



1月26日LSI合同ゼミ@Waseda D級アンプの性能改善

群馬大学大学院 工学研究科
電気電子工学専攻 小林研究室
趙 楠

目次

研究背景と基礎知識

- ◆ D級アンプとか何か？
 - D級アンプの基礎知識
- ◆ アンプの帰還
 - アナログアンプの帰還
 - D級アンプの帰還における特有問題

研究目的

提案回路

- ◆ 帰還キャリアを最小に抑える変調方式
 - 方法1
 - 方法2→新規性

まとめとこれからの課題、謝辞

目次

研究背景と基礎知識

- ◆ D級アンプとか何か？

 - D級アンプの基礎知識

- ◆ アンプの帰還

 - アナログアンプの帰還

 - D級アンプの帰還における特有問題

研究目的

提案回路

- ◆ 帰還キャリアを最小に抑える変調方式

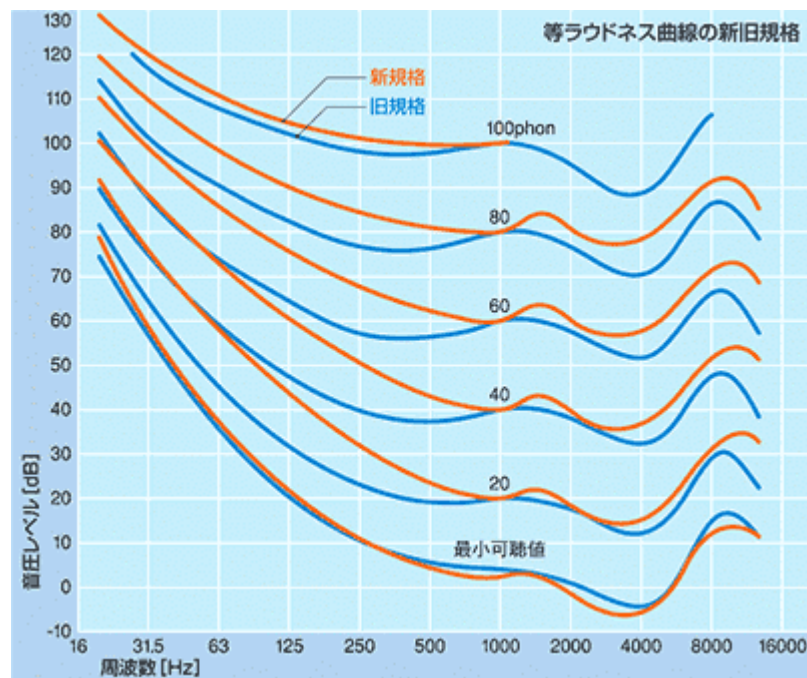
 - 方法1

 - 方法2→新規性

まとめとこれからの課題、謝辞

人間の耳はバンドパスフィルタ

- ◆ 人間の可聴範囲は20-20kHz
- ◆ 周波数によって聞こえる音圧も違う。



産業技術総合研究所 HPより。

http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2003/pr20031022/pr20031022.html

研究背景

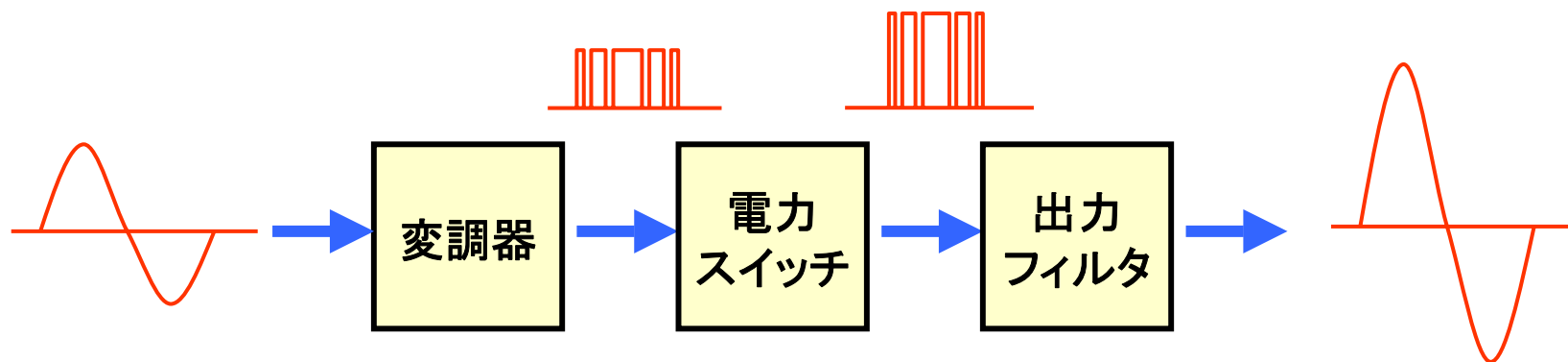
～D級アンプとは何か？～

◆ D級アンプの説明

入力信号をパルス変調し、電力スイッチのスイッチングにより信号を増幅するスイッチングアンプ。デジタルアンプという愛称もある。歴史は浅い。

◆ D級アンプの構成

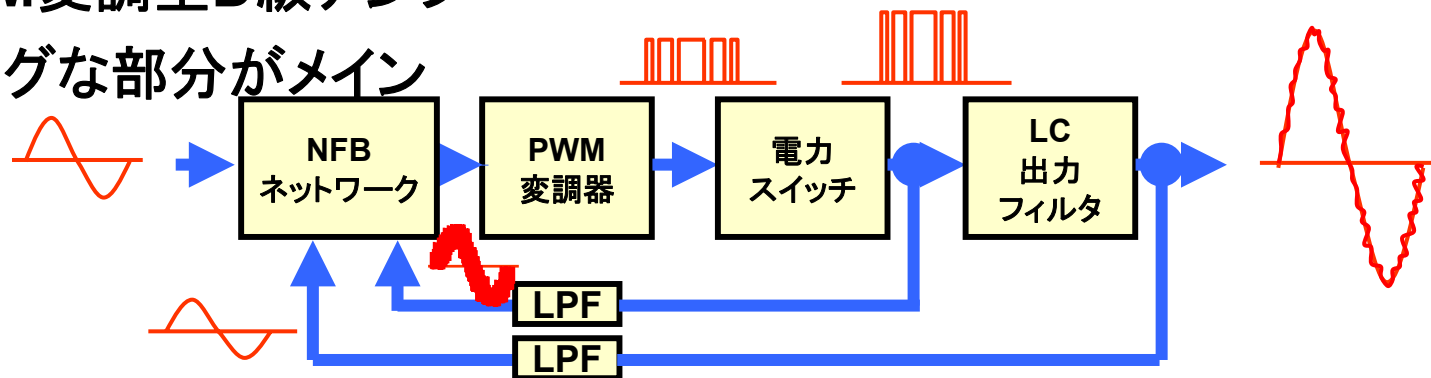
最もシンプルなブロック図



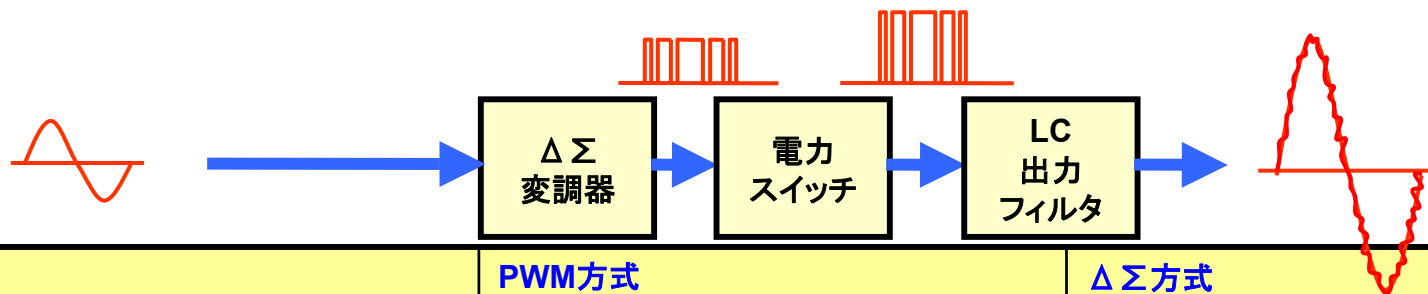
D級アンプの分類

◆ PWM変調型D級アンプ

アナログな部分がメイン

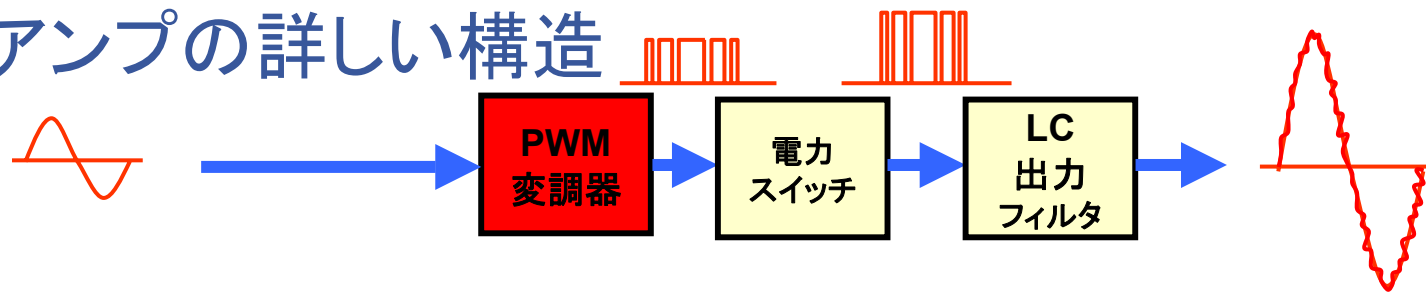


◆ デルタシグマ変調型D級アンプ

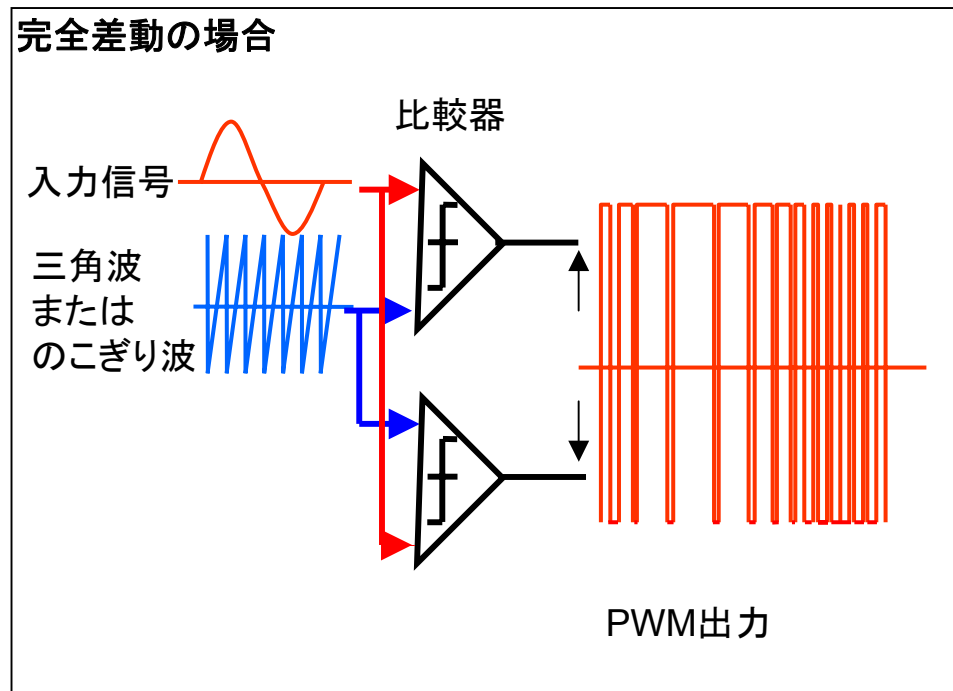
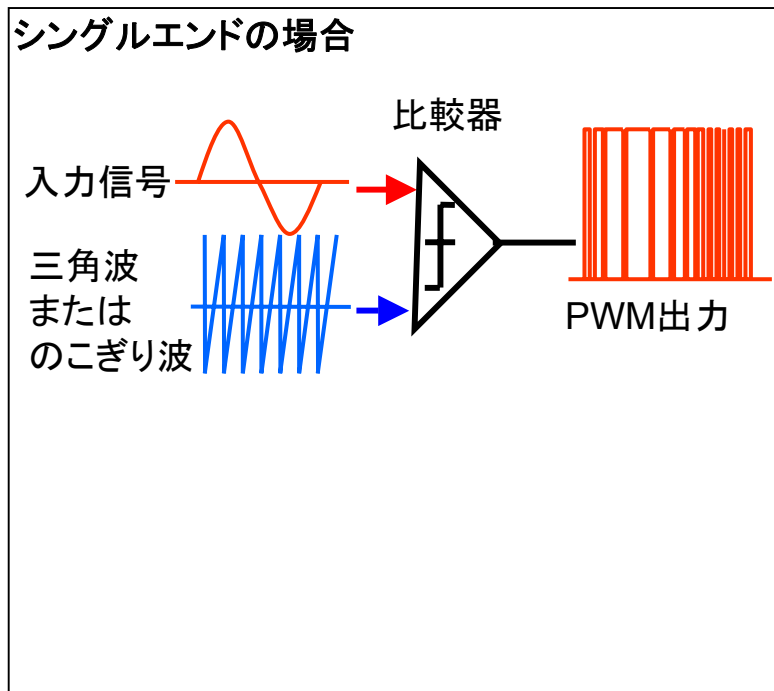


	PWM方式	$\Delta\Sigma$ 方式
スイッチング周波数	一定、低い	変化、高い
パワー効率	非常に良い	悪い
EMIノイズパワー ピーク値	高い	中
EMIノイズの周波数特性	一定周波数にキャリアノイズが入る	どの周波数にもキャリアノイズが入る
全体のノイズ量	少ない	多い
フィードバックの容易さ	LPF使えばフィードバック可能	難しい

D級アンプの詳しい構造



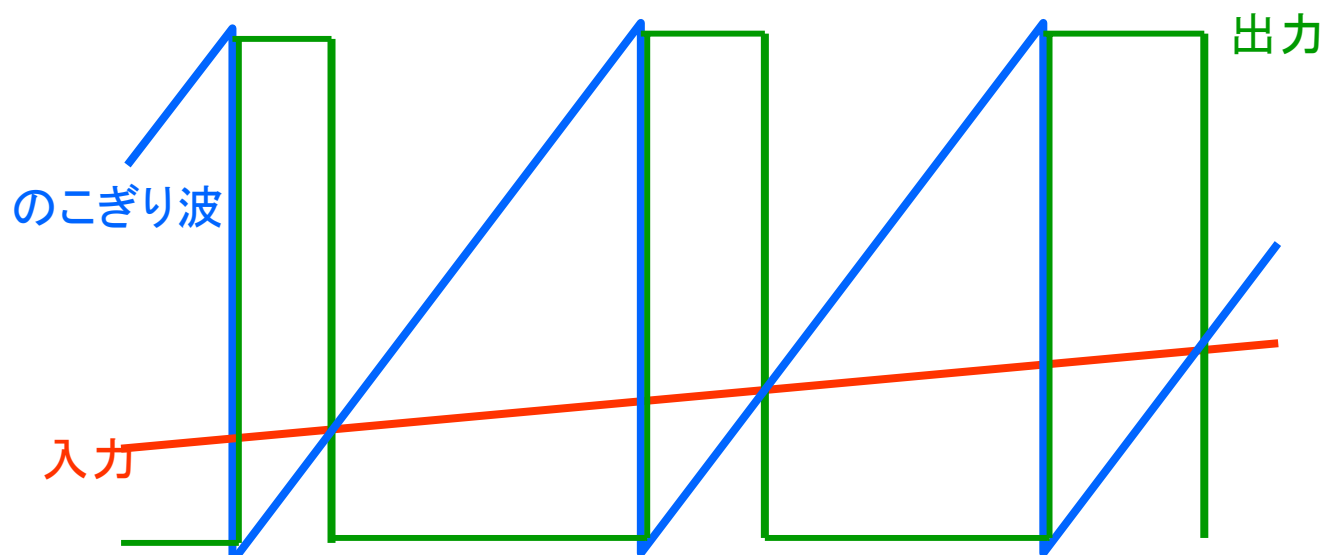
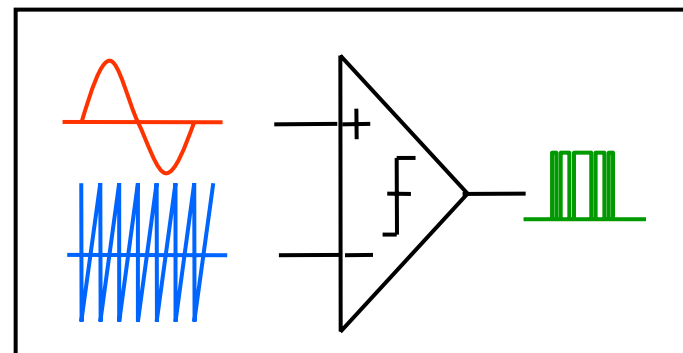
PWM変調器



