徴: 高周波でパルス出力 (過度応答特性)
パラメータ条件で、制御ゲインが変化



パルスコーディング技術適用降圧形電源



SW駆動パルス例

(4) PWC制御電源のシミュレーション結果(降圧形)

【条件】

- ・回路条件: $V_i = 10 \text{ V}$ 、 $V_o = 5.0 \text{ V}$ 、 $F_{ck} = 500 \text{ kHz}$
- ・パルス条件: $T_o = 2.0 \text{ us}$ 、 $W_H = 1.6 \text{ us}$ 、 $W_L = 0.3 \text{ us}$
- ・ノッチ周波数: $F_N = N/(W_H - W_L) = N/(1.6 - 0.3) \text{ us} = 0.77 \cdot N \text{ MHz}$

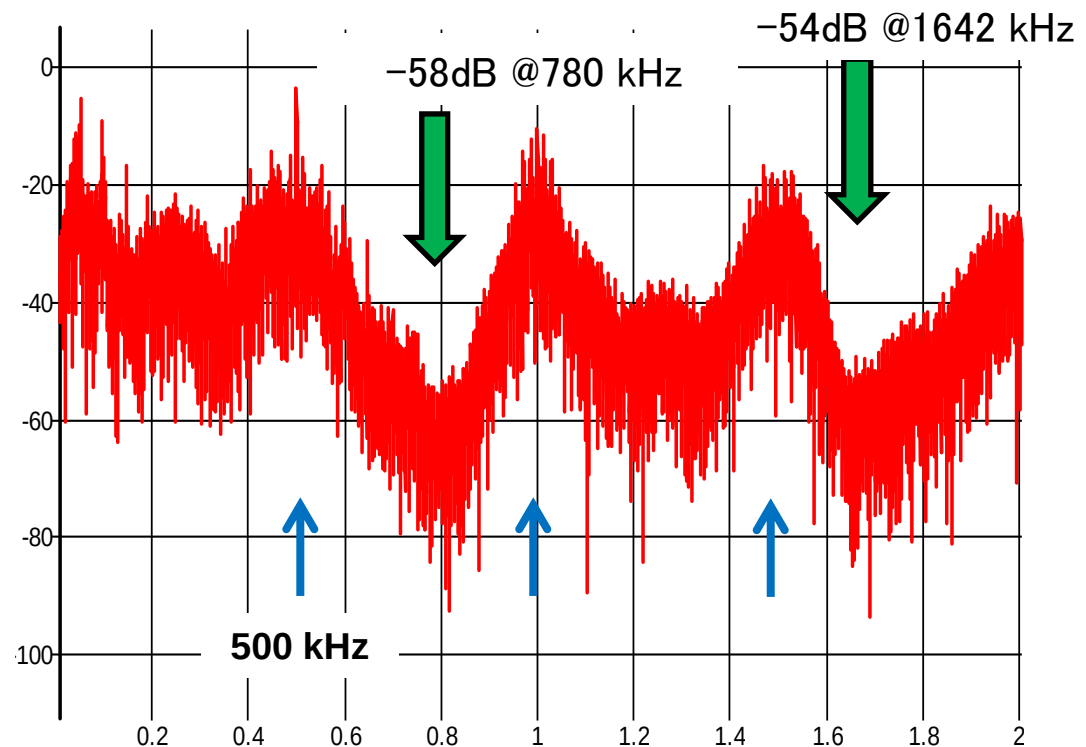
【結果】スペクトラム拡散1

・実測ノッチ周波数

$F_N = 0.78, 1.6 \text{ MHz}$

[クロックと第1高調波の間]

(第2ノッチは、クロックと
重なり、判別困難)



PWC制御電源のスペクトラム拡散1

* シミュレーション結果2 (EMC拡散付)

【条件】

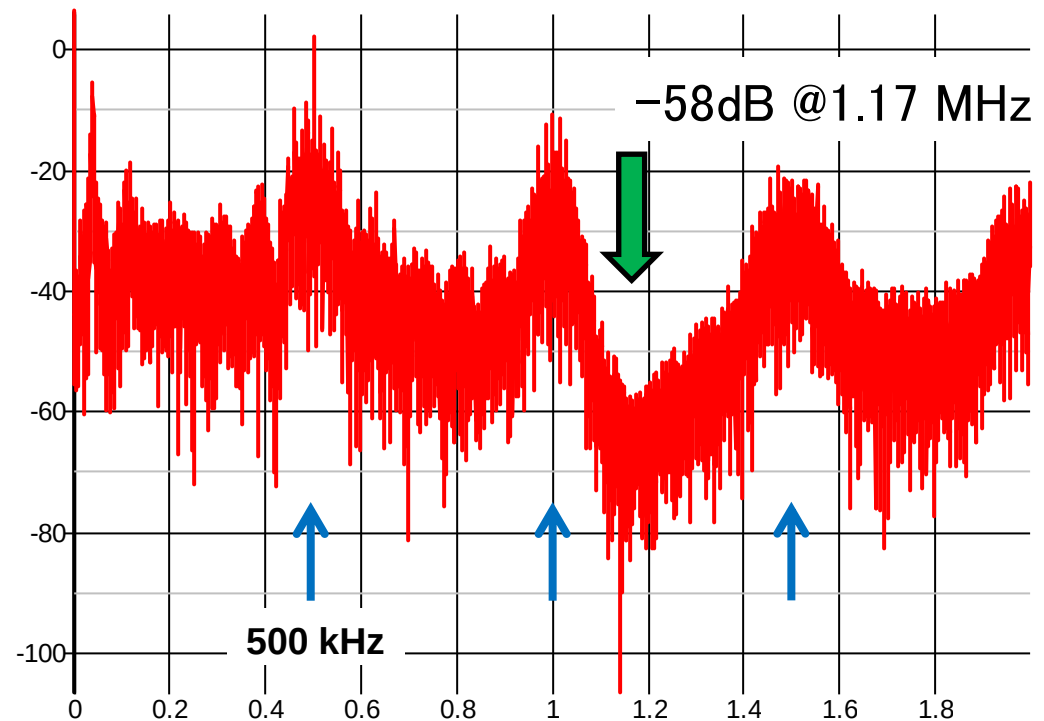
- ・回路条件: $V_o = 5.0 \text{ V}$ 、 $F_{ck} = 500 \text{ kHz}$
- ・パルス条件: $T_o = 2.0 \text{ us}$ 、 $W_H = 1.23 \text{ us}$ 、 $W_L = 0.37 \text{ us}$
- ・ノッチ周波数: $F_N = N / (W_H - W_L) = N / 0.86 \text{ us} = 1.16 \cdot N \text{ MHz}$

