

# パワーエレクトロニクス工学論

## 12. パルスコーディング制御電源

12-1 パルスコーディング制方式

12-2 ノッチ周波数の解析

12-3 PWC方式スイッチング電源の実装

12-4 自動ノッチ生成技術

# 12-1 パルスコーディング制御電源

## 1.1 パルスコーディング技術とは

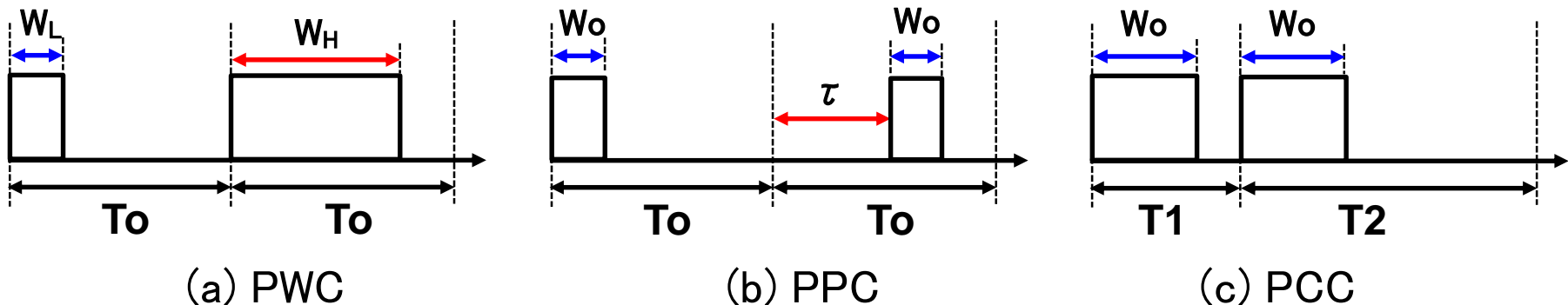
\* 概要: パラメータの異なる多種のパルスを、出力信号により切換えて出力  
・パラメータ: パルス幅、パルス位相(位置)、パルス周期 等

