

DC-DC変換器の デルタシグマ変調器による制御

高虹 ケイ林 小堀康功 小林春夫 美和俊介
元澤篤史 高井伸和 新津葵一 (群馬大学)
大森武志, 小田口貴宏 中西功 根本謙治
(AKM テクノロジ)
松田順一(旭化成パワーデバイス)

Outline

- **研究背景**
- **PWM制御の問題点**
- **各種類のデルタシグマ変調および性能の比較**
- **シミュレーションによる効果確認**
- **まとめ**

Outline

- **研究背景**
- PWM制御の問題点
- 各種類のデルタシグマ変調および性能の比較
- シミュレーションによる効果確認
- まとめ

研究背景

- パワーデバイス技術の進歩

→ 高速スイッチング



- DCDCコンバータ制御に
ΔΣ変調器が適用可能

- ΔΣ変調制御の期待される利点：
 - 高速過渡応答
 - 高効率
 - スwitchングノイズのスペクトラム拡散

Outline

- 研究背景
- **PWM制御の問題点**
- 各種類のデルタシグマ変調および性能の比較
- Simulationによる効果確認
- まとめ

PWM高速過渡応答と高効率化のトレードオフ

- **過渡応答の高速化**



**インダクタのエネルギーの
充放電の高速化**



**高いスイッチング周波数
で動作**

- **高効率**



スイッチングロスが小さい



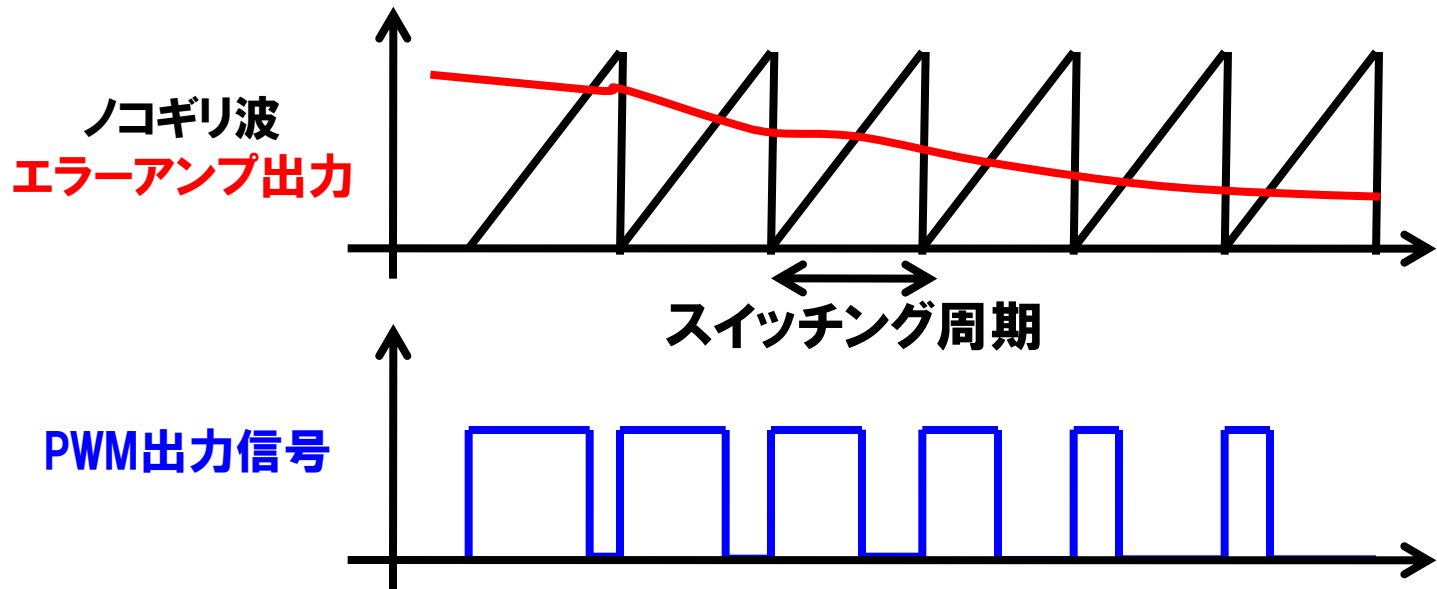
**スイッチのON・OFF
の回数を少なく**



**低いスイッチング周波数
で動作**

PWM制御の問題点

- スイッチング周波数はノコギリ波で決定



- スイッチング周期一定、毎回パルスの幅が変わる

高速過渡応答と高効率ともに実現することは困難

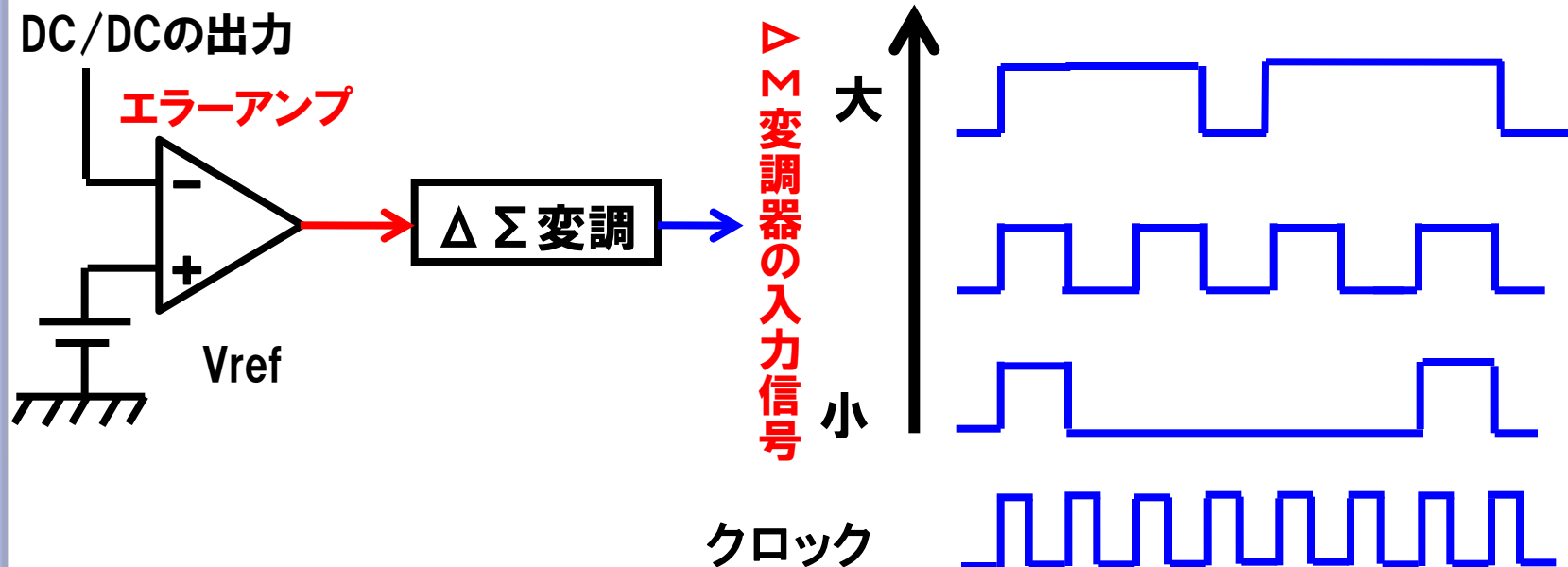
$\Delta \Sigma$ 変調制御方式の提案

デルタシグマ変調の特徴

高速過渡応答: 過渡状態 → 入力信号が大きく、小さく変わる

↓
出力パルス調整スピード速い

高効率化: スwitchのON・OFFの回数少ない



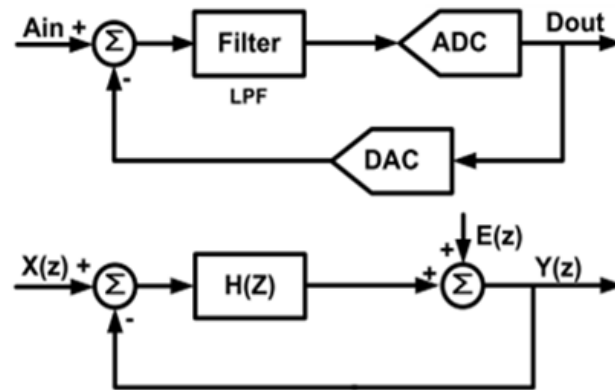
Outline

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- **各種類のデルタシグマ変調および性能の比較**
- Simulationによる効果確認
- まとめ

検討するデルタシグマ変調の種類

- フィードバック**対**フィードフォワード型
- 1次デルタシグマ**対**2次デルタシグマ
- 離散時間デルタシグマ**対**連続時間

フィードバック $\Delta\Sigma$ 変調器



$$Y(z) = \frac{H(z)}{1+H(z)} \cdot X(z) + \frac{1}{1+H(z)} \cdot E(z)$$

$$H(z) = \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \rightarrow STF(z) = z^{-1} \quad NTF(z) = 1 - z^{-1}$$

