

パルスコーディングを用いたスイッチング電源における 選択的ノッチ周波数発生方式

群馬大学 電子情報数理教育プログラム

小林研究室 修士1年

荒船拓也

t15804005@gunma-u.ac.jp



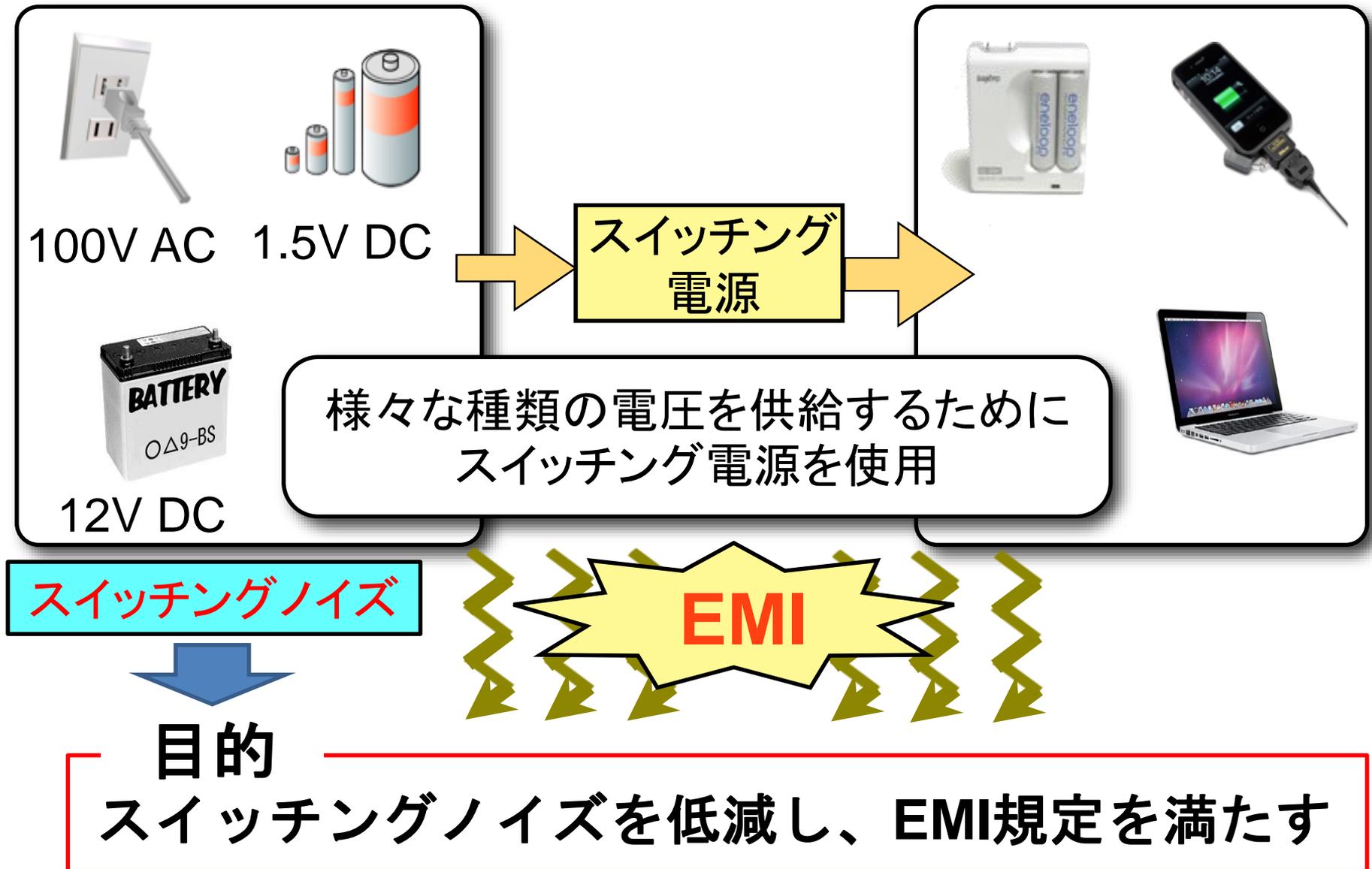
アウトライン

- 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
 - 擬似回路検証
 - スイッチング電源検証
- $\Delta\Sigma$ 変調パルスコーディング方式
- 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
 - 擬似回路検証
 - スイッチング電源検証
- $\Delta\Sigma$ 変調パルスコーディング方式
- まとめ

研究背景 & 目的



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)

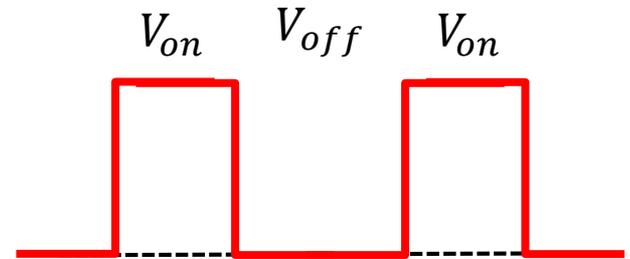
PWMスイッチング電源の構成1

Power Stage

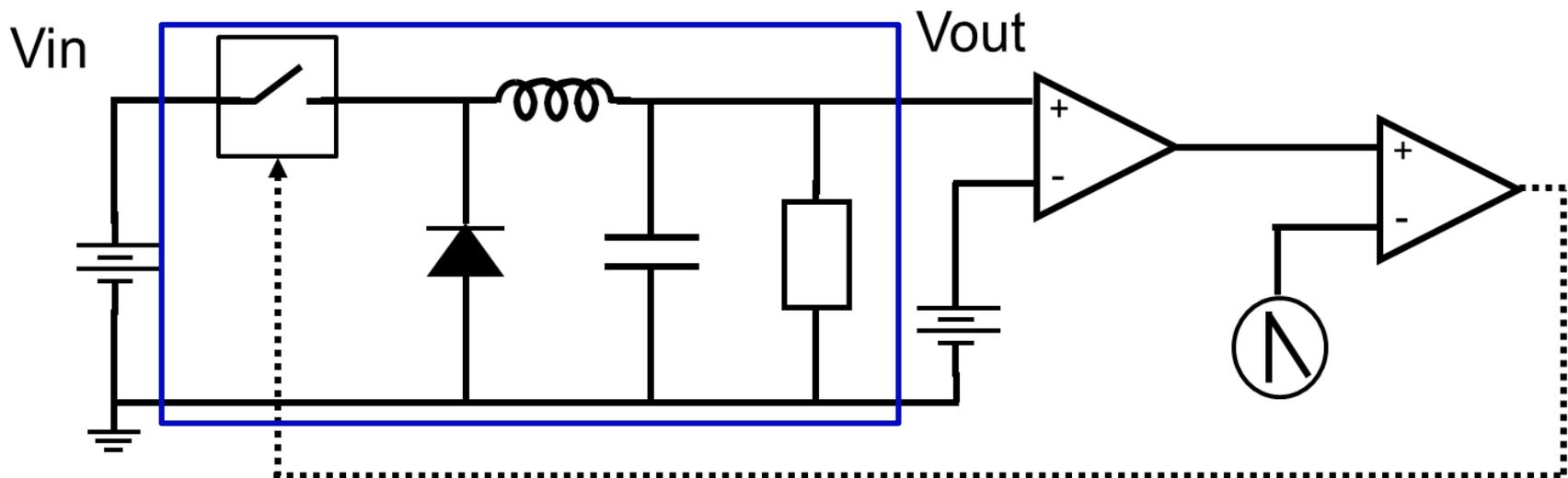
- スwitchングにより電圧の大きさを変化

$$V_{out} = V_{in} \times D$$

$$D = \frac{V_{on}}{V_{off}}$$



出力電圧はDにのみ依存



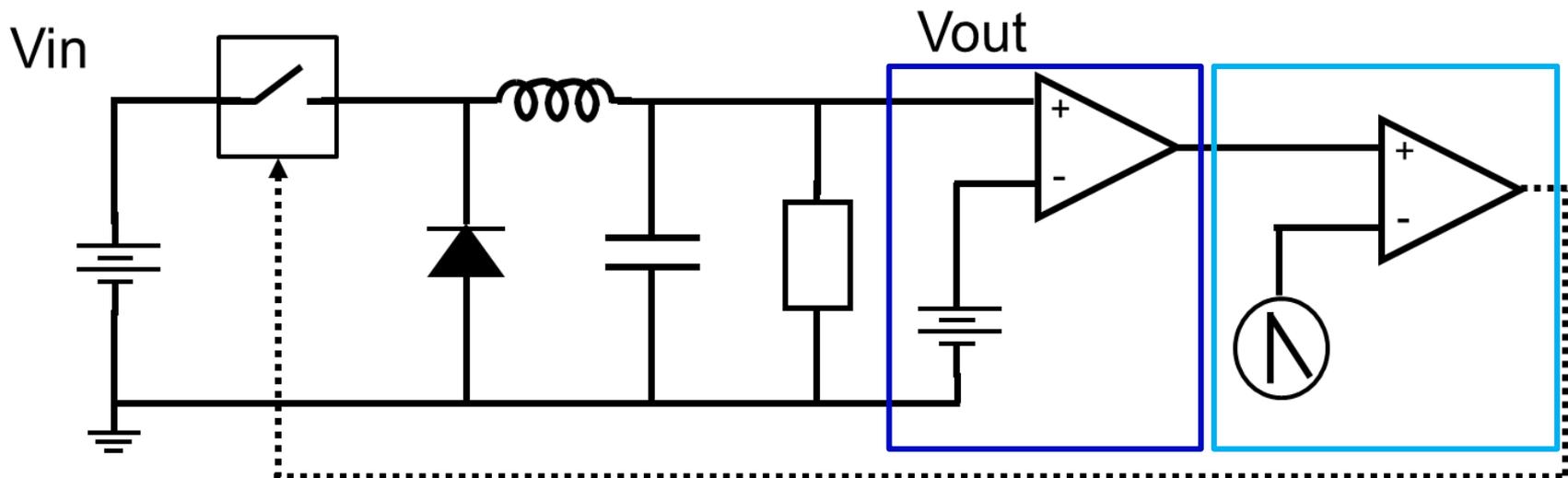
PWMスイッチング電源の構成2

Error Detect

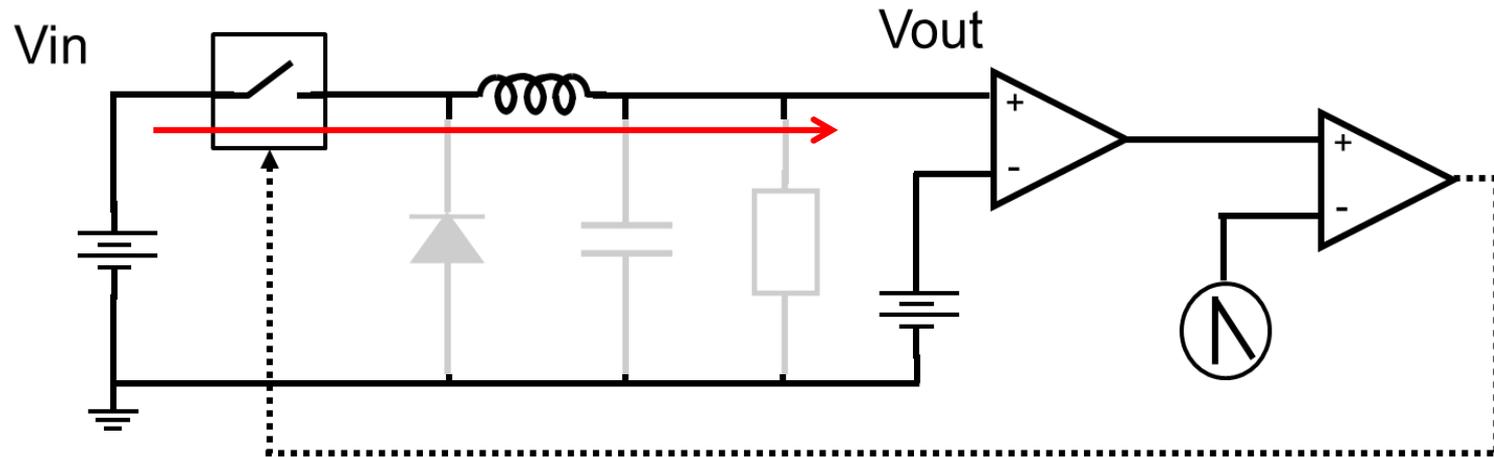
- 出力電圧と誤差電圧 ΔV_0 を検出・増幅

Feedback Control

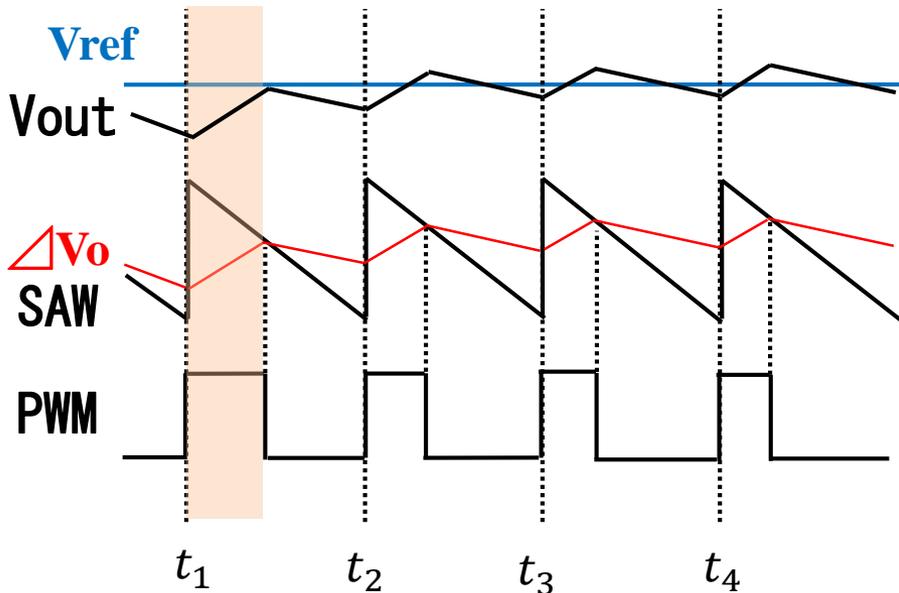
- 検出した誤差電圧によりPWM信号を発生
スイッチに負帰還することで出力を安定



スイッチング電源(動作1)



STATE1



スイッチON



電圧供給

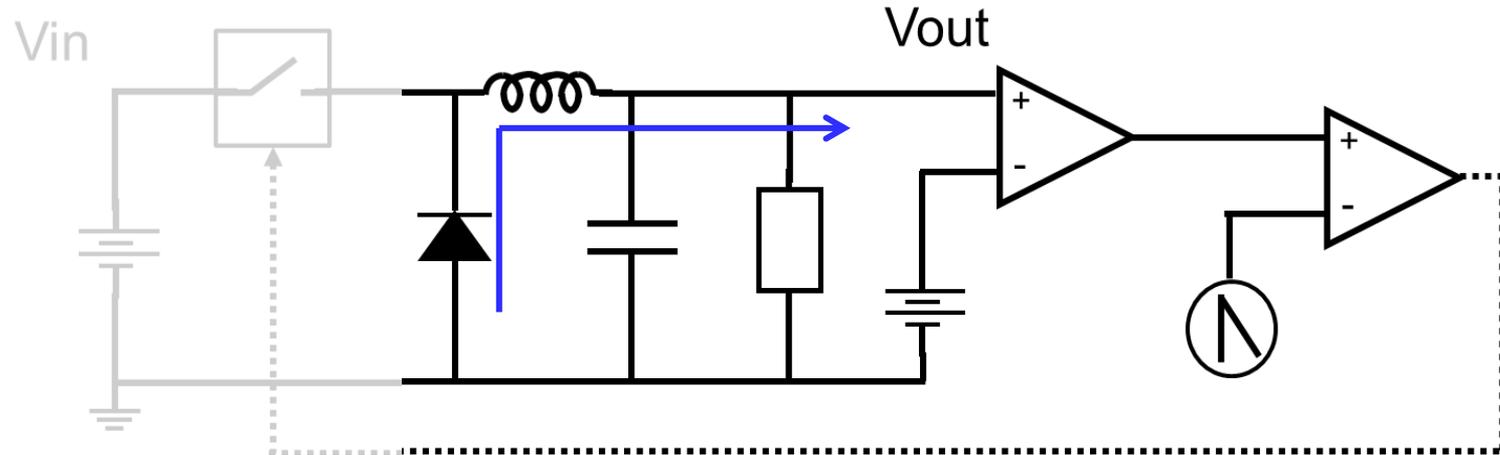


LCにより チャージ

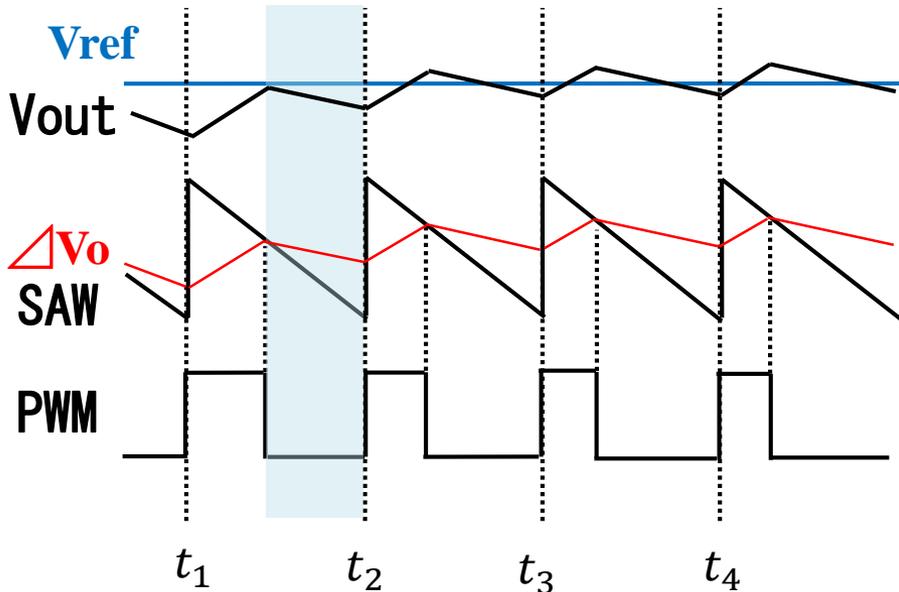


出力電圧：増加

スイッチング電源(動作2)