\* 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

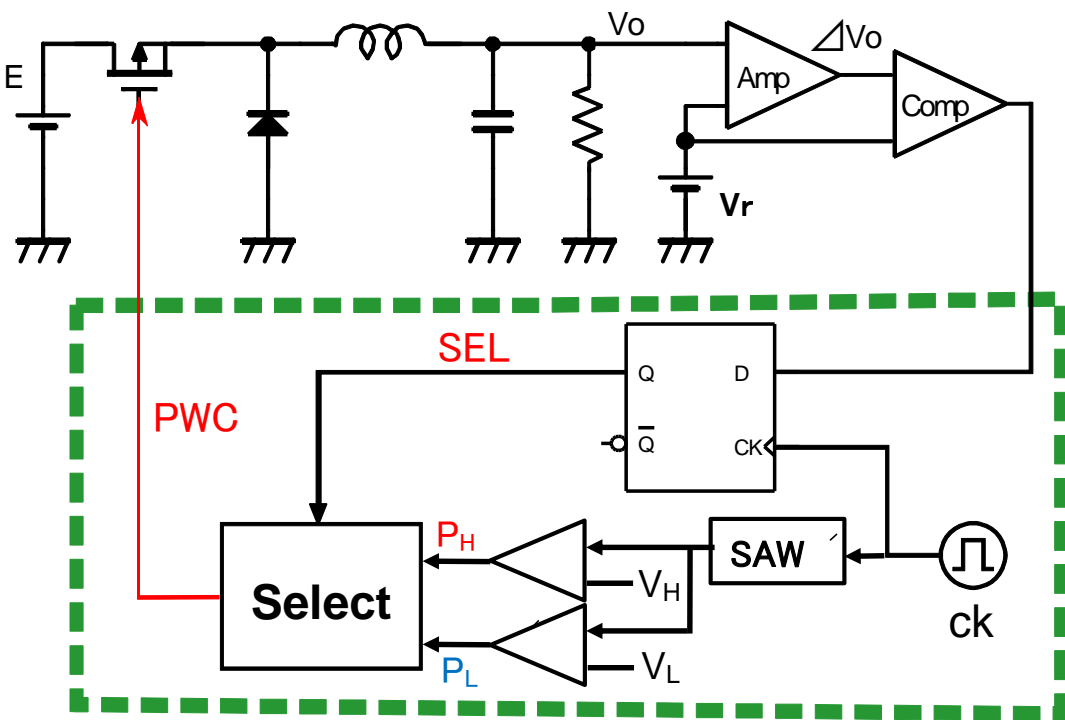


各種 単パルスコーディング波形

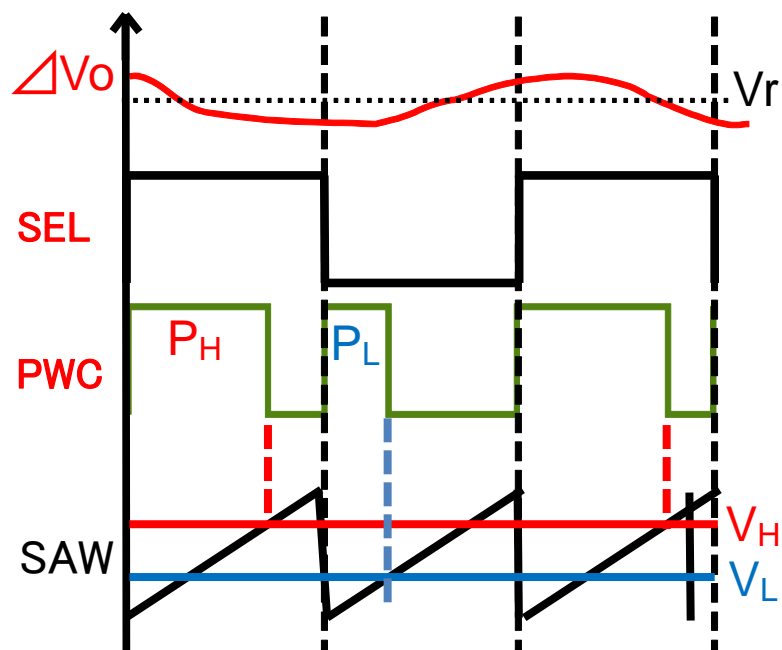
# ● コーディング・パルス発生回路

\* 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



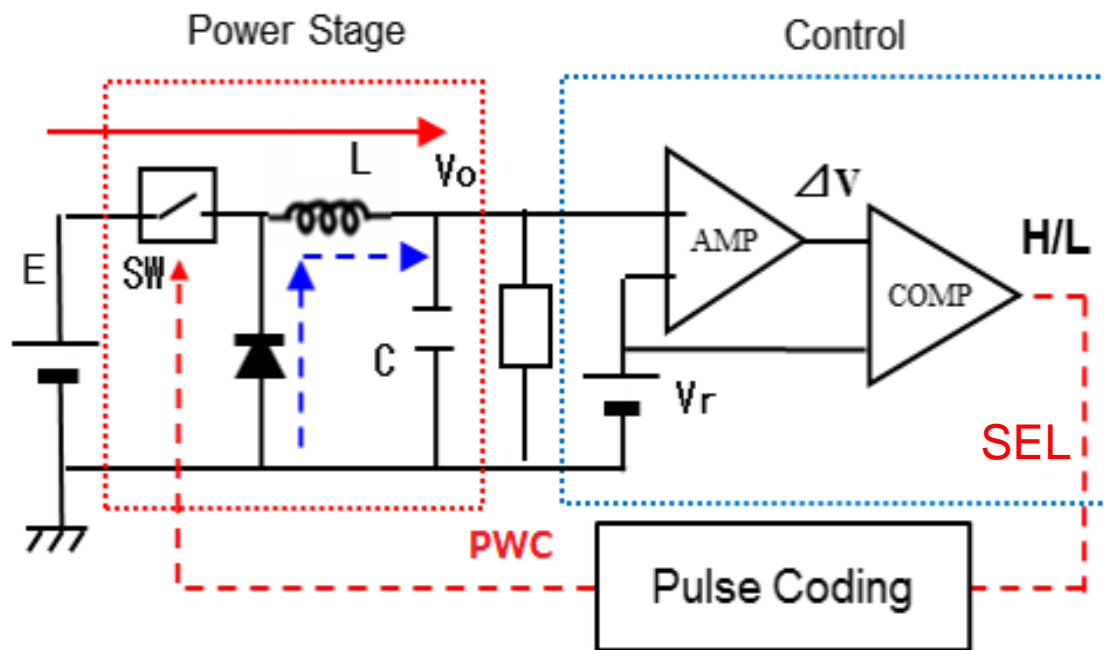
PWCパルス発生回路



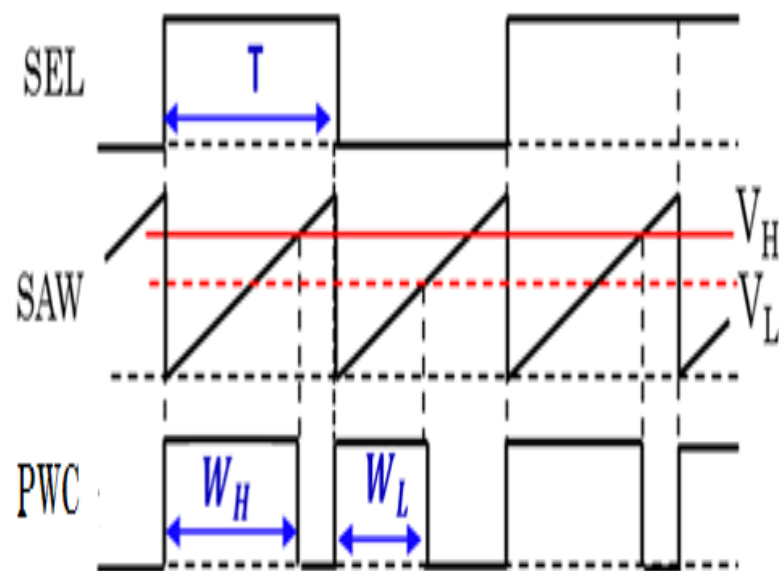
PWCパルス波形図

## 1.2 パルスコーディング技術の電源への適用

- \* 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

# (A) PWC制御電源のシミュレーション結果(降圧形)

\* シミュレーション結果1 (EMC拡散付)

## 【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:  $F_N = N / (W_H - W_L) = N / (1.6 - 0.3) \text{ us} = 0.77 \cdot N \text{ MHz}$