【結果】スペクトラム拡散2

・実測ノッチ周波数:

$$F_N = 1.17 \text{ MHz}$$

[第1・第2高調波の間]



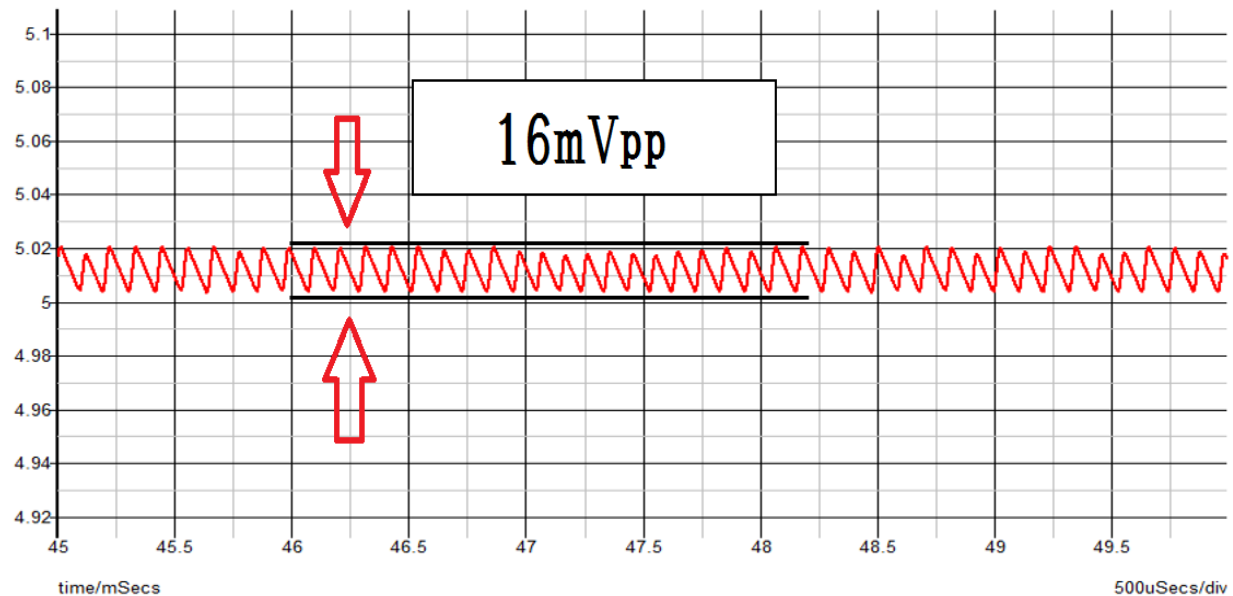
PWC制御電源のスペクトラム2

【結果】 出力電圧リプル

・定常リプル: $\Delta V_o = 16 \text{ mVpp}$ @ $V_o = 5.0 \text{ V}$ 、 $I_o = 0.25 \text{ A}$

* シミュレーション結果としては、リプルはやや大きい

クロック周波数 = 500kHz と通常の2.5倍と低いと思われる



PWC制御電源の出力電圧リプル

4-2 ノッチ周波数の解析

(1) PWCパルスの解析

- ・パルスコーディング方式では、2種のパルスがランダムに発生
- ・ $(W_H + W_L)$ を一周期としてフーリエ変換

* パルス列のフーリエ変換:

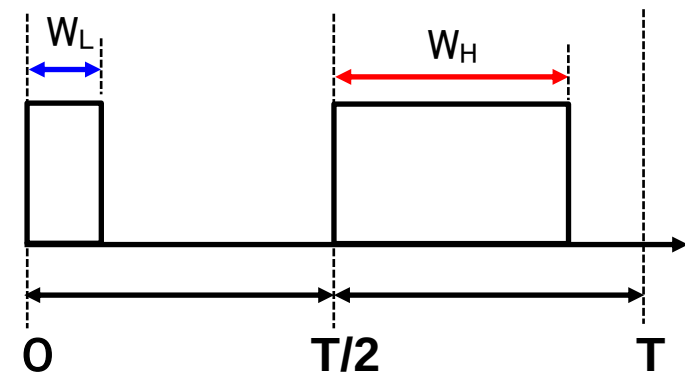
- ・右図の2パルスを一周期として解析
- ・定義式より

$$f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4-1)$$

$$= \int_0^{W_L} e^{-j\omega t} dt + \int_{T/2}^{W_H+T/2} e^{-j\omega t} dt \quad (4-2)$$