Signal Transfer Function

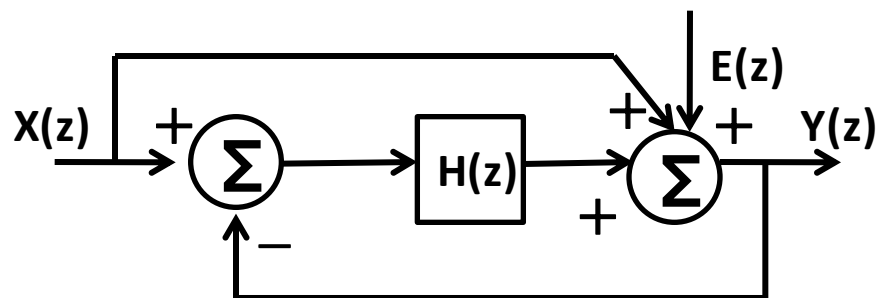
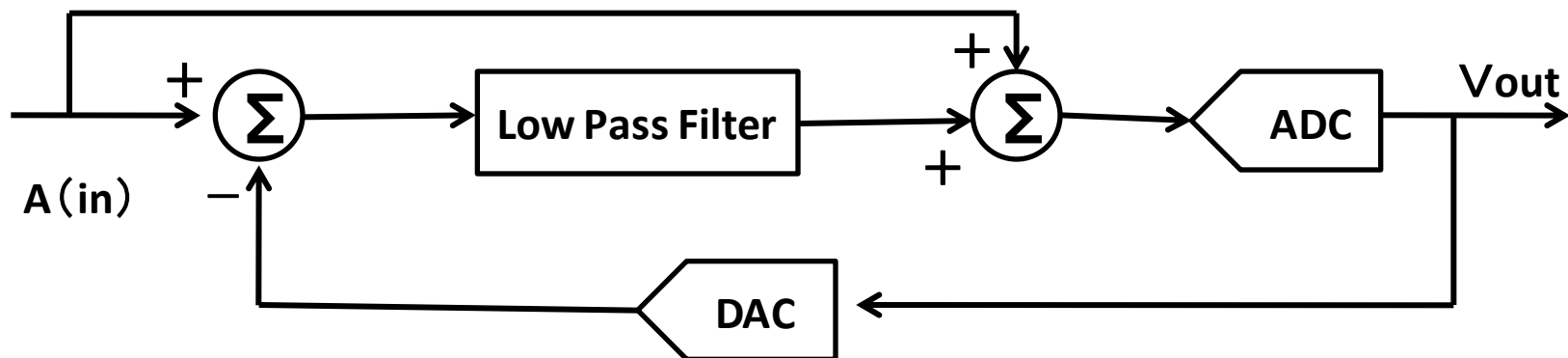
Noise Transfer Function

オーバーサンプリングとノイズシェイピング
高SNDR

1クロック遅れ

微分 = 低域除去

フィードフォワードΔΣ変調器



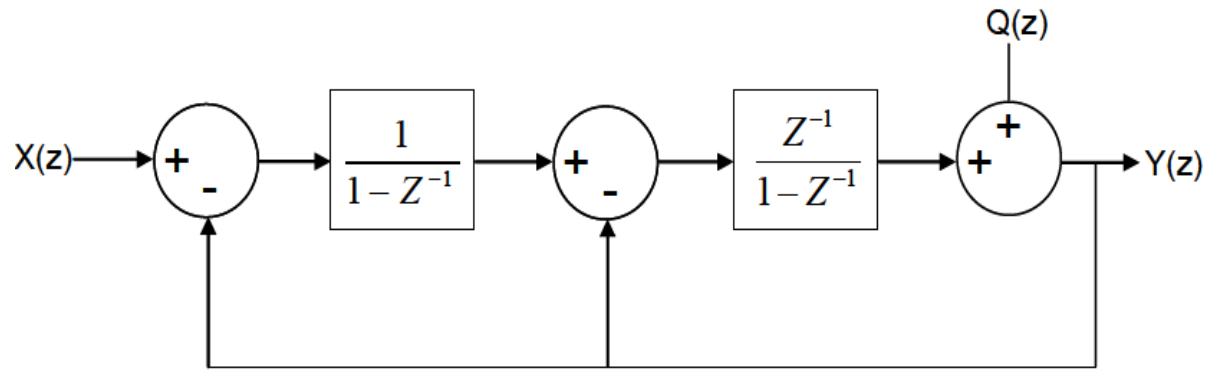
$$Y(z) = X(z) + \frac{1}{1 + H(z)} \cdot E(z)$$

$$H(z) = \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \rightarrow STF(z) = \boxed{1} \quad NTF(z) = \boxed{1 - z^{-1}}$$