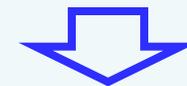
STATE2



スイッチOFF



電圧切断

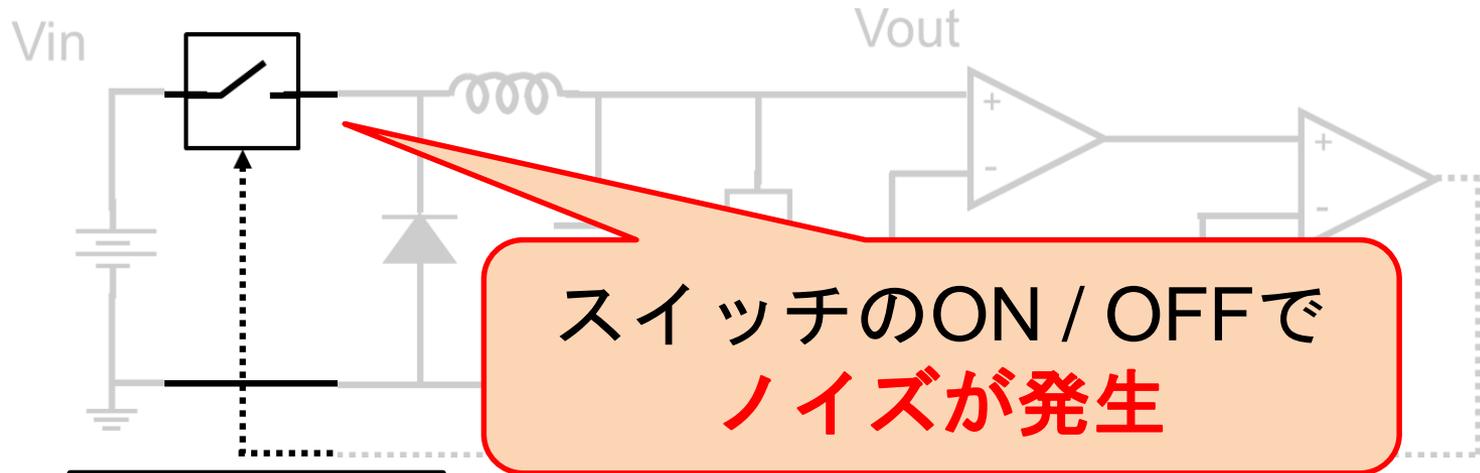


LCにより ディスチャージ

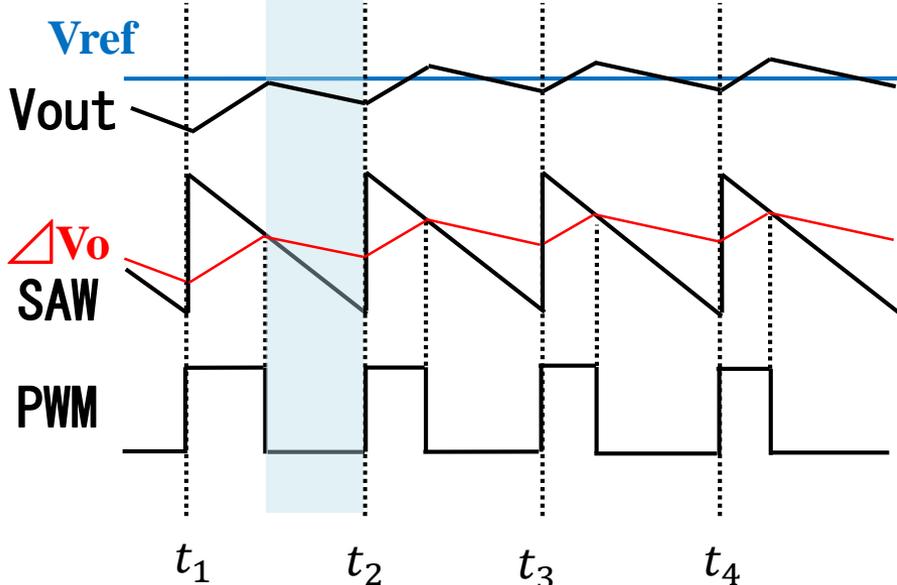


出力電圧：減少

スイッチング電源(動作2)



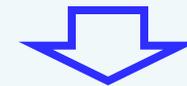
STATE2



スイッチOFF



電圧切断



LCにより ディスチャージ



出力電圧：減少

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
 - 擬似回路検証
 - スイッチング電源検証
- $\Delta\Sigma$ 変調パルスコーディング方式
- まとめ

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...

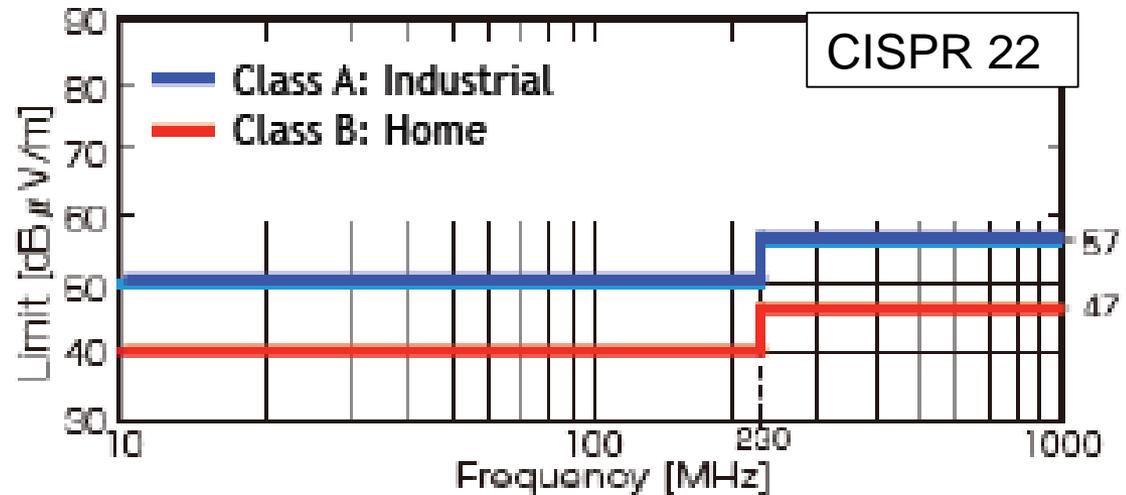


小規模化・低コスト化

基本スペクトラム成分を低減



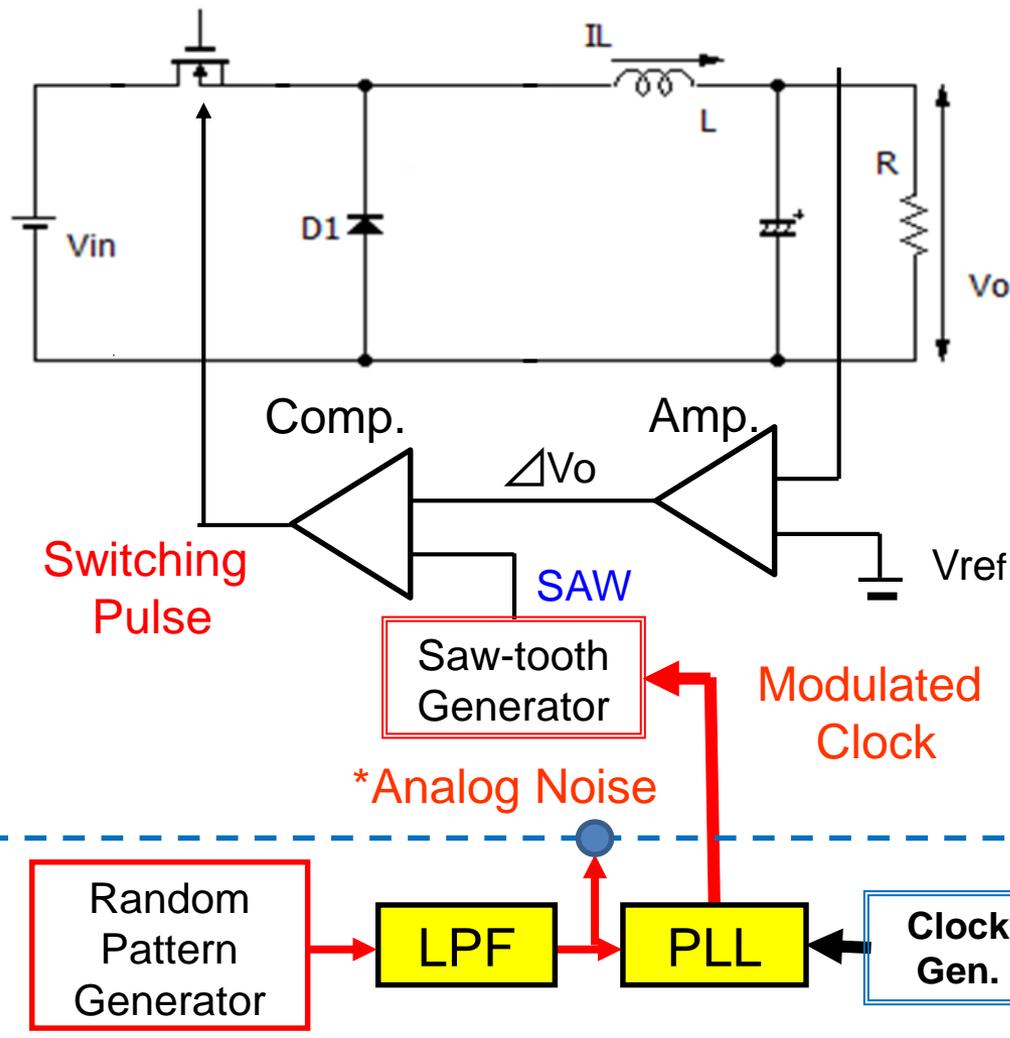
EMI規定を
満たす



EMI: Electro-Magnetic Interference

スペクトラム拡散によるEMI低減

★アナログノイズを用いたスペクトラム拡散



² * 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



* SW パルス周波数が変調され、EMIの最大が低減

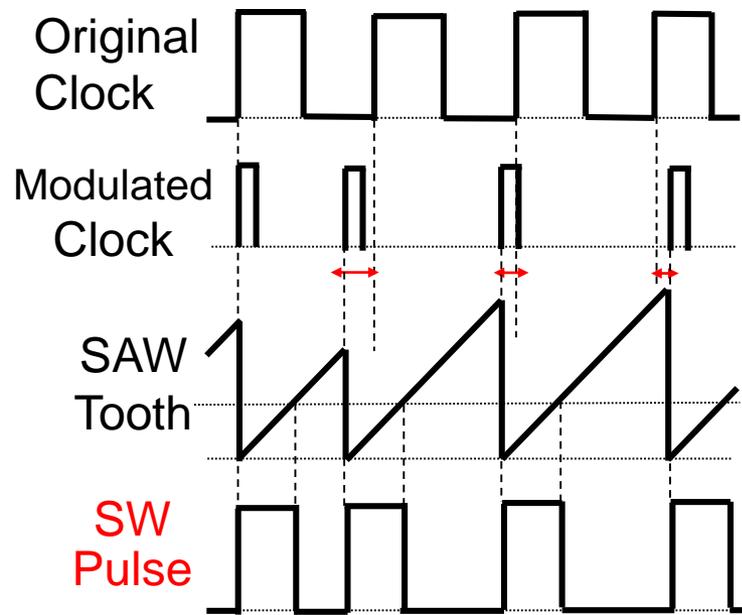


Fig.2-1 Buck converter with modulated clock

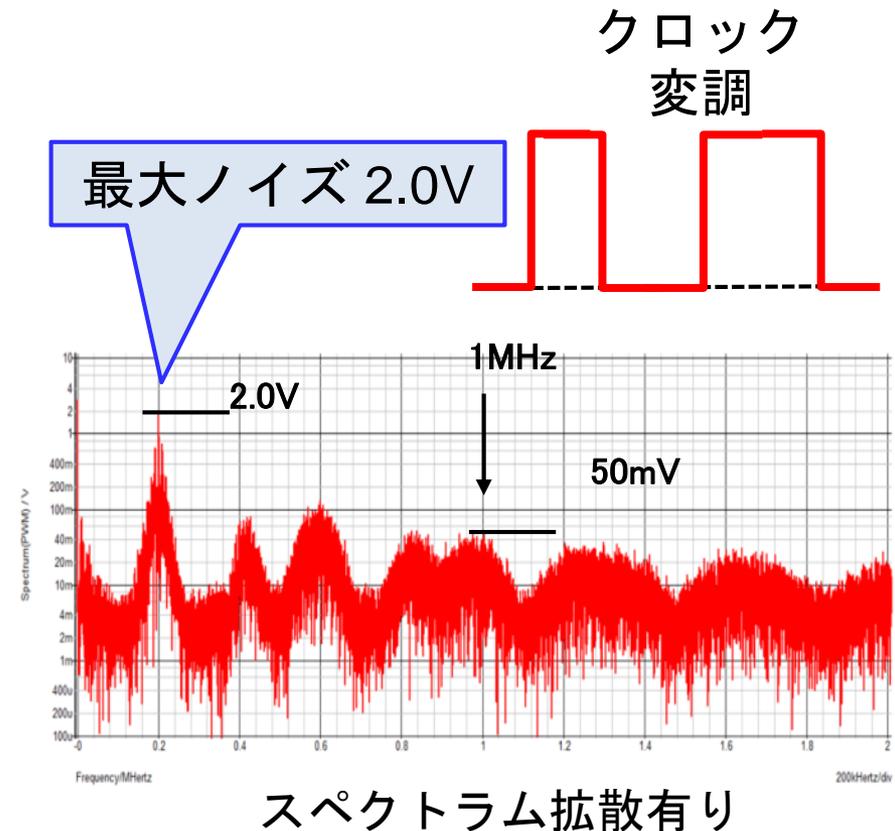
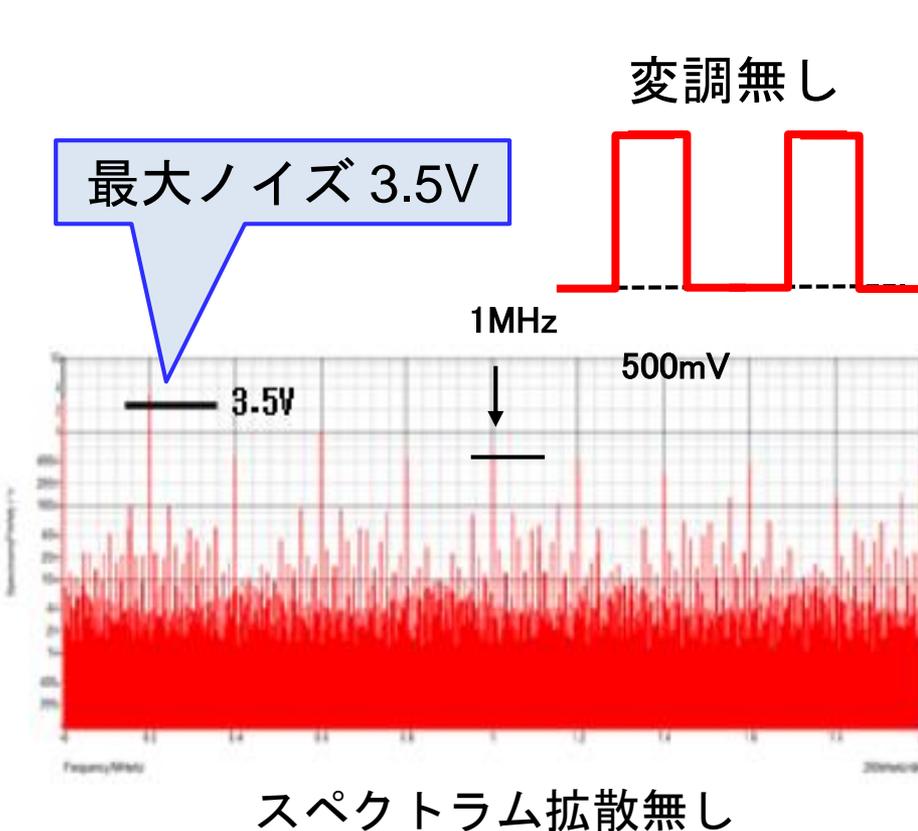
Fig.2-2 Timing Chart