※簡略化のため、フィードバックなしで示しています。

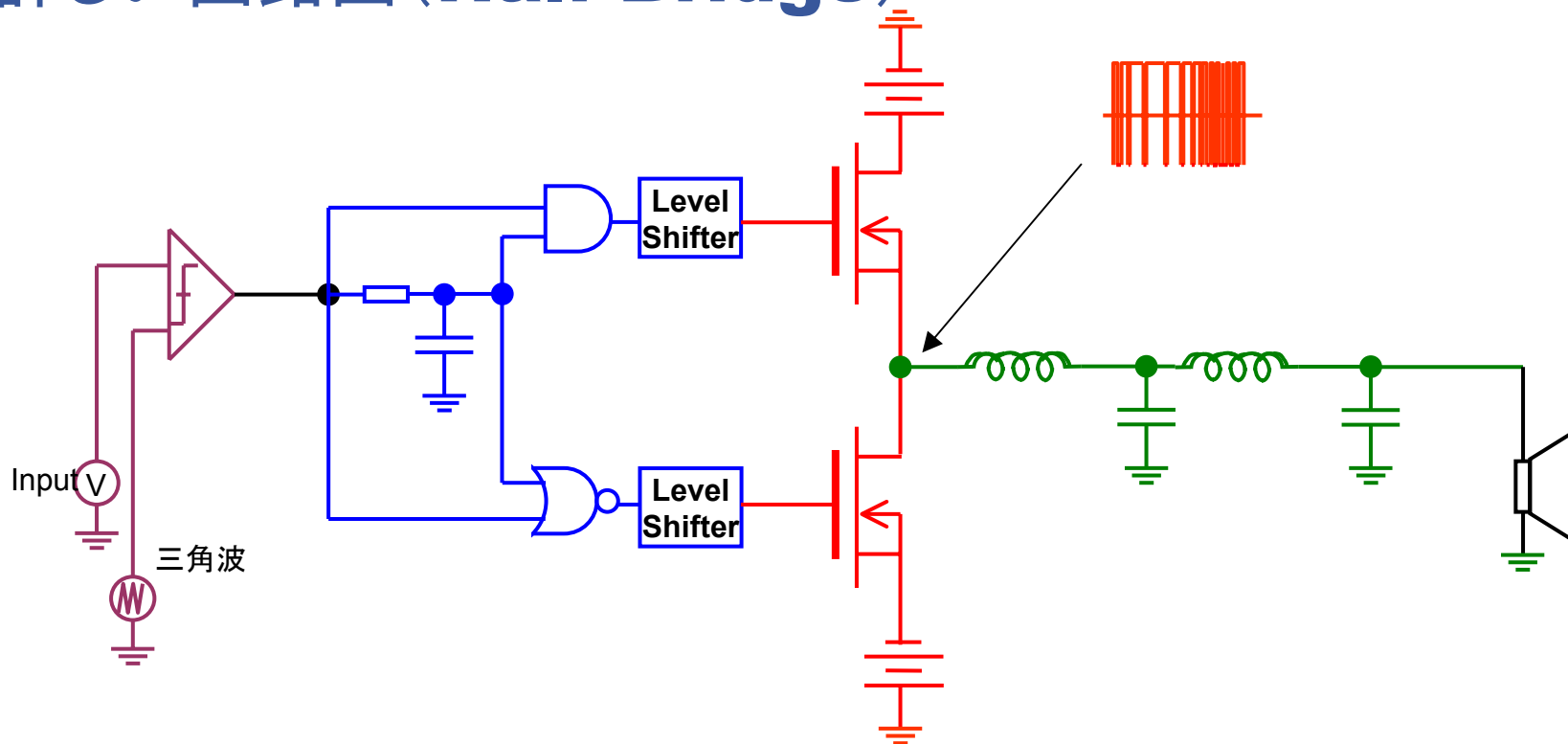
PWM変調

PWMとは、Pulse Width Modulationの略で、変調方法の一つ。パルス波のデューティ比を変化させて変調すること。



D級アンプにおいて、PWM変調とは音声信号をパルス波に乗せる作業である。

詳しい回路図 (Half Bridge)



変調器

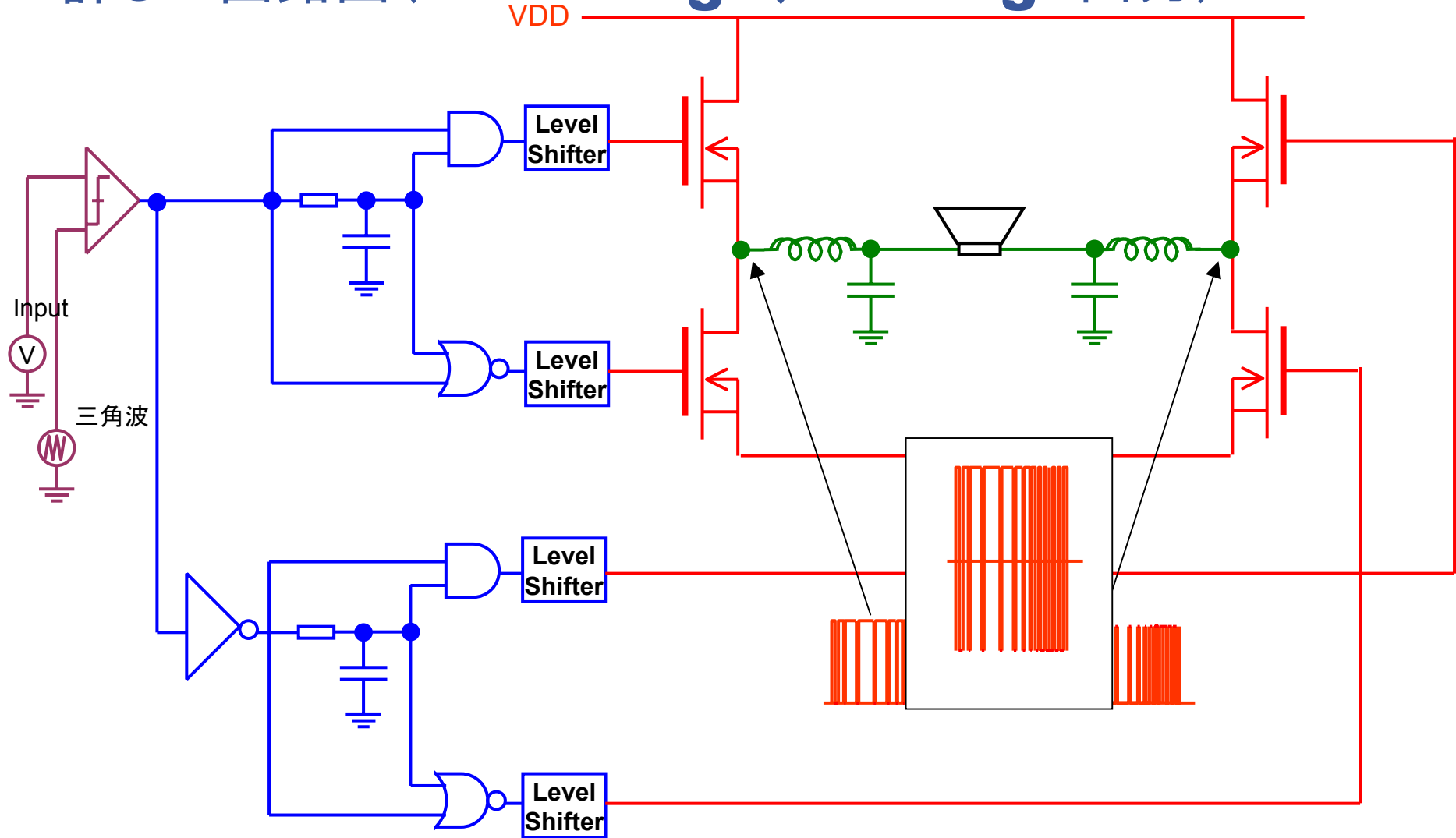
D級ドライブ回路
(デッドタイム発生回路)

パワー増幅段

出力LC LPF

しかし、この回路では2電源が必要。出力は2レベル。

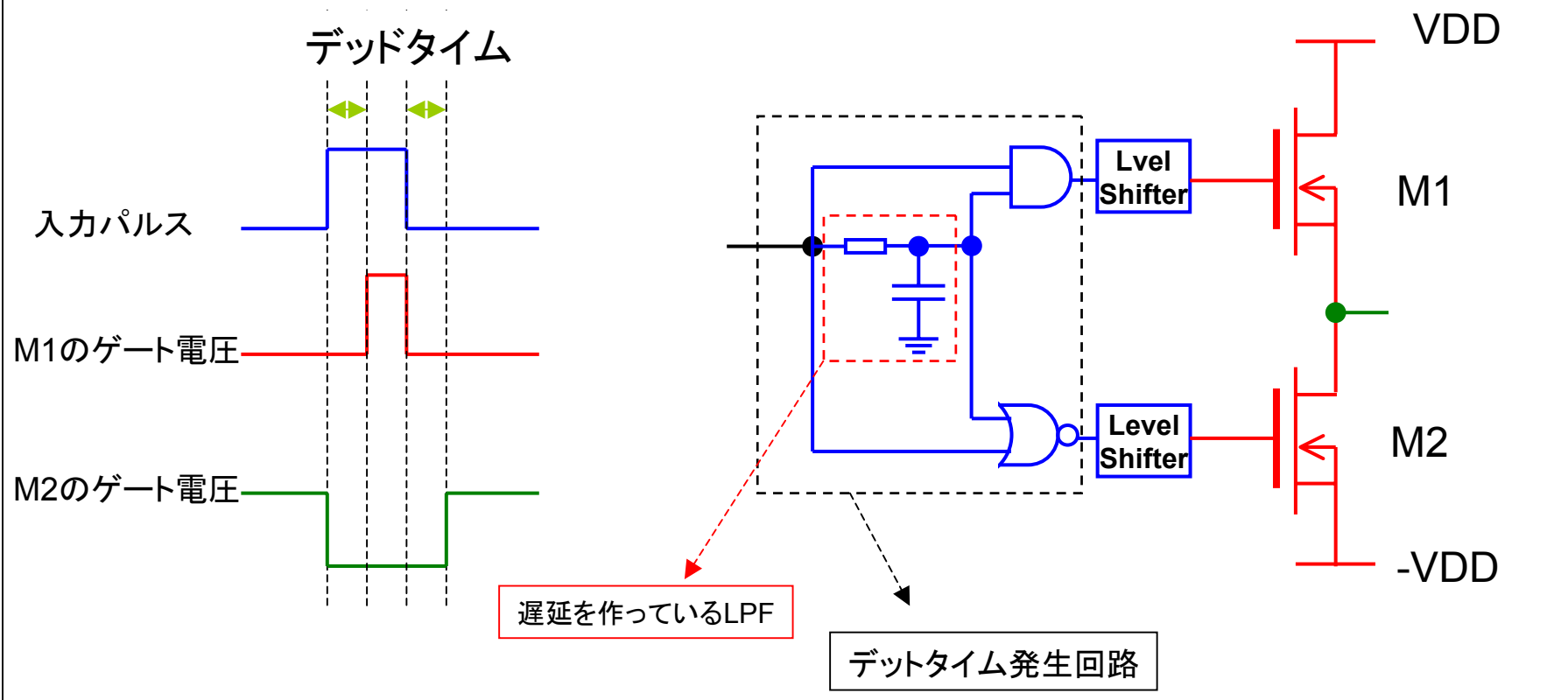
詳しい回路図 (Full Bridge、H Bridge出力)



単電源で動作可能のため、主流の方式、出力は3レベル可能

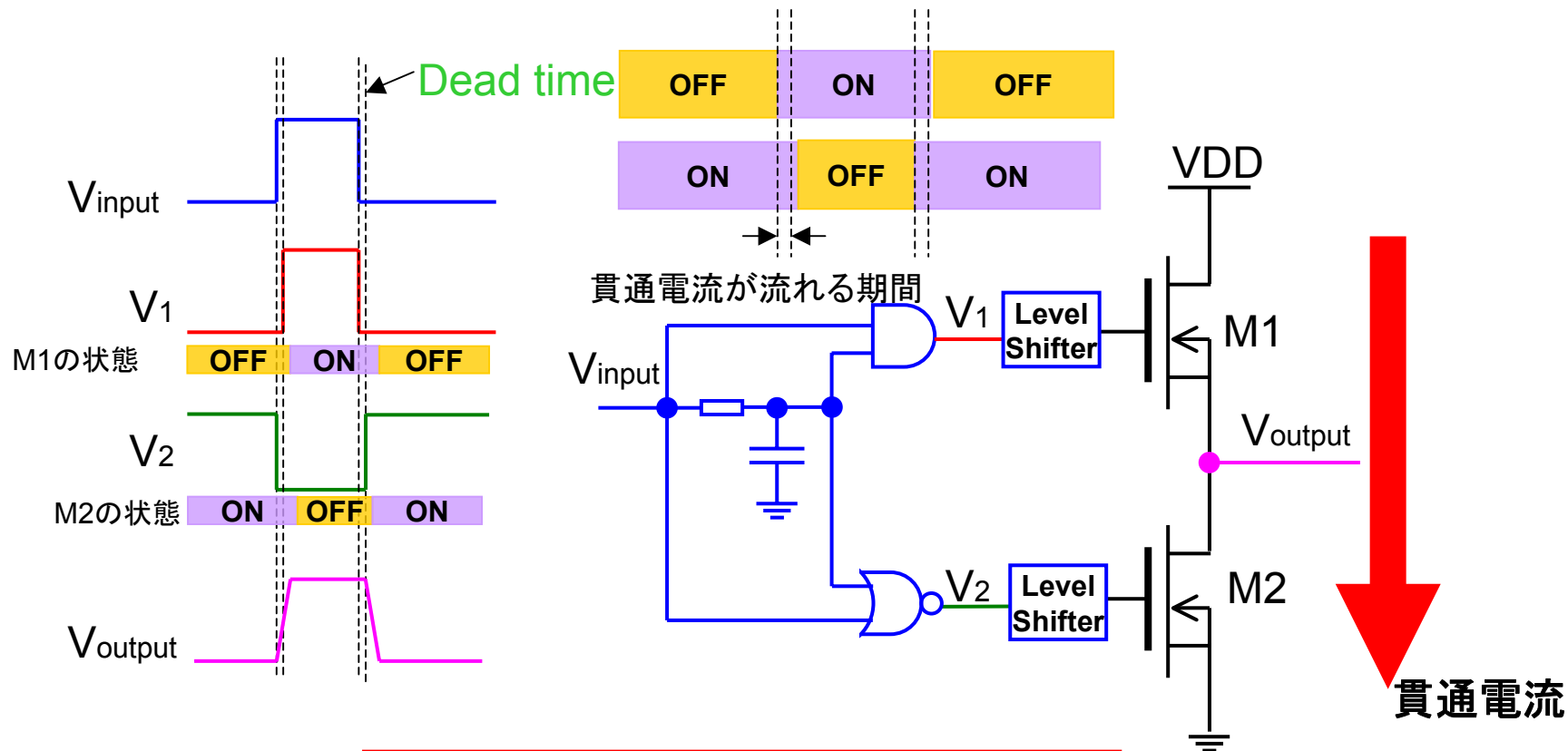
デッドタイムとは

- ◆ パルス波をパワーMOSFETで増幅する時、上下のMOSFETが同時にオンしないために設けたゲートドライブ電圧の時間差である。



D級アンプのひずみ デッドタイムが足りない場合

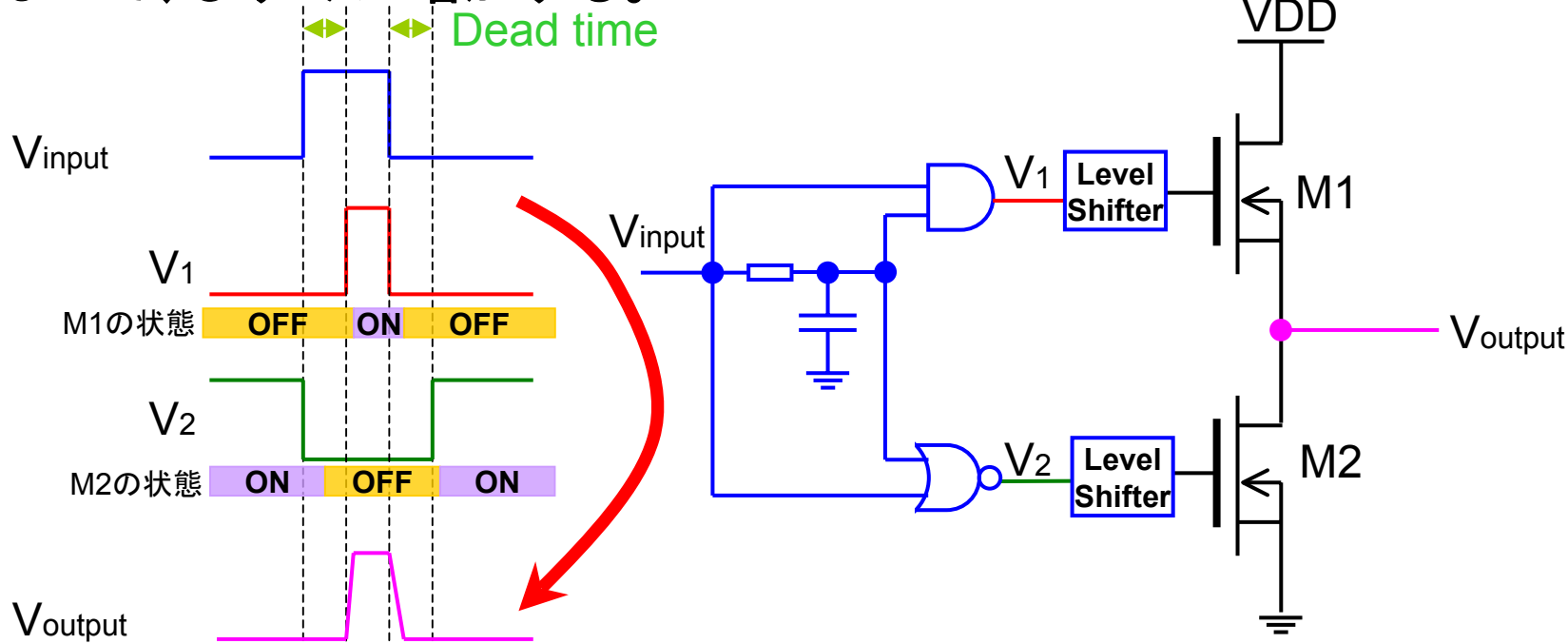
- ◆ デッドタイムがない、または足りない場合、貫通電流が発生する。



MOSFETの発熱、破壊を引き起こす！

D級アンプのひずみ デッドタイムが長いと

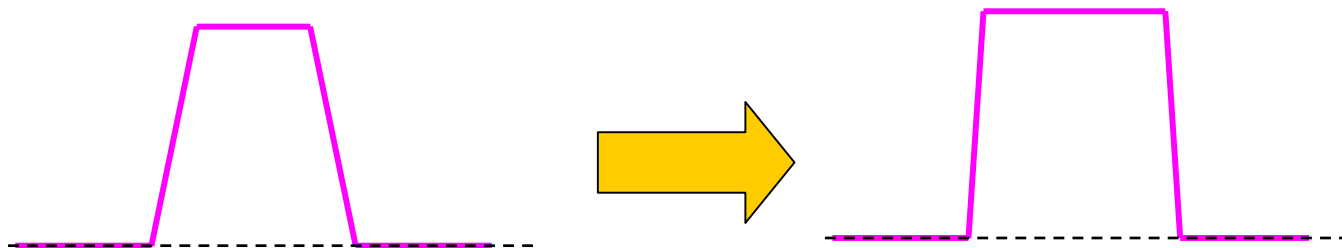
- ◆ デッドタイムは長いほど、パルスの再現性が劣化する。
よって、ひずみが増加する。