遅延しない

微分 = 低域除去

2次フィードバック $\Delta\Sigma$ 変調器

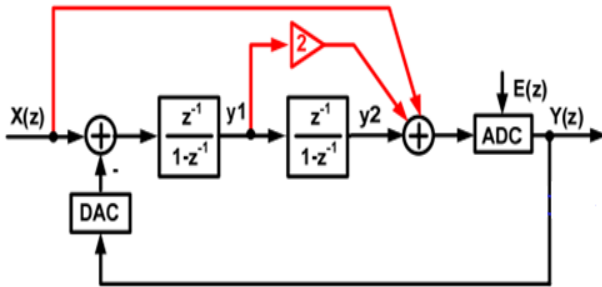


$$Y(z) = z^{-1} X(z) + \left(1 - z^{-1}\right)^2 E(z)$$

1クロック遅れ

2次微分

2次フィードフォワードΔΣ変調器



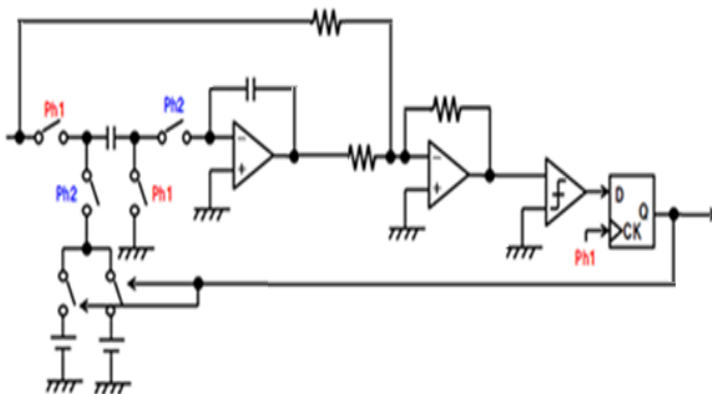
$$Y(z) = X(z) + (1 - z^{-1})^2 E(z)$$

$$\text{STF} = \underline{1} \quad \text{NTF} = \underline{(1 - z^{-1})^2}$$

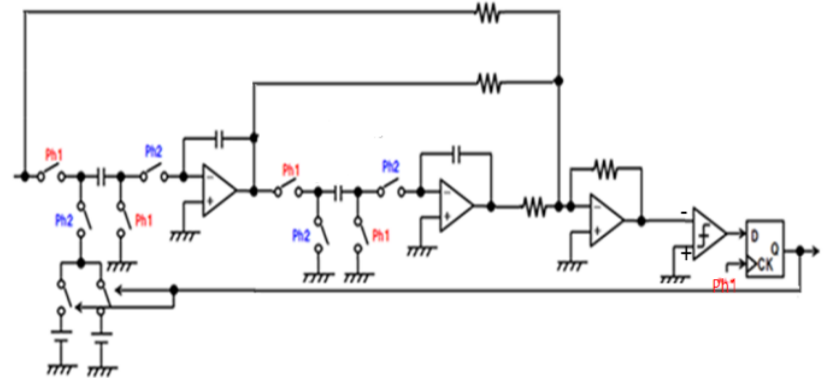
遅延しない

2次微分

1次FF ΔΣ回路図



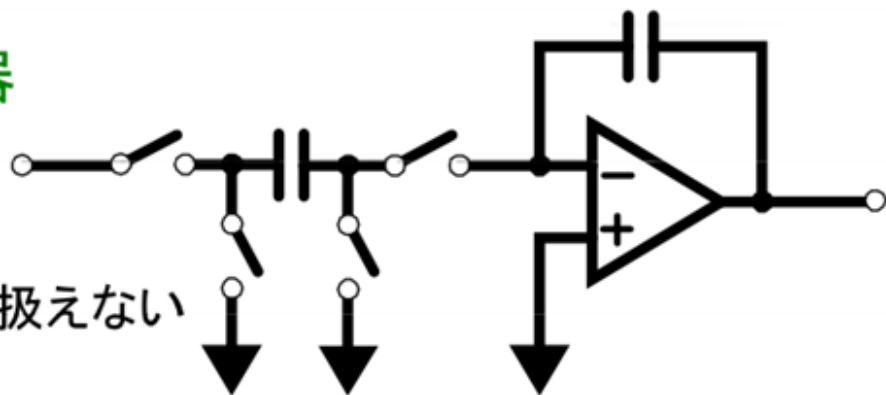
2次FF ΔΣ回路図



離散時間 $\Delta\Sigma$ 対 連続時間 $\Delta\Sigma$

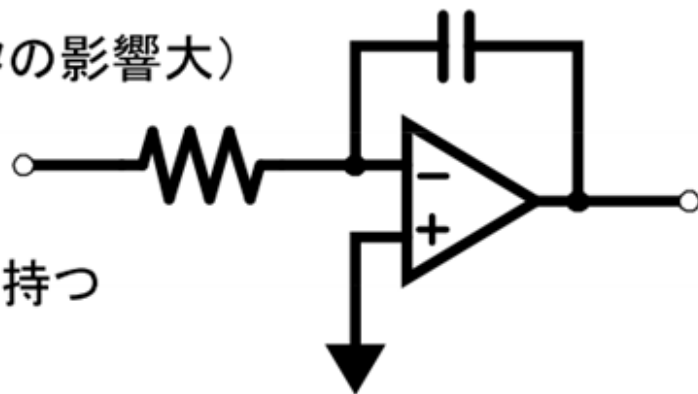
■ 離散時間 $\Delta\Sigma$ AD変調器

- 高精度
- 消費電力大
- 低速・低周波信号しか扱えない



■ 連続時間 $\Delta\Sigma$ AD変調器

- 低精度 (DACのクロックジッタの影響大)
- 低消費電力
- 高速・高周波信号を扱える
- アンチエイリアスフィルタ機能を持つ

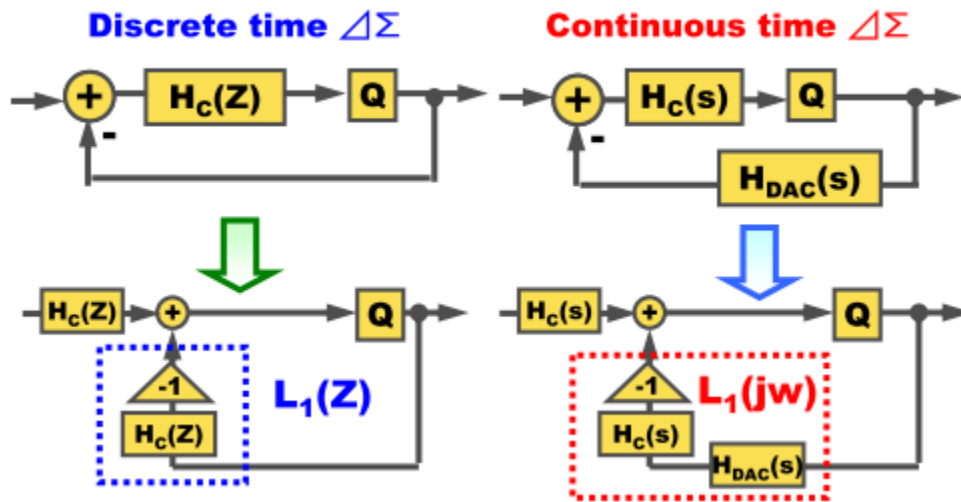


連続時間 $\Delta\Sigma$ の低消費電力、高速・高周波特性



電源回路制御へ応用

離散時間 $\Delta\Sigma$ から連続時間 $\Delta\Sigma$ への変換



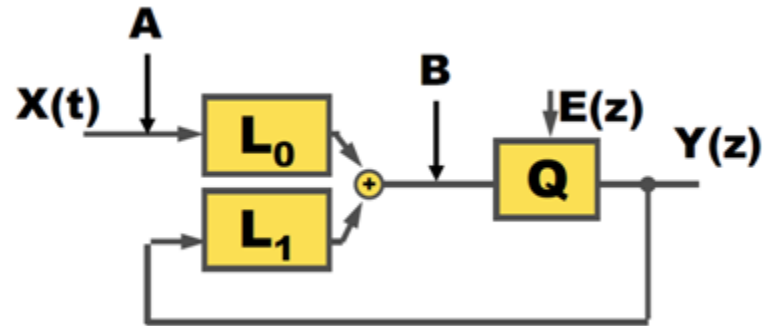
インパルス応答不変変換

(Impulse Response Invariant Transformation)

$H_c(s)$ の設計:

離散時間 $\Delta\Sigma$ 伝達関数 $L_1(z)$ のインパルス応答 $g(nT)$ と
 連続時間 $\Delta\Sigma$ 伝達関数 $L_1(jw)$ のインパルス応答 $h(t)$ の時刻 $t=nT$ での
 インパルス応答 $h(nT)$ が全ての整数 n に対して一致させる。

連続時間 $\Delta\Sigma$ 対 離散時間 $\Delta\Sigma$



$$\text{STF} = \frac{L_0}{1 - L_1}$$

$$\text{NTF} = \frac{1}{1 - L_1}$$

STF: Signal Transfer Function
信号伝達関数 Y/X

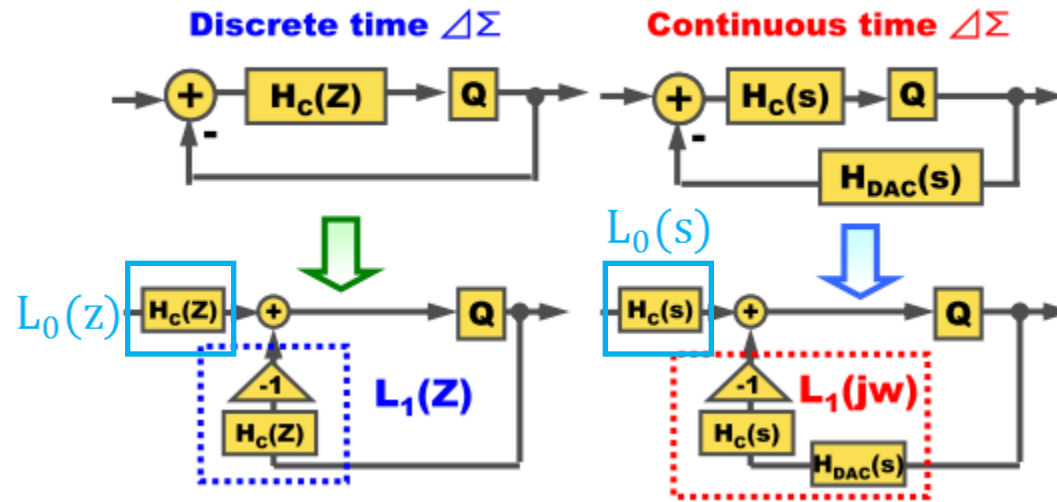
NTF: Noise Transfer Function
信号伝達関数 Y/E

サンプリングスイッチの位置

A: 離散時間 $\Delta\Sigma$

B: 連続時間 $\Delta\Sigma$

1次連続時間フィードバック $\Delta\Sigma$ STF 計算



DT -> CT 変換

$$NTF = \frac{1}{1 - L_1}$$

$$NTF = 1 - z^{-1}$$

$$L_1(z) = -\frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

$$NTF(j\omega) = 1 - e^{-j\omega T}$$

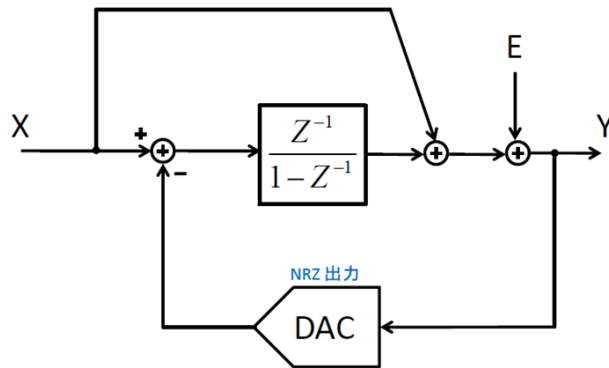
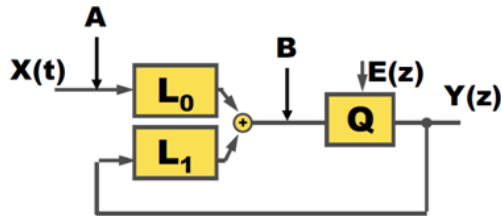
DACがNRZ出力の場合

$$H_c(s) = \frac{1}{sT}$$

$$L_0(s) = \frac{1}{sT}$$

$$STF = \frac{L_0}{1 - L_1} = \frac{\frac{1}{j\omega T}}{1 + \frac{e^{-j\omega T}}{1 - e^{-j\omega T}}}$$

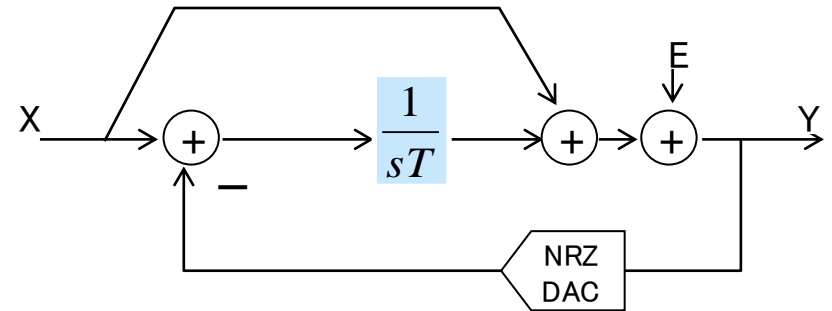
1次連続時間フィードフォワードΔΣ STF計算



$$L1_{DT} = -\frac{z^{-1}}{1-z^{-1}}$$

$$L1_{CT} = -\frac{1}{sT}$$

係数設計をおこなう



$$L0_{CT} = \frac{sT + 1}{sT}$$

$$STF(j\omega) = \frac{L0(j\omega)}{1 - L1(\exp(j\omega T))}$$

$$STF = \frac{jT\omega + 1}{1 + \frac{e^{-j\omega T}}{1 - e^{-j\omega T}}}$$

$$STF = \left(1 + \frac{1}{j\omega T}\right) \cdot (1 - e^{-j\omega T})$$

1 次 $\Delta\Sigma$ 伝達関数導出の補足説明(1)

$L(z) = -(1/z)/(1-(1/z))$ のインパルス応答 $g(nT)$

$$g(nT) = 0 \text{ for } n < 0, \\ -1 \text{ for } n \geq 0$$

$h(t) = h_c(t) * h_{DAC}(t)$ * はconvolution

NRZ DAC の場合 $h_{DAC}(t) = u(t) - u(t-T)$

$u(t)$ はユニット関数

$$H_{DAC}(s) = (1 - \exp(-sT))/s$$

$$H(s) = H_c(s) H_{DAC}(s)$$

$h(t)$ は $H(s)$ の逆ラプラス変換で得る。

$H_c(t) = A/s$ とする。 (A は定数)

$$H(s) = (A/s) [1 - \exp(-sT)]/s$$

ラプラス変換表より $h(t) = 0$ for $t \leq 0$, $A \cdot T$ for $t > 0$

したがって、 $h(nT) = 0$ for $n \leq 0$, $A \cdot T$ for $n > 0$.

$g(nT) = h(nT)$ のためには $A = -1/T$. すなわち $H_c(s) = -1/(sT)$.