スペクトラム拡散技術

スペクトラム拡散方式

Clock Frequency: 200kHz

- パルスのパラメータ（パルス幅・位相等）を
変調することでEMIを低減



スペクトラム拡散技術

スペクトラム拡散方式

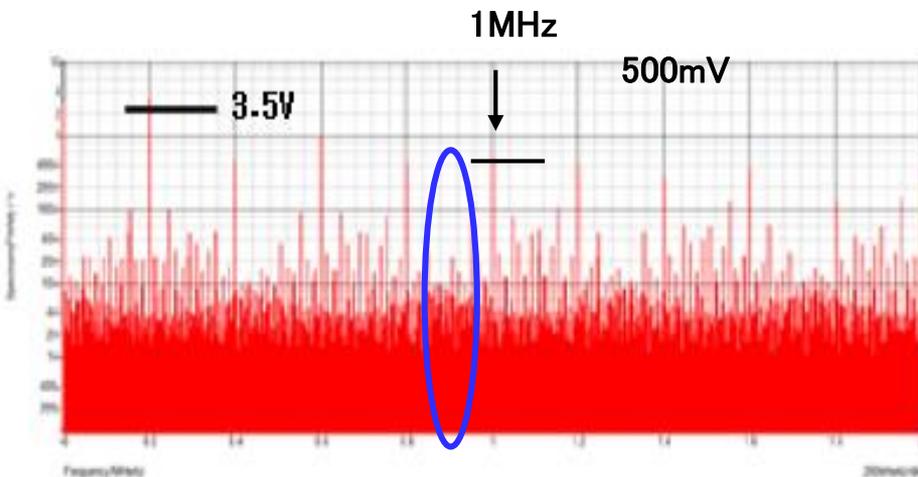
Clock Frequency: 200kHz

- パルスのパラメータ（パルス幅・位相等）を
変調することでEMIを低減

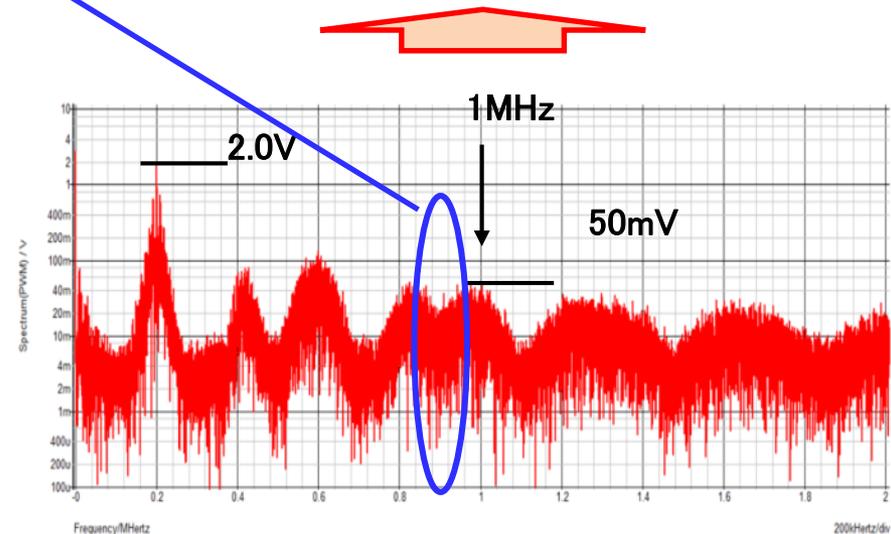
Problem

一部の重要周波数帯域に
ノイズが拡散

拡散によるノイズが集中



スペクトラム拡散無し



スペクトラム拡散有り

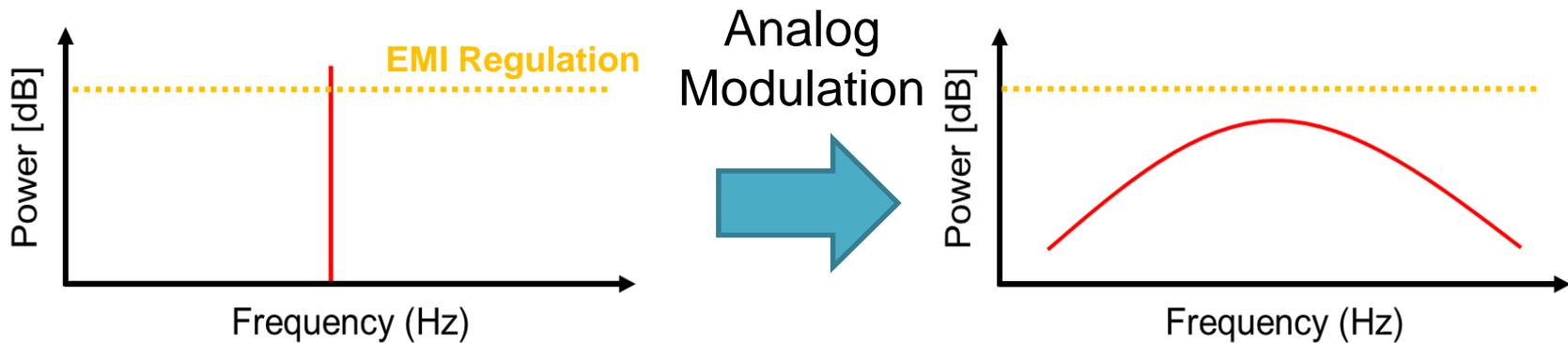
アウトライン

- 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**
 - 擬似回路検証
 - スイッチング電源検証
- $\Delta\Sigma$ 変調パルスコーディング方式
- まとめ

従来と提案スペクトラム拡散方式の比較

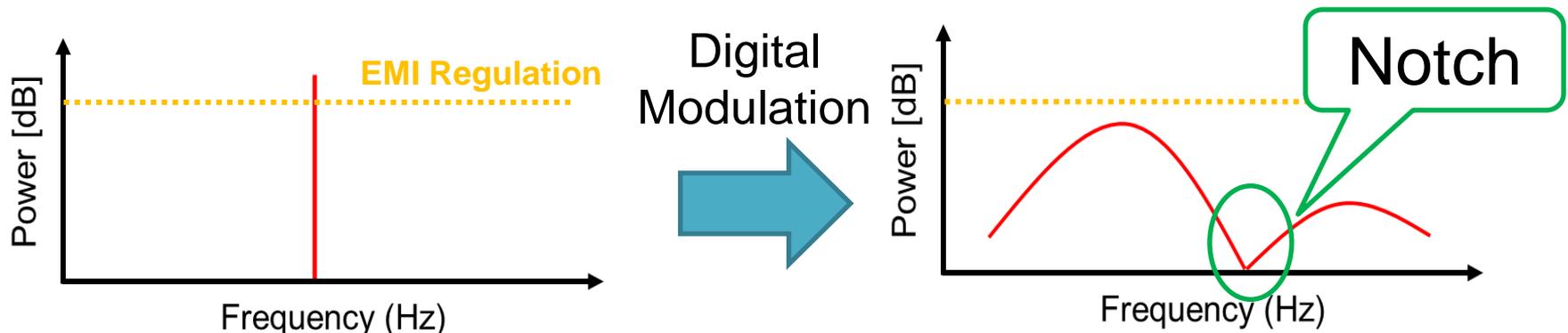
Conventional Method

- アナログ信号に基づいて、パルスのパラメータを変調



Proposed Method

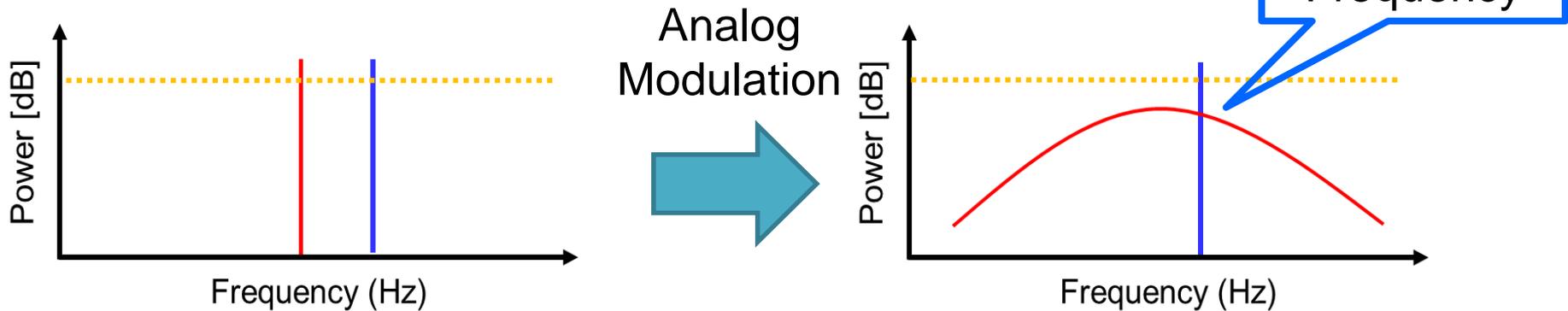
- デジタル信号に基づいて、パルスのパラメータをコーディング



コーディング方式スペクトラム拡散

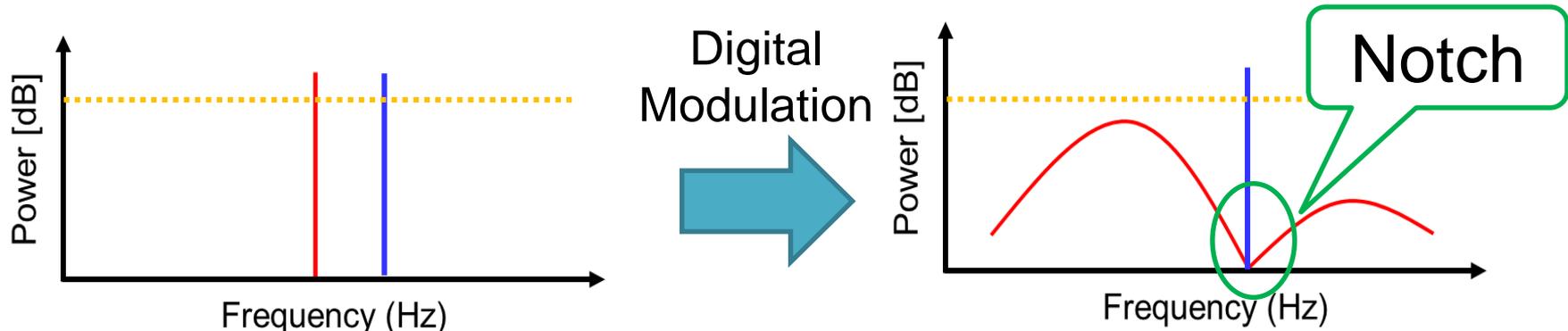
Conventional Method

- アナログ信号を入力し、パルスのパラメータを変調



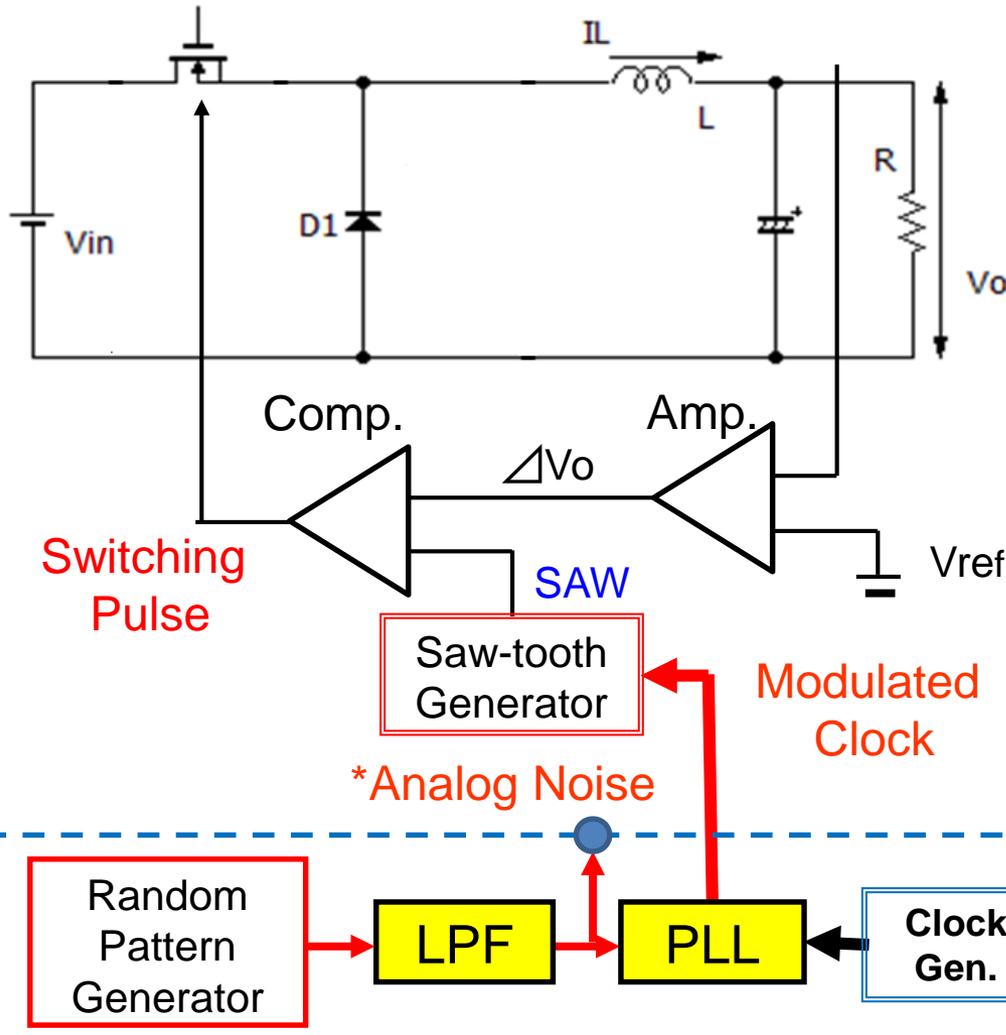
Proposed Method

- デジタル信号を入力し、パルスのパラメータをコーディング



従来と提案の比較

★アナログノイズを用いたスペクトラム拡散



- ² * 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
- ↓
- * SW パルス周波数が変調され、EMIの最大が低減

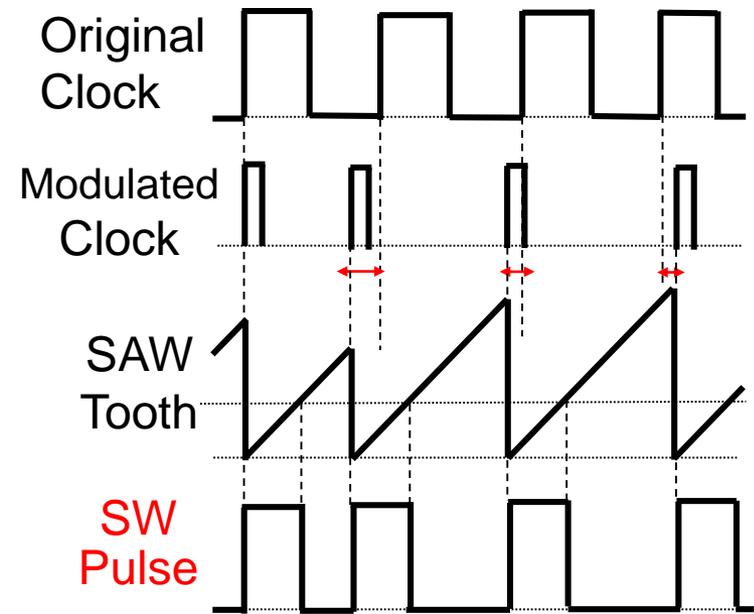
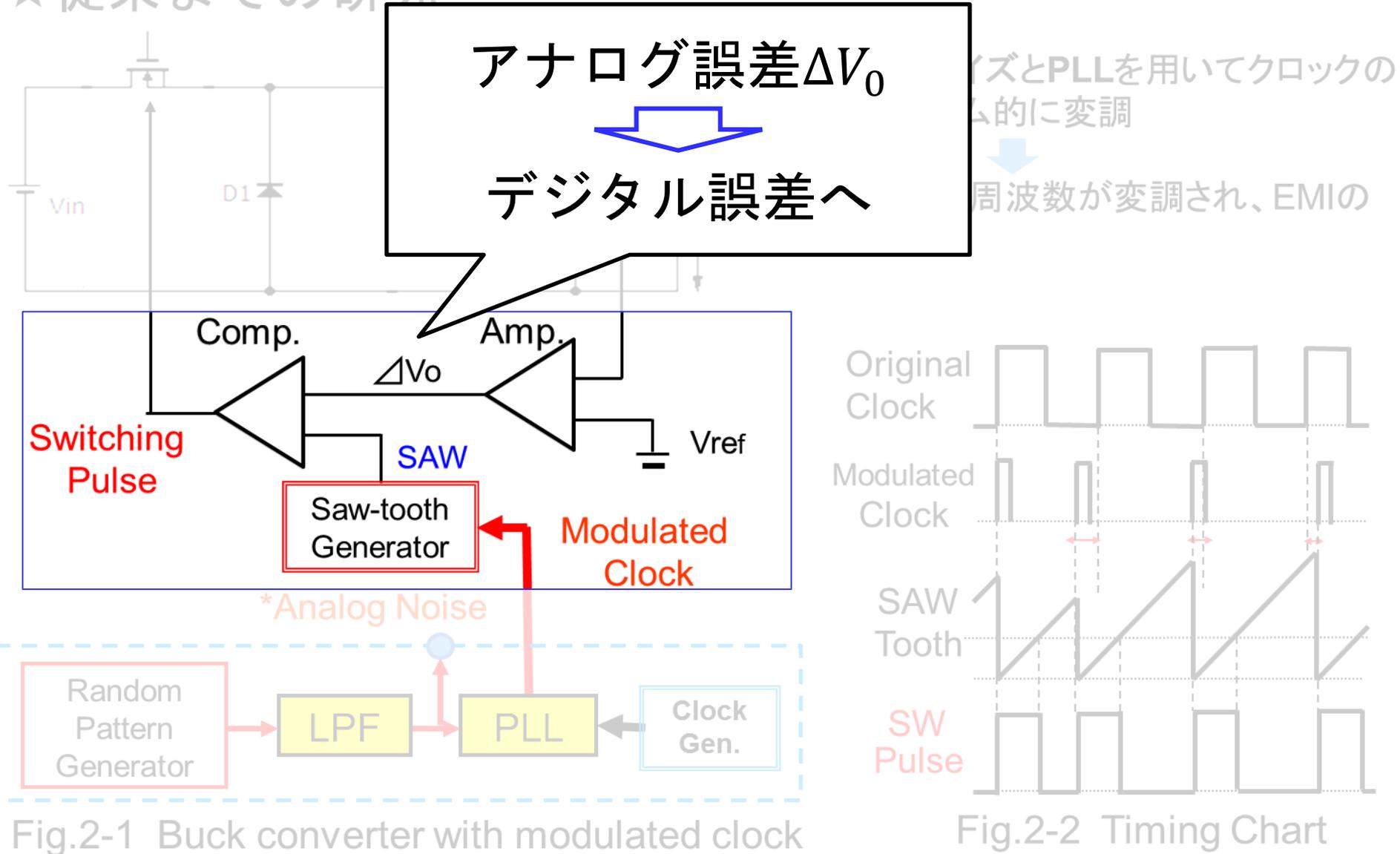