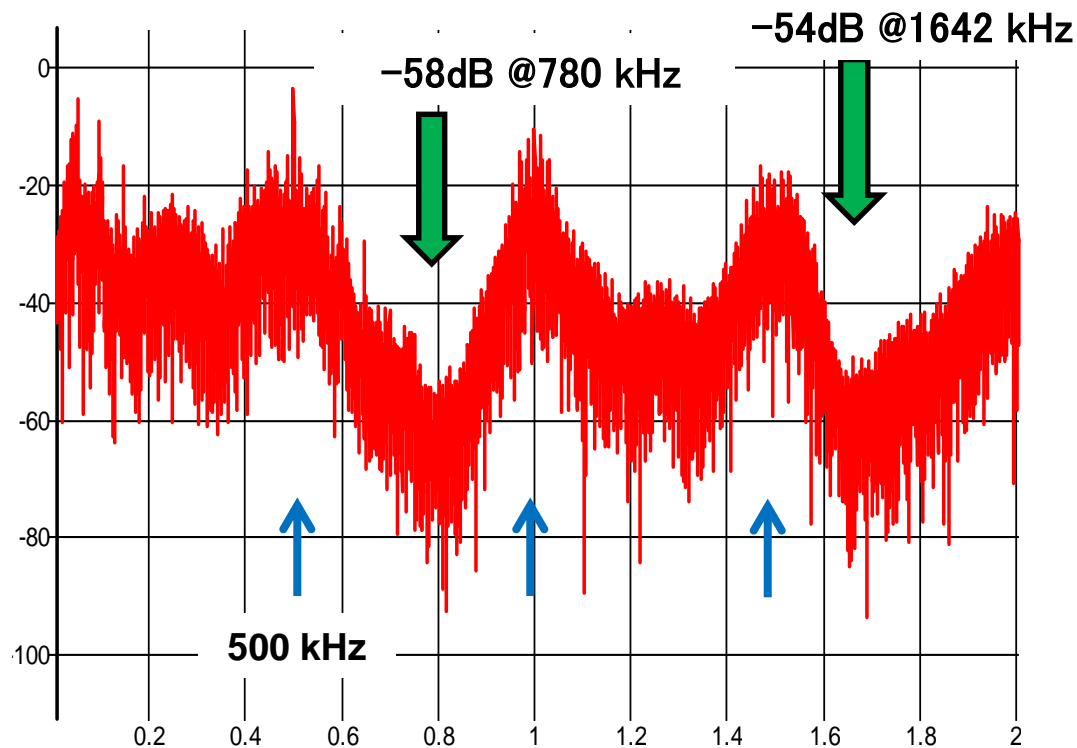
## 【結果】スペクトラム拡散1

### ・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】

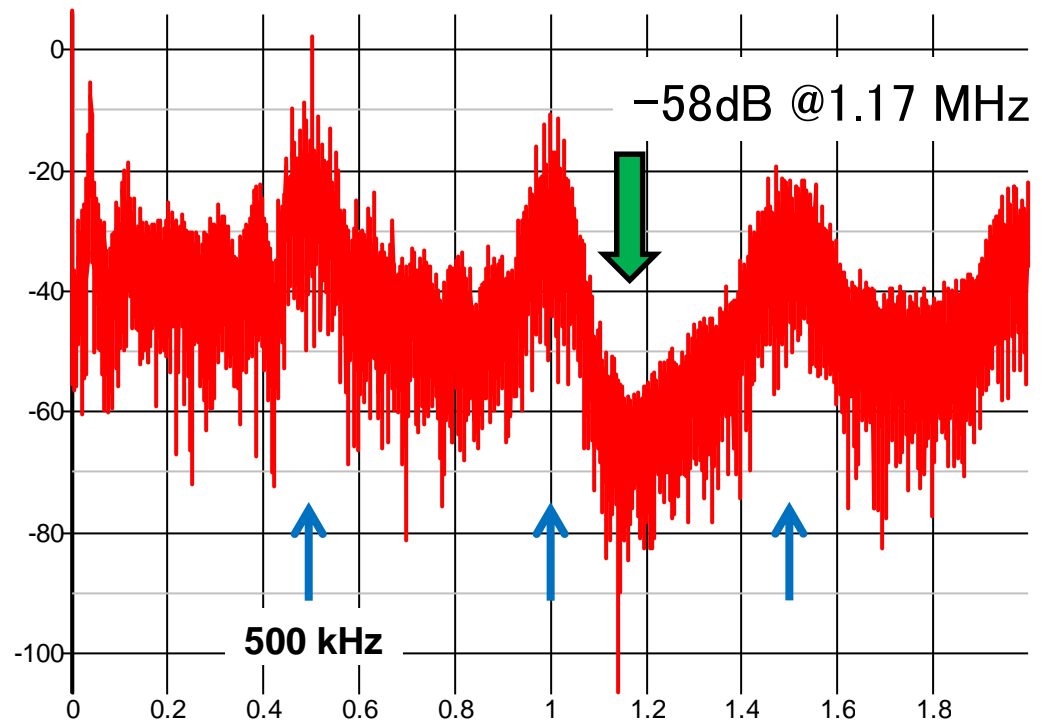
- ・回路条件:  $V_o = 5.0 \text{ V}$ 、 $F_{ck} = 500 \text{ kHz}$
- ・パルス条件:  $T_o = 2.0 \text{ us}$ 、 $W_H = 1.23 \text{ us}$ 、 $W_L = 0.37 \text{ us}$
- ・ノッチ周波数:  $F_N = N / (W_H - W_L) = N / 0.86 \text{ us} = 1.16 \cdot N \text{ MHz}$

### 【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]



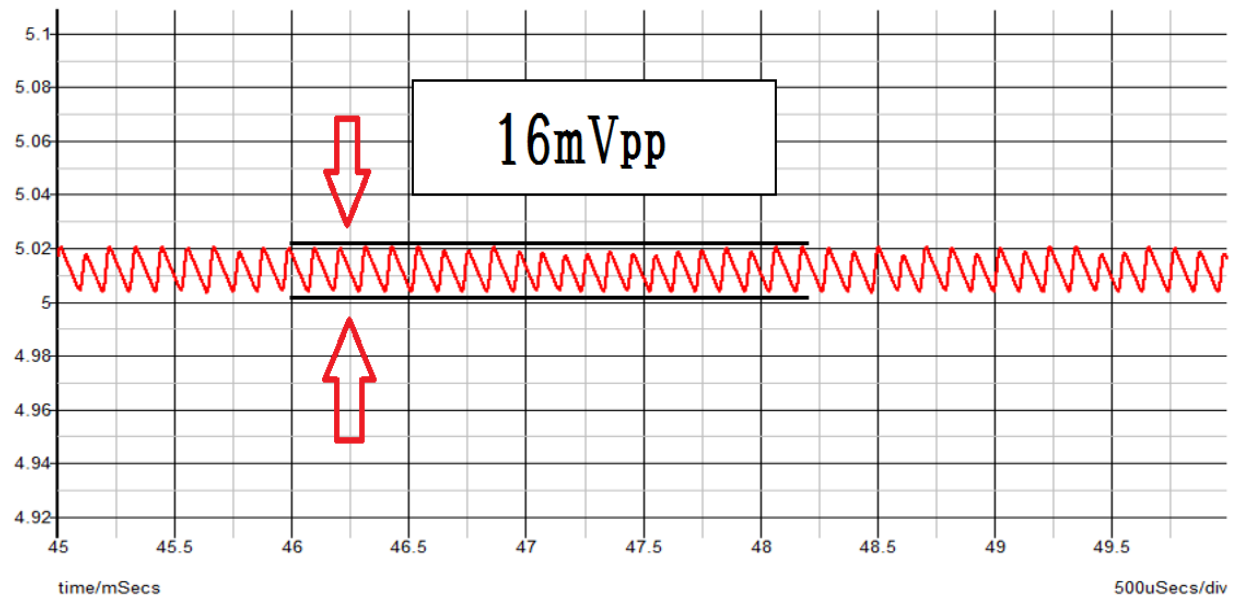
PWC制御電源のスペクトラム2

## 【結果】 出力電圧リップル

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

\* シミュレーション結果としては、リップルはやや大きい

クロック周波数 = 500kHz と通常の2.5倍と低いためと思われる



PWC制御電源の出力電圧リップル

# パワーエレクトロニクス工学論

12-1 パルスコーディング制御電源

**12-2 ノッチ周波数の解析**

2.1 PWCパルスの解析

2.2 PPCパルスの解析

2.3 複合コーディングの解析

12-3 PWC方式スイッチング電源の実装

12-4 自動ノッチ生成技術



## 12-2 ノッチ周波数の解析

### 2.1 PWCパルスの解析

\* 概要:

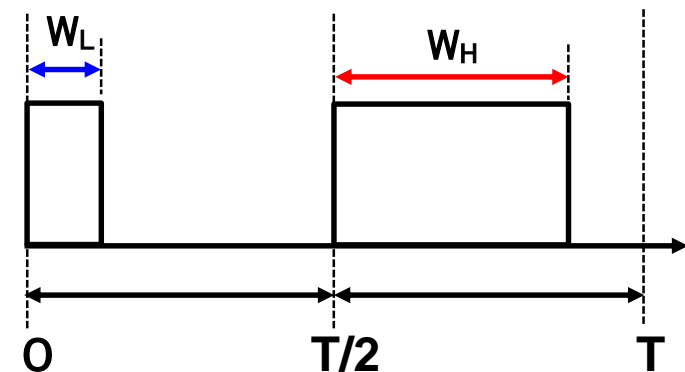
- ・パルスコーディング方式では、2種のパルスがランダムに発生
- ・パルス周期の変化は、異種パルスが連続して発生した場合のみ
- ・ $(W_H + W_L)$ を一周期としてフーリエ変換

\* 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

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

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



PWCパルス列の配置

\* フーリエ変換の続き1:

$$f(\omega) = -\frac{1}{j\omega} [e^{-j\omega t}]_0^{W_L} - \frac{1}{j\omega} [e^{-j\omega t}]_{T/2}^{T/2+W_H} \quad (4-3)$$

$$= -\frac{1}{j\omega} \{e^{-j\omega W_L} - \mathbf{1}\} - \frac{1}{j\omega} \{e^{-j\omega(\frac{T}{2}+W_H)} - e^{-j\omega\frac{T}{2}}\} \quad (4-4)$$

ここで  $\omega \cdot \frac{T}{2} = \pi$  より  $e^{-j\omega\frac{T}{2}} = -\mathbf{1}$ ,  $e^{-j\omega(\frac{T}{2}+W_H)} = -e^{-j\omega W_L}$

$$f(\omega) = -\frac{1}{j\omega} e^{-j\omega W_H} - \frac{1}{j\omega} e^{-j\omega W_L} \quad (4-5)$$

$$= -\frac{1}{j\omega} \{\cos(\omega W_H) - j\sin(\omega W_H) - \cos(\omega W_L) + j\sin(\omega W_L)\} \quad (4-6)$$

絶対値をとると

$$|\omega f(\omega)|^2 = \{\cos(\omega W_H) - \cos(\omega W_L)\}^2 + \{\sin(\omega W_H) - \sin(\omega W_L)\}^2 \quad (4-7)$$

$$= 2\{1 - \cos(\omega W_H) \cdot \cos(\omega W_L) - \sin(\omega W_H) \cdot \sin(\omega W_L)\} \quad (4-8)$$

ここで  $\cos\{(\omega W_H) + (\omega W_L)\} = \cos(\omega W_H) \cdot \cos(\omega W_L) - \{\sin(\omega W_H) \cdot \sin(\omega W_L)\}$

$$\therefore |\omega f(\omega)|^2 = \{1 - \cos(\omega W_H - \omega W_L)\} \quad (4-9)$$

## \* フーリエ変換の続き2:

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

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

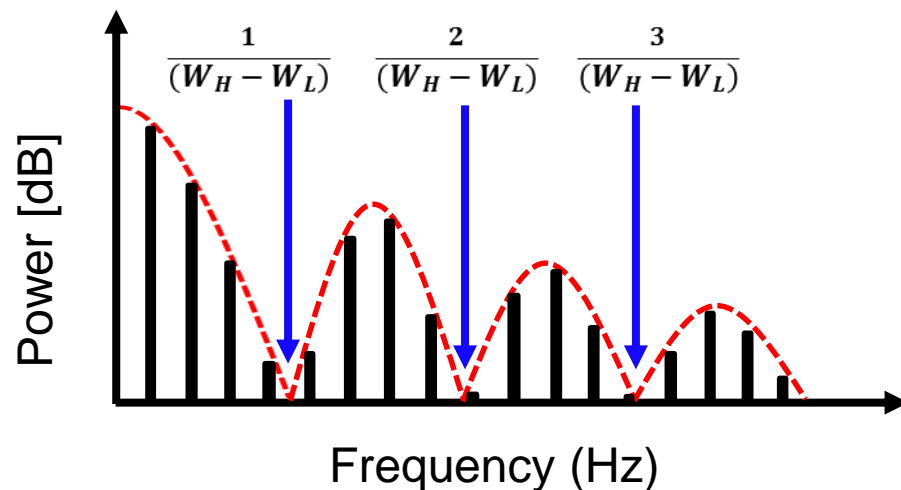
$$\therefore |f(\omega)| = \frac{1}{\omega} \sqrt{4\sin^2\{(\omega W_H - \omega W_L)/2\}} \quad (4-11)$$