D級アンプの主なひずみはデッドタイム発生回路により生じる

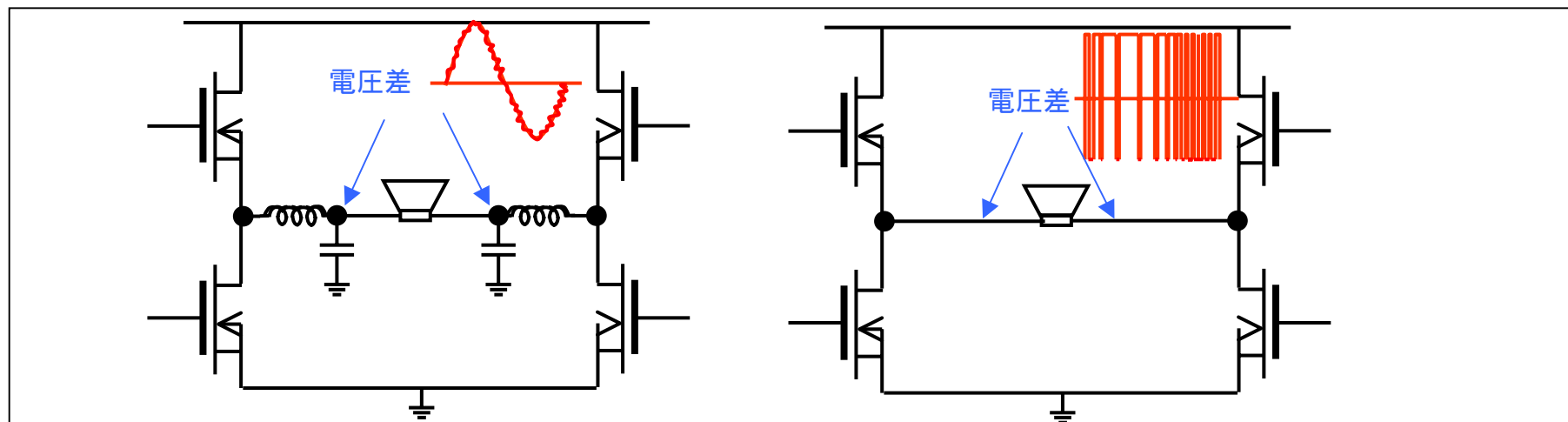
パワーMOSFETは日々進化している D級アンプがますます注目されてきた原因

パワーMOSFETスルーレートが改善



- ◆ 高速スイッチング可能
 - ◆ デッドタイムへの要求が少なくなる
(デッドタイム20nsオーダーのパワーMOSFETが市販されている)
- 今後、パワーMOSFETのデッドタイムによるひずみはますます減少する。
- ◆ LC出力フィルタ以外のすべての部分は集積化可能であり。EMIノイズの問題を解決できれば1チップ化ができる。

出力フィルタについて



付けてるのと、付けないのは、スピーカーに出力される波形は全く違うが人間には全く同じように聞こえる。

人間の耳には20-20kHzしか聞こえない。

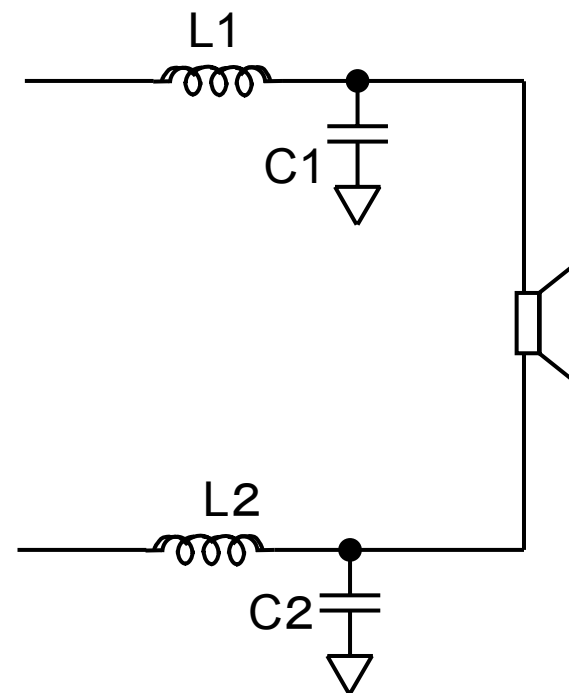
出力フィルタはEMI対策のため、可聴帯のノイズ除去のためではない。

一般的に出力フィルタは**LC**ローパスが使用されている。

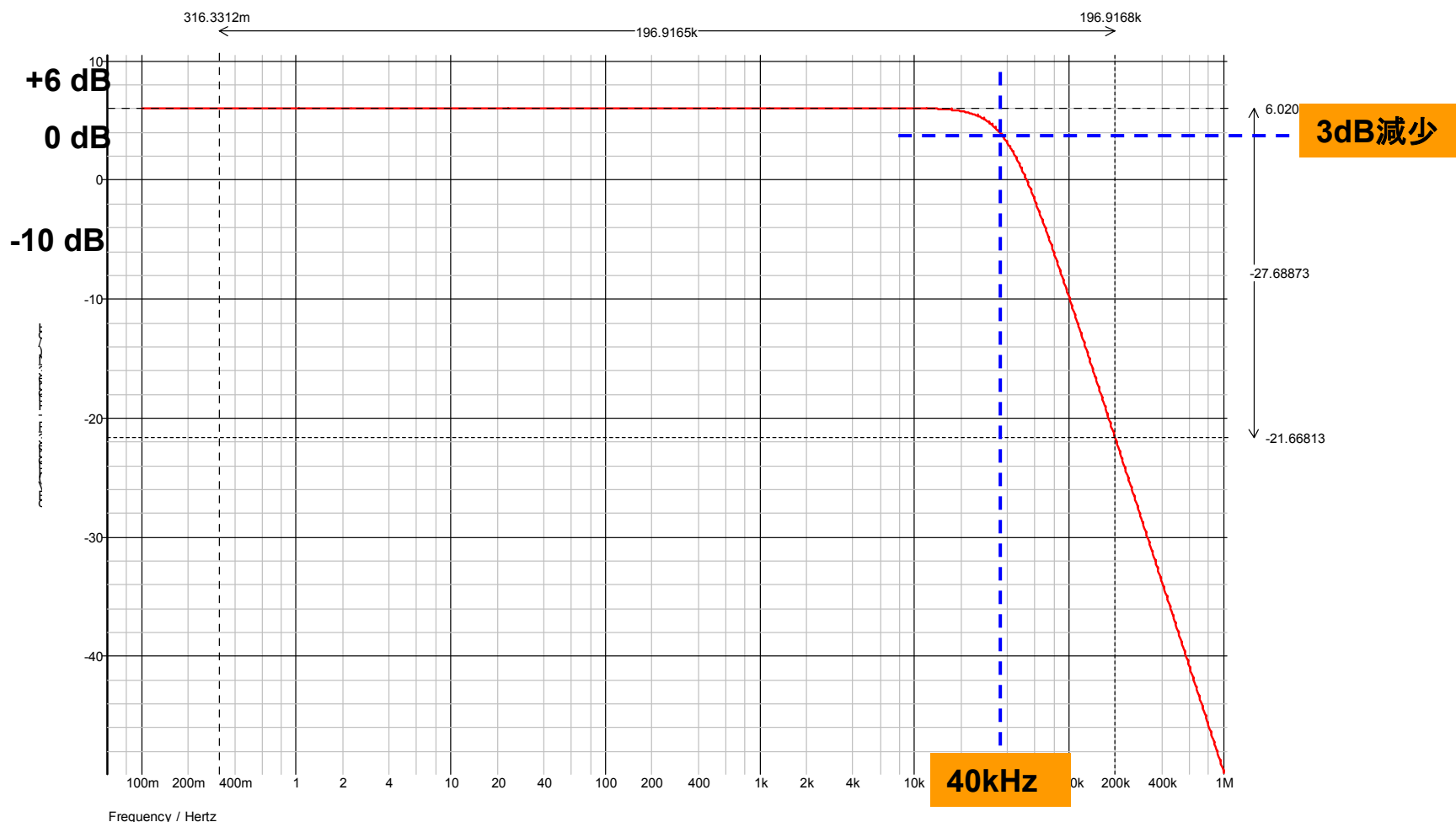
$$L1 = L2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \left(\frac{R_L}{2\pi \cdot f_c} \right)$$

$$C1 = C2 = \sqrt{2} \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_c \cdot R_L} \right)$$

RLは国際標準8Ωと仮定。
カットオフ周波数Fc=40kHzと設定した際、
L1=22.5uH
C2=0.703uFとなる。



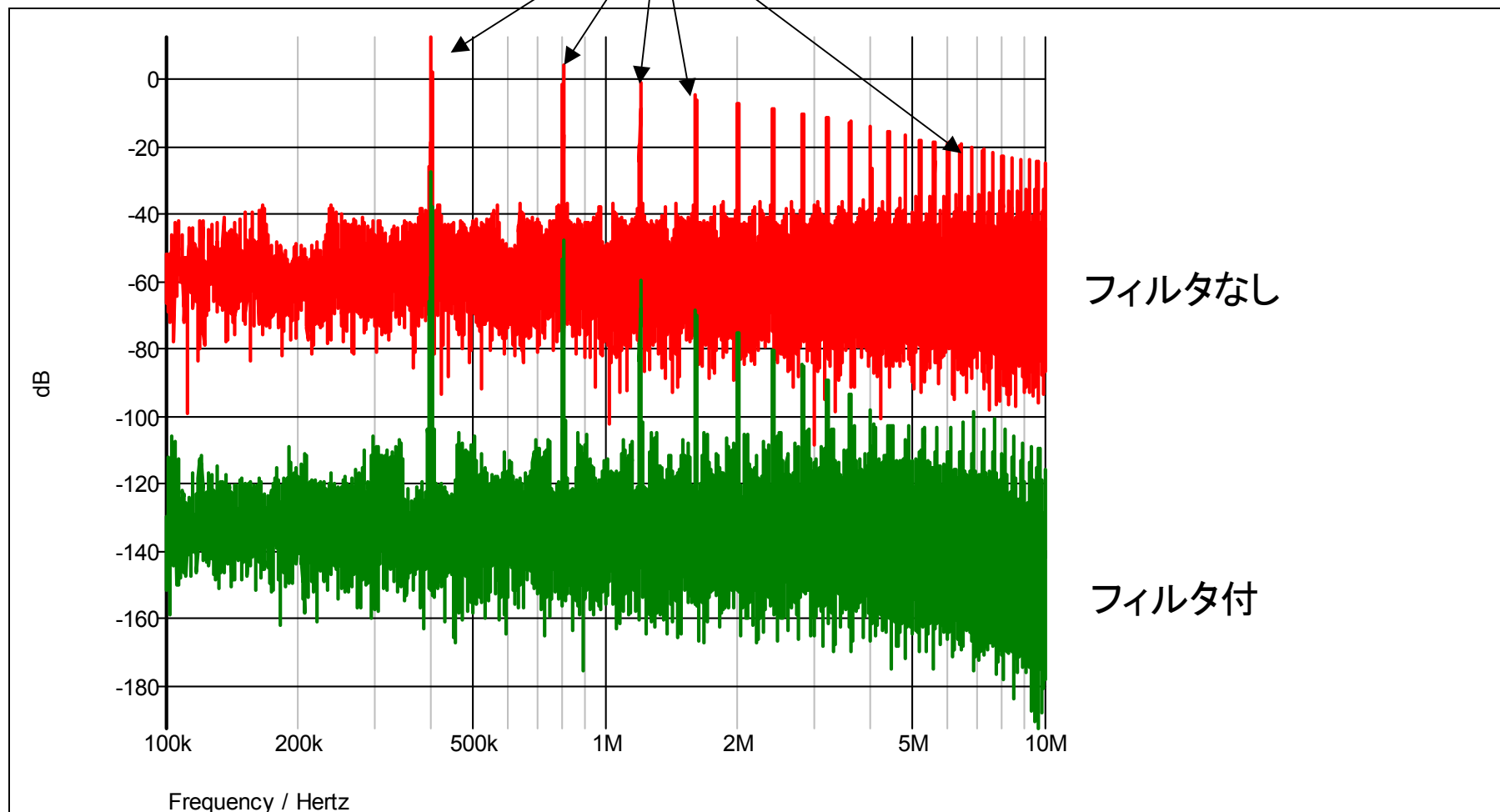
フィルタ設計(シミュレーション)



※差動構成のため、ゲインが2倍となるので全体的+6dBとなる

出力フィルタによるEMI減少効果

変調キャリア



※ノイズフロアが高く見えるのは、パルス波を直接FFTしているため、誤動作。

D級アンプのシュミレーション及び評価における注意点

- ◆ 出力波形には変調キャリアが残る。
- ◆ 出力波形を直接FFTすると狂った結果になる。
- ◆ シュミレーション又は評価の際はキャリア成分の振幅を十分に落とす必要があるにでLC出力フィルタの後にさらに3次のLPFに通してから信号をFFTする。

目次

研究背景と基礎知識

◆ D級アンプとか何か？

D級アンプの基礎知識

◆ アンプの帰還

アナログアンプの帰還

D級アンプの帰還における特有問題

研究目的

提案回路

◆ 帰還キャリアを最小に抑える変調方式

方法1

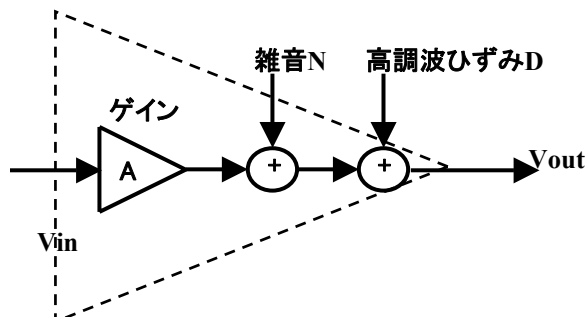
方法2→新規性

まとめとこれからの課題、謝辞

アナログアンプの帰還

$$V_{out} = A \cdot V_{in} + N + D$$

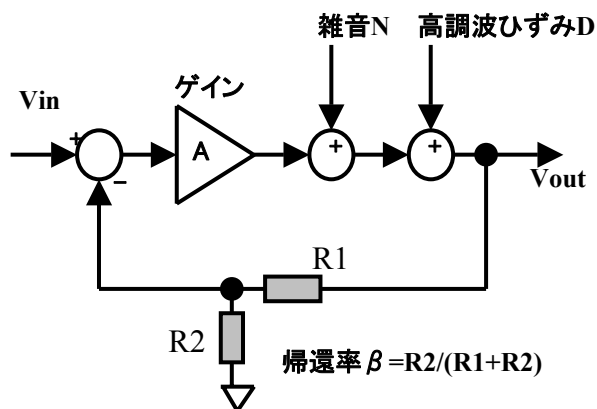
一般的なアナログアンプの場合



※ひずみDはVinの関数

$$V_{out} = A \cdot (V_{in} - \beta \cdot V_{out}) + N + D$$

アンプの帰還を帰還させると....



$$V_{out} = \frac{A}{1 + A \cdot \beta} V_{in} + \frac{1}{1 + A \cdot \beta} N + \frac{1}{1 + A \cdot \beta} D$$

一般的にアナログアンプはAが100dB以上あるので

$$V_{out} \approx \frac{1}{\beta} V_{in} + \frac{1}{A \cdot \beta} (N + D)$$

非常に都合のいい結果となる

- ①ゲインは帰還率 β で決まる。
- ②ループゲイン $A \beta$ が高い程、ノイズとひずみの除去比が高くなる。

目次

研究背景と基礎知識

◆ D級アンプとか何か？

D級アンプの基礎知識

◆ アンプの帰還

アナログアンプの帰還

D級アンプの帰還における特有問題

研究目的

提案回路

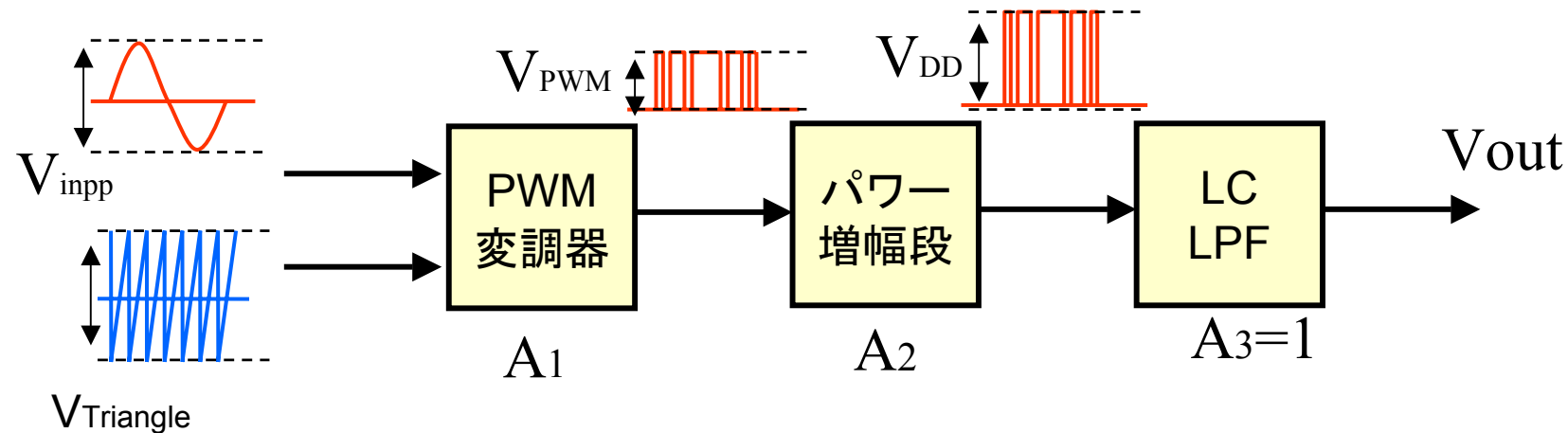
◆ 帰還キャリアを最小に抑える変調方式

方法1

方法2→新規性

まとめとこれからの課題、謝辞

無帰還D級アンプの利得



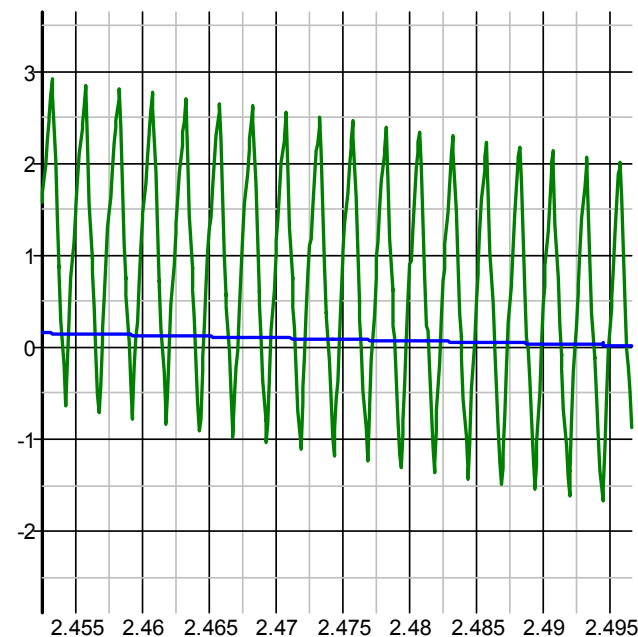
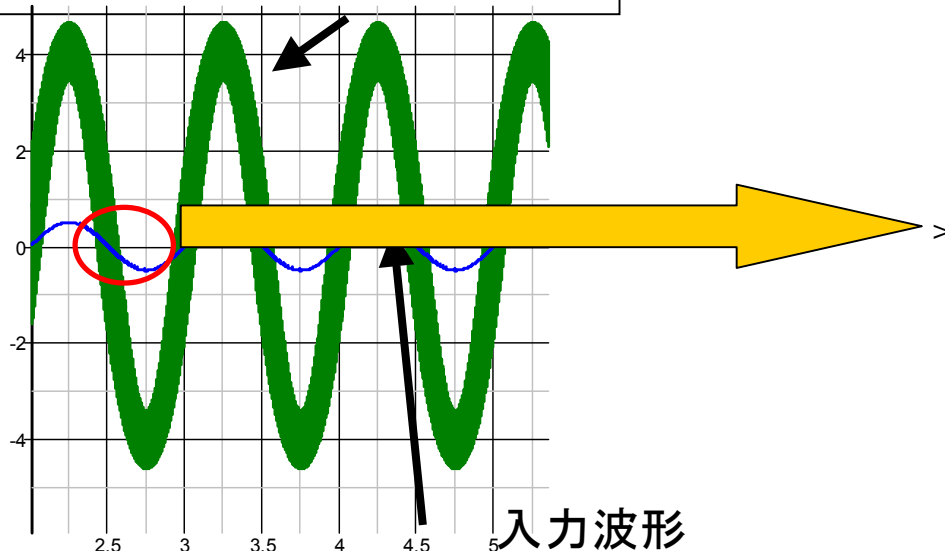
$$A_{total} = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 = \frac{V_{inpp} \cdot V_{PWM}}{V_{Triangle}} \cdot \frac{V_{DD}}{V_{PWM}} = \frac{V_{inpp}}{V_{Triangle}} \cdot V_{DD}$$