Fig.2-2 Timing Chart

Fig.2-1 Buck converter with modulated clock

従来と提案の比較

★従来までの研究



コーディング方式のシミュレーション

単変調方式

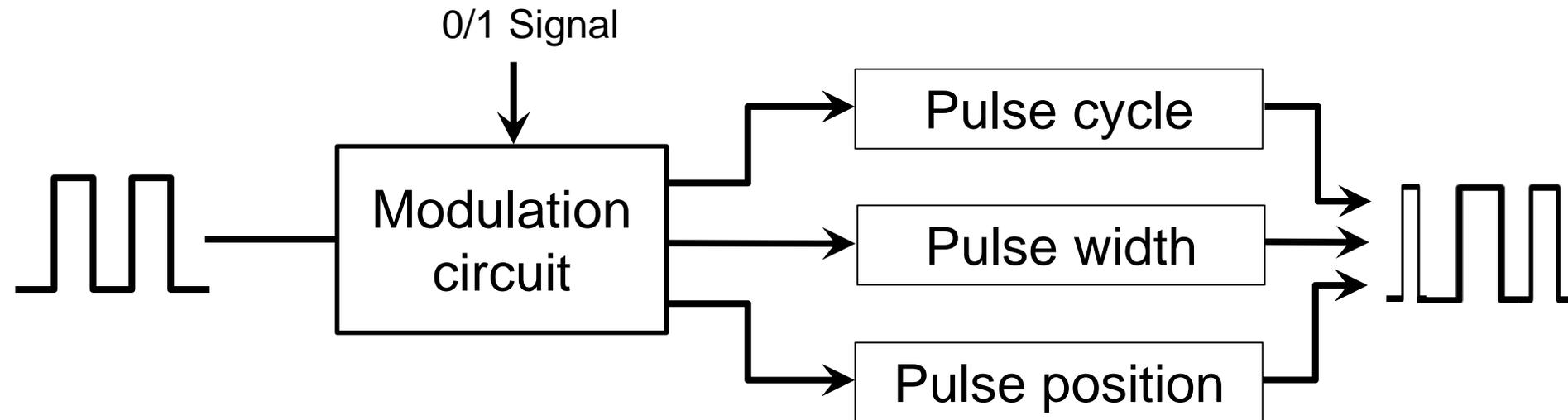
パルス幅・周期・位置の中のいずれかを任意選択して変調

- PWM方式
- PCM方式
- PPM方式

複合変調方式

パルス幅・周期・位置の中の複数を任意選択して変調

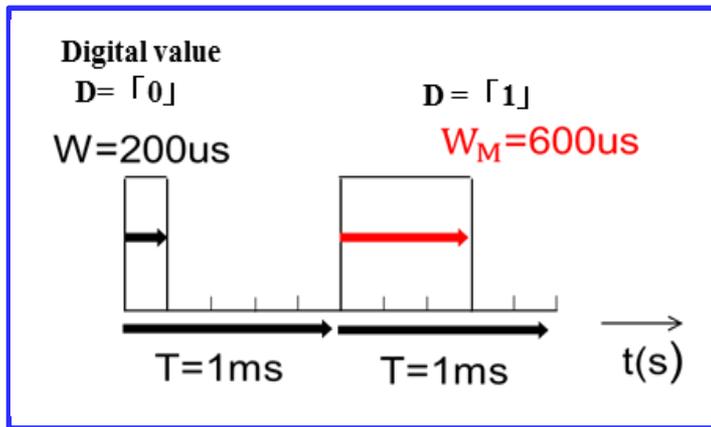
- ASM (PWM+PCM) 方式
- DPM (PWM+PCM) 方式



PWMコーディング方式スペクトラム拡散

PWMコーディング方式

デジタル値(1/0)に応じてパルスの幅をコーディング



PWM_{cod} のノッチ発生の実験式

[1]

$$f_{\text{notch}} \cong K \times \frac{1}{(W_M - W)}$$

$$= 2.5\text{kHz}, 5.0\text{kHz}, \dots$$

0/1 Signal

Modulation
circuit

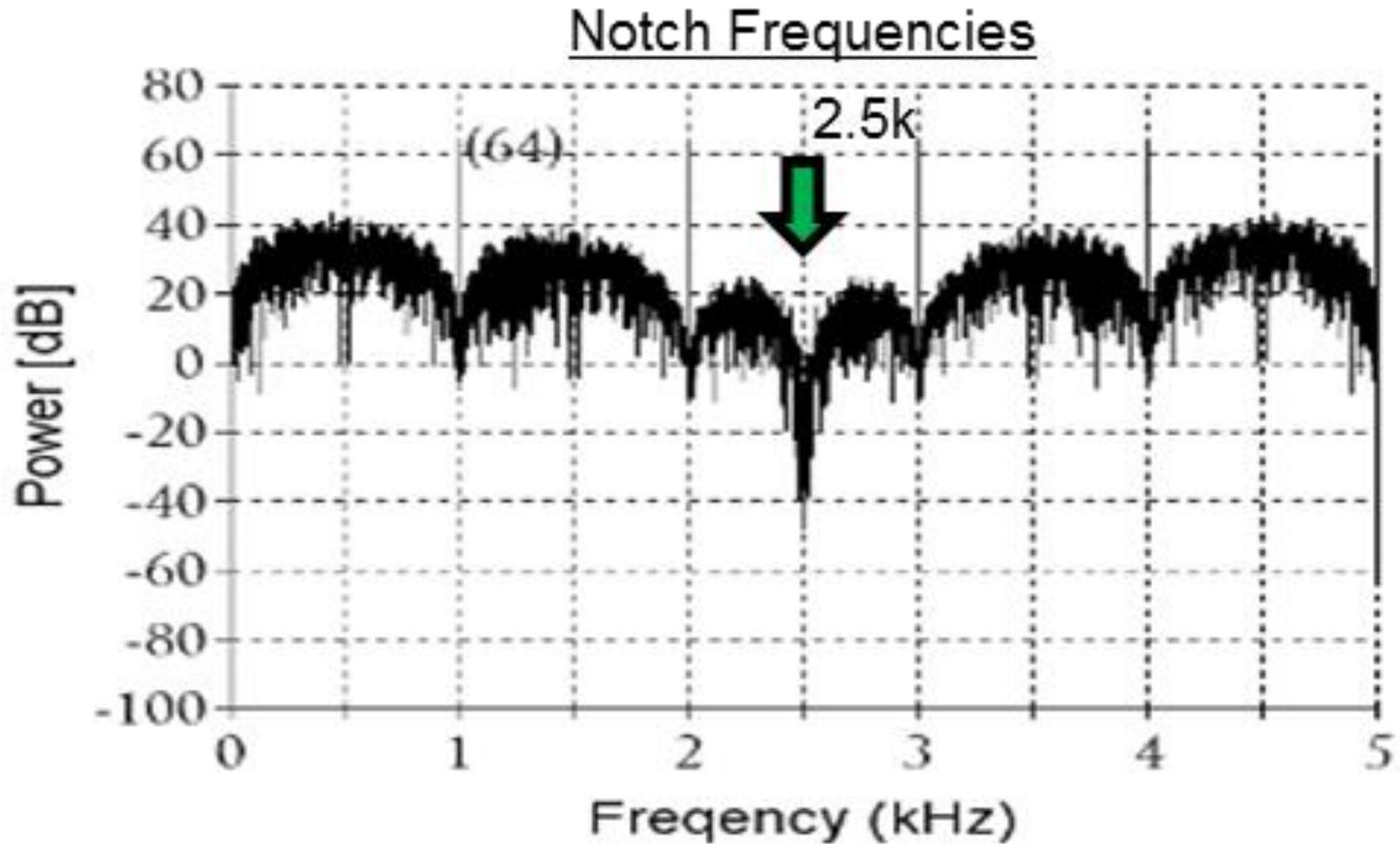
Pulse cycle

Pulse width

Pulse position

[1]実験式：シミュレーション結果から経験的に導出した式

PWMコーディング方式スペクトラム1



式とSIM結果の整合性有り

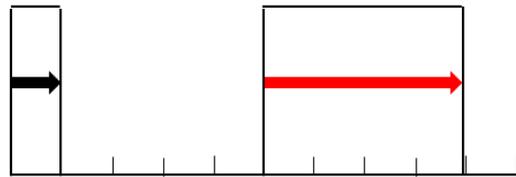
PWMコーディング方式スペクトラム2

パルスパラメータ変調値

Digital value

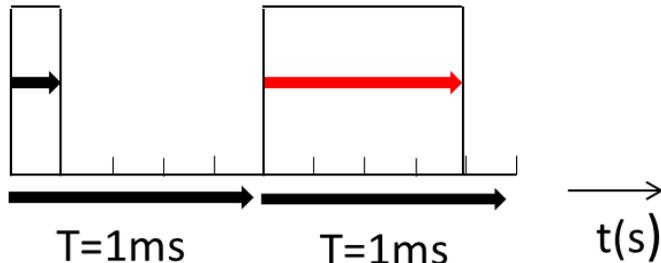
D = 「0」

W = 200us



D = 「1」

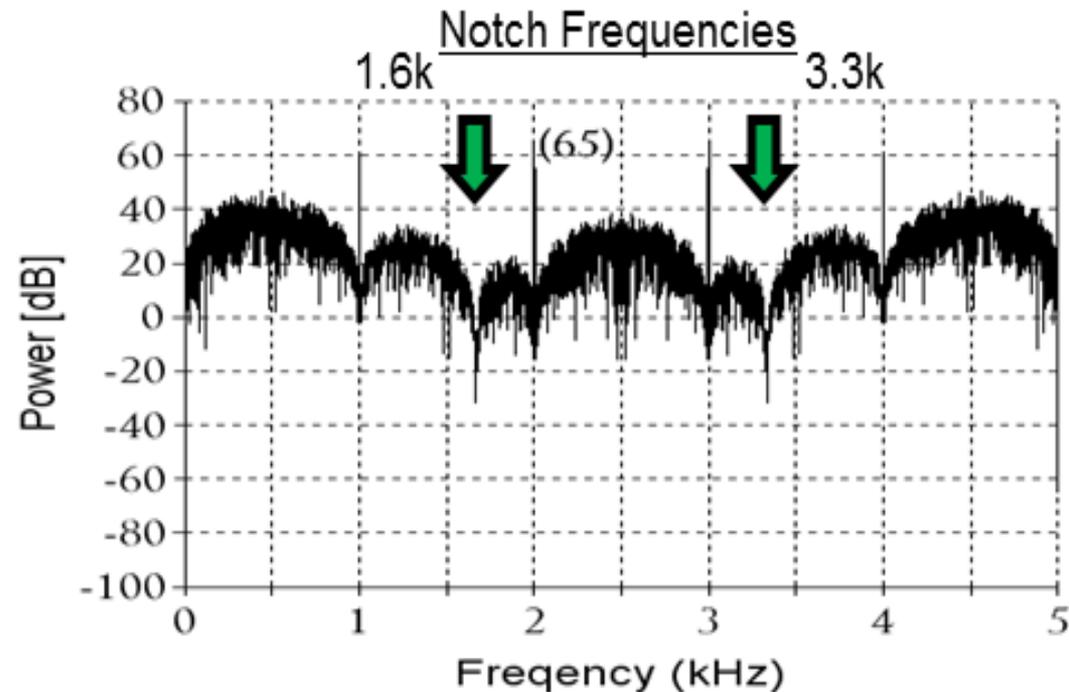
$W_M = 800us$



PWM_{cod} 方式のノッチ発生式

$$f_{notch} \cong K \times \frac{1}{(W_M - W)}$$

$$= 1.67kHz, 3.33kHz, \dots$$



式とSIM結果の
整合性有り

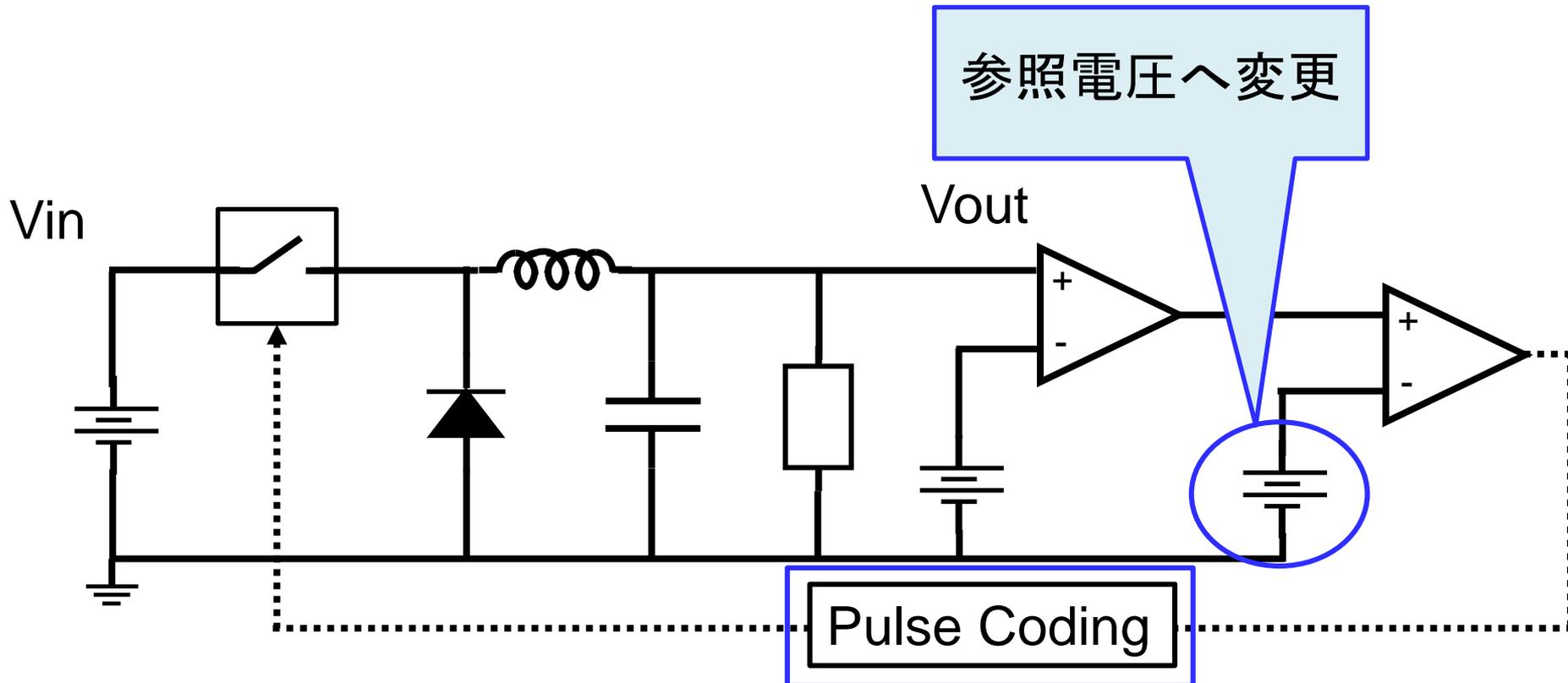
アウトライン

- 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**
 - 擬似回路検証
 - スイッチング電源検証
- $\Delta\Sigma$ 変調パルスコーディング方式
- まとめ

コーディング方式スイッチング電源回路

Pulse Coding

- デジタル値に応じて
パルスパラメータをコーディング



PWMコーディング回路(動作1)