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

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

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

$f = n / (W_H - W_L)$  にノッチ発生



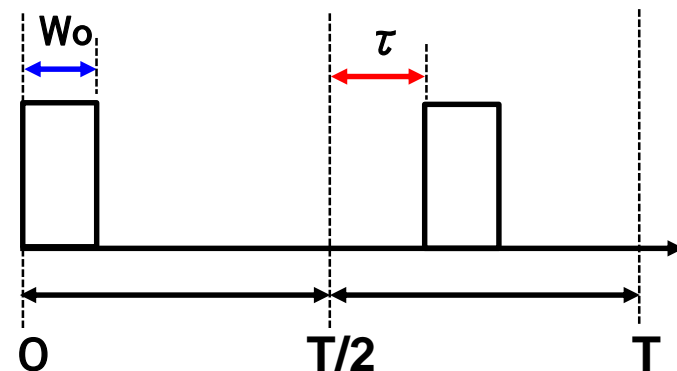
## 2.2 PPCパルスの解析 (パルス位相/位置コーディング)

\* 概要:

- ・PWCと同様に、周期の変化は2種のパルスが連続して発生した時
- ・2パルス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



PPCパルス列の配置

$$\begin{aligned}
 f(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \\
 &= \int_0^{W_0} e^{-j\omega t} dt + \int_{\frac{T}{2}+\tau}^{\frac{T}{2}+\tau+W_0} e^{-j\omega t} dt \quad (4-20)
 \end{aligned}$$

$$= -1/j\omega \{ (e^{-j\omega W_0} - 1) + (e^{-j\omega(\frac{T}{2}+\tau+W_0)} - e^{-j\omega(\frac{T}{2}+\tau)}) \} \quad (4-21)$$

ここで  $e^{-j\omega\frac{T}{2}} = -1$  より

$$f(\omega) = -1/j\omega \{ (e^{-j\omega W_0} - 1) - (-e^{-j\omega(\tau+W_0)} + e^{-j\omega\tau}) \} \quad (4-22)$$

$$= +1/j\omega (e^{-j\omega W_0} - 1) \cdot (e^{-j\omega\tau} - 1) \quad (4-23)$$

## \* フーリエ変換の続き:

絶対値をとると

$$| \{e^{-j\omega W_0} - 1\} |^2 = \{ \cos(\omega W_0) - 1 \}^2 + \{ \sin(\omega W_H) \}^2 = 2 \{ 1 - \cos(\omega W_H) \} \quad (4-24)$$

$$\text{よって } |\omega f(\omega)|^2 = 4 \{ 1 - \cos(\omega W_0) \} \cdot \{ 1 - \cos(\omega \tau) \} \quad (4-25)$$

前述の2倍角の定理より  $\cos(2\theta) = \cos^2\theta - \sin^2\theta = 1 - 2\sin^2\theta$

$$\therefore |f(\omega)| = \frac{4}{\omega} \sqrt{\sin^2\{(\omega W_0)/2\} \cdot \sin^2\{(\omega \tau)/2\}} \quad (4-26)$$

$$= \frac{(\omega \cdot W_0 \cdot \tau) \left| \sin\left(\frac{\omega W_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega \tau}{2}\right) \right|}{\frac{\omega W_0}{2} \cdot \frac{\omega \tau}{2}} \quad (4-27)$$

$$= (\omega W_0 \tau) \left| \text{sinc}\left\{\frac{\omega W_0}{2}\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{\omega \tau}{2}\right\} \right| = 0 \quad (4-28)$$

$$\text{よって } \left| \frac{\omega}{2} W_0 \right| = n\pi \quad \text{より}$$

$$\underline{\underline{f = n/W_0, f = m/\tau_L \text{ にノッチ発生}}} \quad (4-29)$$

「パルス幅」と「位相差」に依存したスペクトラム特性

## 2.3 複合コーディングの解析 (パルス幅+位相/位置コーディング)

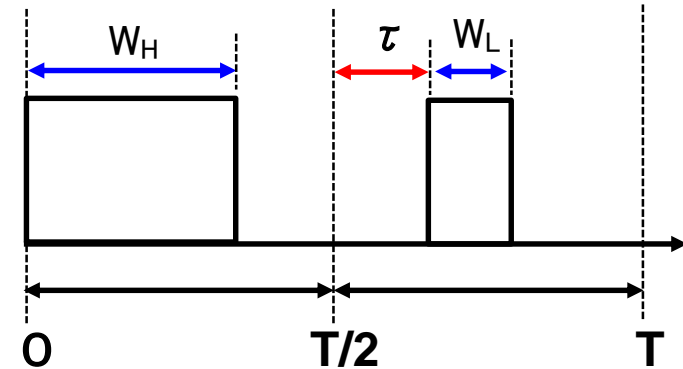
( PWPC:Pulse Width & Phase/Position Coding )

\* 概要:PWC+PPC による複合コーディング

\* 右図パルス列のフーリエ変換:

・定義式より

$$\begin{aligned}
 f(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \\
 &= \int_0^{W_H} e^{-j\omega t} dt + \int_{\frac{T}{2}+\tau}^{\frac{T}{2}+\tau+W_L} e^{-j\omega t} dt \\
 &= -1/j\omega \{ (e^{-j\omega W_H} - 1) + (e^{-j\omega(\frac{T}{2}+\tau+W_L)} - e^{-j\omega(\frac{T}{2}+\tau)}) \} \quad (4-30)
 \end{aligned}$$



PWPCパルス列の配置

ここで  $e^{-j\omega\frac{T}{2}} = -1$  より

$$f(\omega) = -1/j\omega \{ (e^{-j\omega W_H} - 1) + (-e^{-j\omega(\tau+W_L)} + e^{-j\omega\tau}) \} \quad (4-31)$$

$$= +1/j\omega (e^{-j\omega W_H} - 1) \cdot (e^{-j\omega\tau} - 1) \quad (4-32)$$

## \* フーリエ変換の続き:

絶対値をとると

$$| \{ e^{-j\omega W_0} - 1 \} |^2 = \{ \cos(\omega W_0) - 1 \}^2 + \{ \sin(\omega W_0) \}^2 = 2 \{ 1 - \cos(\omega W_0) \} \quad (4-24)$$

$$\text{よって } |\omega f(\omega)|^2 = 4 \{ \{ 1 - \cos(\omega W_0) \} \cdot \{ 1 - \cos(\omega \tau) \} \} \quad (4-25)$$