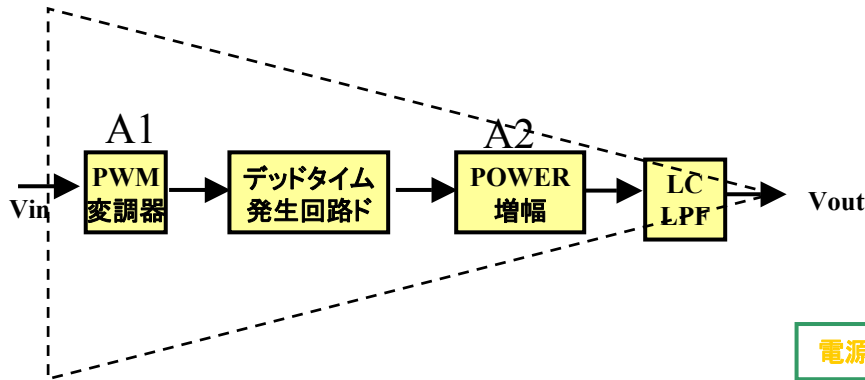
$V_{inpp}=1[V]$ 、 $V_{Triangle}=1.2[V]$ 、 $V_{DD}=40[V]$ の場合、 $A_{total}=33.33$ 倍
 フルブリッジの場合 $2A_{total}=66.66$ 倍
 アナログアンプの100dBと比べて、利得が極めて小さい

残留キャリアとは？

- ◆ PWM変調の時に波形に加わった三角波の周波数成分を「キャリア」呼ぶ。
- ◆ 変調後のパルス波をフィードバック用のLPFに通しても取り除けなかった三角波の周波数成分を「残留キャリア」と呼ぶ

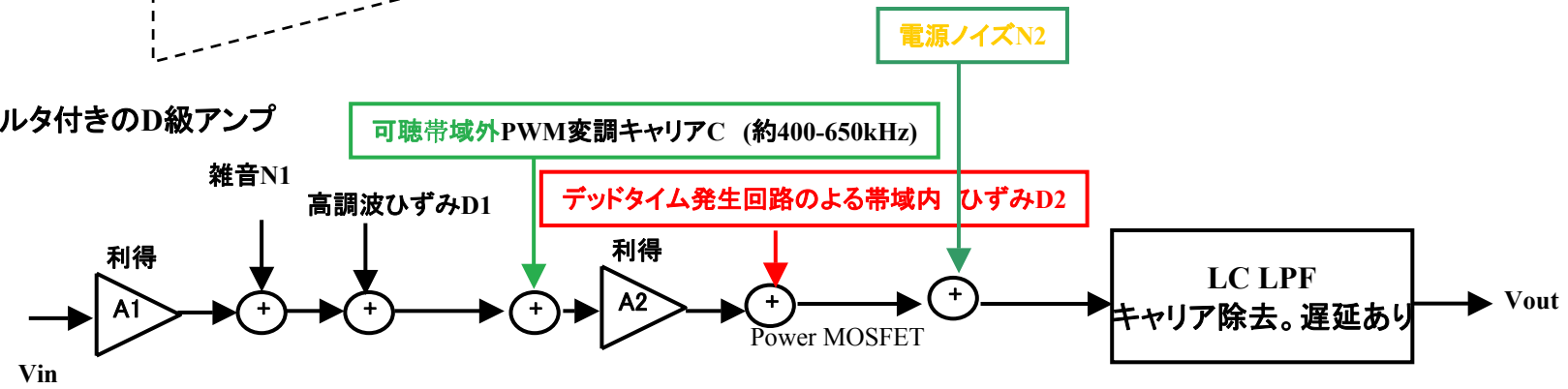
フィードバック用LPF後の波形





POWER MOSFETは単なるスイッチであるため、電源ノイズは直接出力に現れる。
PSRR=0dB!

フィルタ付きのD級アンプ



変調キャリアCはLC LPFで除去し切れないが、もともと可聴帯域外ノイズなので、アンプとしては問題ない。

$$V_{out} = (A_1 \cdot V_{in} + N_1 + D_1) \cdot A_2 + N_2 + D_2 + C_{left}$$

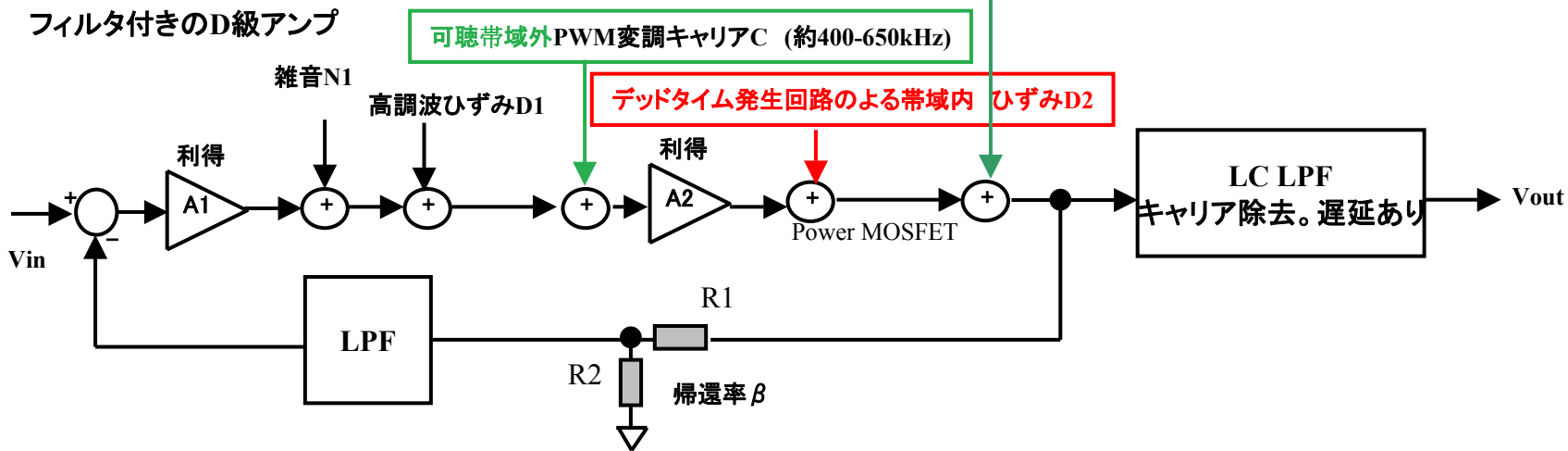
$$V_{out} = A_{total} \cdot V_{in} + \underbrace{A_2 \cdot N_1 + N_2 + A_2 \cdot D_1 + D_2}_{\text{ノイズとひずみの項}} + \underbrace{C_{left}}_{\text{残留キャリア}}$$



電源ノイズN2

可聴帯域外PWM変調キャリアC (約400-650kHz)

デッドタイム発生回路による帯域内 ひずみD2



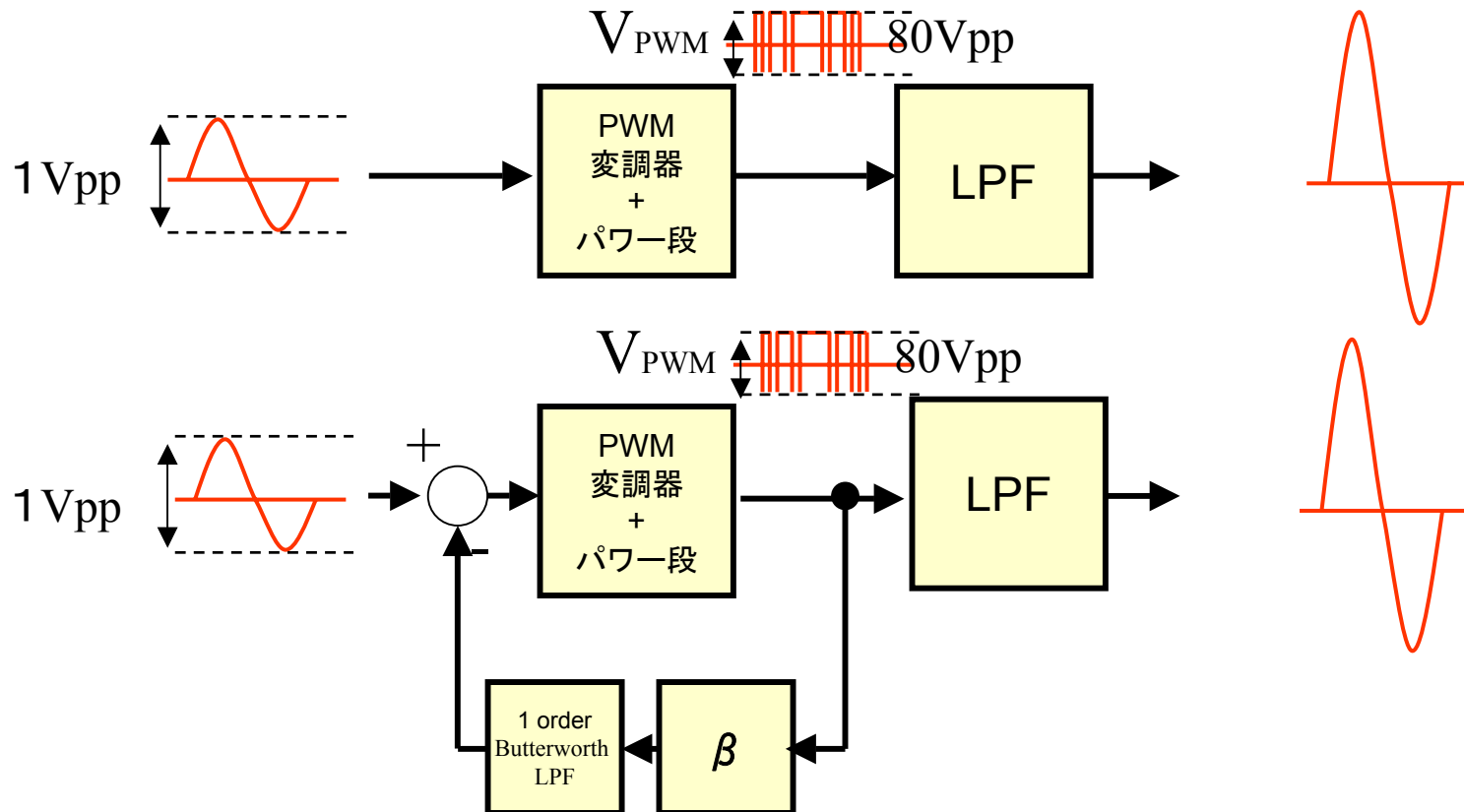
$$V_{out} = ((V_{in} - \beta \cdot V_{out}) A_1 + N_1 + D_1) A_2 + N_2 + D_2 + C_{left}$$

$$A_1 \cdot A_2 = A_{total}$$

$$V_{out} = A_{total} \cdot V_{in} - A_{total} \cdot \beta \cdot V_{out} + (N_1 + D_1) A_2 + N_2 + D_2 + C_{left}$$

$$V_{out} = \frac{A_{total}}{1 + A_{total} \cdot \beta} V_{in} + \frac{A_2}{1 + A_{total} \cdot \beta} (N_1 + D_1) + \frac{1}{1 + A_{total} \cdot \beta} (N_2 + D_2) + C_{left}$$

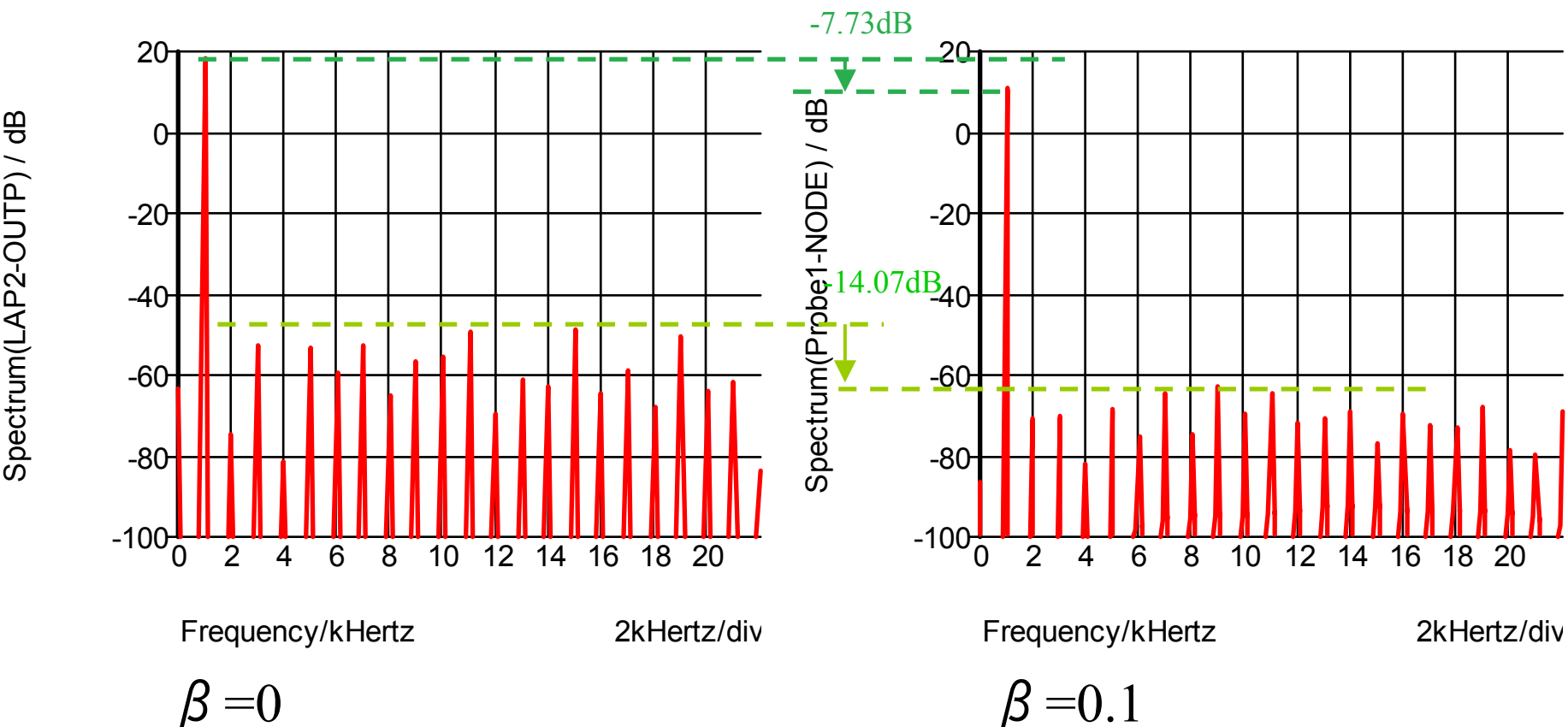
A_{total}が低い場合、ゲインは帰還率βだけでは決められない



※ 後段のLPFは0-20kHzの信号だけをデータ収集するためのもの。

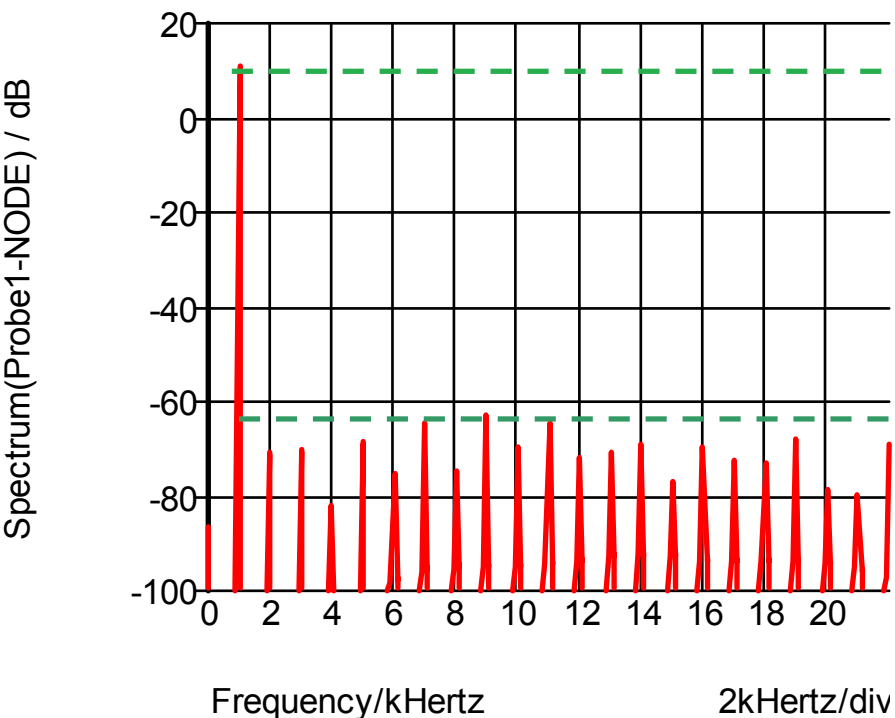
入力信号	1kHz サイン波
三角波周波数	400kHz
LPFのCUTOFF周波数	33kHz
シミュレーションソフト	SIMetrix 5.3 Demo版