* 展開して 絶対値をとる

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



PWCパルス列の配置

$$\text{よって } |f(\omega)| = \frac{1}{\omega} \sqrt{2 - 2\cos(\omega W_H - \omega W_L)} \quad (4-10)$$

$$\text{2倍角の定理より } \cos(2\theta) = \cos^2\theta - \sin^2\theta = 1 - 2\sin^2\theta$$

$$\therefore |f(\omega)| = \frac{1}{\omega} \sqrt{4\sin^2\{(\omega W_H - \omega W_L)/2\}} \quad (4-11)$$

$$= \frac{(W_H - W_L) \left| \sin\left\{\frac{\omega}{2}(W_H - W_L)\right\} \right|}{\frac{\omega}{2}(W_H - W_L)} \quad (4-12)$$

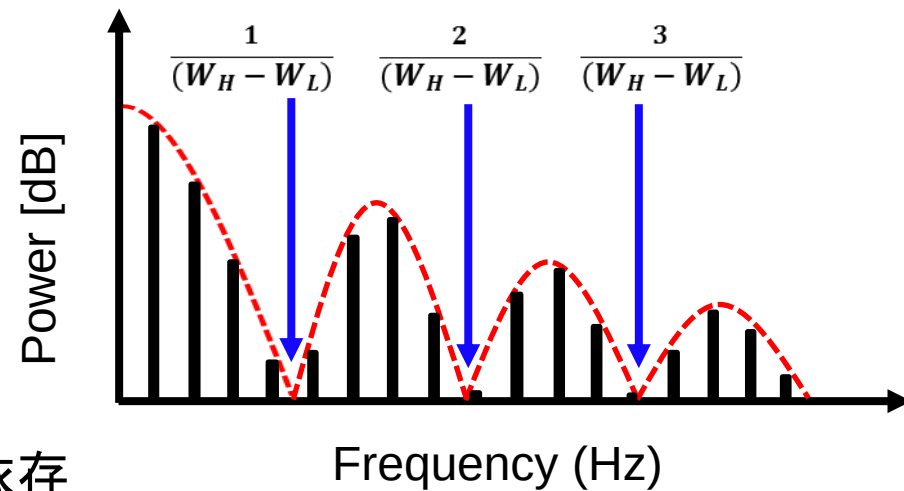
$$= (W_H - W_L) \left| \text{sinc}\left\{\frac{\omega}{2}(W_H - W_L)\right\} \right| = 0 \quad (4-13)$$

$$\text{よって } \left| \frac{\omega}{2}(W_H - W_L) \right| = n\pi \quad \text{より}$$

$$\underline{\underline{f = n / (W_H - W_L) \text{ にノッチ発生}}}$$

◆ ノッチ周波数

- ・コーディング・パルスの時間差のみ に依存
(クロック周波数には 無関係)

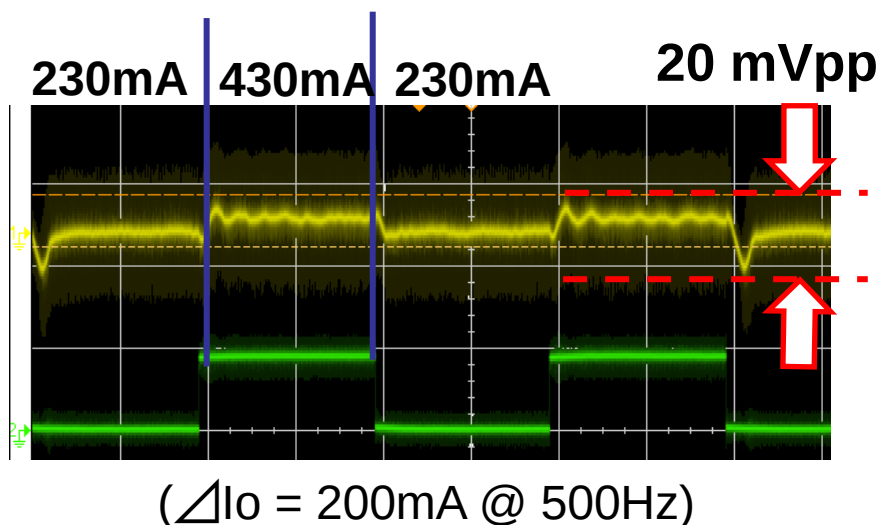


(1) PWC方式降圧形電源の実装結果

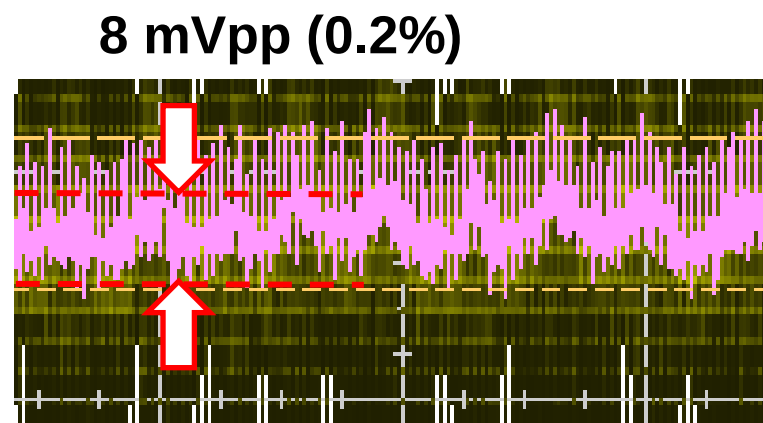
* 回路条件: $V_i=10\text{ V}$, $V_o=5.0\text{ V}$, $I_o=330\text{ mA}$, $L=100\text{ }\mu\text{H}$, $C=610\text{ }\mu\text{F}$
• $F_{ck}=600\text{ kHz}$, $T=1.67\text{ }\mu\text{s}$, $W_H=1.46\text{ }\mu\text{s}$, $W_L=0.40\text{ }\mu\text{s}$

* 出力電圧リプル:

- ・定常リプル: $\Delta V_o = 8\text{ mV}_{pp}$ @ $I_o = 530\text{ mA}$ (V_o の0.2 %)
(GNDラインによるスパイクノイズを待機制限)
- ・過渡応答 : シュート = $\pm 10\text{ mV}$ @ $\Delta I_o = 200\text{ mA}$ (位相遅れ補償無し)



出力電圧リプル



(2.0MHzで帯域制限)

拡大リプル波形

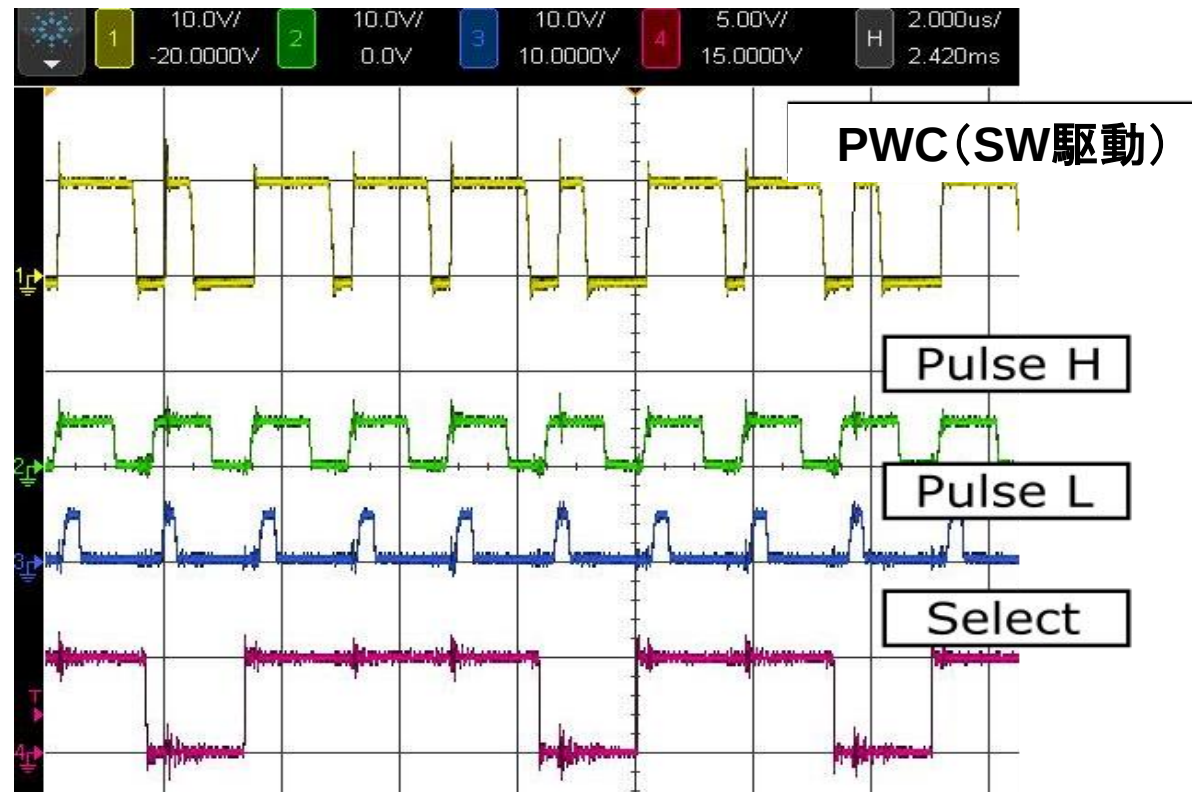
* 各部の実測波形:

【条件】・ $V_i=10\text{ V}$, $V_o=5.0\text{ V}$, $I_o=330\text{ mA}$, $L=100\text{ }\mu\text{H}$, $C=610\text{ }\mu\text{F}$

・ $F_{ck}=600\text{ kHz}$, $T=1.67\text{ }\mu\text{s}$, $W_H=1.46\text{ }\mu\text{s}$, $W_L=0.40\text{ }\mu\text{s}$

【結果】実測波形

- ・SEL信号により、SW駆動パルスPWCのパルス幅が切替わる
- ・ $PWC=P_H$ @SEL=H
 $PWC=P_L$ @SEL=L



PWC降圧形電源の実測波形

* スペクトラム1:

【条件】

・ $F_{ck}=600\text{ kHz}$, $T=1.67\text{ }\mu\text{s}$, $W_H=1.46\text{ }\mu\text{s}$, $W_L=0.40\text{ }\mu\text{s}$

【結果】ノッチ周波数

・理論値:

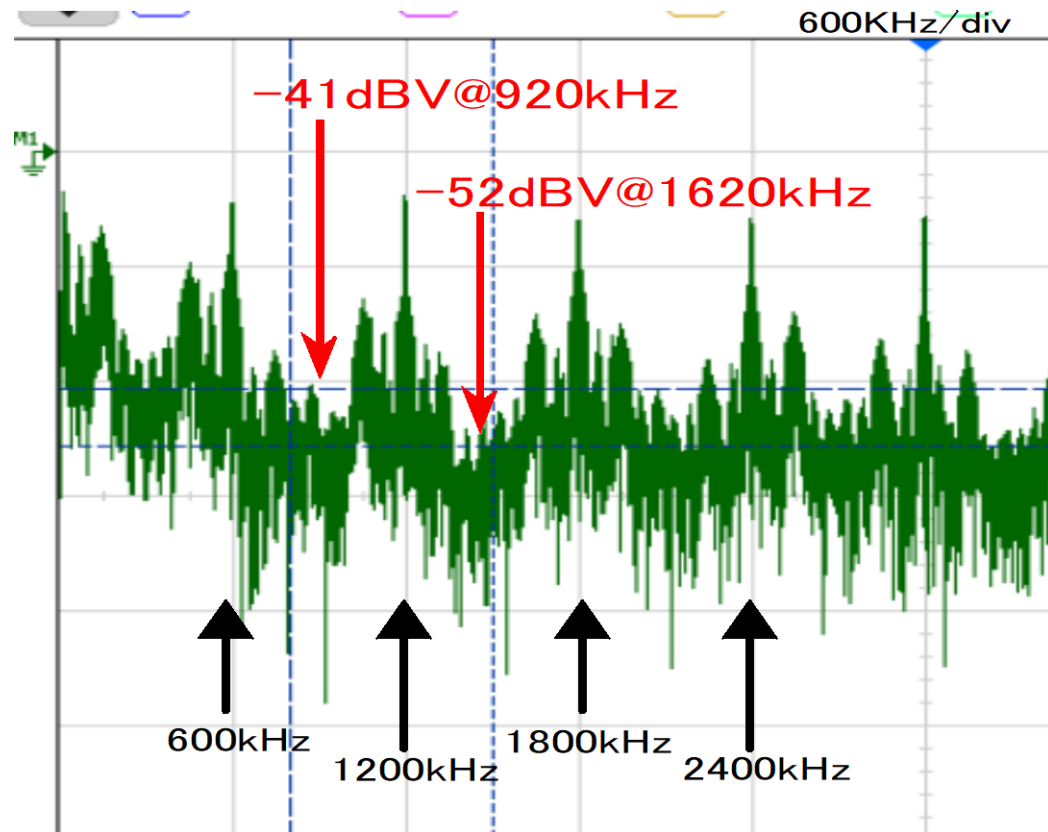
$$F_{NO} = N / 1.06\text{ }\mu\text{s} = 0.94 \cdot N\text{ MHz}$$

0.943 M, 1.89 M, 2.83 MHz

・実測値

$F_N = 0.92\text{ M}$, $1.42\text{ MHz} (?)$

● ほぼ 理論通りにノッチ発生



PWC降圧形電源のスペクトラム1

* スペクトラム2:

【条件】

・F_{ck}=600 kHz, T=1.67 μ s, W_H=1.32 μ s, W_L=0.00 μ s

(特殊パルス条件での確認)

【結果】ノッチ周波数

・理論値:

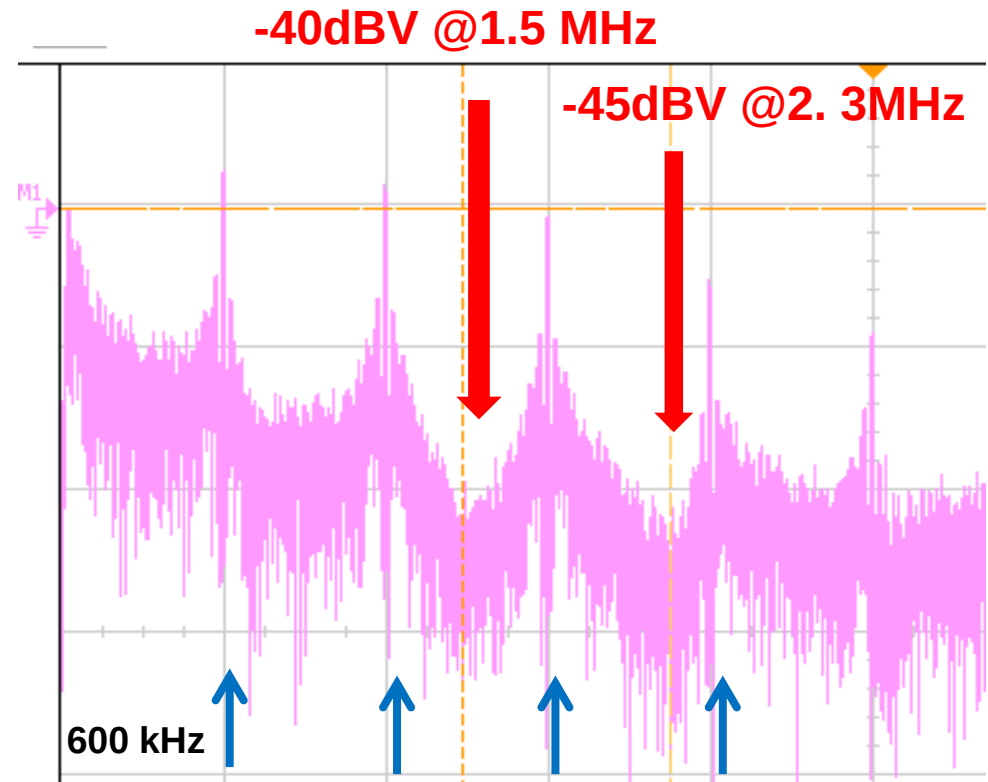
$$F_{NO} = N / 1.32 \mu s = 0.76 \cdot N \text{ MHz}$$

0.76 M, 1.52 M, 2.26 MHz

・実測値

$$F_N = 1.5 \text{ M}, 2.3 \text{ MHz}$$

●第1ノッチは 確認できず



PWC降圧形電源のスペクトラム2

(2) PWC方式昇圧形電源の実装

【条件1】

・ $F = 160 \text{ kHz}$, $T \doteq 6.2 \text{ us}$, $W_H = 5.0 \text{ us}$, $W_L = 1.3 \text{ us}$

【結果1】ノッチ周波数:

・理論値

$$F_{NO} = N / 3.7 \mu s = 270 \cdot N \text{ kHz}$$

・実測値

$$F_N = 274, 540 \text{ kHz}$$

★ノッチは、クロックと
第1高調波の間に発生



PWC昇圧形電源のスペクトラム1

【条件2】

・ $F = 160 \text{ kHz}$, $T \doteq 6.2 \text{ us}$, $W_H = 4.0 \text{ us}$, $W_L = 1.1 \text{ us}$

【結果2】ノッチ周波数:

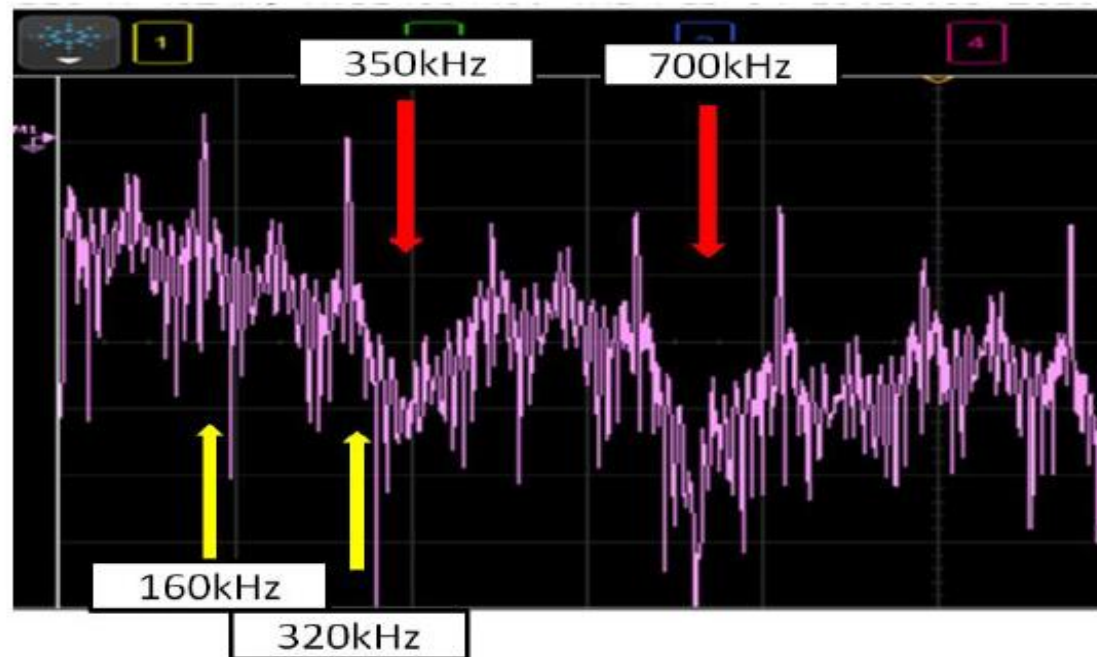
・理論値

$$F_{NO} = N / 2.9 \text{ us} = 345 \cdot N \text{ kHz}$$

・実測値

$F_N = 350, 700 \text{ kHz}$

★ノッチは、
第1と第2高調波の間に発生



PWC昇圧形電源のスペクトラム2

【条件3】 高周波化

・ $F = 420 \text{ kHz}$, $T \doteq 2.38 \text{ us}$, $W_H = 2.0 \text{ us}$, $W_L = 1.0 \text{ us}$

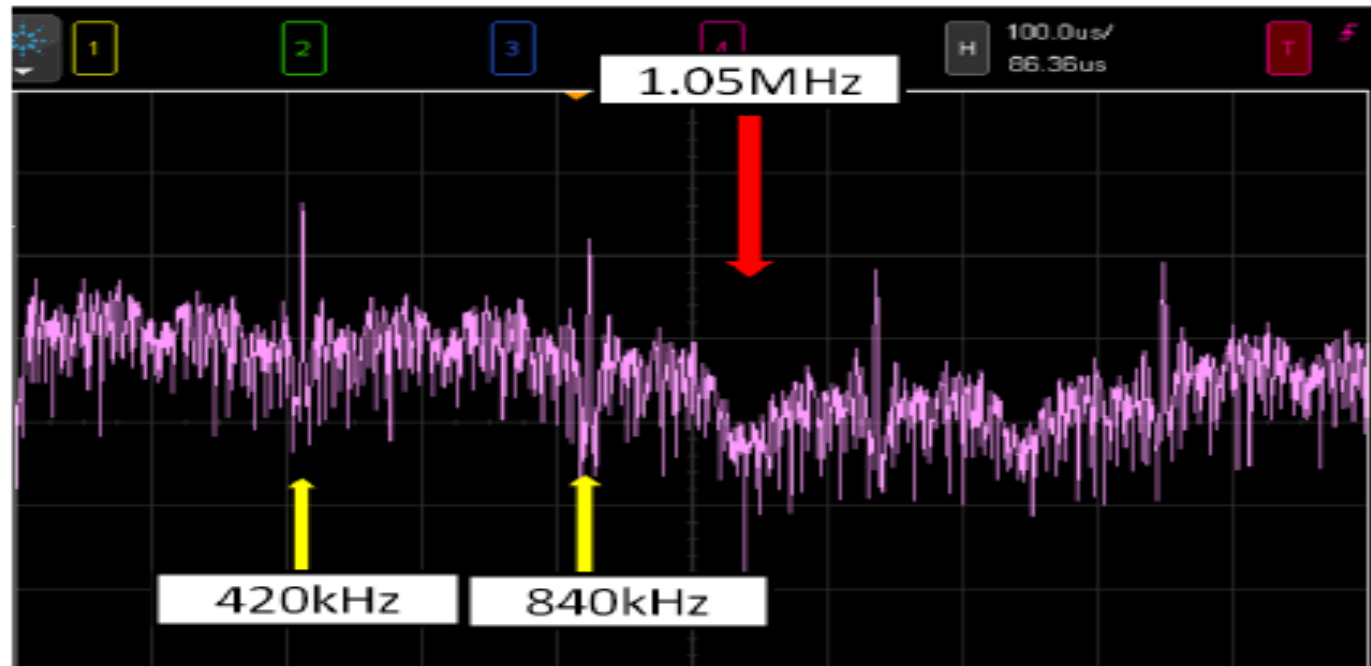
【結果3】 ノッチ周波数:

・理論値

$$F_{NO} = N / 1.0 \text{ us} = 1.0 \cdot N \text{ MHz}$$

・実測値

$F_N = 1.05 \text{ MHz} \Rightarrow \text{AMラジオ帯域に発生}$



PWC昇圧形電源のスペクトラム3

4-4 自動ノッチ発生方式

(1) 受信周波数＝ノッチ周波数 の自動発生課題

* 概要：微弱受信信号 (F_{in} 、 T_{in}) の周波数付近では、電源ノイズ は NG
よって 入力信号 $\Rightarrow$ クロック発生 $\Rightarrow$ コーディング・パルス発生

* 課題1：ノッチ周波数を、クロック高調波の中心に発生

◆ 入力周波数に同期する クロックパルスの発生

$$F_{in} = \{nF_{ck} + (n+1)F_{ck}\}/2 = (n+0.5)F_{ck} \quad \therefore T_{ck} = (n+0.5)T_N \quad (4-1)$$

課題2：入力周波数(周期)に一致する、コーディング・パルス幅の自動発生

◆ 入力周波数に連動する コーディングパルスの発生

$$F_{in} = F_N = M/(W_H - W_L) \quad \therefore T_{in} = T_N = (W_H - W_L)/M \quad (4-2)$$

課題3：電源の制御条件より、制御平均のPWMパルス幅の自動検出

◆ 平均PWMパルス幅の検出 (平均デューティの検出)

$$T_{PWM} = D_o \cdot T_{ck} = (V_o/V_{in}) \cdot T_{ck} \quad (4-3)$$

課題4：制御ダイナミックレンジの確保

◆ 平均PWMパルス幅 $\div$ コーディング・パルスの平均幅

$$(W_H + W_L)/2 \div T_{PWM} \text{ or } (W_H, W_L) = T_{PWM} \pm T_{in}/2 \quad (4-4)$$

(2) ノッチ周波数 の自動発生方式

* 課題1: クロック主波数 の決定

- ・カウンタによる T_{ck} の発生 (整数 n は、 F_{in} の周波数帯により決定)

* 課題2: コーディング・パルス幅 の決定

- ・入力周波数(周期)に一致する、コーディング・パルス幅の自動発生
 $T_N = (W_H - W_L)$ 、 $(W_H, W_L) = T_{PWM} \pm T_{in}/2$ より $T_{in}/2$ データを検出