前述の2倍角の定理より  $\cos(2\theta) = \cos^2\theta - \sin^2\theta = 1 - 2\sin^2\theta$

$$\therefore |f(\omega)| = \frac{4}{\omega} \sqrt{\sin^2\{(\omega W_0)/2\} \cdot \sin^2\{(\omega \tau)/2\}} \quad (4-26)$$

$$= \frac{(\omega \cdot W_0 \cdot \tau) \left| \sin\left(\frac{\omega W_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega \tau}{2}\right) \right|}{\frac{\omega W_0}{2} \cdot \frac{\omega \tau}{2}} \quad (4-27)$$

$$= (\omega W_0 \tau) \left| \text{sinc}\left\{\frac{\omega W_0}{2}\right\} \cdot \text{sinc}\left\{\frac{\omega \tau}{2}\right\} \right| = 0 \quad (4-28)$$

よって  $\left| \frac{\omega}{2} W_0 \right| = n\pi$  より

$f = n/W_0, f = m/\tau$  にノッチ発生

**「パルス幅」と「位相シフト量」に依存したスペクトラム特性**

# パワーエレクトロニクス工学論

12-1 パルスコーディング制御電源

12-2 ノッチ周波数の解析

**12-3 PWC方式スイッチング電源の実装**

3.1 PWC方式**降圧形**電源の実装結果

3.2 PWC方式**昇圧形**電源の実装結果

12-4 自動ノッチ生成技術



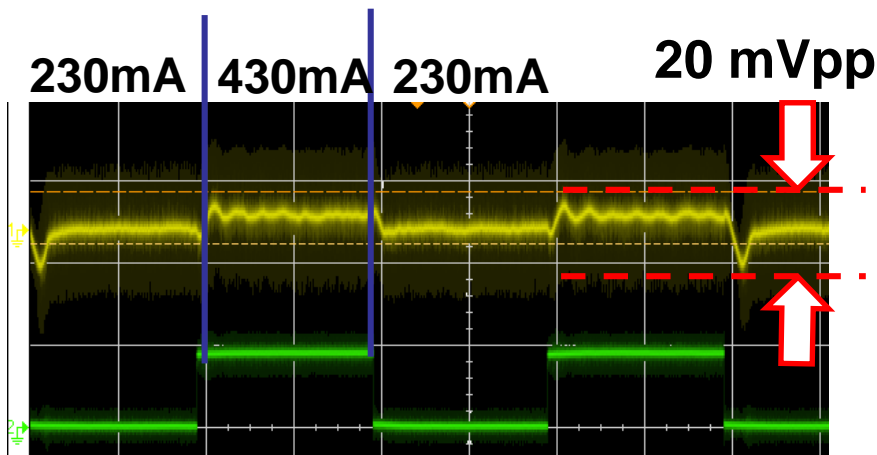
## 12-3 PWC方式スイッチング電源の実装

### 3.1 PWC方式降圧形電源の実装結果

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

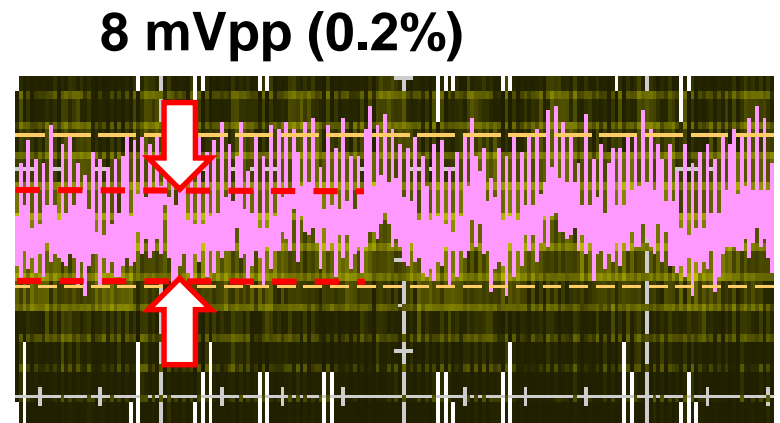
#### \* 出力電圧リップル:

- ・ 定常リップル:  $\Delta V_o = 8\text{ mVpp}$  @  $I_o = 530\text{ mA}$  ( $V_o$  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)



( $\Delta I_o = 200\text{ mA}$  @  $500\text{ Hz}$ )

出力電圧リップル



(2.0MHzで帯域制限)

拡大リップル波形

## \* 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:

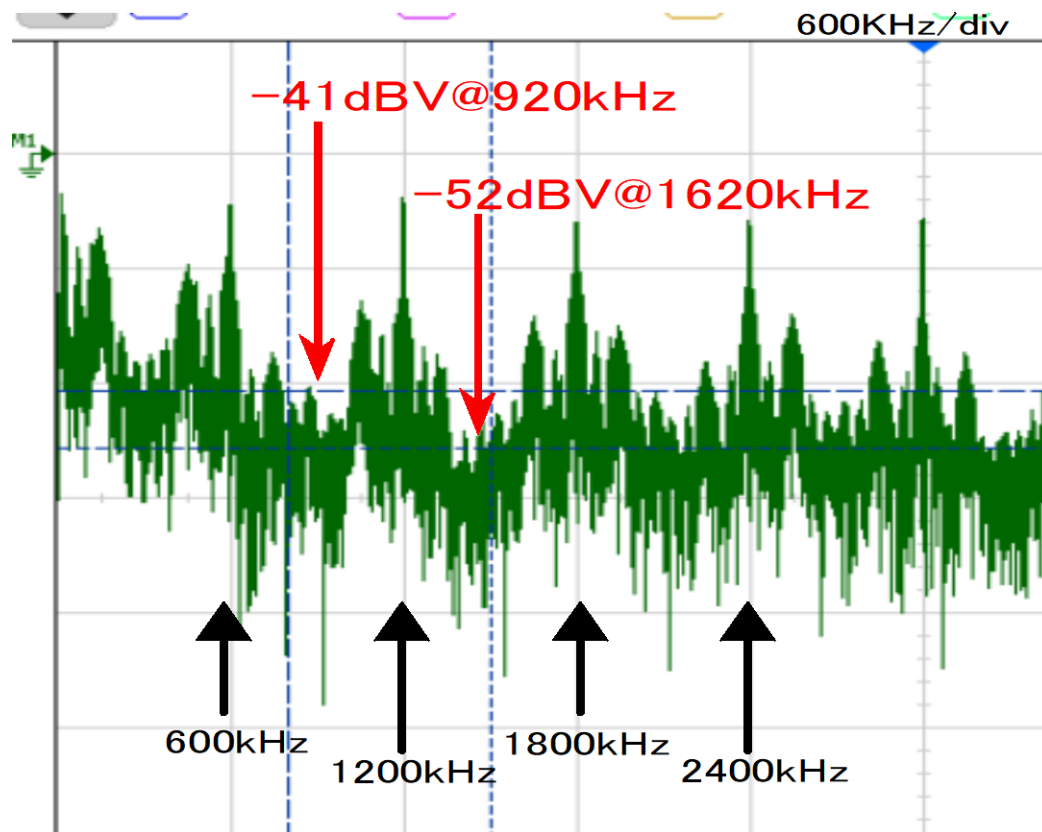
$$F_{NO} = N / 1.06\text{ }\mu\text{s} = 0.94 \cdot N\text{ MHz}$$