帰還によるPWM変調器のひずみ改善効果

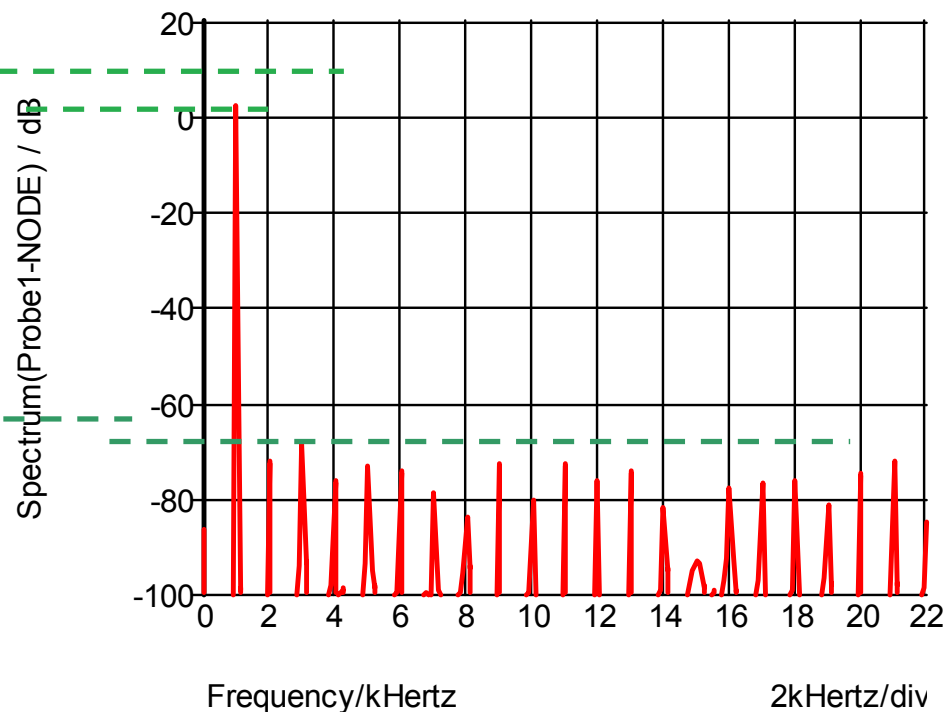


帰還により利得が多少減るが、ひずみの減少が著しい

帰還率 β を高くした場合



$\beta = 0.1$



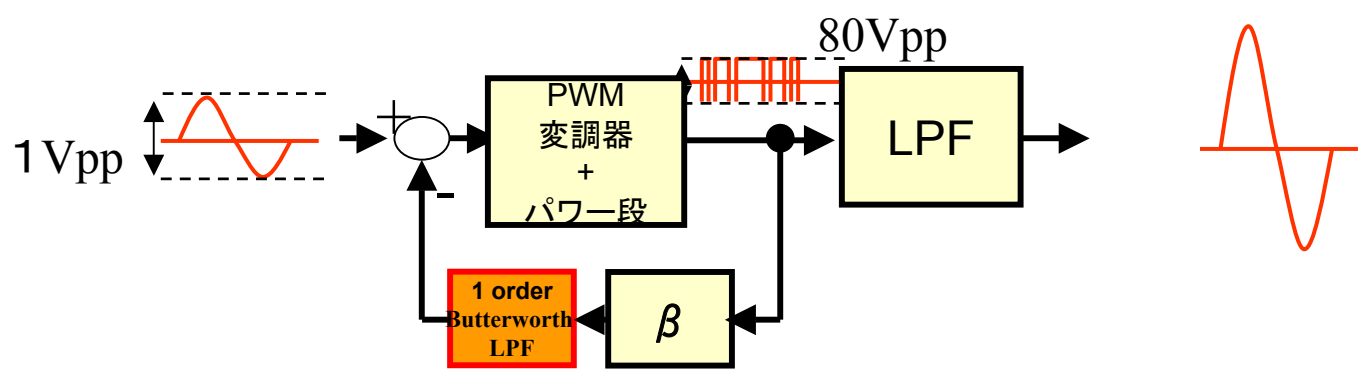
$\beta = 0.5$

D級アンプ特有の問題発生！

ゲインの減少がひずみの減少より目立つ

つまり、帰還率を高くするほど特性が悪くなっている。

帰還率 β が高くなると音質が劣化する原因



$$V_{out} = (V_{in} - \beta \cdot V_{out} - \beta \cdot C_{FB})A + N + D + C_{left}$$

$$V_{out} = \frac{A}{1 + A\beta} V_{in} + \frac{A}{1 + A\beta} (N + D) + \frac{A \cdot \beta}{1 + A\beta} C_{FB} + C_{left}$$

$A \cdot \beta \gg 1$ のとき

$$V_{out} \approx \frac{A}{1 + A\beta} V_{in} + \frac{A}{1 + A\beta} (N + D) + C_{FB} + C_{left}$$

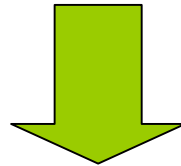
β が高くなると減衰する項

β によらない項

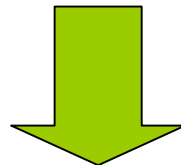
ダイナミックレンジアップには C_{FB} を下げることが必要。

研究背景のまとめ

音質向上を図るには



ひずみをなくすこと



フィードバックキャリアを減少させることが重要

目次

研究背景と基礎知識

◆ D級アンプとか何か？

D級アンプの基礎知識

◆ アンプの帰還

アナログアンプの帰還

D級アンプの帰還における特有問題

研究目的

提案回路

◆ 帰還キャリアを最小に抑える変調方式

方法1

方法2→新規性

まとめとこれからの課題、謝辞

研究目的

- ◆ ひずみを減少させるためのフィードバックキャリアの低減手法
- ◆ EMIの低減手法

目次

研究背景と基礎知識

◆ D級アンプとか何か？

D級アンプの基礎知識

◆ アンプの帰還

アナログアンプの帰還

D級アンプの帰還における特有問題

研究目的

提案回路

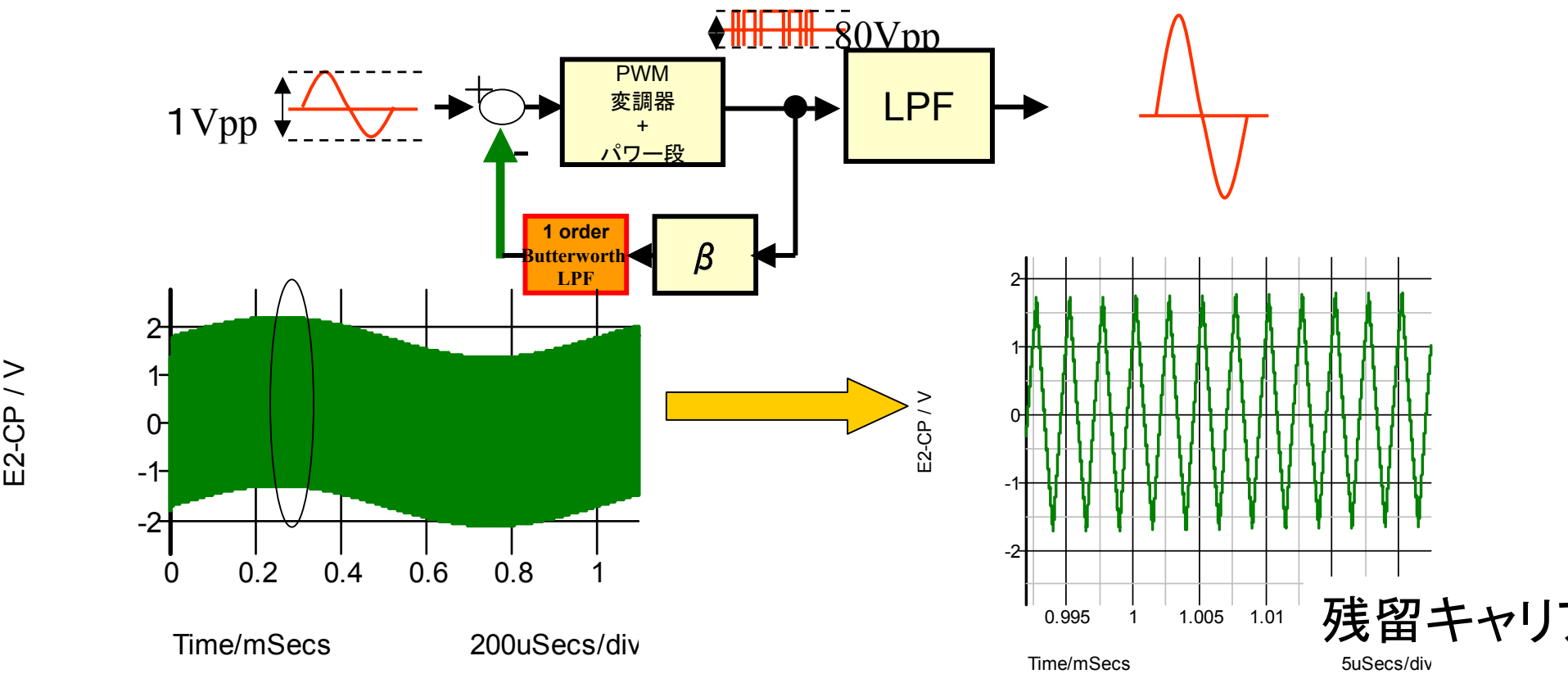
◆ 帰還キャリアを最小に抑える変調方式

方法1

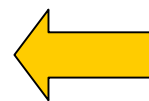
方法2→新規性

まとめとこれからの課題、謝辞

フィードバック波形のキャリア成分 キャリア成分はフィルタで除去できるか？

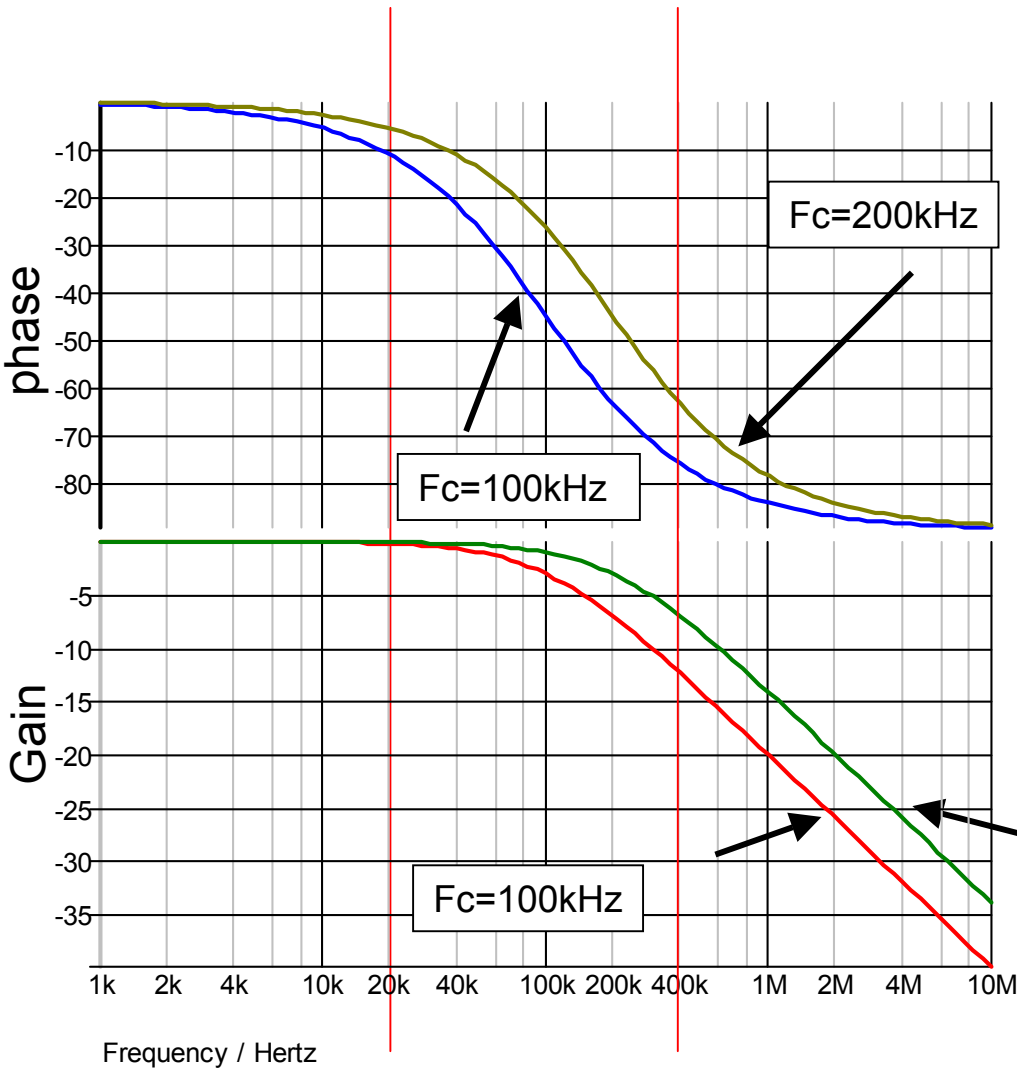


1 order Butterworth LPF



では、これを調べてみる

通常フィードバックでは1次バターワースを使う



PWM用三角波周波数が400kHzの場合
 Fc=200kHzの1次バターワース
 Fc=100kHzの1次バターワース

との差は

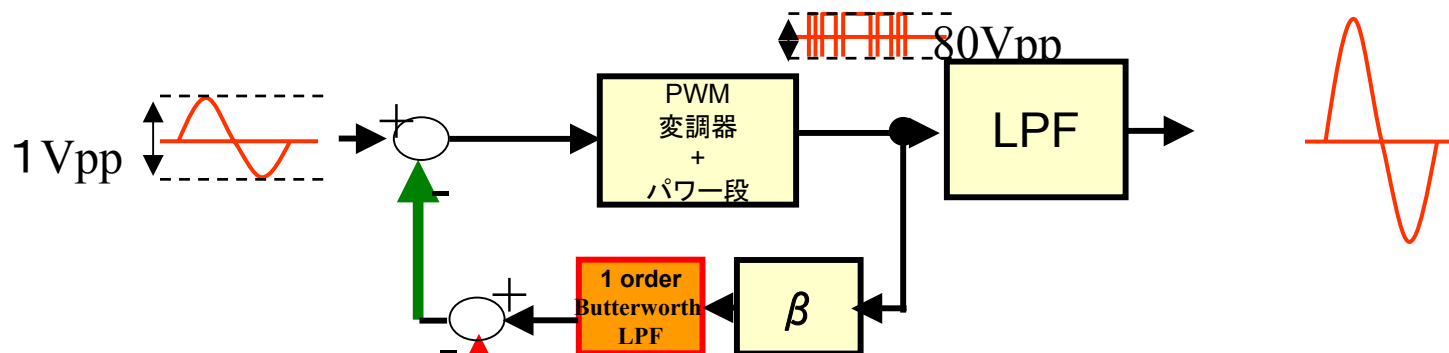
400kHzではキャリアの量5.3dBの差。

しかし、

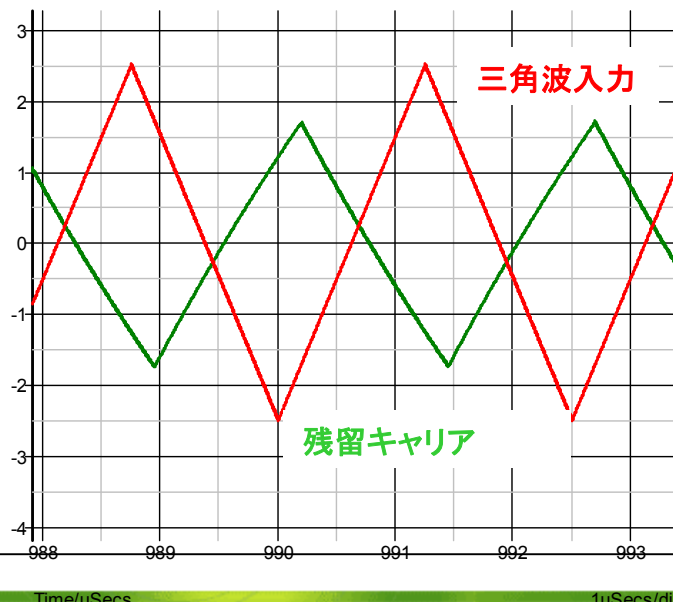
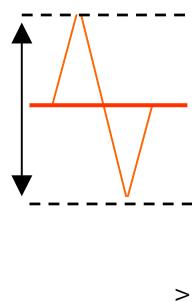
20kHz入力で5.6度位相遅れの差がある