①基準<出力のとき

SEL信号はHigh
 V_L を選択



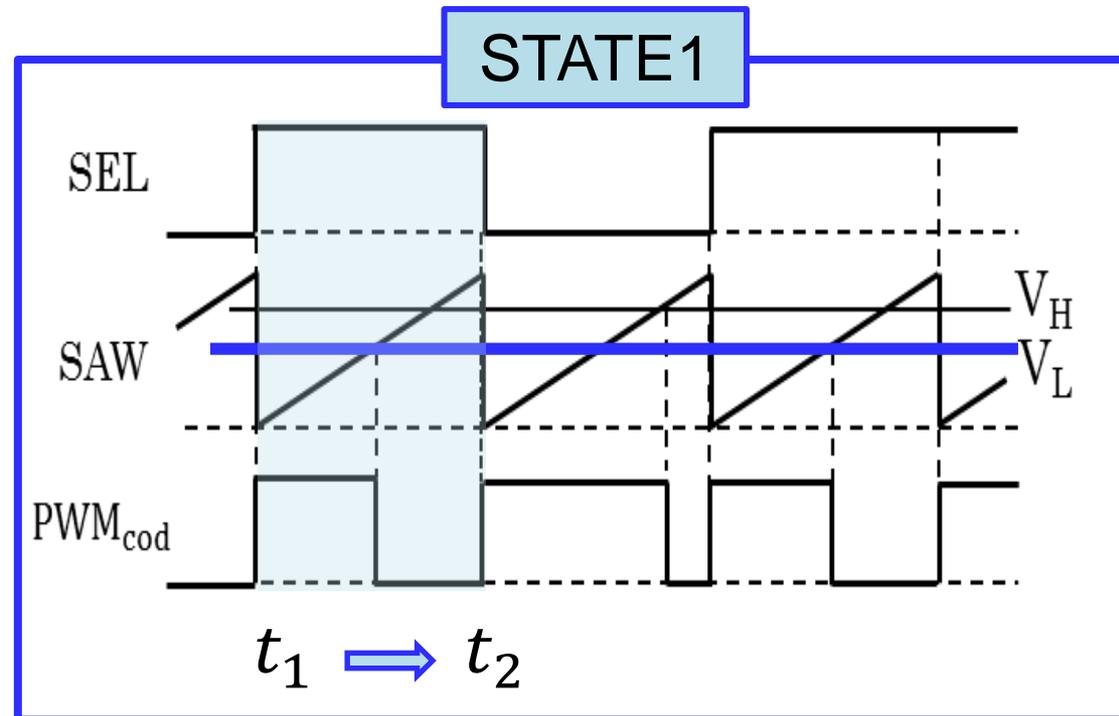
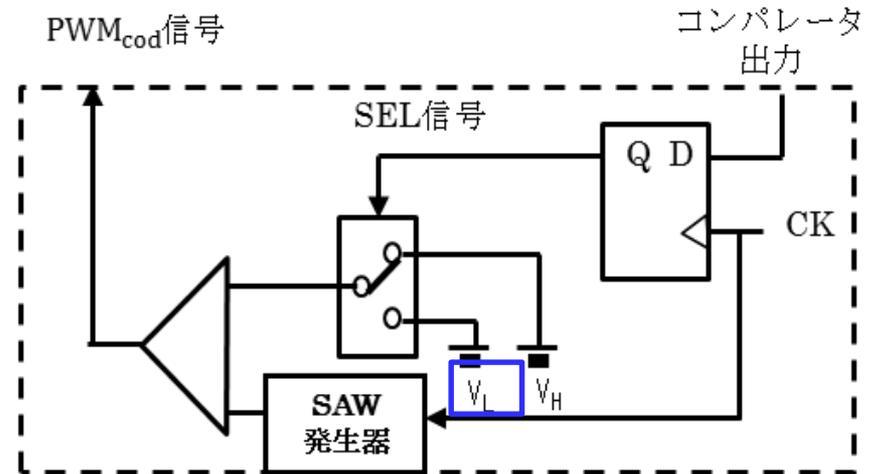
V_L と鋸歯状波とを比較



Duty Ratio : 小



周期全体の出力電圧 : 減少



PWMコーディング回路(動作2)

②基準 > 出力のとき

SEL信号はLOW
 V_H を選択



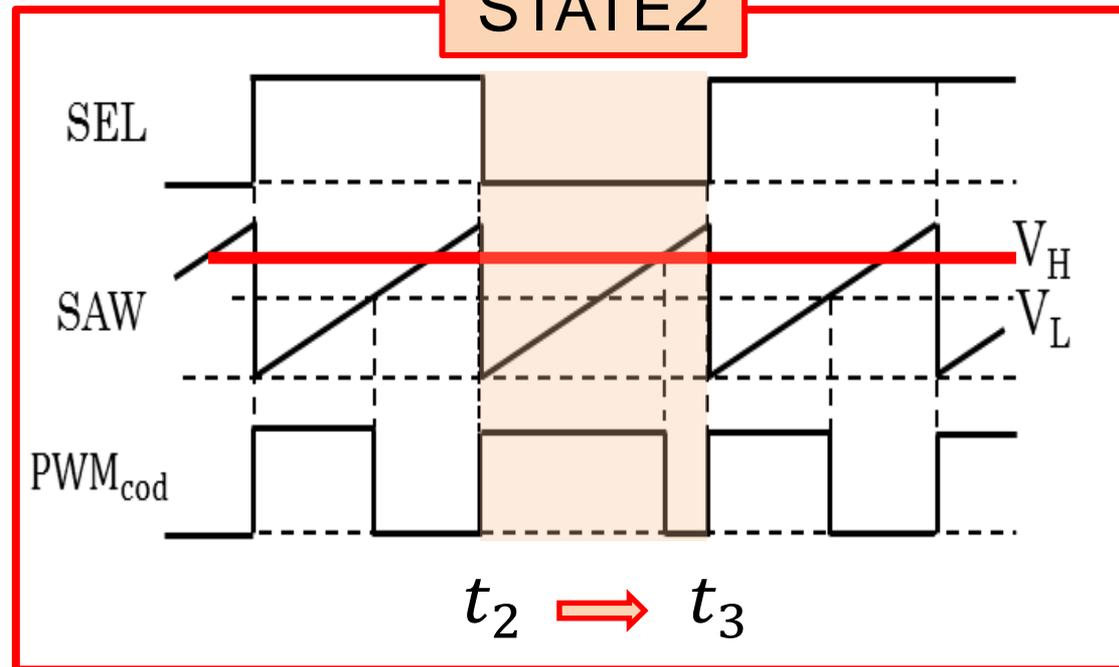
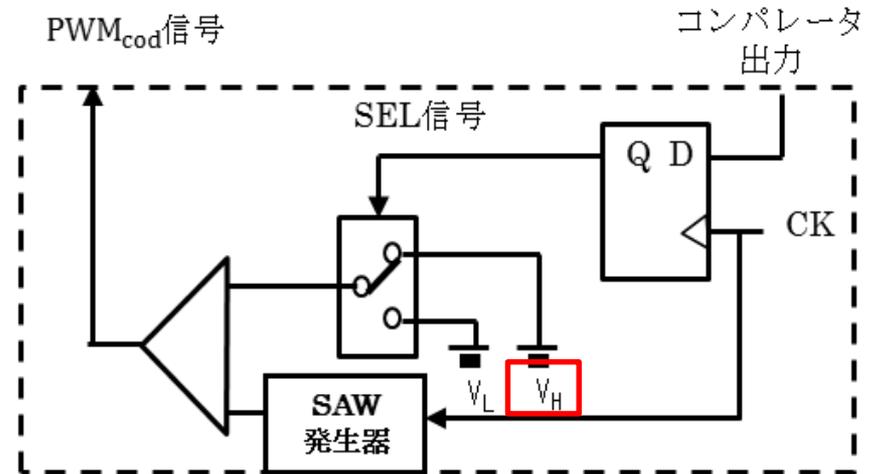
V_H と鋸歯状波とを比較



Duty Ratio : 大



周期全体の出力電圧 : 増大



PWMコーディング回路(動作3)

③基準<出力のとき

SEL信号はHigh
 V_L を選択



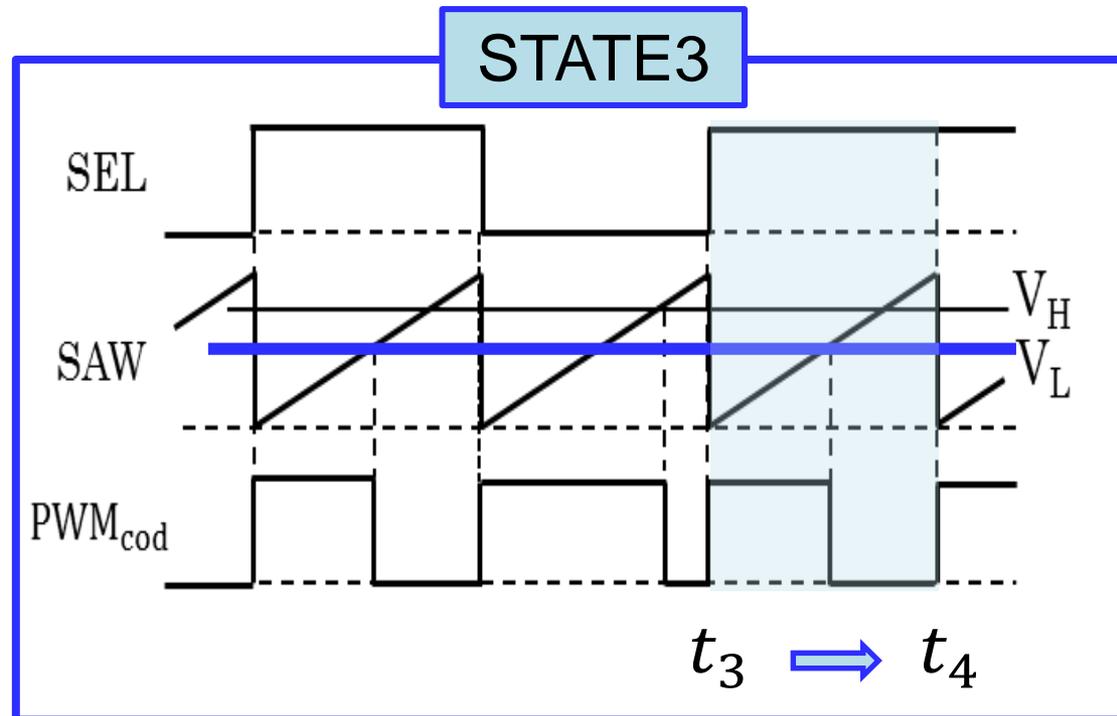
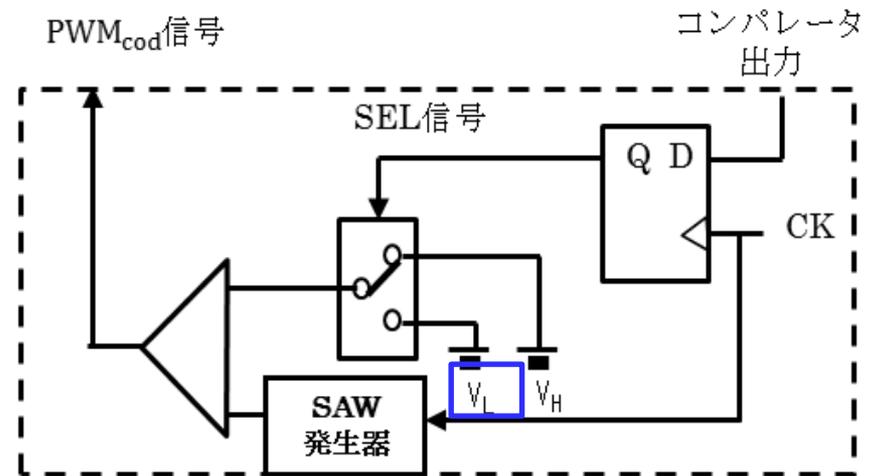
V_L と鋸歯状波とを比較



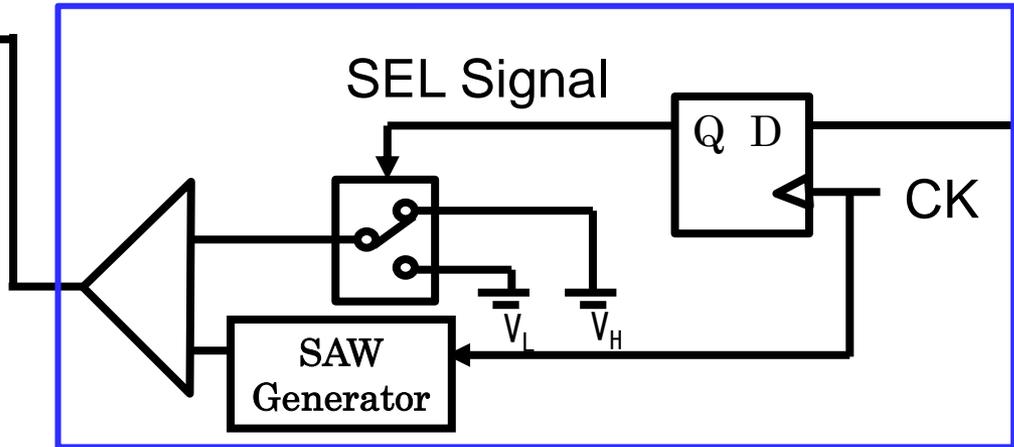
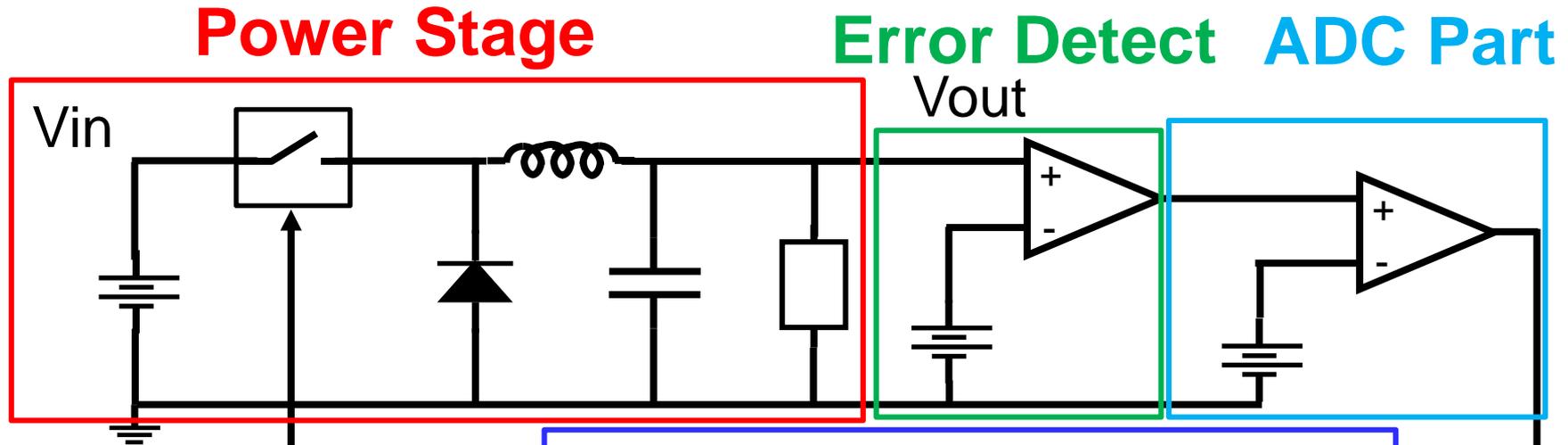
Duty Ratio : 小



周期全体の出力電圧 : 減少



PWM提案手法の回路図



Pulse Coding

実験式

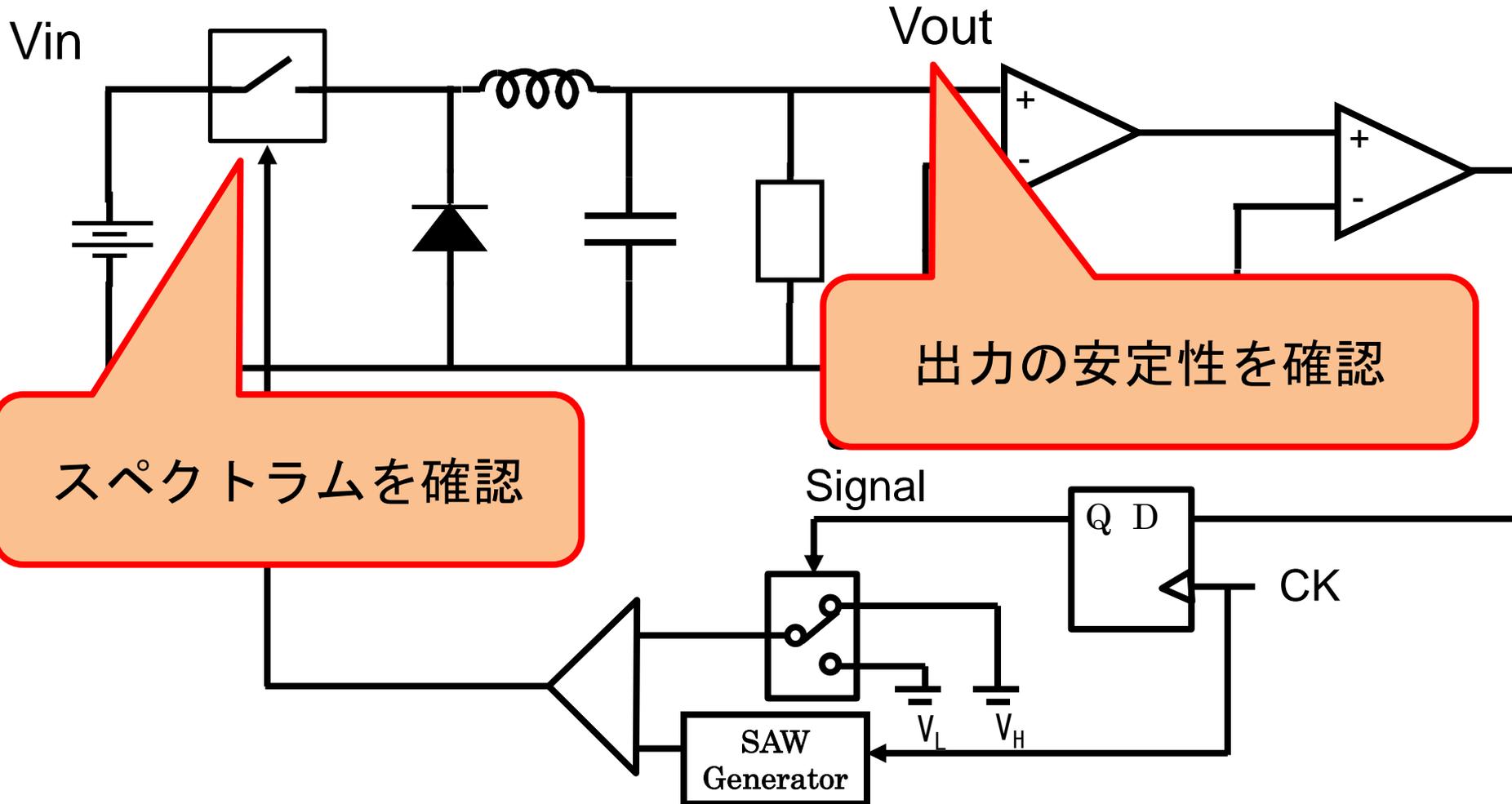
$$f_{\text{notch}} \cong K \times \frac{1}{(1.6\mu - 0.3\mu)} = 770\text{kHz}, 1.5\text{MHz}$$