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<sub>ck</sub>=600 kHz, T=1.67 us, W<sub>H</sub>=1.32 us, W<sub>L</sub>=0.00 us

(特殊パルス条件での確認)

### 【結果】ノッチ周波数

・理論値:

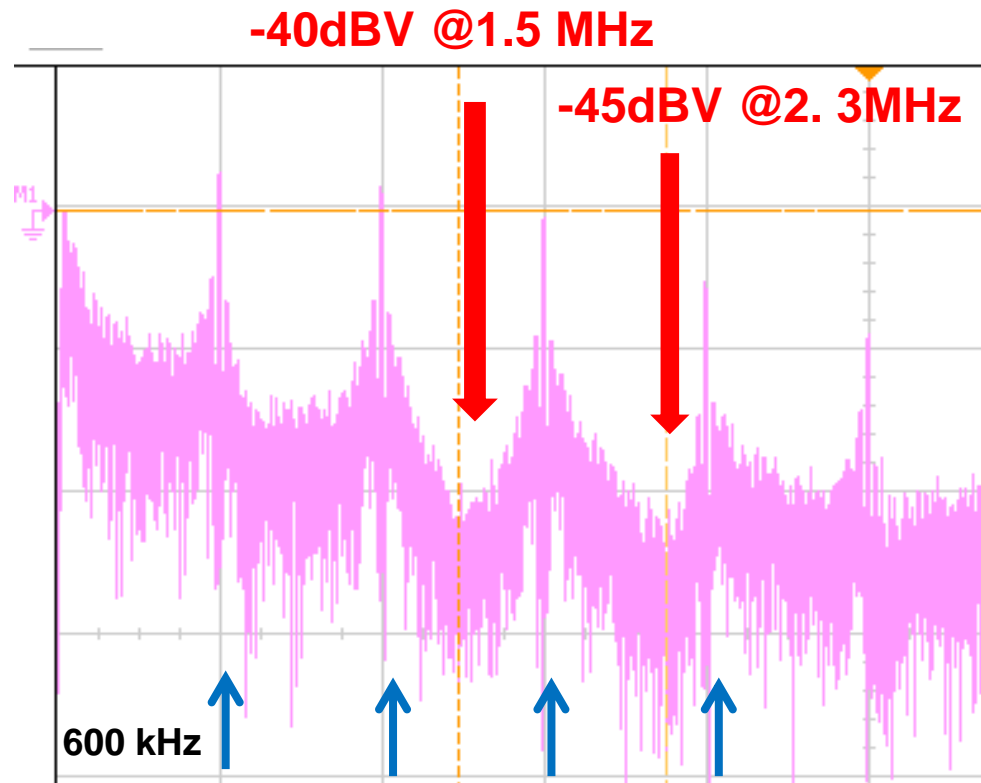
$$F_{NO} = N / 1.32 \text{ us} = 0.76 \cdot N \text{ MHz}$$