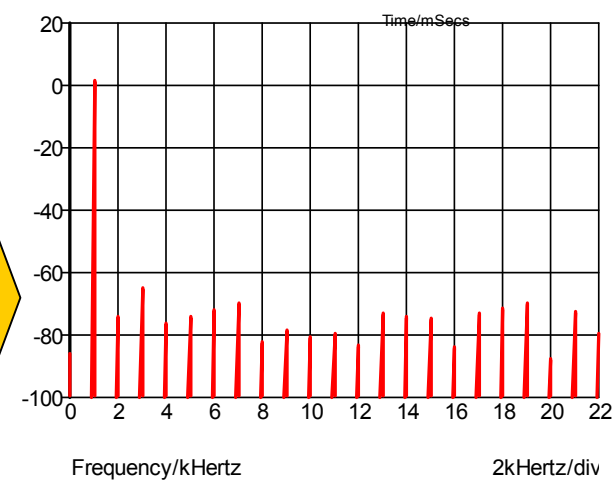
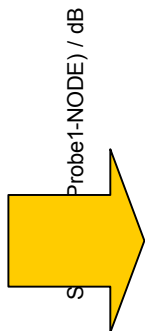
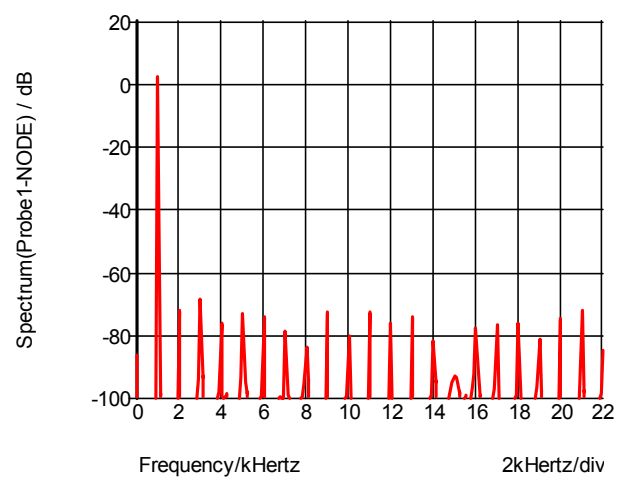
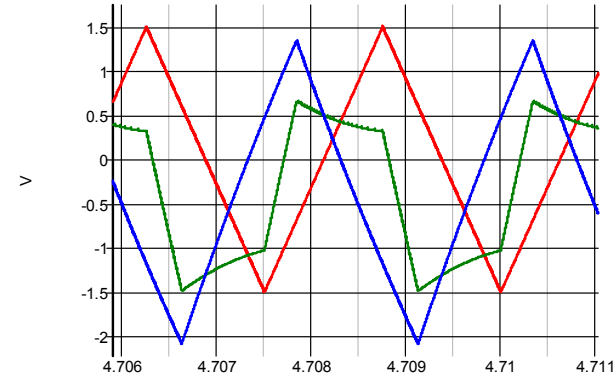
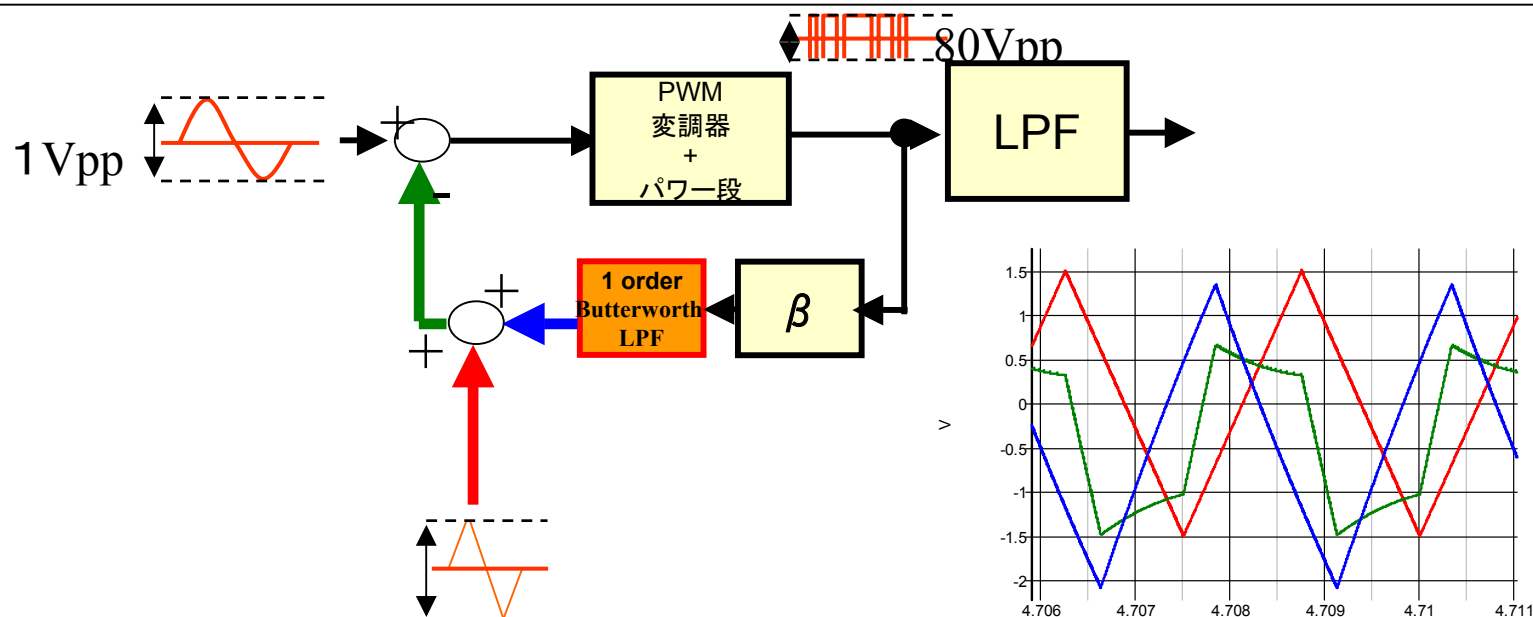
フィルタでキャリアを多めに除去すると、位相遅れも増える。

キャリア成分は相殺可能か？



三角波成分を振幅を一致させて引けば多少は改善が図れる？

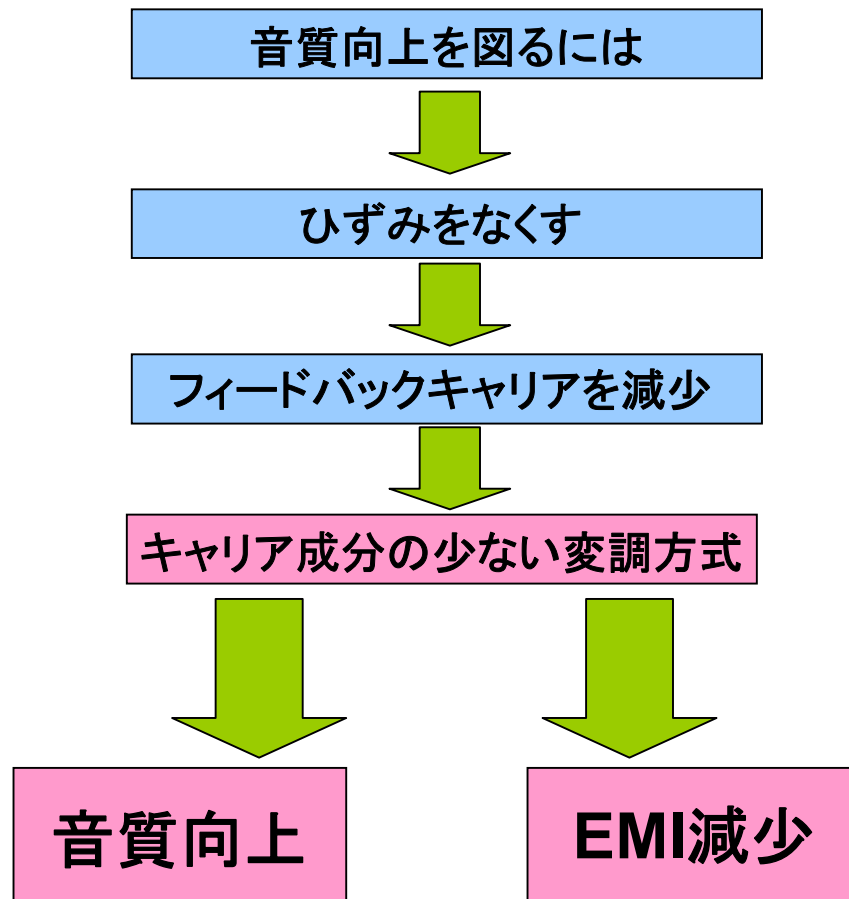




悪化

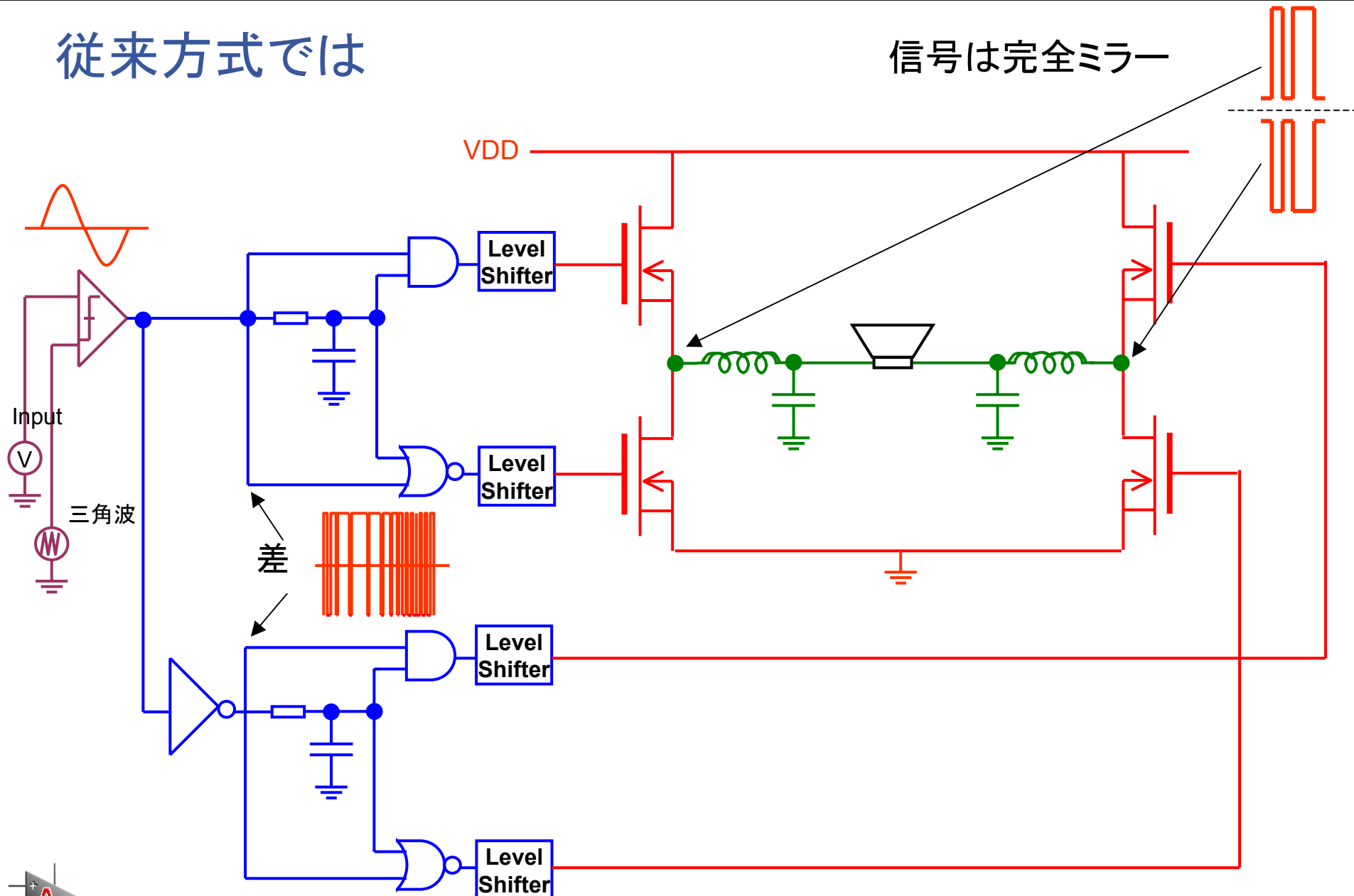
加算でのキャリア成分の相殺ではキャリアが多少減少するが、効果がなかった

出発点



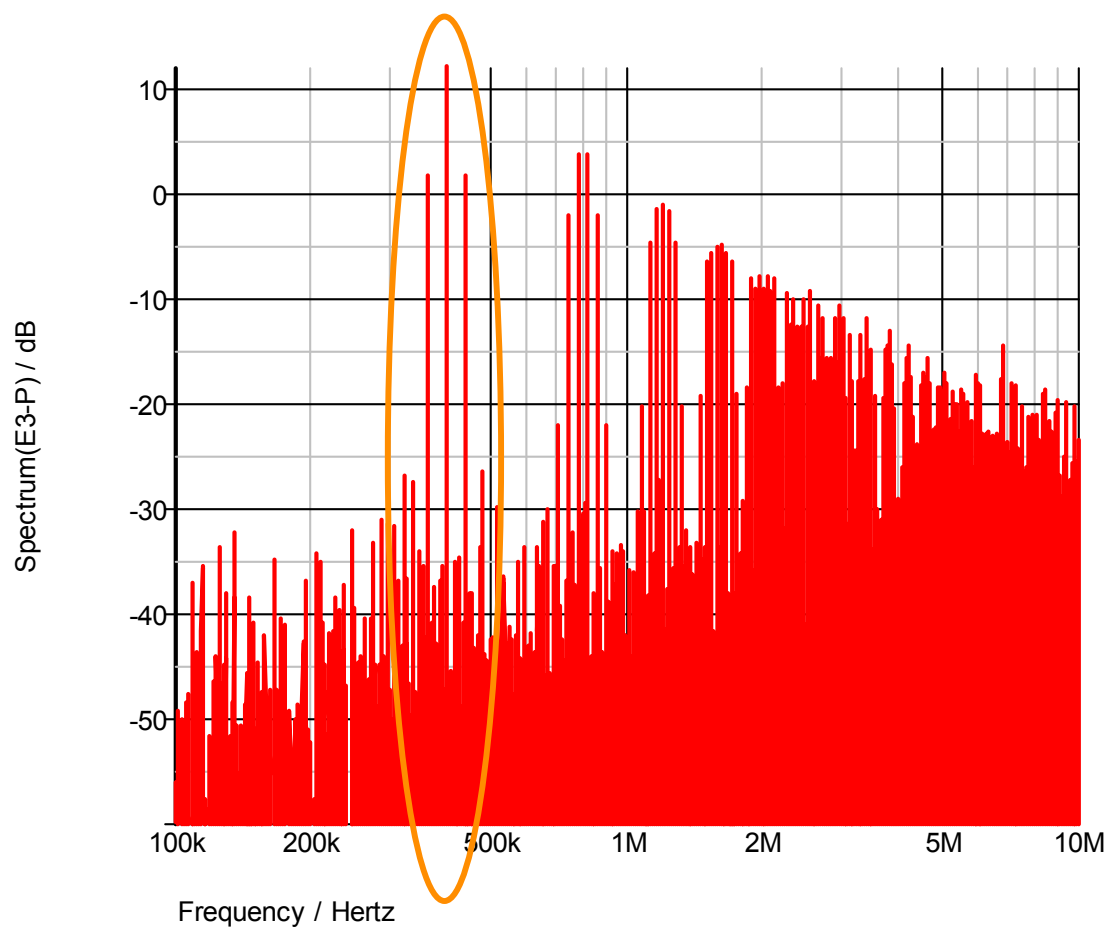
従来方式では

信号は完全ミラー



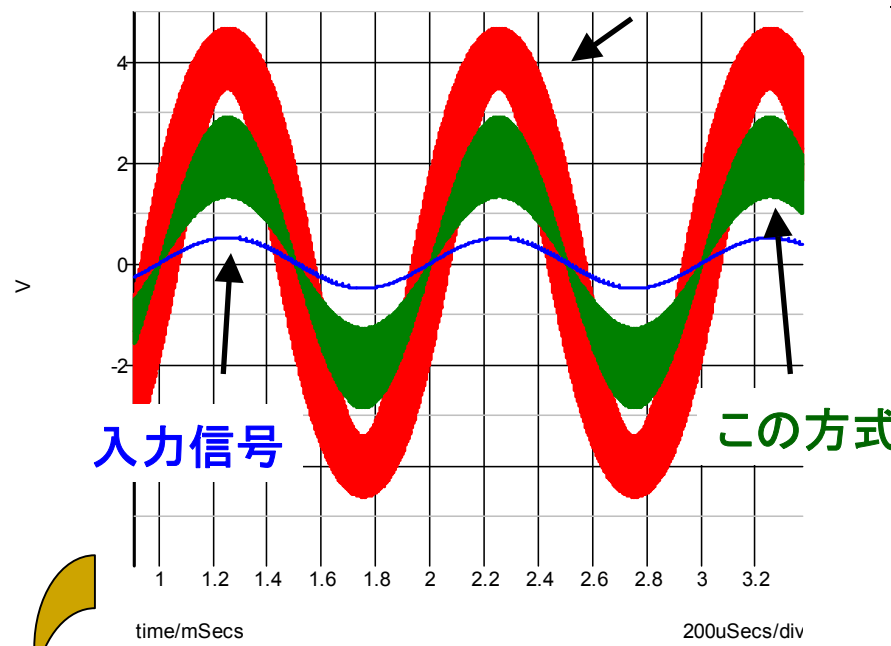
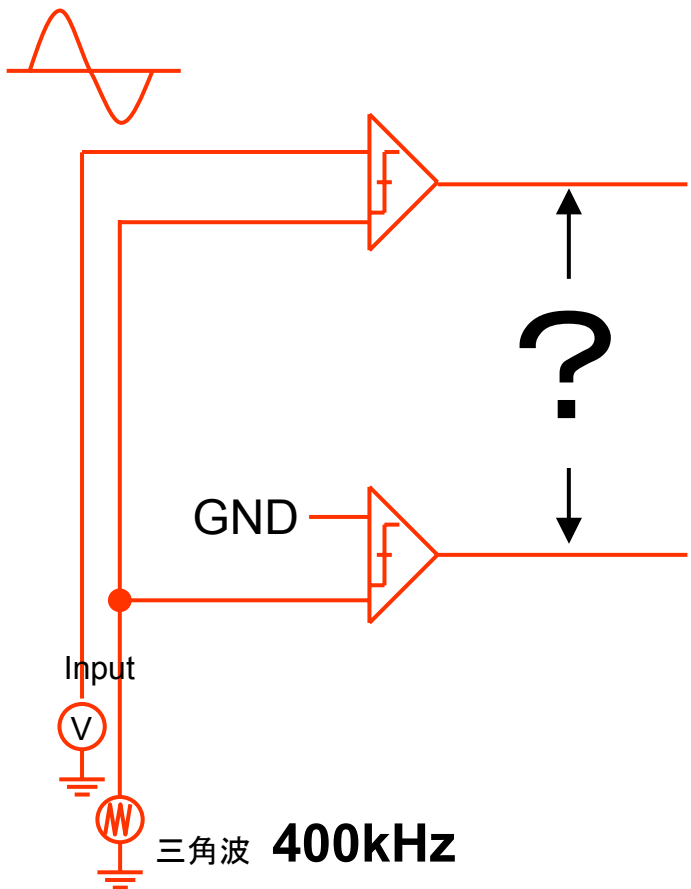
従来方式の変調結果