1次 $\Delta\Sigma$ 伝達関数導出の補足説明(2)

連続時間 1次フィードバック

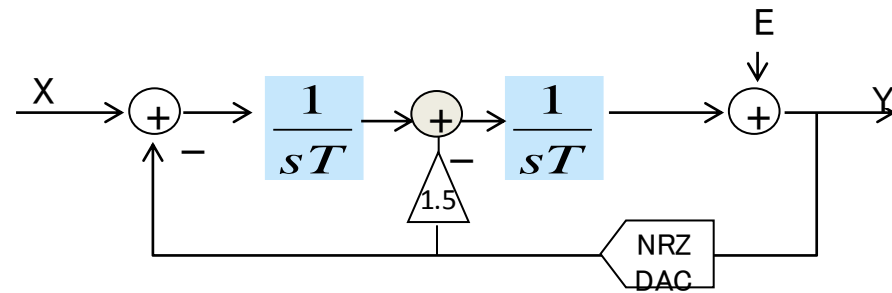
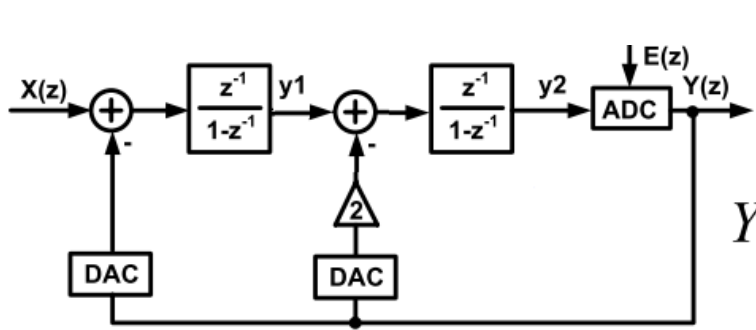
$$\begin{aligned} \text{STF}(s) &= -H_c(s)\text{NTF}(s) \\ &= 1/(sT) [1-\exp(-sT)] \end{aligned}$$

連続時間 1次フィードフォワード

$$\begin{aligned} \text{STF}(s) &= [1+H_c(s)] \text{NTF}(s) \\ &= [1+1/(sT)] [1-\exp(-sT)] \end{aligned}$$

STF: Signal Transfer Function 信号伝達関数

2次連続時間フィードバック $\Delta\Sigma$ STF 計算



$$L1_{DT} = \frac{z^{-2} - 2z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2}$$

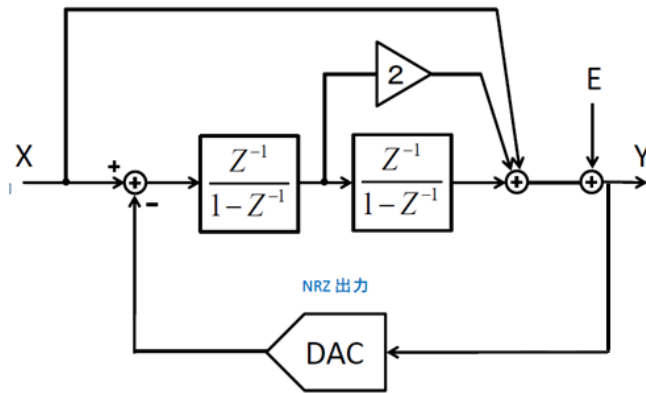
$$L1_{CT} = \frac{-\frac{3}{2}sT - 1}{(sT)^2}$$

$$L0_{CT} = \frac{1}{(sT)^2}$$

$$STF(j\omega) = \frac{L0(j\omega)}{1 - L1(\exp(j\omega T))}$$

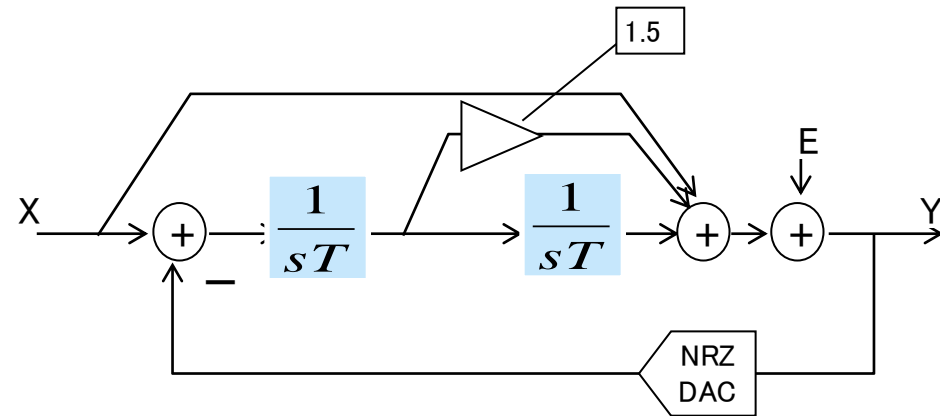
$$STF(j\omega) = \frac{1}{(Tj\omega)^2} \cdot (1 - e^{-j\omega T})^2$$

2次連続時間フィードフォワードΔΣ STF計算



$$L1_{DT} = \frac{z^{-2} - 2z^{-1}}{(1 - z^{-1})^2}$$

$$L1_{CT} = \frac{-\frac{3}{2}sT - 1}{(sT)^2}$$



$$L0_{CT} = \frac{(sT)^2 + 1.5(sT) + 1}{(sT)^2}$$

$$STF(j\omega) = \frac{L0(j\omega)}{1 - L1(\exp(j\omega T))}$$

$$STF(j\omega) = \left(1 + \frac{1.5}{Tj\omega} + \frac{1}{(Tj\omega)^2}\right) \cdot (1 - e^{-j\omega T})^2$$

2次 $\Delta\Sigma$ 伝達関数導出の補足説明(1)

$L\{z\} = -\{2+(1/z)/[1-(1/z)]\} / [1-(1/z)]$ のインパルス応答 $g(nT)$

$$g(nT) = 0 \text{ for } n \leq 0,$$

$$-(n+1) \text{ for } n > 0$$

$h(t) = h_c(t) * h_{DAC}(t)$ ここで $*$ はconvolution

NRZ DAC の場合 $h_{DAC}(t) = u(t) - u(t-T)$

ここで $u(t) = 0$ for $t < 0$, 1 for $t \geq 0$

$$H_{DAC}(s) = (1 - \exp(-sT))/s$$

$$H(s) = H_c(s) H_{DAC}(s)$$

$h(t)$ は $H(s)$ の逆ラプラス変換として求まる。

$H_c(s) = A/s + B^2/s^2$ とする。 (A, B は定数)

$$H(s) = (A/s + B^2/s^2) [1 - \exp(-sT)]/s$$

$g(nT) = h(nT)$ のためには $A = 3/(2T)$, $B = 1/T^2$.

すなわち $H_c(s) = 3/(2sT) + 1/(sT)^2$.

2次 $\Delta\Sigma$ 伝達関数導出の補足説明(2)

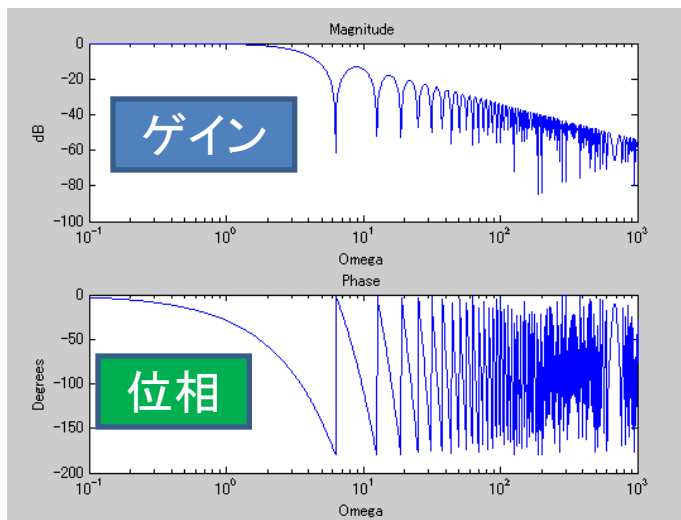
連続時間 2次フィードバック

$$\begin{aligned}\text{STF}(s) &= H_c(s)\text{NTF}(s) \\ &= [2/(sT) + 1/(sT)^2] [1 - \exp(-sT)]\end{aligned}$$

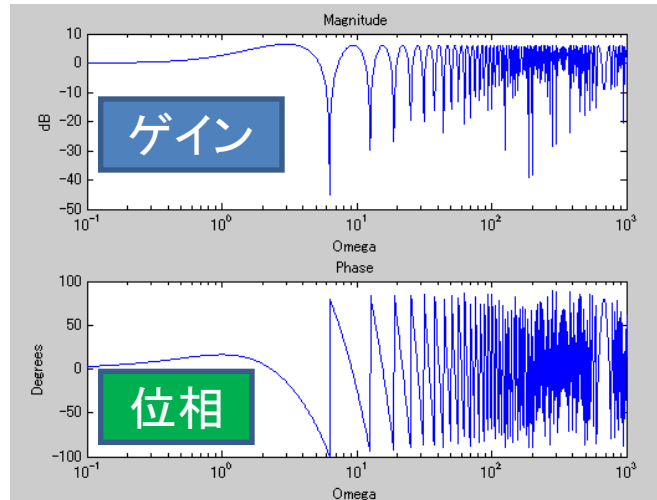
連続時間 2次フィードフォワード

$$\begin{aligned}\text{STF}(s) &= [1 + H_c(s)] \text{NTF}(s) \\ &= [1 + 3/(2sT) + 1/(sT)^2] [1 - \exp(-sT)]\end{aligned}$$