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

SIMでの確認事項

Power stage

Error Detect ADC part

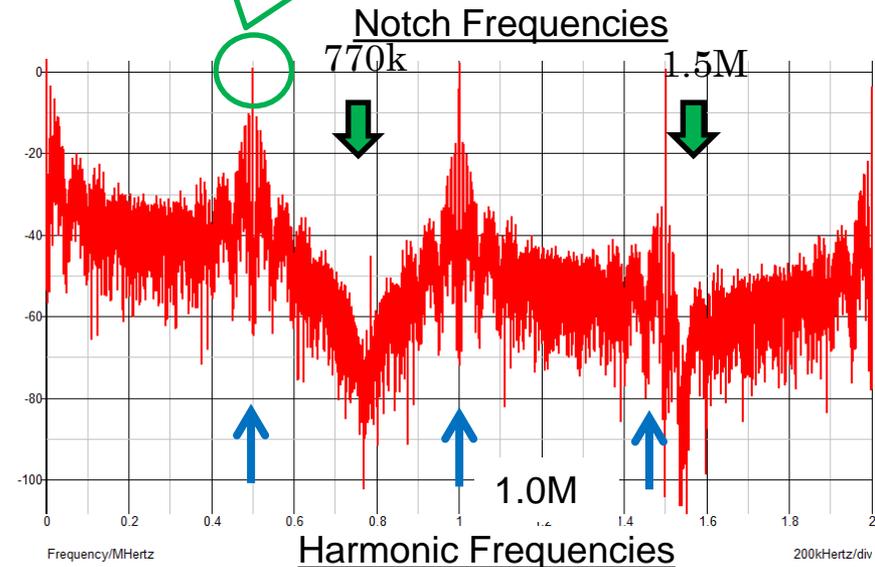
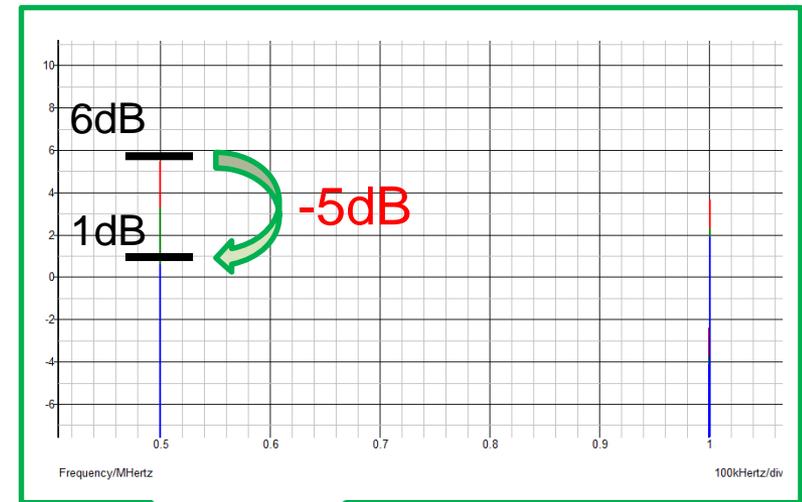
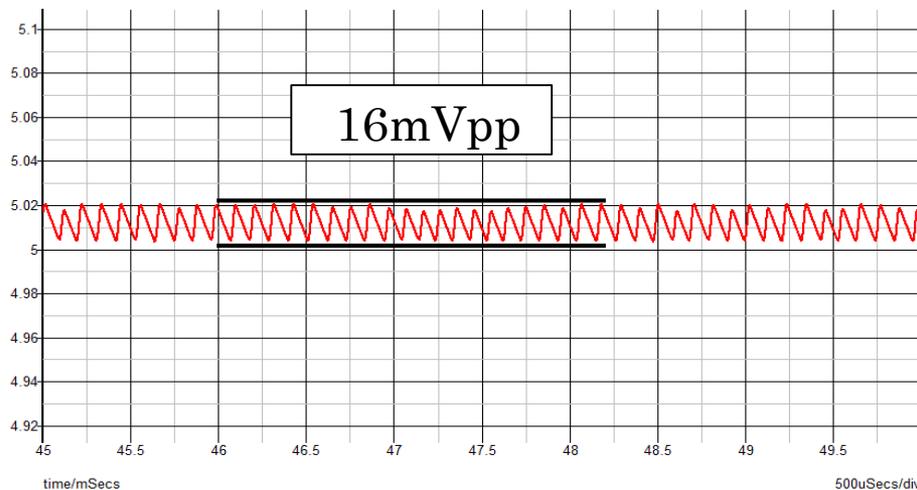


Pulse Coding

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



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
 - 擬似回路検証
 - スイッチング電源検証
- $\Delta\Sigma$ 変調パルスコーディング方式
- まとめ

$\Delta\Sigma$ AD変換回路

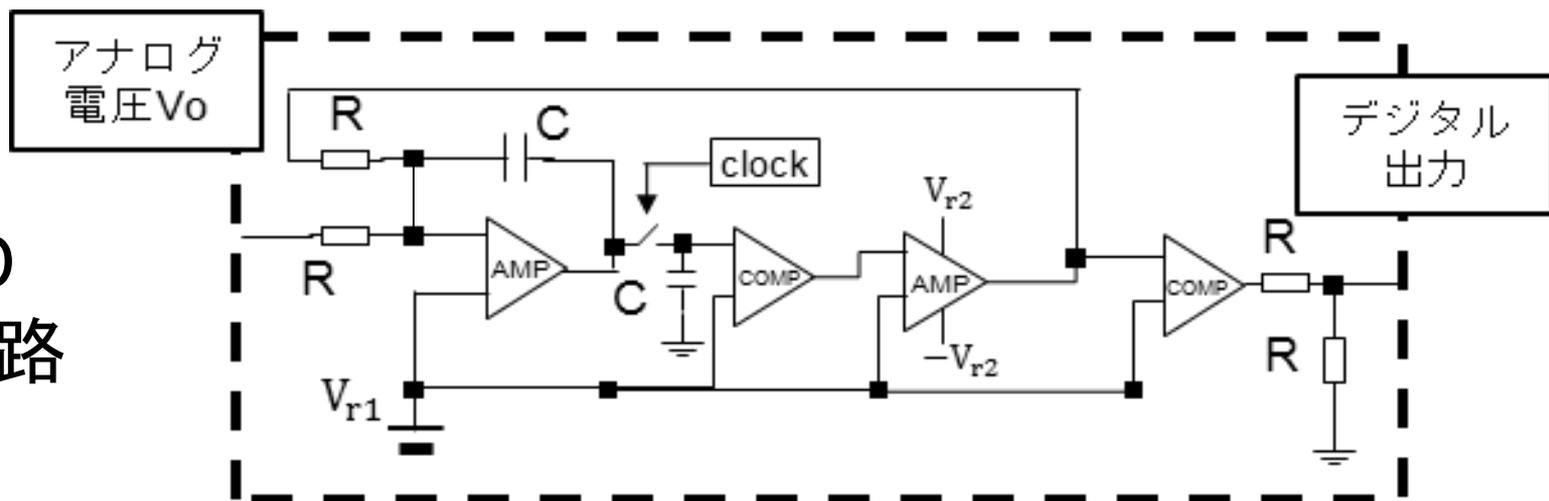
$\Delta\Sigma$ 変換器

- Δ (差分) と Σ (積分) によりアナログ信号を
1ビットのデジタル値で変換する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

$\Delta\Sigma$ 変換回路

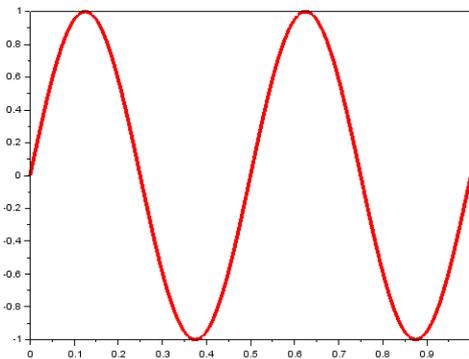


$\Delta\Sigma$ AD変換回路(原理)

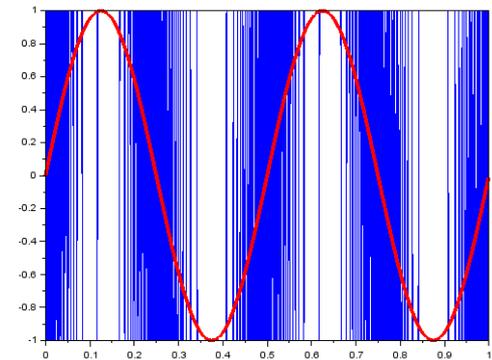
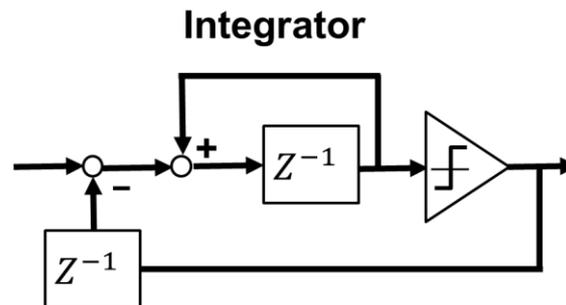
$\Delta\Sigma$ 変換器

- Δ (差分) と Σ (積分) によりアナログ信号を
1ビットのデジタル値で変換するAD変換器

{ 入力信号振幅 : 大 \Rightarrow Highの割合多
 { 入力信号振幅 : 小 \Rightarrow Lowの割合多



アナログ信号



デジタル信号

電圧振幅



$\Delta\Sigma$ 変調器回路



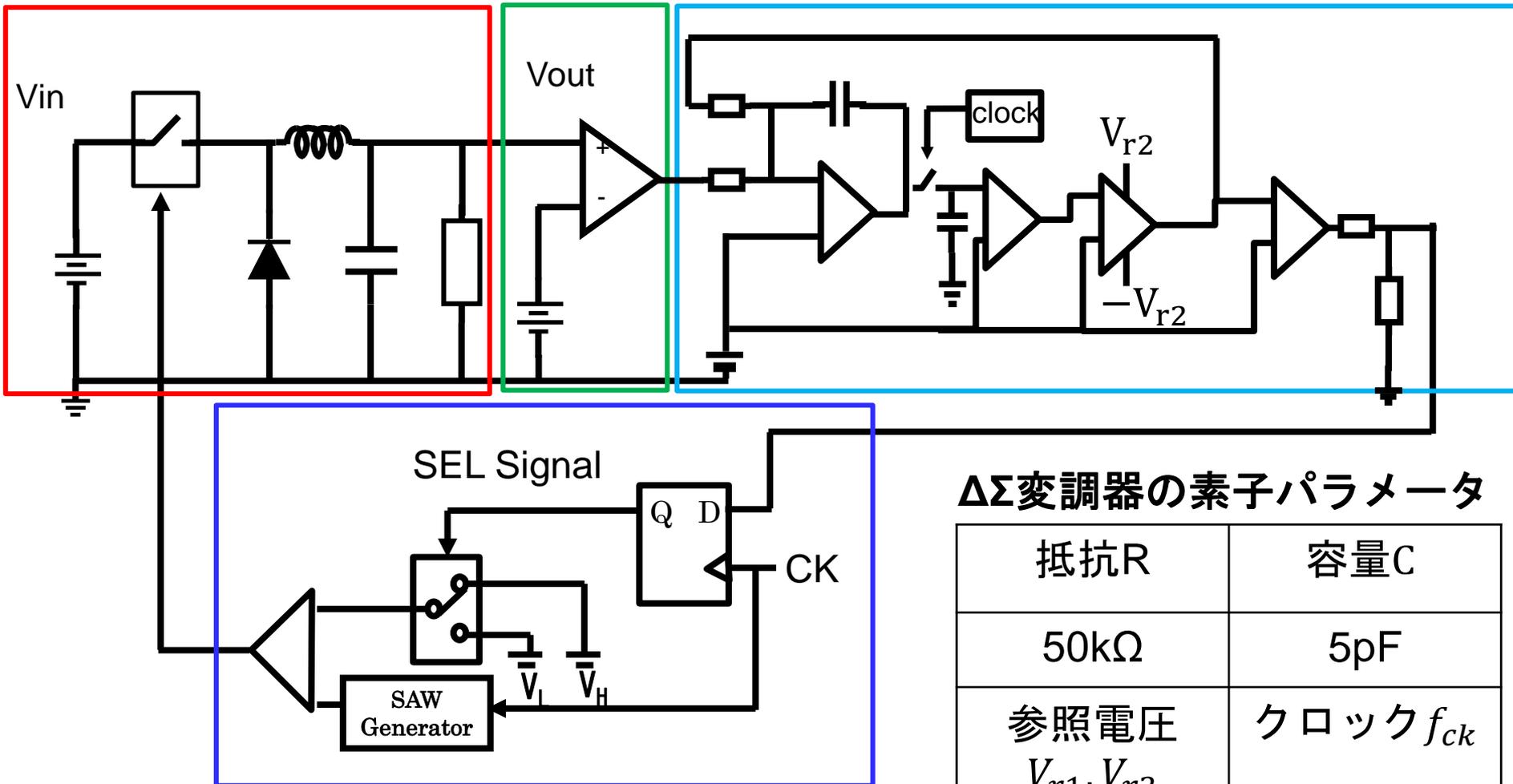
パルス密度

$\Delta\Sigma$ PWMコーディング方式スイッチング電源回路構成

Power Stage

Error Detect

$\Delta\Sigma$ ADC Part



Pulse Coding

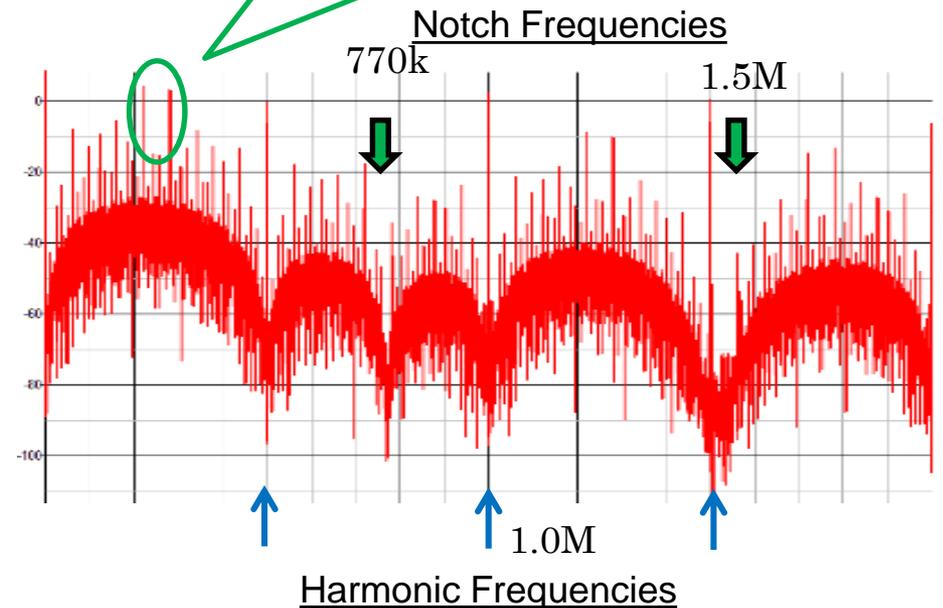
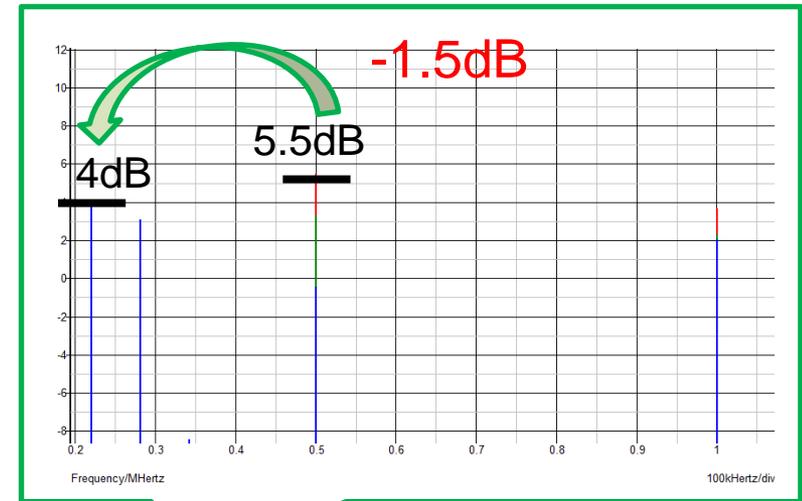
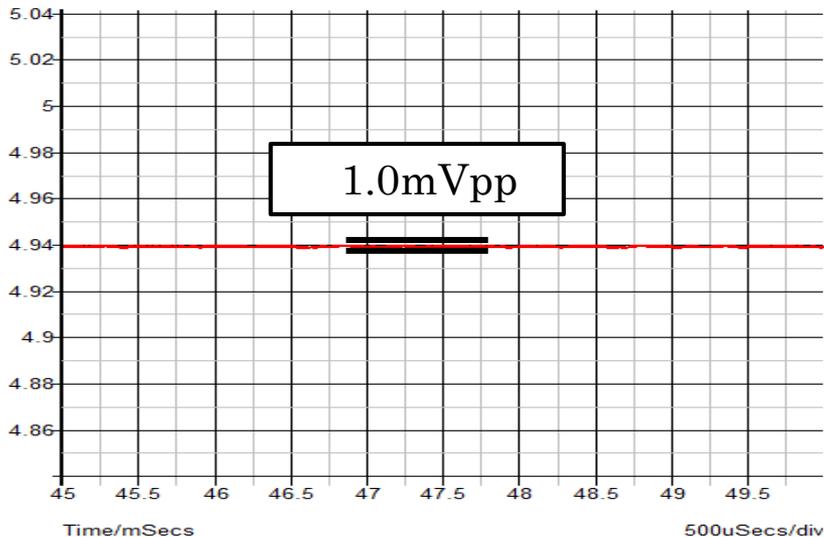
$\Delta\Sigma$ 変調器の素子パラメータ