400kHzの三角波での変調

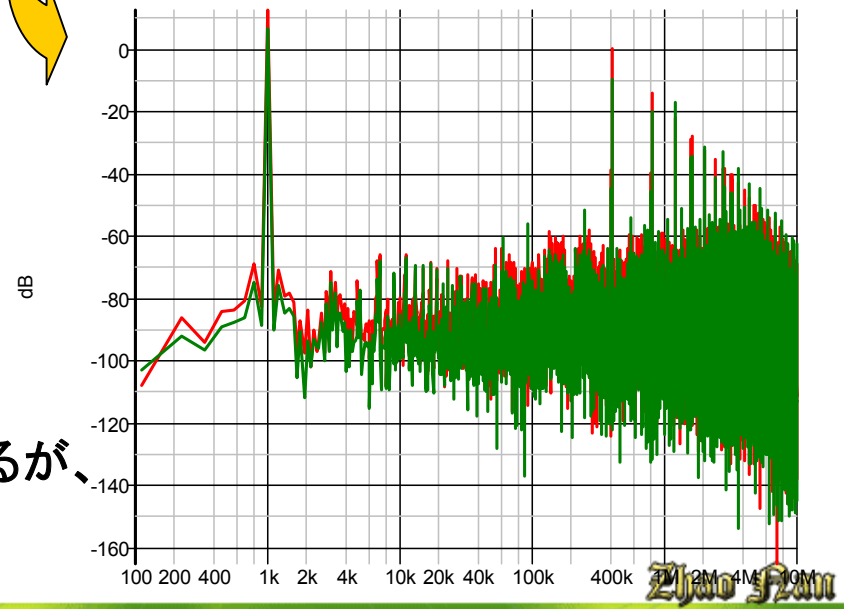


400kHz周辺にキャリアが立つ

キャリアを相殺させるには



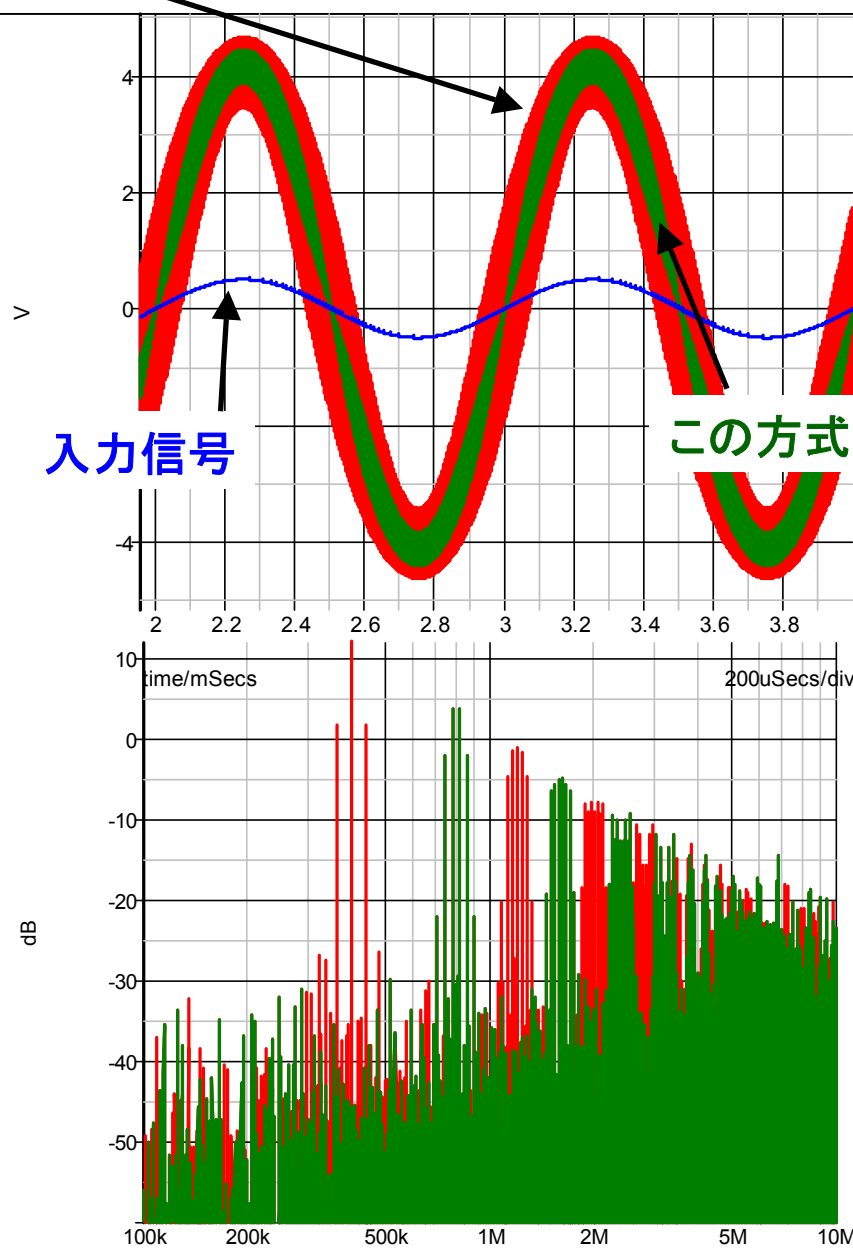
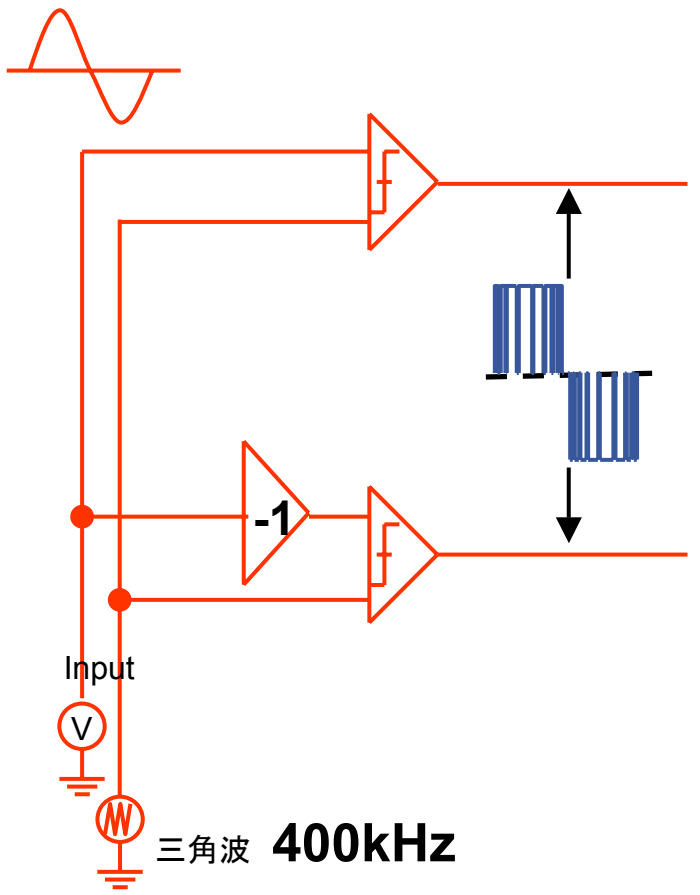
FFT



確かに400kHzキャリア成分が10dB減少するが、
信号振幅も半減(-6db)する



キャリア相殺変調

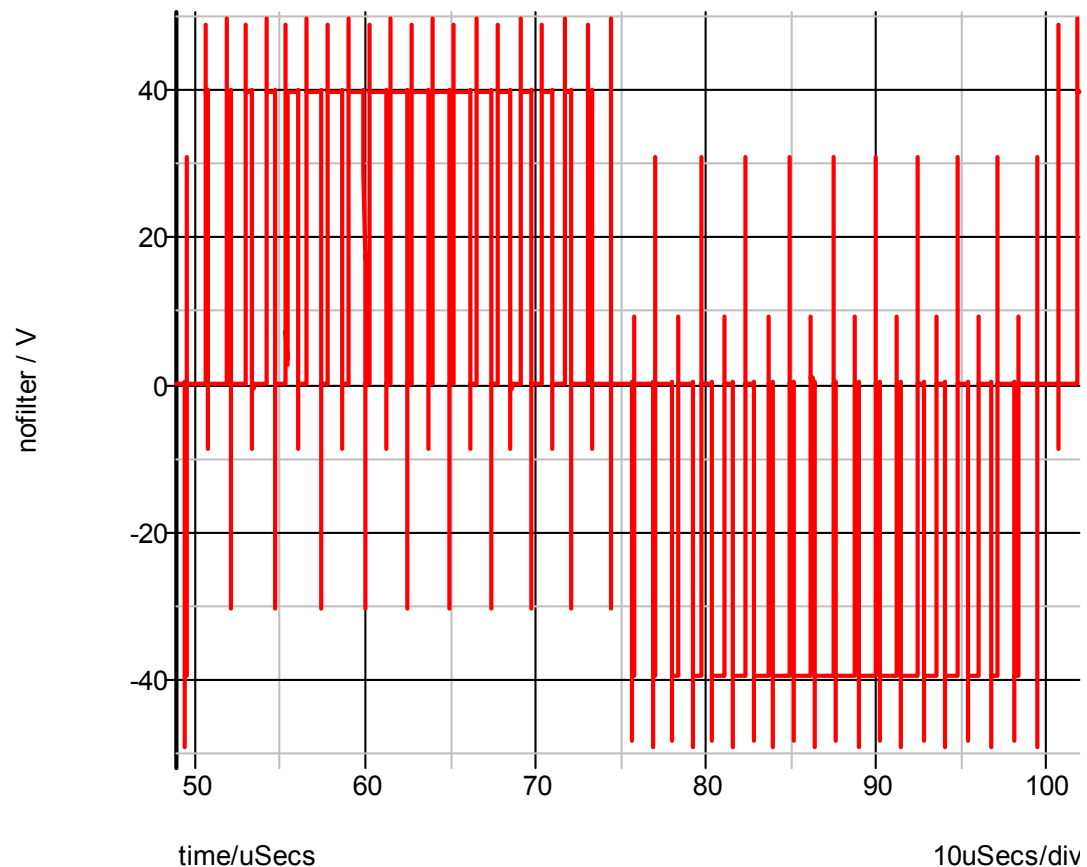


400kHzの成分がない



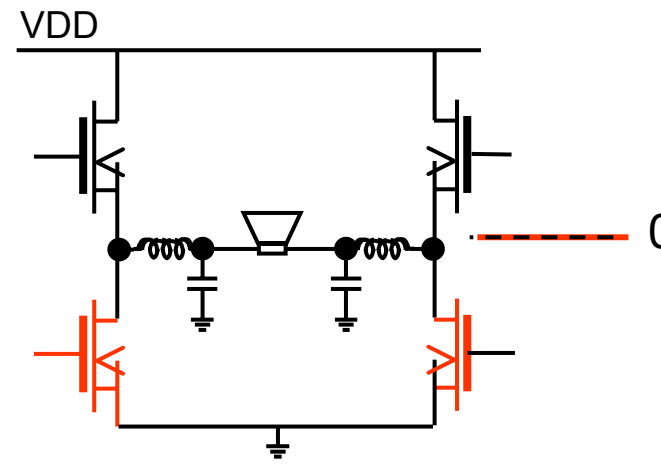
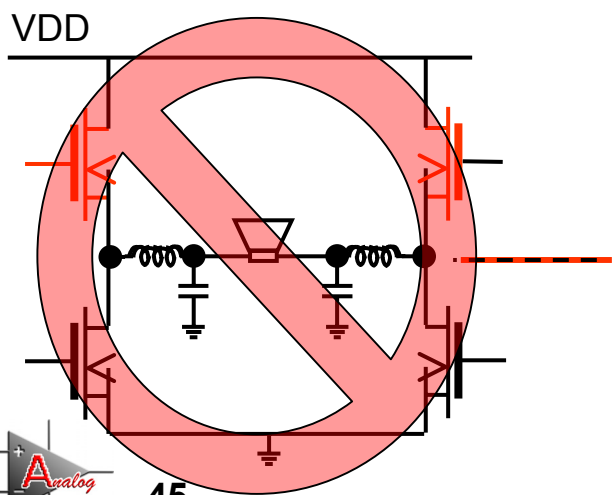
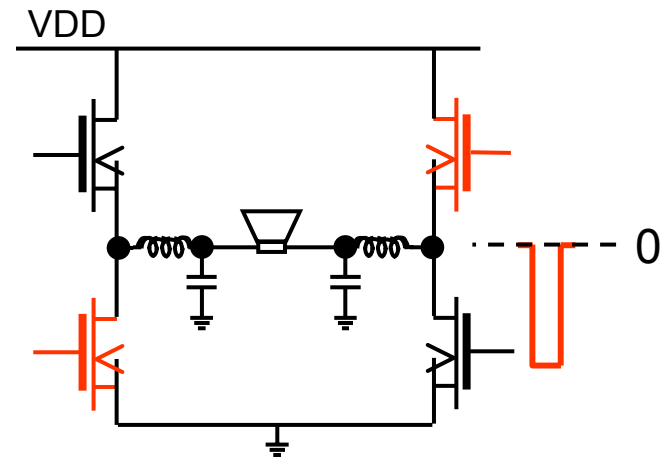
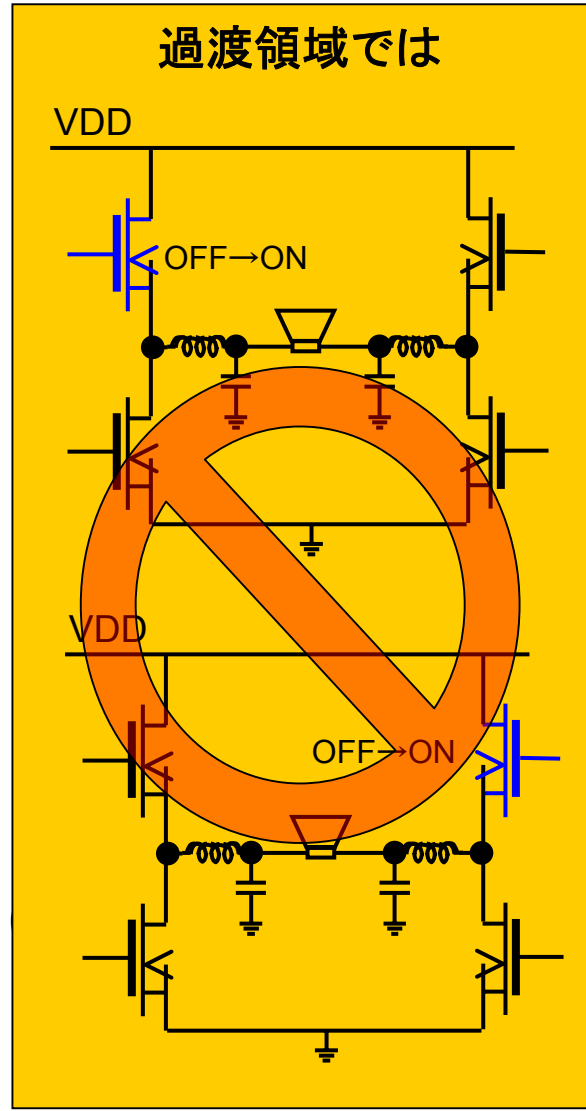
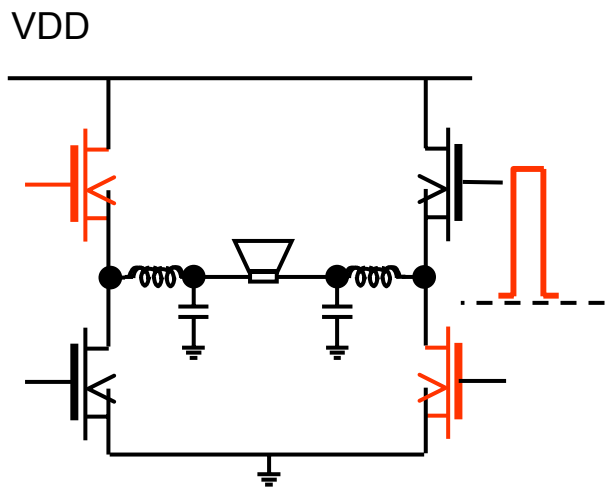
この出力をそのままパワー一段に持っていく、
フィルタなしで波形を観察すると

◆ シュートが発生している(フィルタ付ければシュートは観測できない)