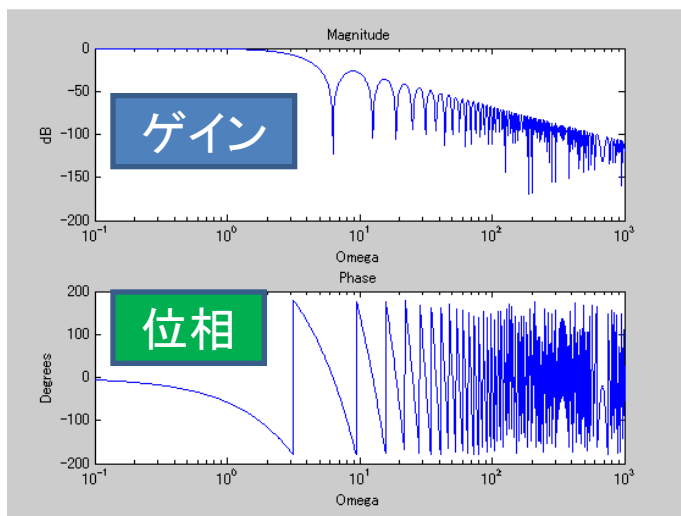
STFのボード線図比較



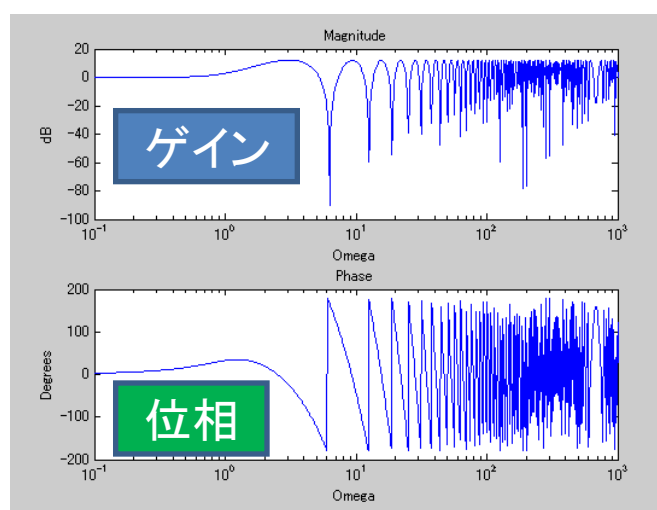
1次連続時間Feedback $\Delta\Sigma$



1次連続時間Feedforward $\Delta\Sigma$



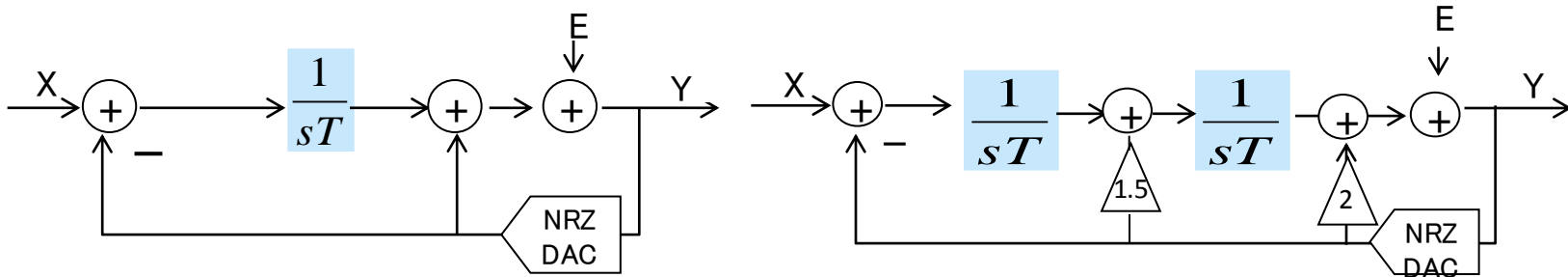
2次連続時間Feedback $\Delta\Sigma$



2次連続時間Feedforward $\Delta\Sigma$

Feedback型は位相が周波数 ω とともに遅れが、Feedforward型は遅れない
1次より2次のほうが位相が進んでいる

連続時間 $\Delta\Sigma$ ループ遅延の補償



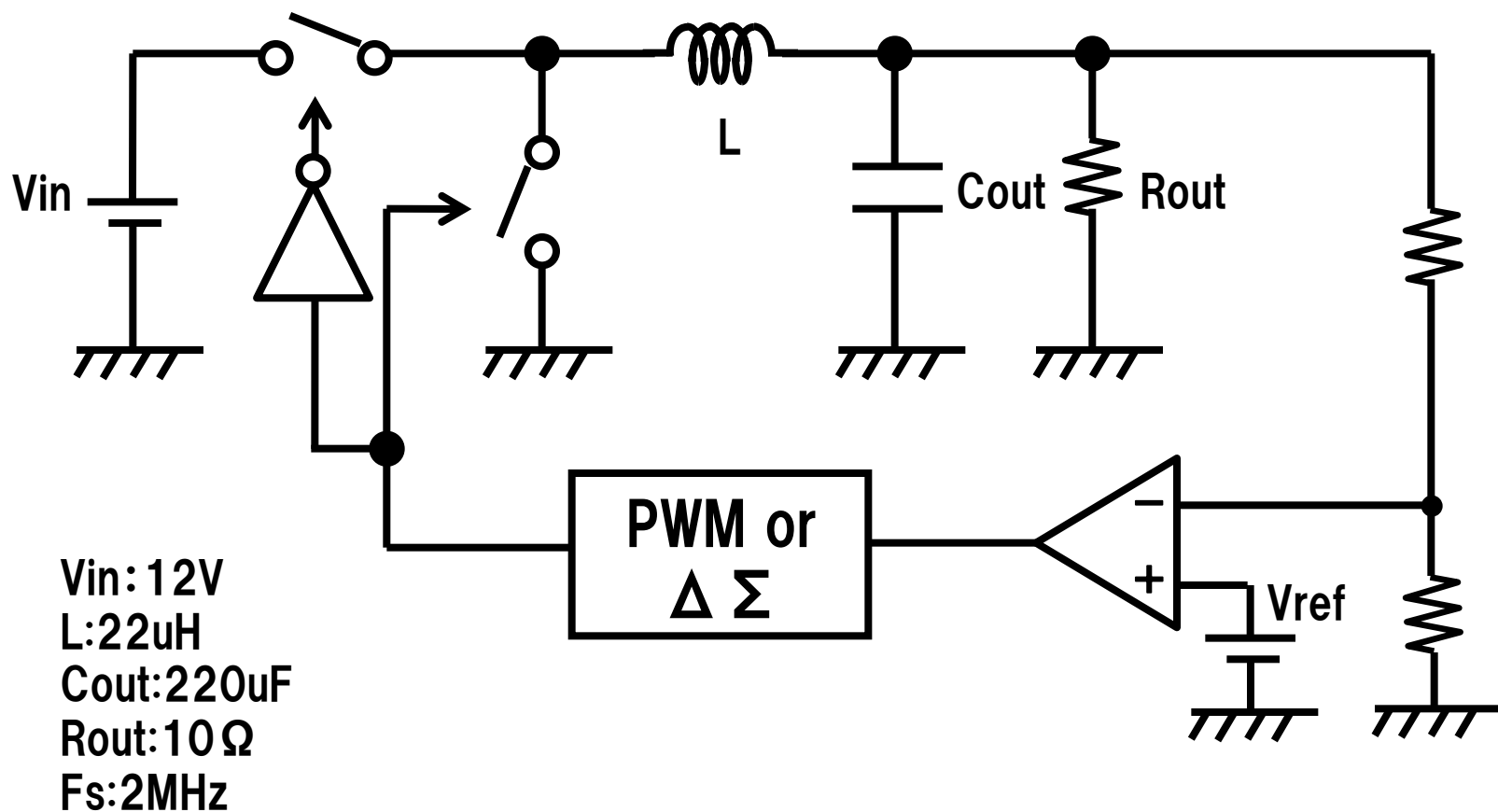
ループ遅延を補償した
1次 連続時間 FB $\Delta\Sigma$

ループ遅延を補償した
2次 連続時間 FB $\Delta\Sigma$

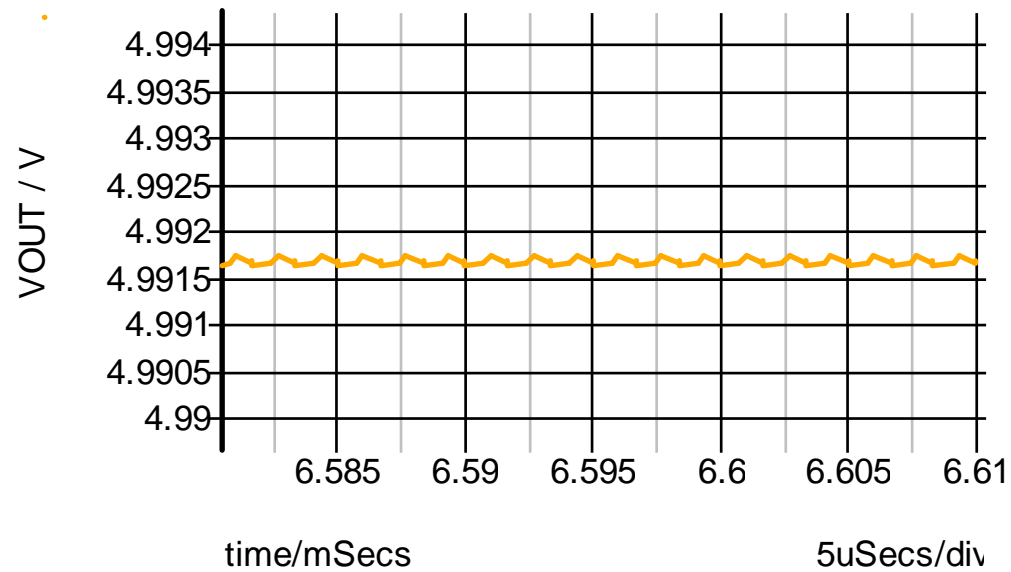
Outline

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類のデルタシグマ変調および性能の比較
- シミュレーションによる効果確認
- まとめ