抵抗R	容量C
50k Ω	5pF
参照電圧 V_{r1}, V_{r2}	クロック f_{ck}
5.0V, 10V	500kHz

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



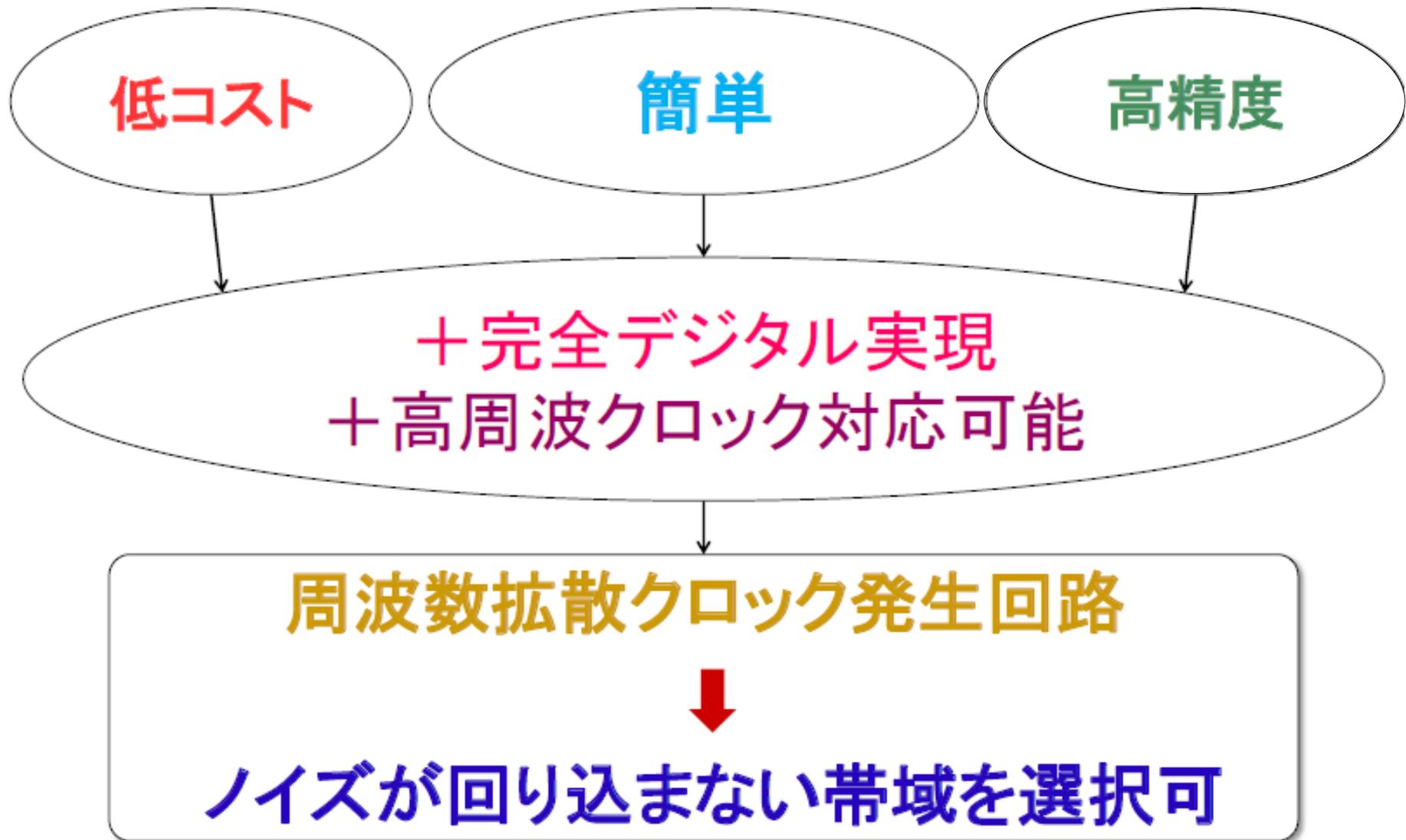
アウトライン

- 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
 - 擬似回路検証
 - スイッチング電源検証
- $\Delta\Sigma$ 変調パルスコーディング方式
- まとめ

まとめ

- ノッチ特性を持ったスペクトラム拡散方式を提案
 - ノッチ発生式の導出
- 提案方式をスイッチング電源回路に応用
 - ノッチの発生
 - EMI低減
- 提案方式に $\Delta\Sigma$ 変調器を応用
 - 応答速度の向上
 - 位相遅れ発生

最後に

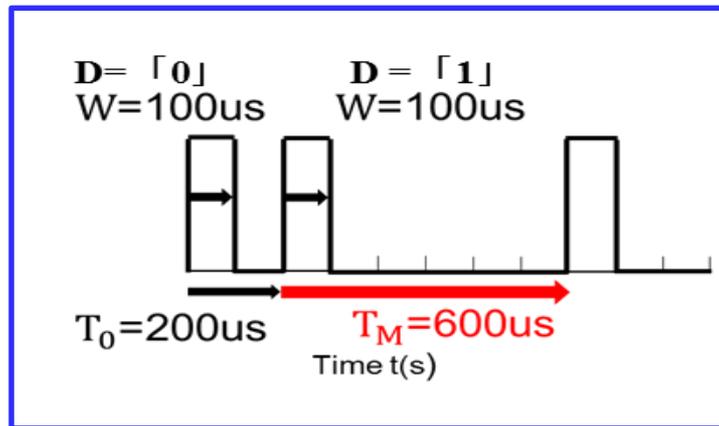


付録

PCMコーディング方式スペクトラム拡散

PCMコーディング方式

デジタル値(1/0)に応じてパルスの周期をコーディング



PCM_{cod} のノッチ発生の実験式

$$f_{notch} = K \times \frac{1}{(T_M - T)}$$

[1]

$$= 2500, 5000, \dots$$

0/1 Signal

Modulation circuit

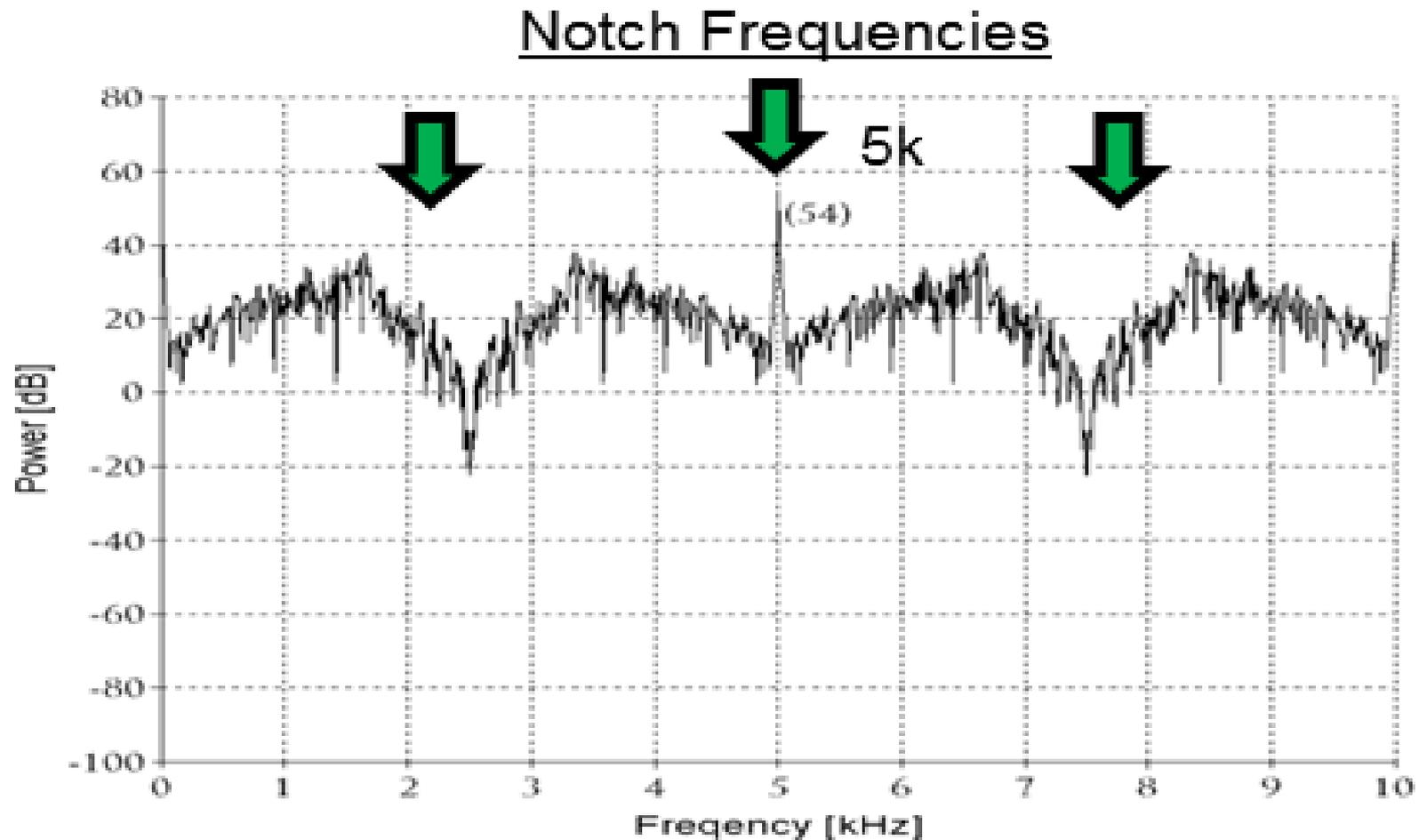
Pulse cycle

Pulse width

Pulse position

[1]実験式：シミュレーション結果から経験的に導出した式

PCMコーディング方式のスペクトラム

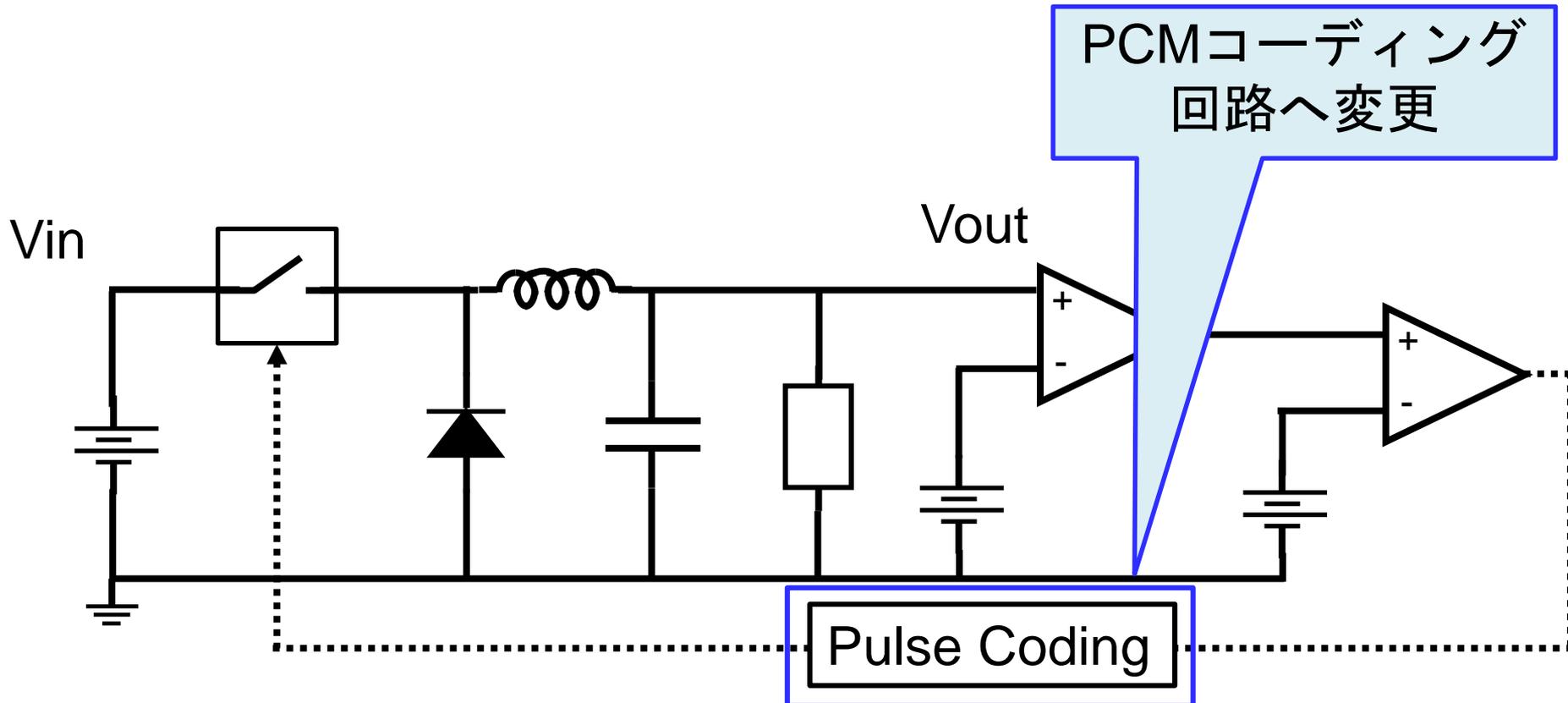


式とSIM結果の整合性有り

コーディング方式スイッチング電源回路

Pulse Coding

- デジタル値に応じて
パルスパラメータをコーディング



PCMコーディング回路(動作1)

①基準<出力のとき

パルス発生周期を
 T_{SELL} にセット



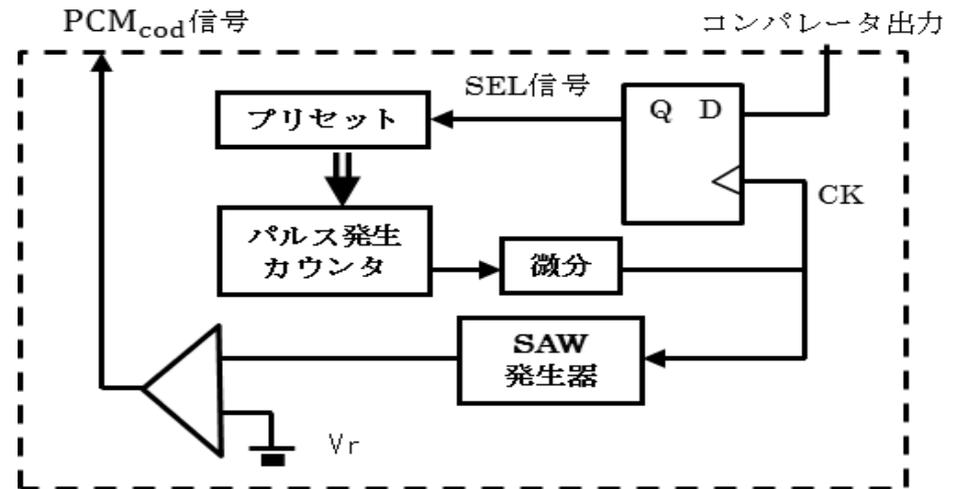
鋸歯状波の周期：短



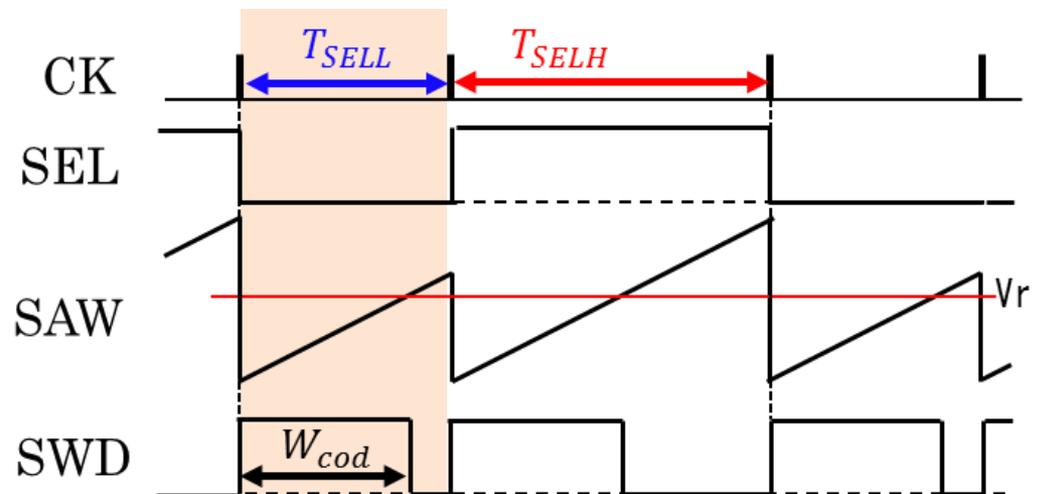
Duty Ratio：大



周期全体の出力電圧：増大



STATE1



PCMコーディング回路(動作2)