* 課題3: 平均PWMパルス幅 の決定

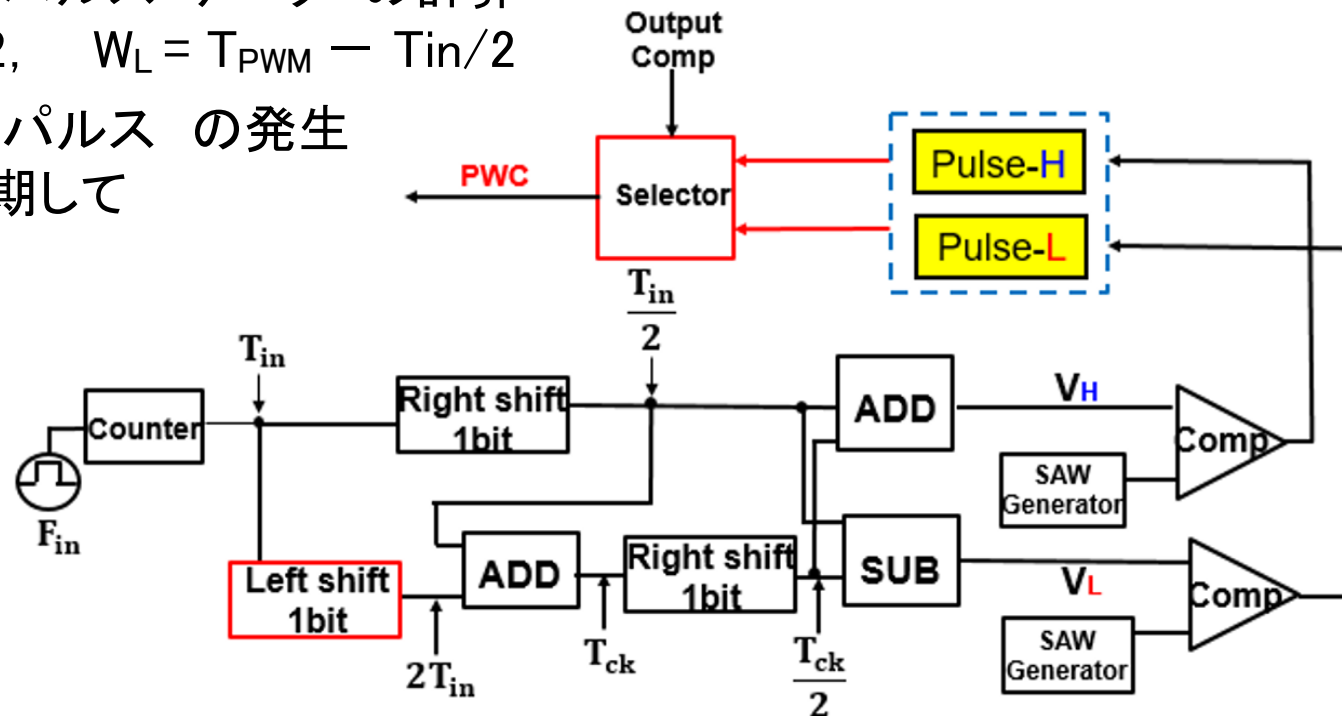
- ・電源投入時、逐次平均法でPWMパルス幅 T_{PWM} をで検出

* 課題4: コーディングパルス・データ の計算

$$W_H = T_{PWM} + T_{in}/2, \quad W_L = T_{PWM} - T_{in}/2$$

* 課題5: コーディングパルス の発生

- F_{ck} のトリガに同期して
 (W_H, W_L) を発生



(3) シミュレーション結果(周波数変調無し) * 条件(PWC方式) 2-38

* $F_{in}=750\text{ kHz} \Rightarrow F_{ck}=500\text{kHz}$: 自動発生

* PWMデューティ ≈ 0.35 : 自動検出

* コーディング・パルスの自動発生

$$W_H = 1.66\mu\text{s}, W_L = 0.95\mu\text{s}$$

$V_{in} : 15\text{V}$

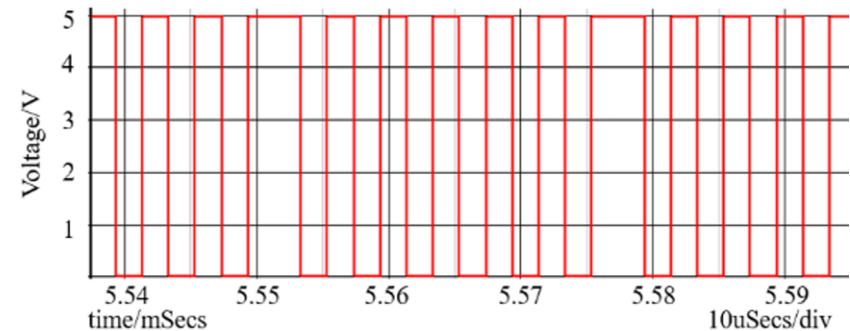
$V_{out} : 5\text{V}$

$L : 200\mu\text{H}$

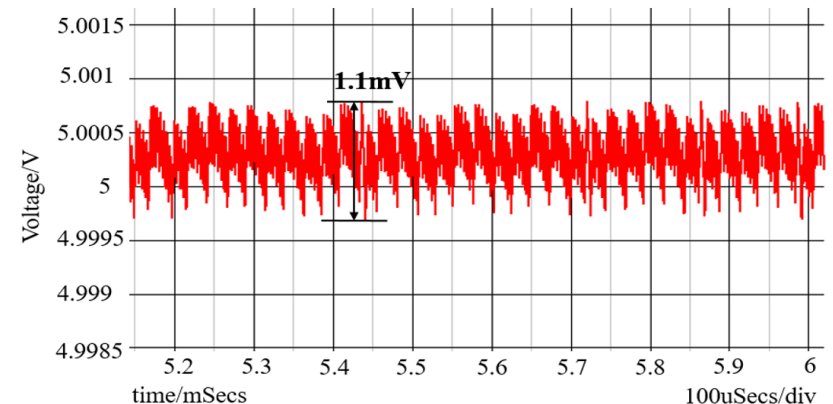
$C : 470\mu\text{F}$

$I_{out} : 0.25\text{A}$

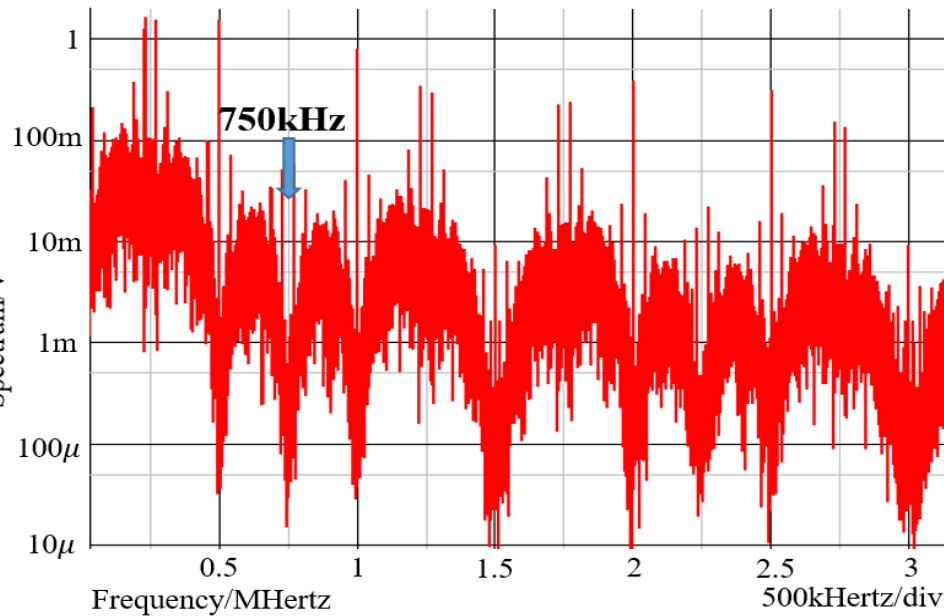
$F_{in} : 750\text{kHz}$



PWM波形(デューティ・バランス)



出力電圧リップル (1.1 mVpp)



スペクトラム拡散 ($F_n=750\text{kHz}$)

● 残り時間により、2-6 節 に戻ります

以上で講義を終了します

「スイッチング電源の基礎と ノイズ・スペクトラム拡散技術」

* 質問のある方は
ミュート は外して発言して下さい

(所属と名前をお願いします)