シミュレーションによる効果確認

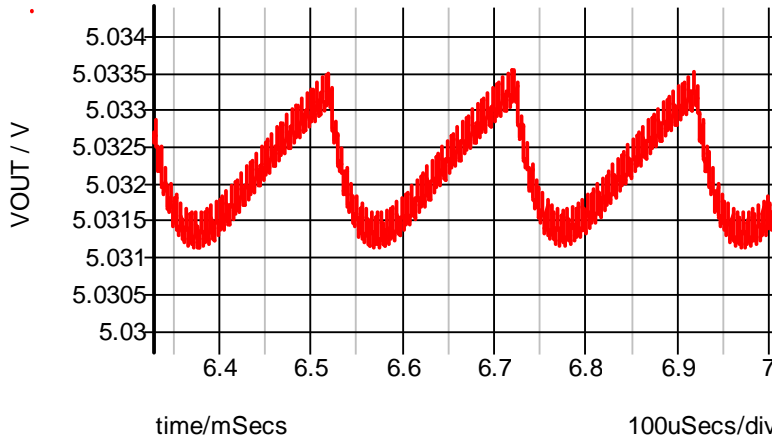


出力電圧リップルの比較

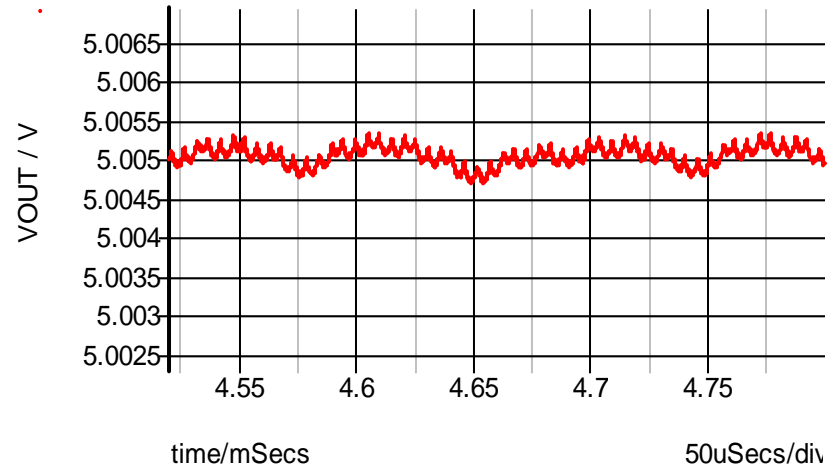


PWM 0.1mV

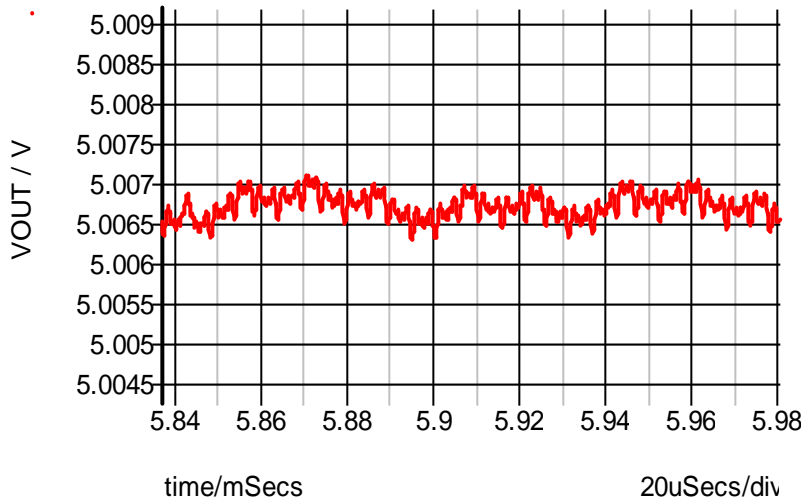
出力電圧リップルの比較



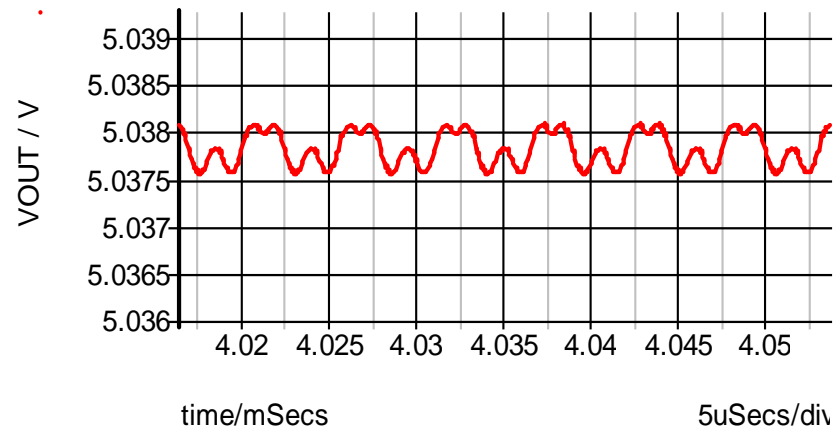
1次離散時間Feedback $\Delta\Sigma$ 3.2mV



1次離散時間Feedforward $\Delta\Sigma$ 0.8mV

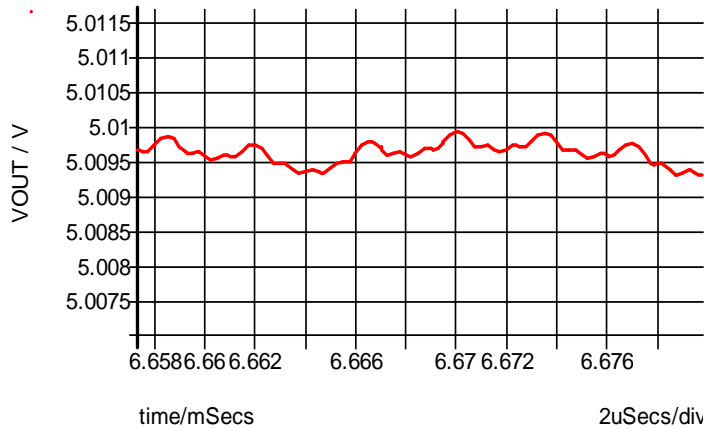


2次離散時間Feedback $\Delta\Sigma$ 1.2mV

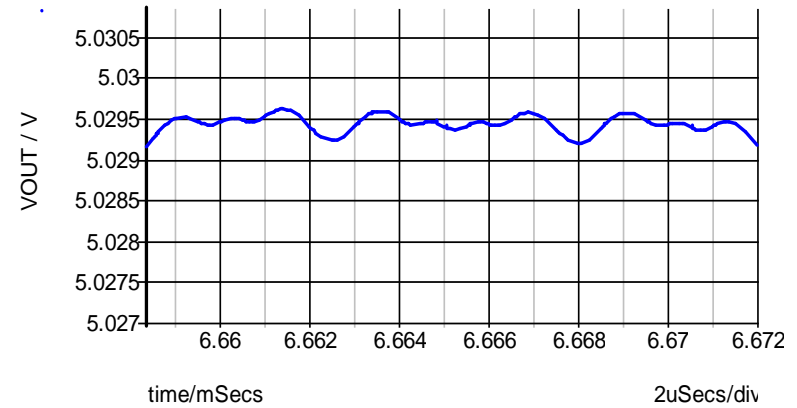


2次離散時間Feedforward $\Delta\Sigma$ 0.7mV

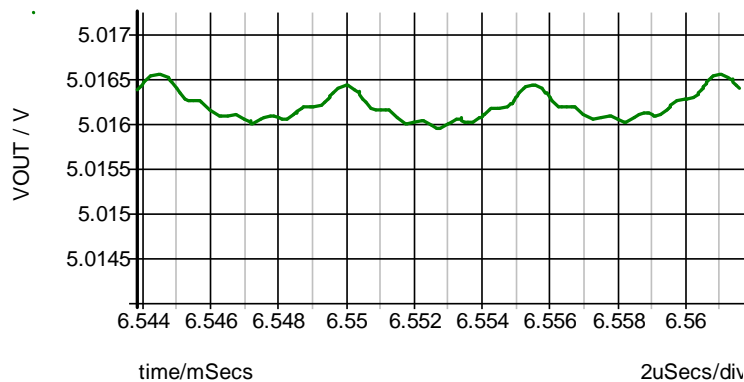
出力電圧リップルの比較



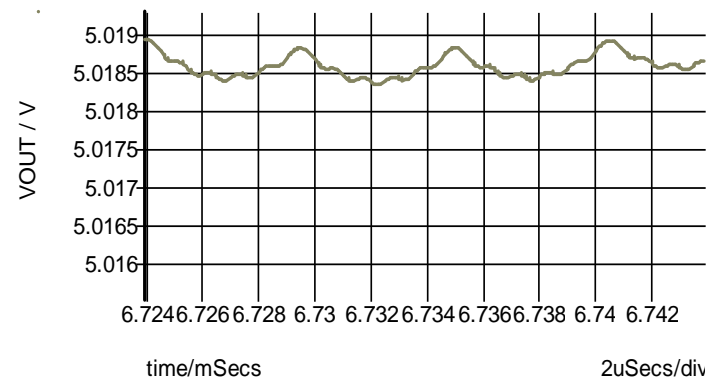
1次連続時間Feedback $\Delta\Sigma$ 0.5mV



2次連続時間Feedback $\Delta\Sigma$ 0.5mV



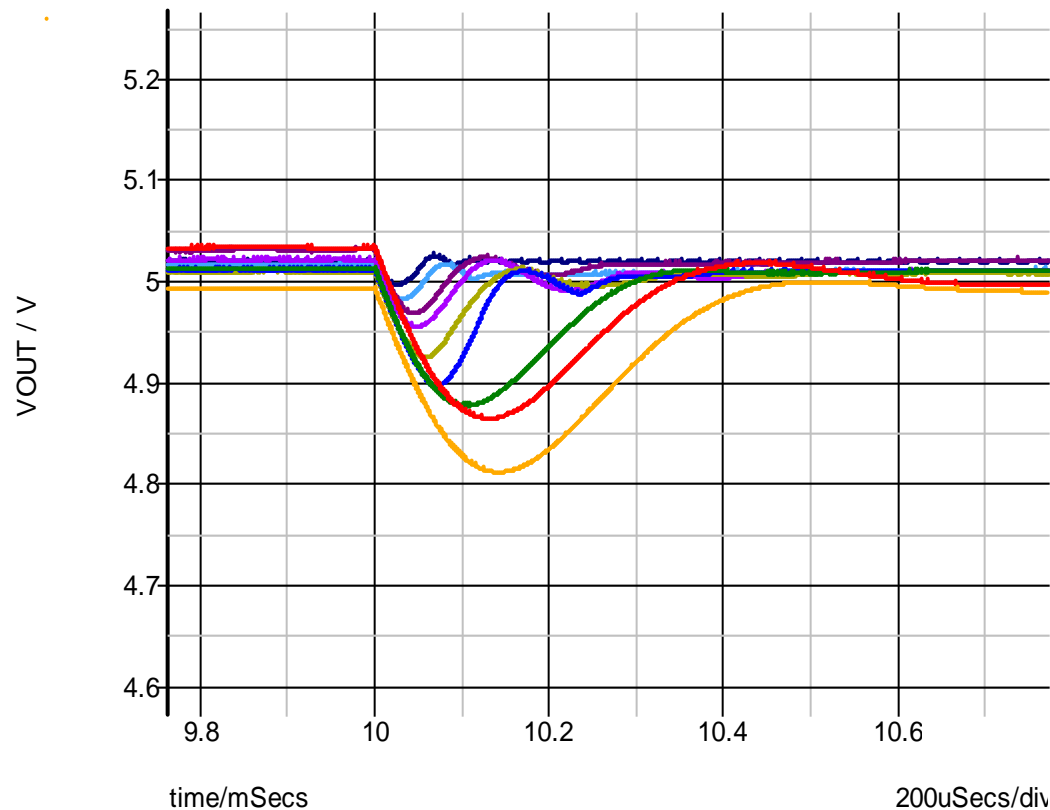
1次連続時間Feedforward $\Delta\Sigma$ 0.6mV