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

## 3.2 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:

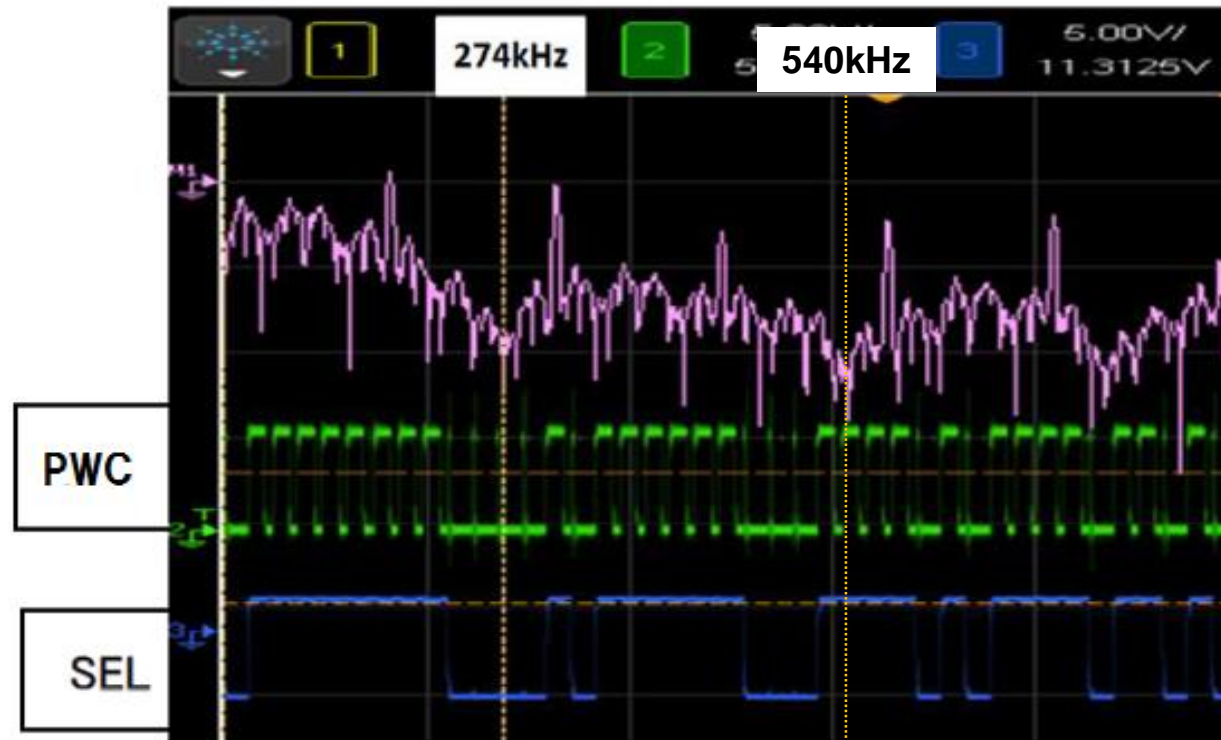
#### ・理論値

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

#### ・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

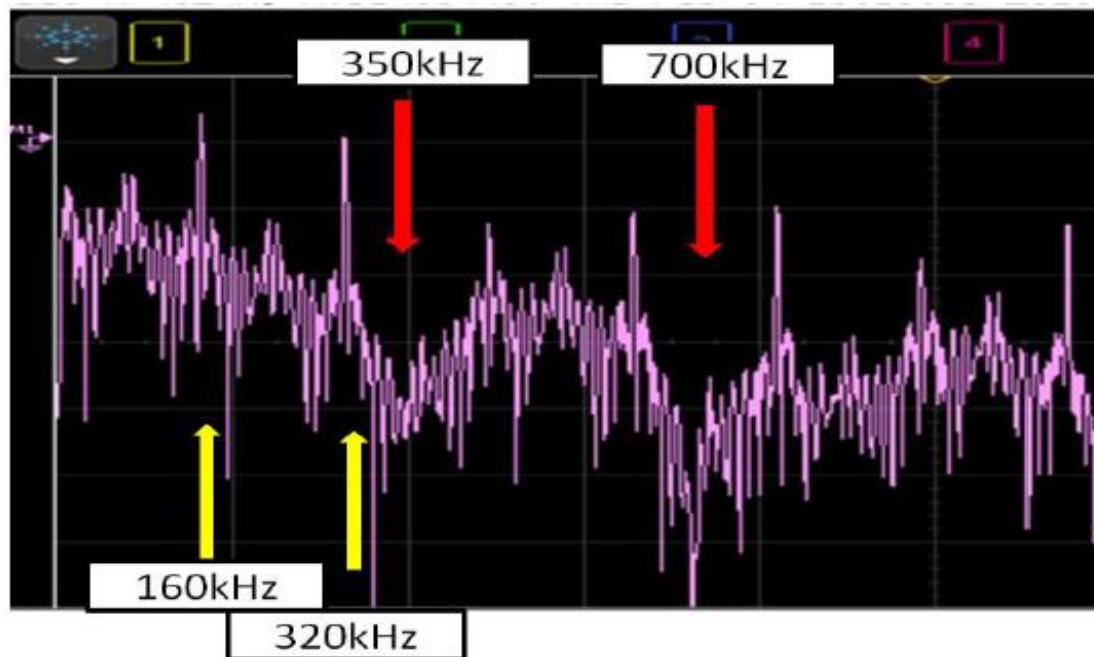
$$F_{NO} = N / 2.9 \text{ us} = 345 \cdot N \text{ kHz}$$

・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

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

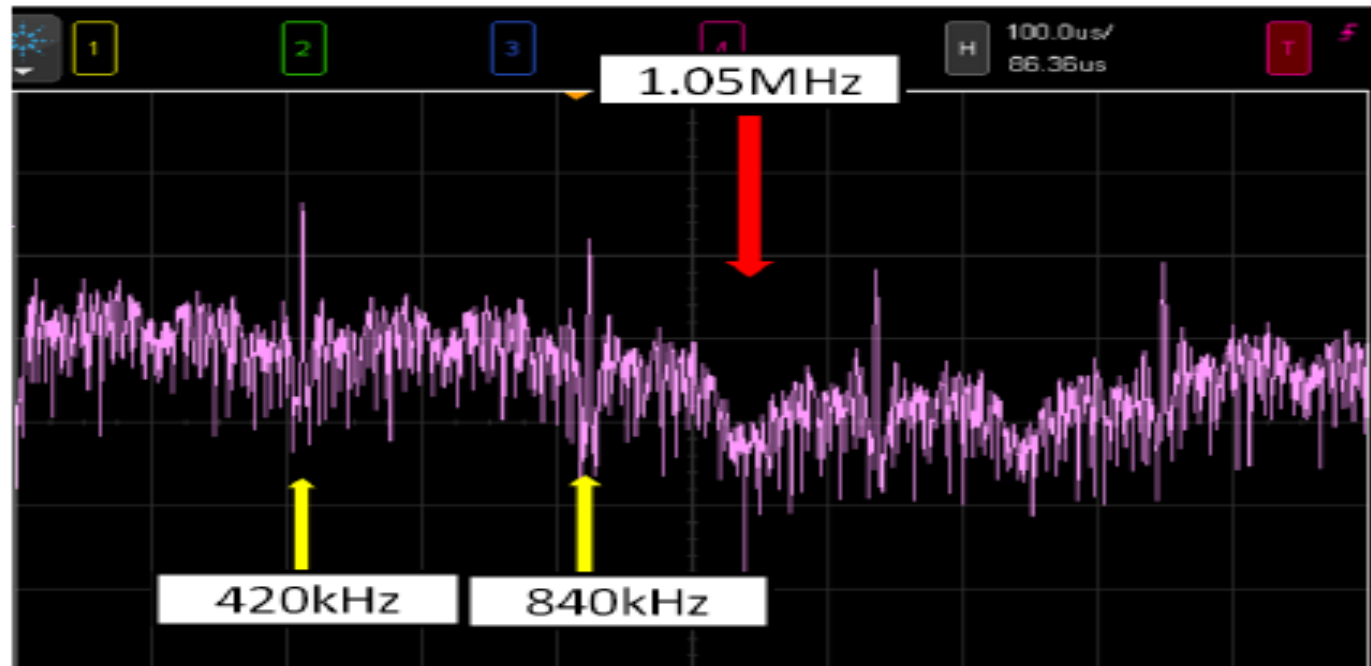
### 【結果3】 ノッチ周波数:

・理論値

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

・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