②基準 > 出力のとき

パルス発生周期を
 T_{SELH} にセット



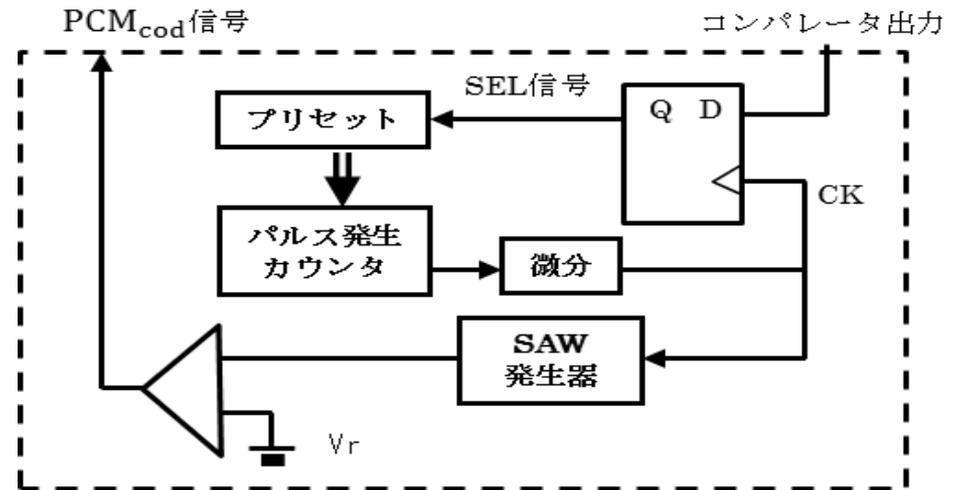
鋸歯状波の周期：長



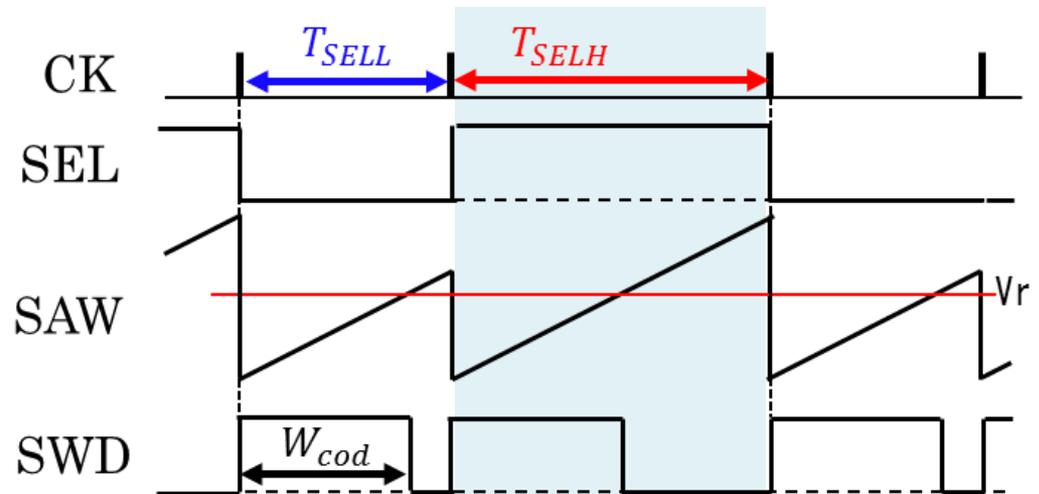
Duty Ratio：小



周期全体の出力電圧：減少



STATE2



PCMコーディング回路(動作3)

③基準<出力のとき

パルス発生周期を
 T_{SELL} にセット



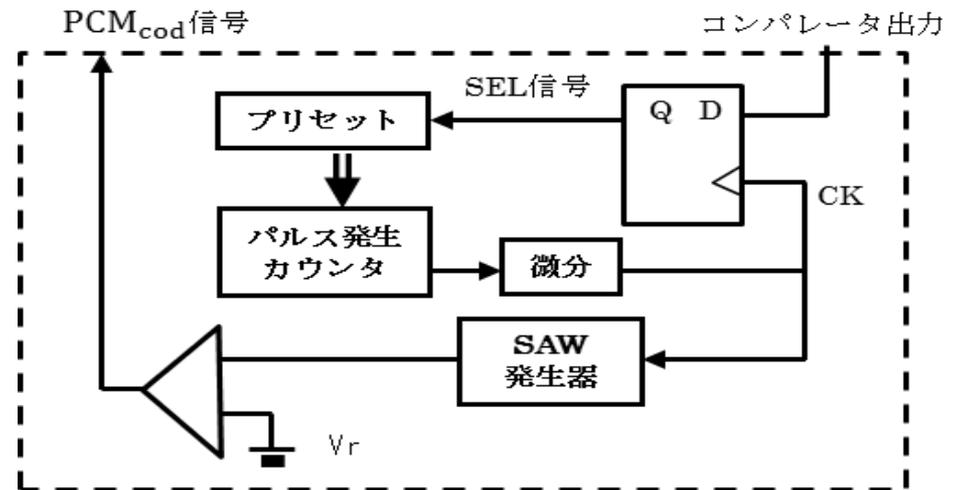
鋸歯状波の周期：短



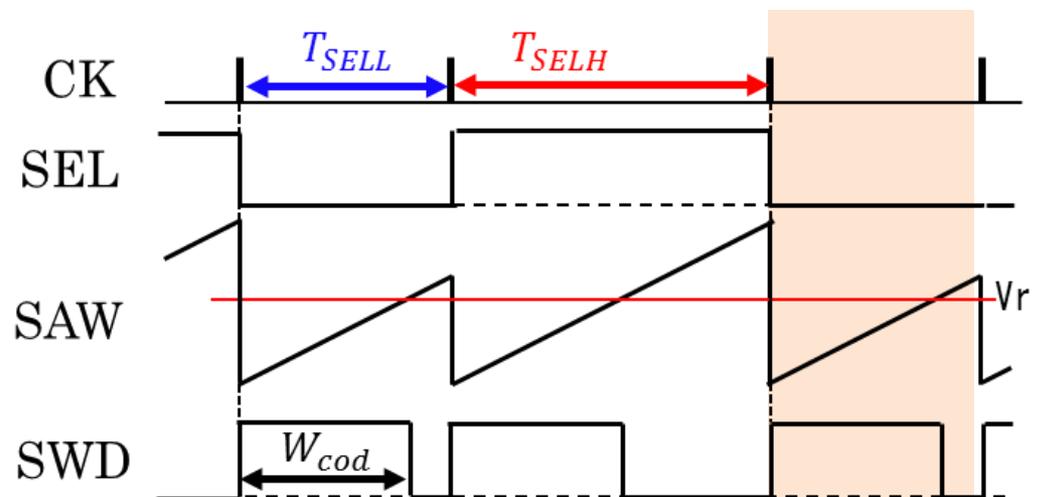
Duty Ratio：大



周期全体の出力電圧：増大



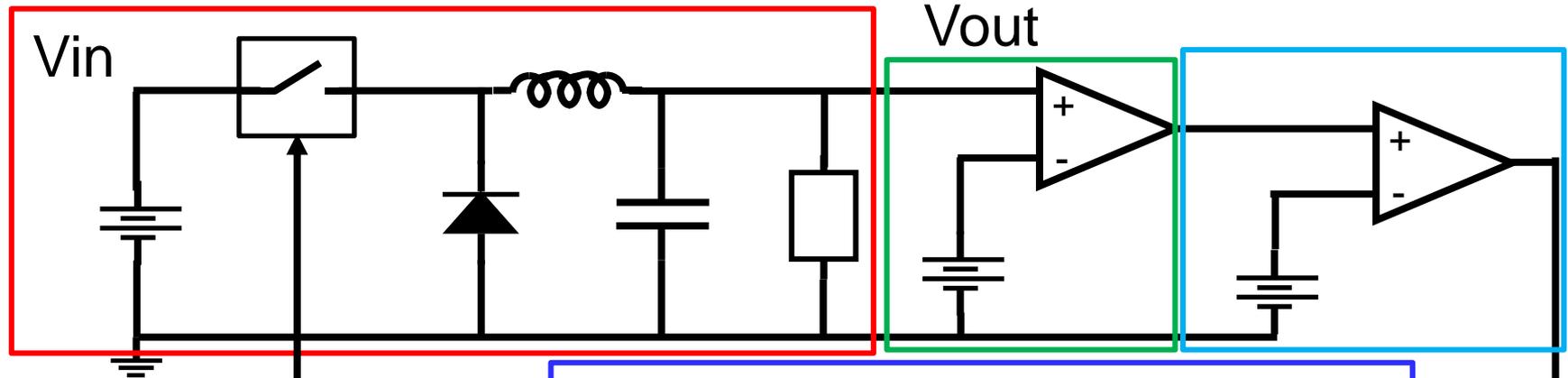
STATE3



PCM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

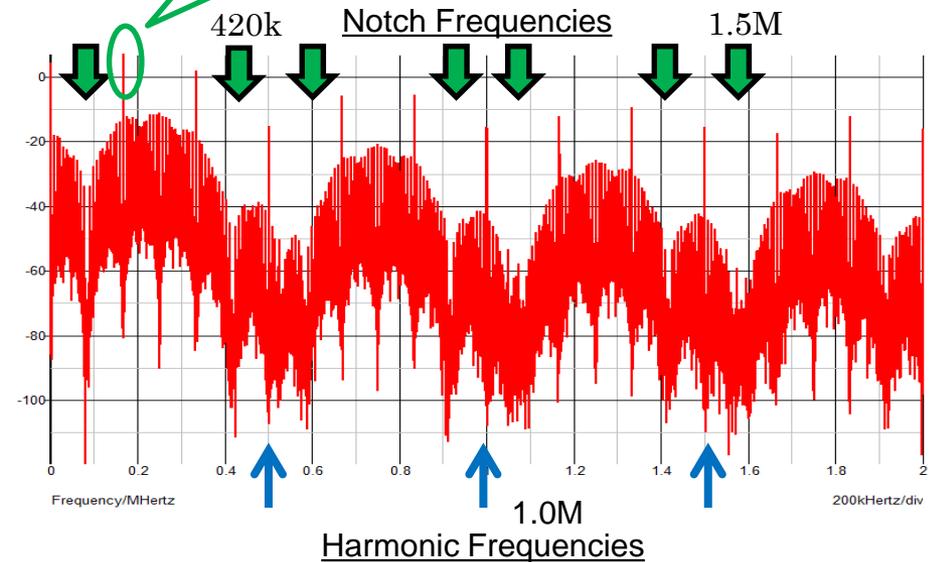
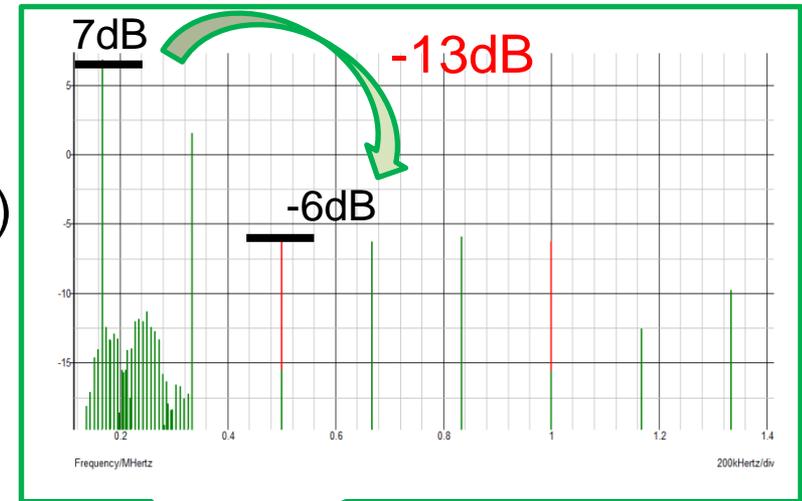
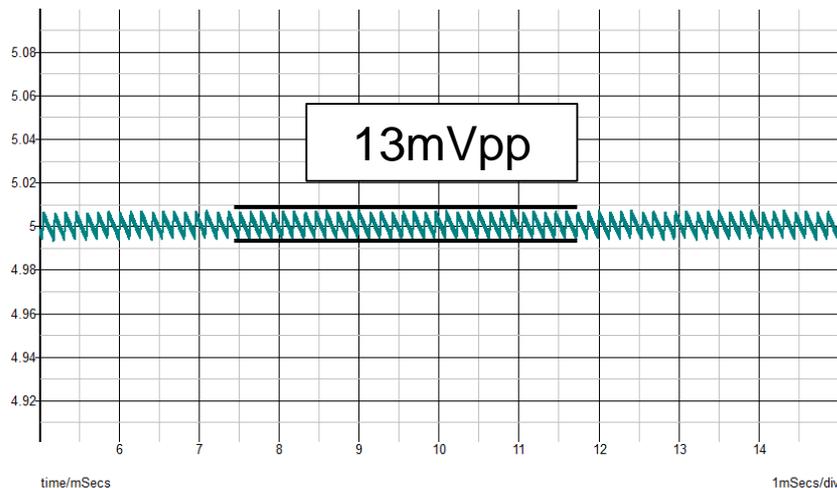
PCM_{cod}信号

Pulse Coding

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



まとめ

	従来	PWM方式	PCM方式	$\Delta\Sigma$ PWM方式
ノッチの発生	✗	○	◎	○
EMIの低減	○	○	◎	○
オフセット	○	○	○	✗
リップル	◎	○	○	◎
式との整合性		◎	✗	◎

コーディング方式

【PWM方式】

- ノッチの発生
- EMI低減
- オフセット中

【PCM方式】

- ノッチの発生
- EMI低減
- オフセット小

$\Delta\Sigma$ コーディング方式

【 $\Delta\Sigma$ PWM方式】

- ノッチの発生
- EMI低減
- リップル改善
- オフセット大

Q&A

Q & A

● クロックの周波数はどのくらいに設定されているか？

500kHzに設定しています。そのためシミュレーション結果では500kHz及びその倍数周波数にノイズのピークが発生しています。

● 実験式は経験的に求めた式とおっしゃっていましたが、理論的に求めたものではないのか？

はい。現段階では理論的に求めた式ではありません。今後はノッチ式を理論的に導出することは今後の課題の一つです。

Q & A

- デジタル変調によって発生するパルスの周期は2msなのか？
つまり、2種類のパルスは交互に現れるという認識で良いのか？

それは違います。2種類のパルスの発生は出力電圧の昇降に対応して発生しているため必ずしも交互とは限りません。

- つまり、パルス幅の小さいパルスが連続して出力される可能性やパルス幅の大きいパルスが連続して出力される可能性もあるということですか？

その通りです。

- 式のKとはどのような値なのか？

このKは係数のKではなく、自然数です。すいません、スライドではKに関する説明をしていませんでした。

Q & A

- ノッチの特性を3次、5次高調波の周波数に合わせることで高調波のピークレベルを低減できるのでは？

以前私も検討しましたが低減しませんでした。

今回でいうとノッチと3次高調波がかなり近い周波数で発生していますがノッチの影響によるピークの低減は確認できませんでした。

- $\Delta\Sigma$ 変調方式において小さなノイズピークがたくさん出現しているがこれは $\Delta\Sigma$ 変調を用いたことによるものなのか？

多分そうだと思います。 $\Delta\Sigma$ 変調を使用した時にこのようなピークノイズがたくさん発生するのでこの変調器が影響していると考えられます。しかし、この小さなノイズピークを低減する必要性はあると思います。

Q&A

- 2種類のパルスの順番は出力に応じて変化することだがそれでもノッチは発生するのか？また、ノッチの位置は変化しないのか？

発生します。今回のシミュレーションでも発生させたパルスの順番は出力に依存していることを確認しています。そのうえでノッチが発生しています。

ノッチの位置も変化していません。実験式からもわかるように依存するのはパルスのパラメータのみです。それなのでパルスの順番が変わってもノッチの位置には影響しません。

- モーターを駆動する周波数のスペクトラム拡散を研究しています。今回のシミュレーションでは1MHz程度の周波数でシミュレーションをしていました。しかし、モーターを駆動する周波数では数kHzで高くても10kHz程度です。低周波におけるEMI規定の上限はかなり厳しいため、もし宜しければ検討してみてください。

ありがとうございます。今後の課題として検討させていただきます。