2次連続時間Feedforward $\Delta\Sigma$ 0.5mV

過渡応答比較

(出力電流0.5Aから1Aへ変換)



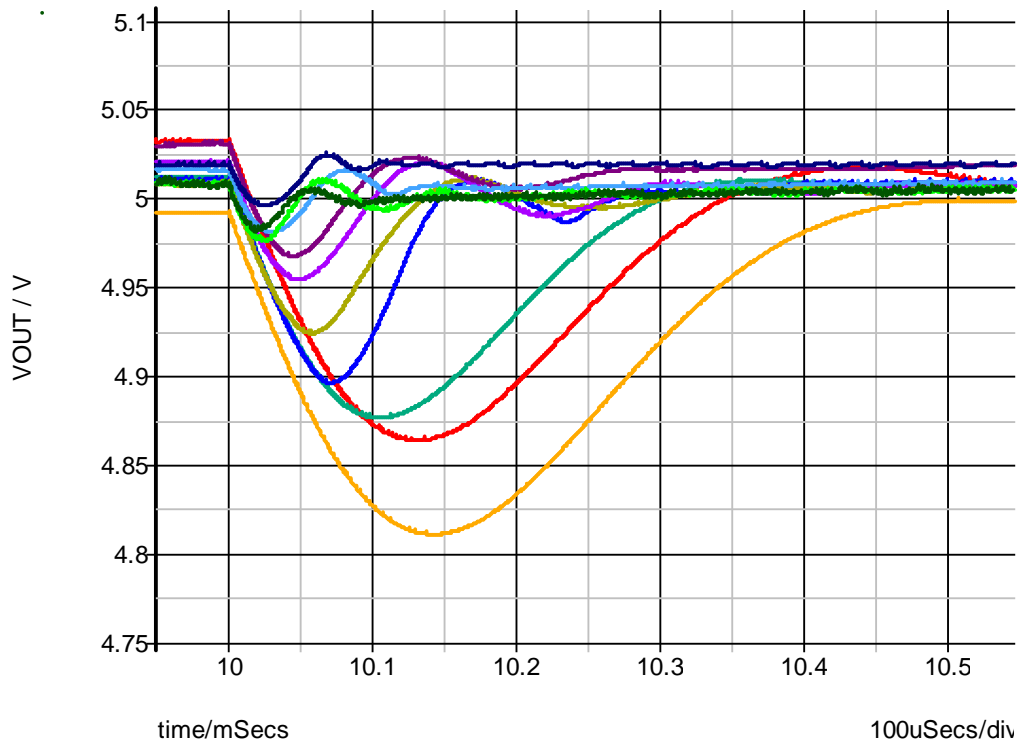
遅い

早い

PWM	離散 1次 FB	離散 2次 FB	離散 1次 FF	離散 2次 FF	連続 1次 FB	連続 2次 FB	連続 1次 FF	連続 2次 FF
-----	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

過渡応答比較

(出力電流0.5Aから1Aへ変換)

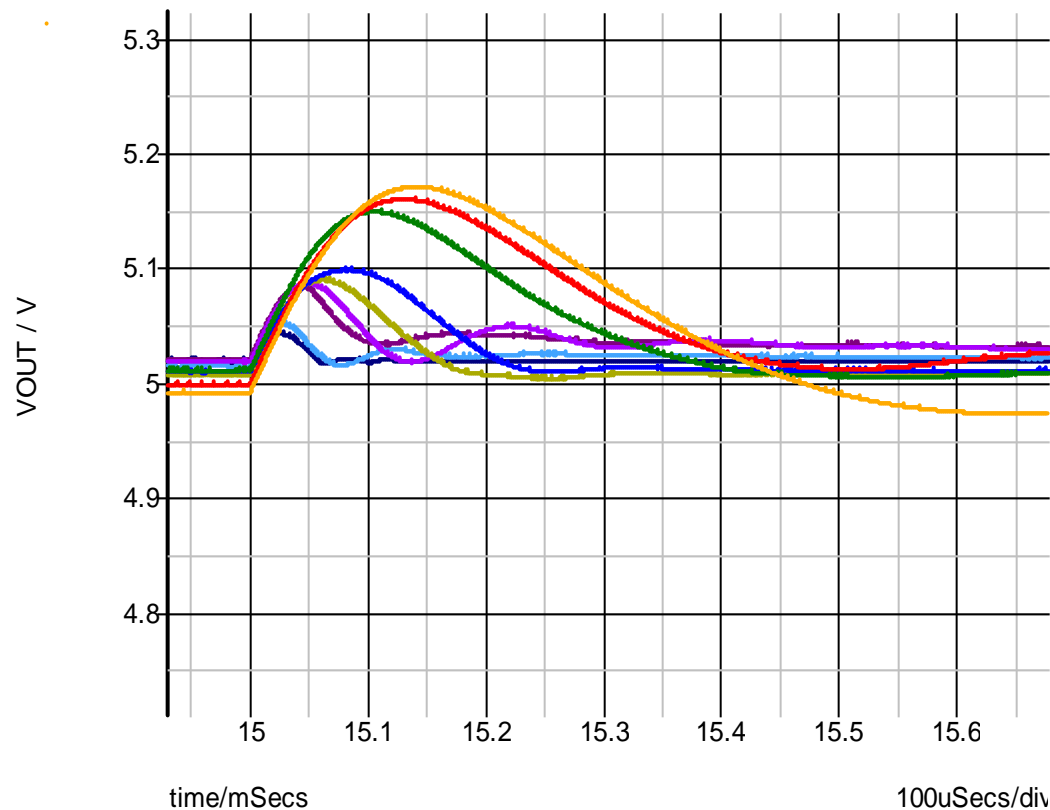


遅い -----> 早い

PWM	離散 1次 FB	離散 2次 FB	離散 1次 FF	離散 2次 FF	連続 1次 FB	連続 2次 FB	連続 1次 FF	連続 2次 FF	連続 1次 FB 補償	連続 2次 FB 補償
-----	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------------	----------------------

過渡応答比較

(出力電流0.5Aから1Aへ変換)



遅い

早い

PWM

分散
1次
FB

分散
2次
FB

分散
1次
FF

分散
2次
FF

連続
1次
FB

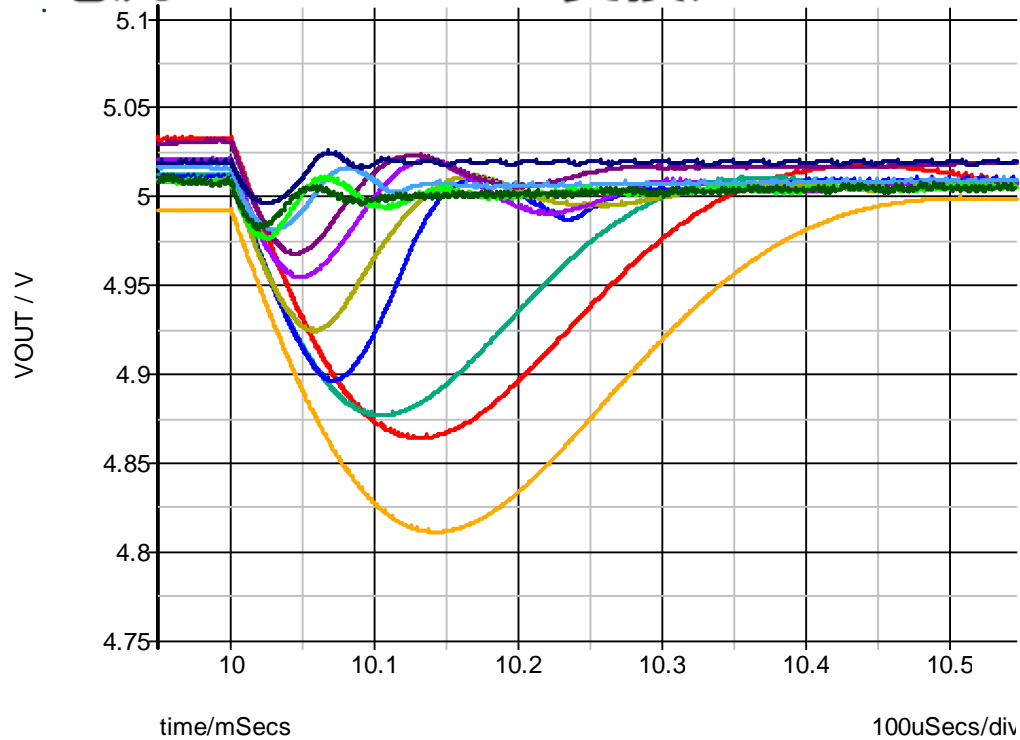
連続
2次
FB

連続
1次
FF

連続
2次
FF

過渡応答比較

(出力電流0.5Aから1Aへ変換)



遅い

早い

PWM

離散
1次
FB

離散
2次
FB

離散
1次
FF

離散
2次
FF

連続
1次
FB

連続
2次
FB

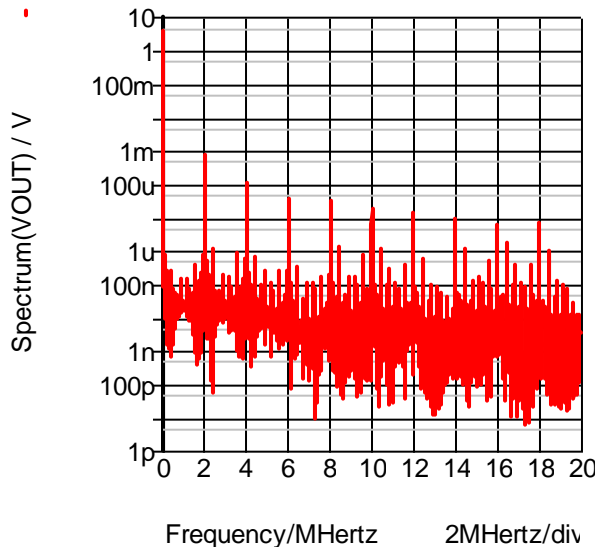
連続
1次
FF

連続
2次
FF

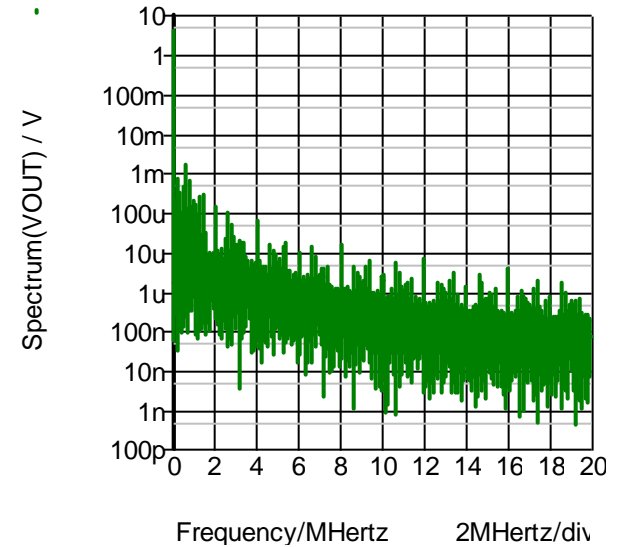
連続
1次
FB
補償

連続
2次
FB
補償

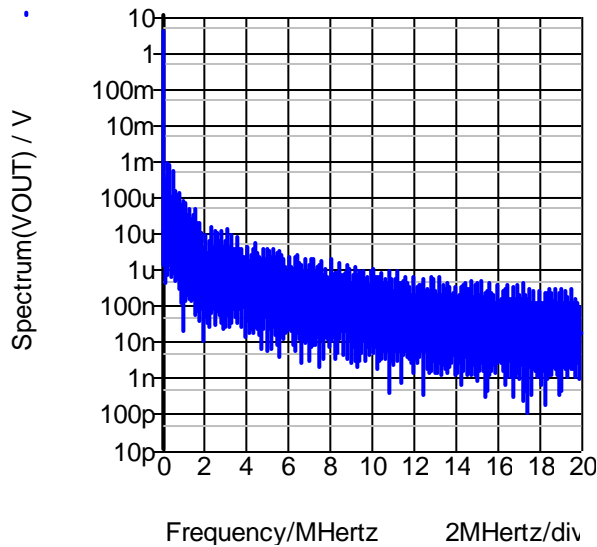
DC-DCコンバータ出力のPSD分析



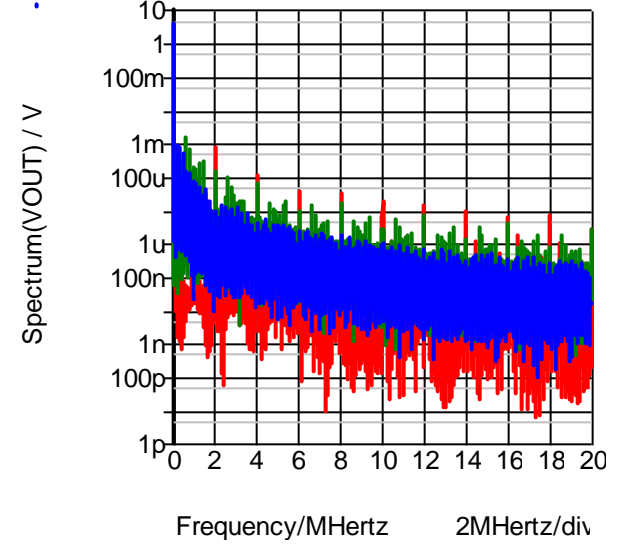
PWM制御



1次 連続時間(CT) FB $\Delta\Sigma$

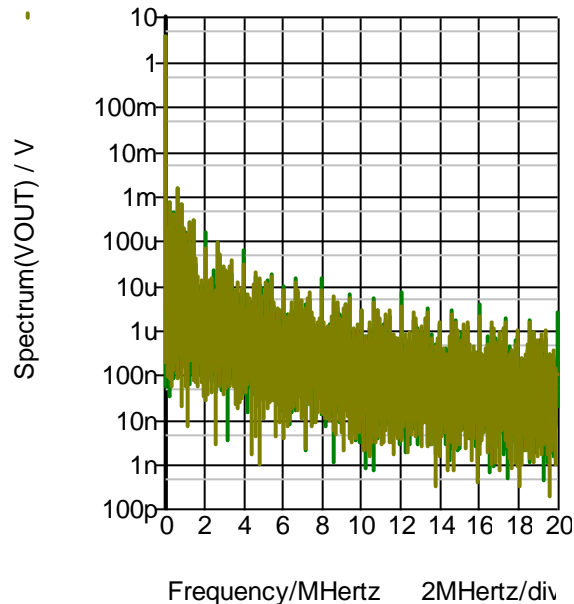


2次 CT FB $\Delta\Sigma$

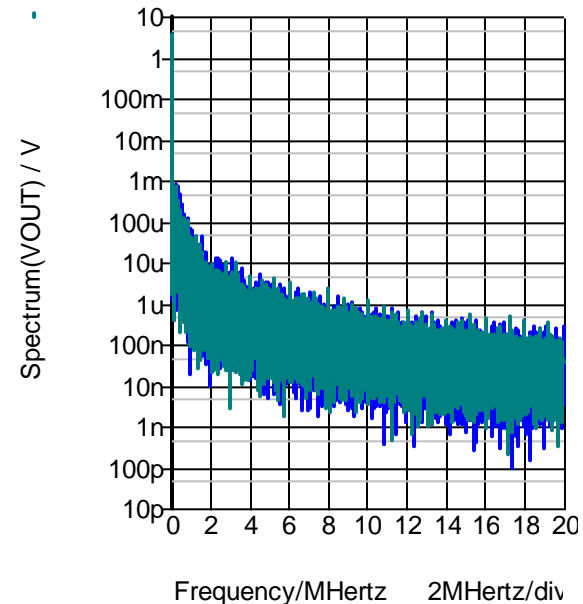


3つの結果の比較

DC-DCコンバータ出力のPSD分析



1次 連続時間(CT)
FB $\Delta\Sigma$ とFF $\Delta\Sigma$ 結果の比較



2次 連続時間(CT)
FB $\Delta\Sigma$ とFF $\Delta\Sigma$ 結果の比較

デルタシグマ変調シミュレーションの まとめ

- PWMより $\Delta\Sigma$ の方が
 - 定常状態リップルがやや大きい
 - 過渡応答が速い
 - スイッチングノイズのスペクトラム拡散
- 各デルタシグマ変調制御の比較：
 - 1.リップルが同じぐらいである
 - 2.負荷変動の場合には
 - 離散時間より、連続時間の方が速い
 - 1次 $\Delta\Sigma$ より、2次の方が速い
 - FB $\Delta\Sigma$ より、FFの方が速い
 - 連続時間 $\Delta\Sigma$ ループ遅延補償されたほうが速い
 - 3.スイッチングノイズのスペクトラム拡散
 - 1次 $\Delta\Sigma$ より、2次の方が良い

Outline

- 研究背景
- PWM制御の問題点
- 各種類のデルタシグマ変調および性能の比較
- シミュレーションによる効果確認
- まとめ

まとめ

- PWM制御は高効率と高速過渡応答が同時に実現できない



- デルタシグマ制御を提案、各種類の比較



連続時間、フィードフォワード、2次デルタシグマ
(高速過渡応答、スイッチングノイズのスペクトラム拡散)

今後の予定

- 良い性能、回路簡単なデルタシグマ
- 連続時間デルタシグマループ遅延の補償



御清聴ありがとうございました！