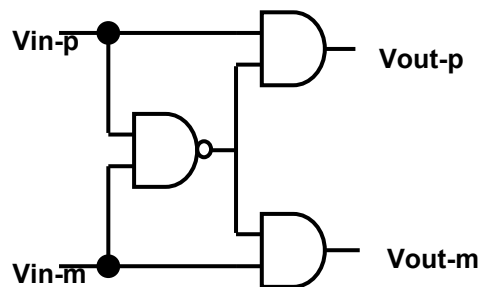
入力は15kHzのサイン波

ONするMOSFETと出力波形

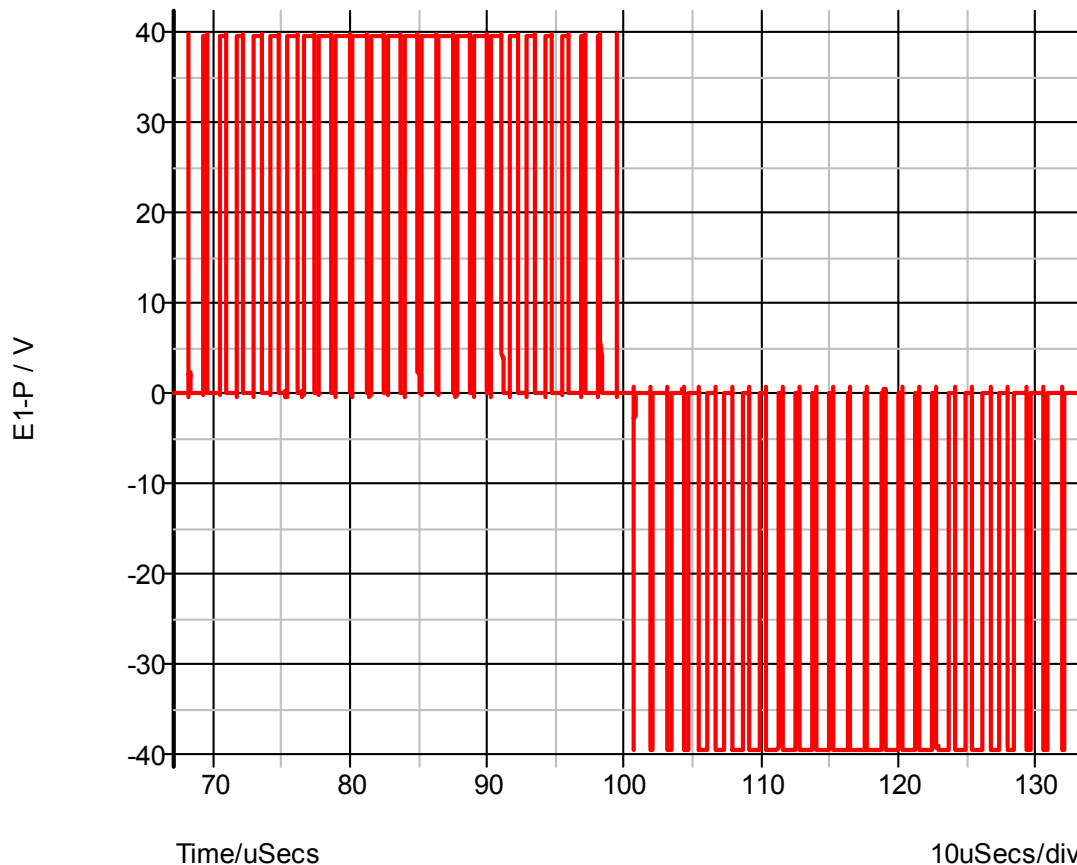


キャリア相殺変調パワー一段まで実現させるための方法

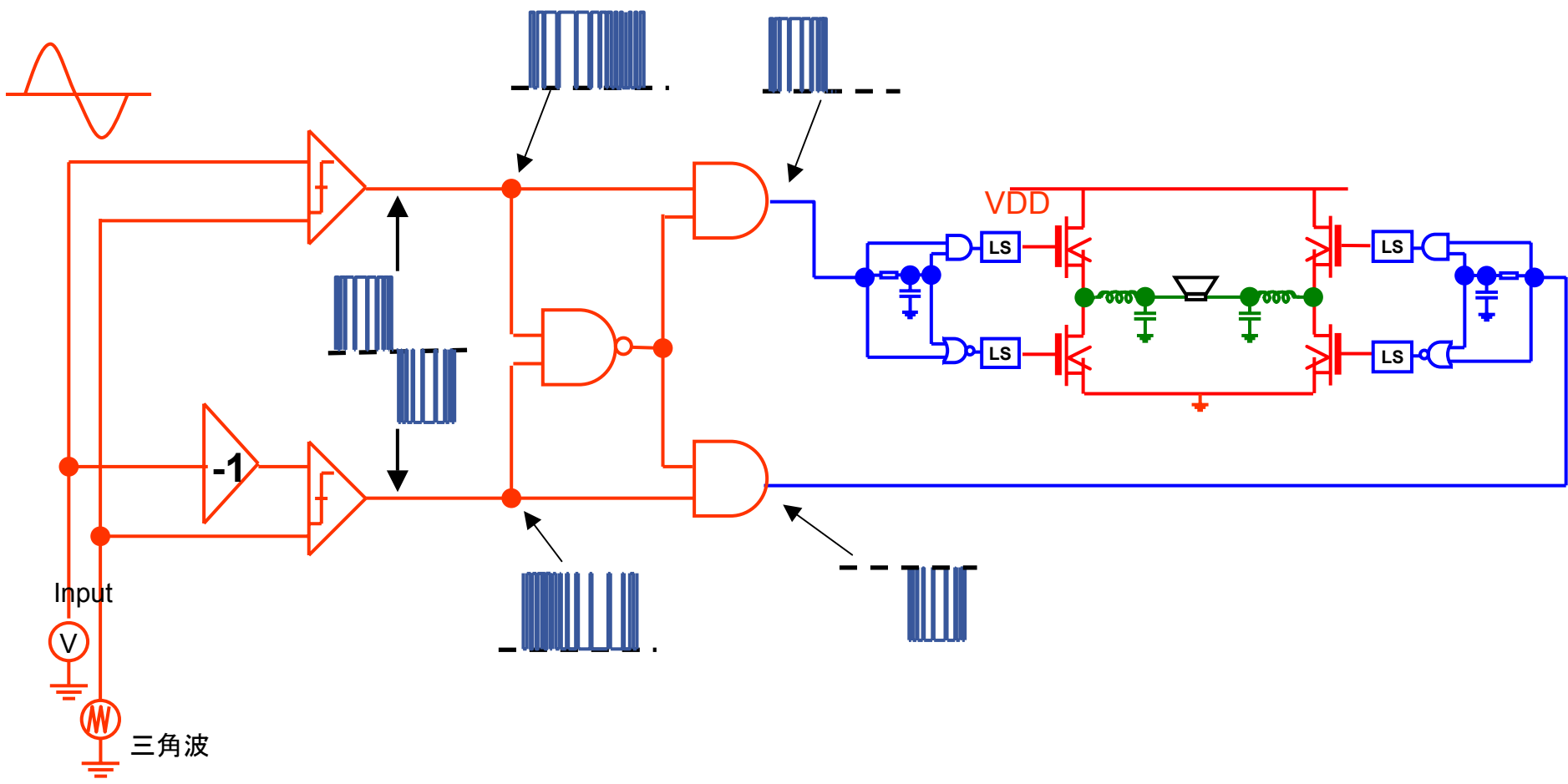
◆ 同時に1になるのを防ぐ



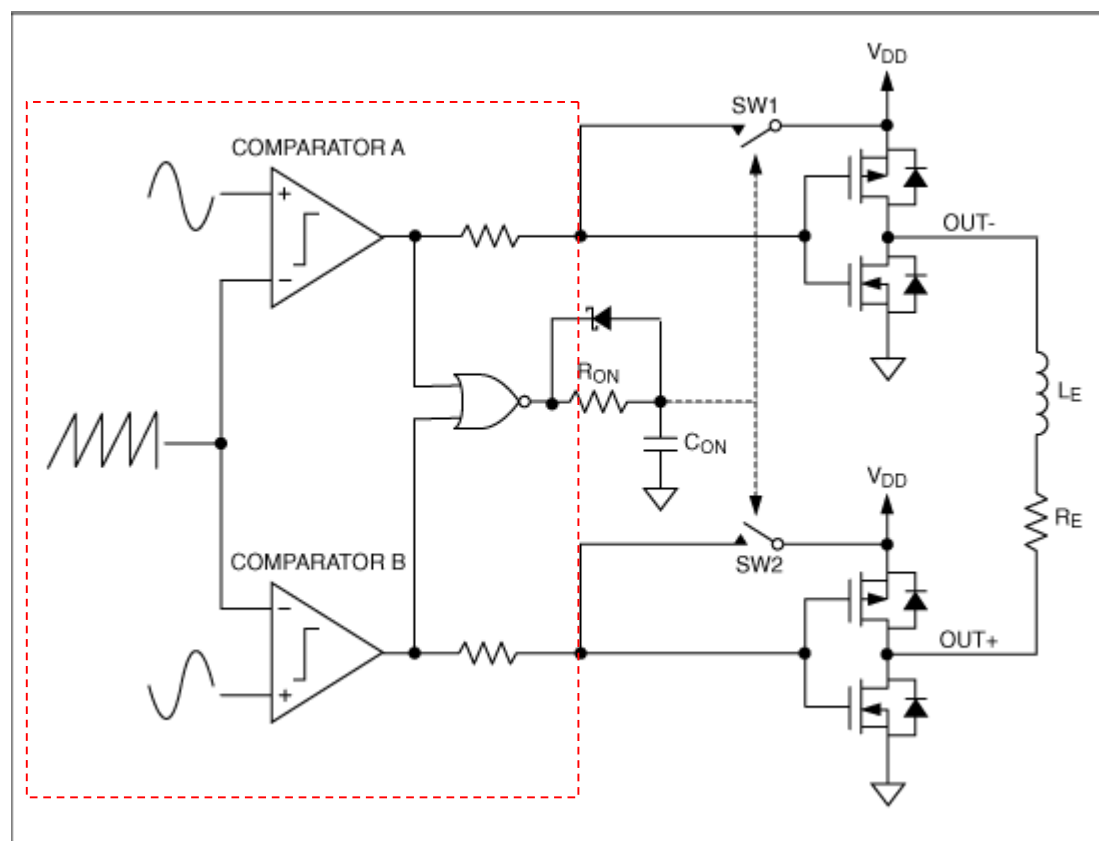
Vin-p	Vin-m	Vout-p	Vout-m
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0



提案變調方式1 回路構成



残念ながら、調べた結果、**Maxim**の特許技術と入力段が似ていた。



◆ http://japan.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/3977

目次

研究背景と基礎知識

◆ D級アンプとか何か？

D級アンプの基礎知識

◆ アンプの帰還

アナログアンプの帰還

D級アンプの帰還における特有問題

研究目的

提案回路

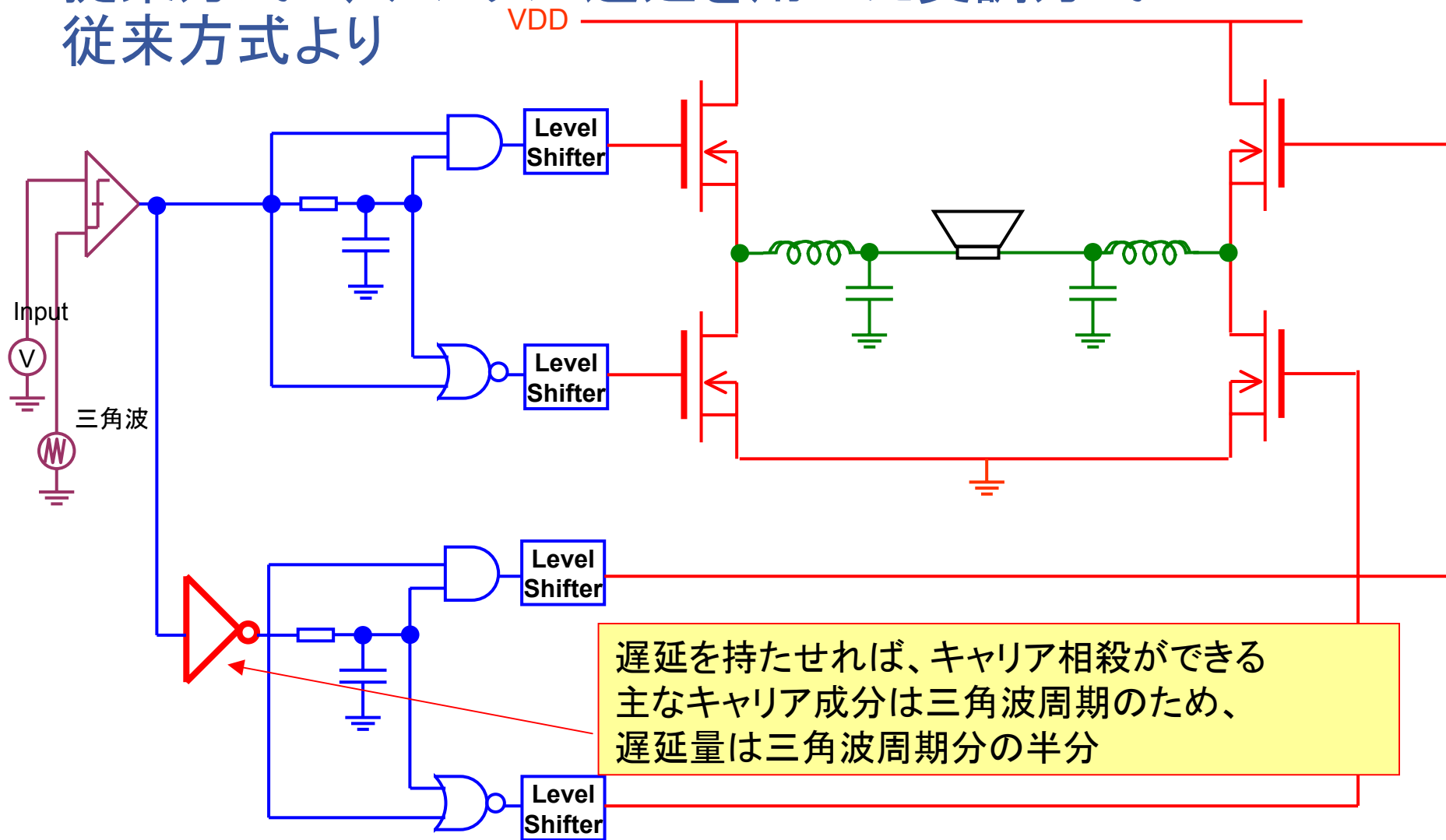
◆ 帰還キャリアを最小に抑える変調方式

方法1

方法2→新規性

まとめ

提案方式2、デジタル遅延を用いた変調方式 従来方式より



遅延を持たせれば、キャリア相殺ができる
主なキャリア成分は三角波周期のため、
遅延量は三角波周期分の半分

波形を歪ませる覚悟でわざと遅延を作る！

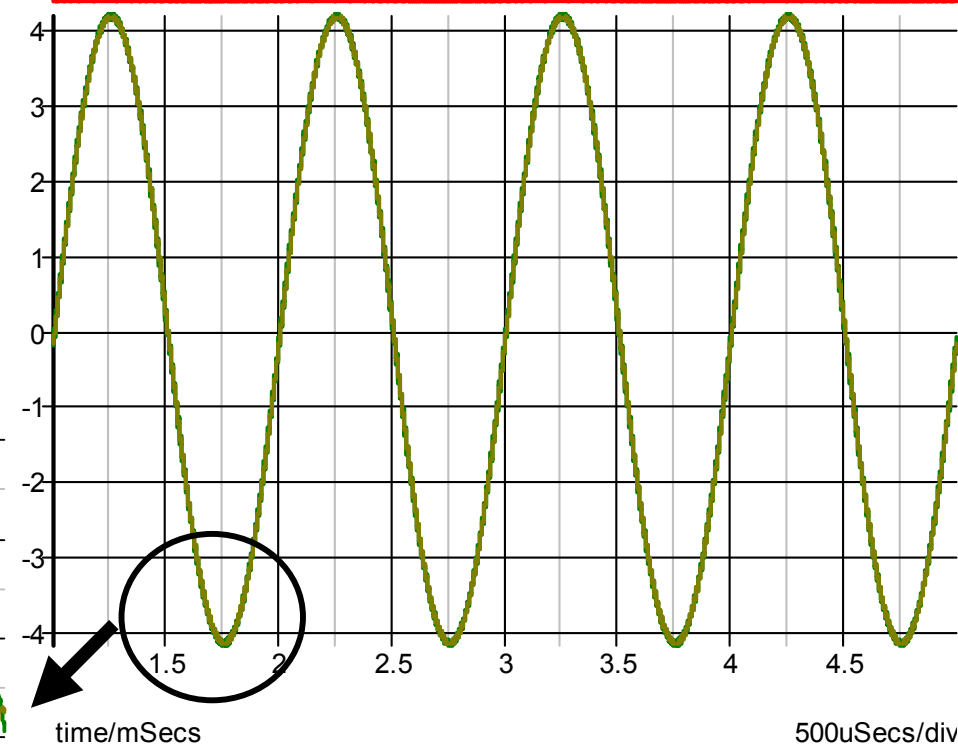
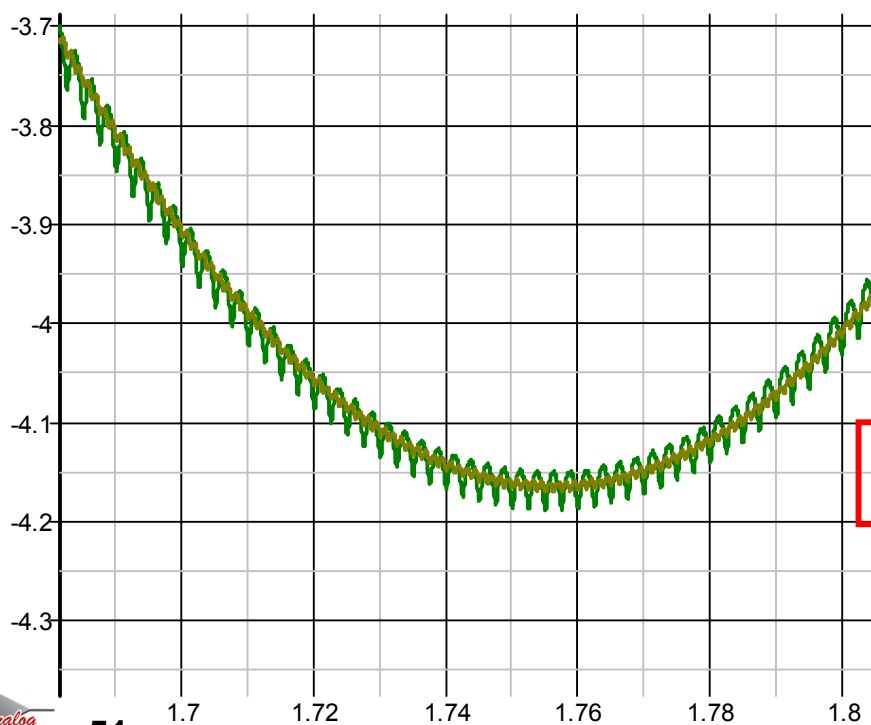
提案方式2の差動PWM出力 E3-P

従来方式の差動PWM出力 E3-P

出力波形確認

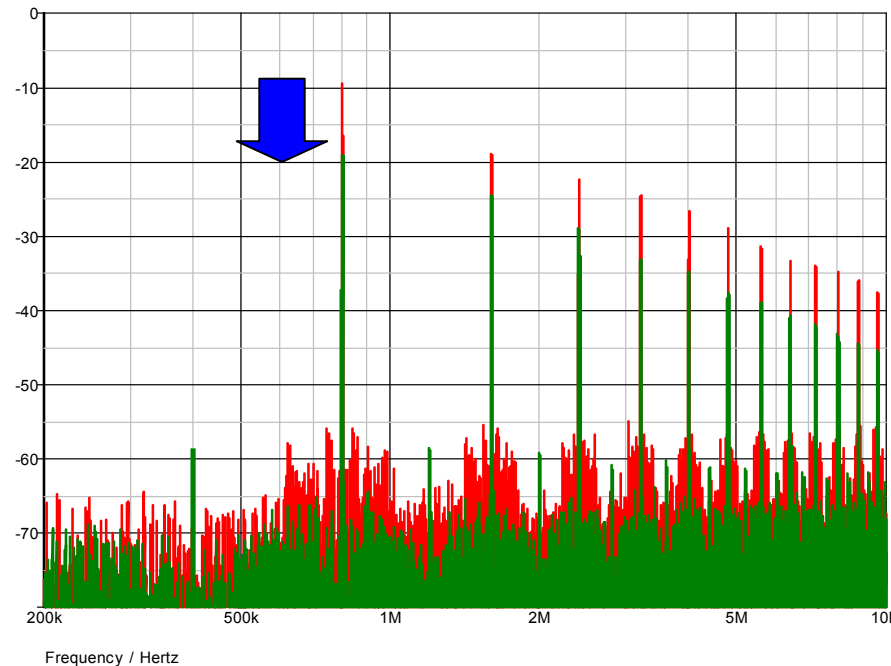
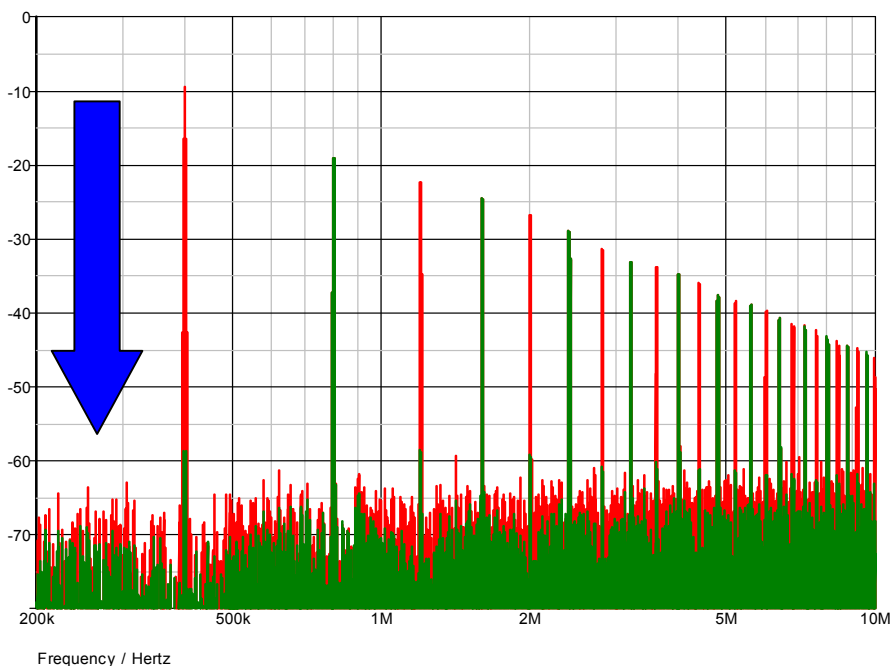


E4-P / V



フィルタ後のキャリアが確実に減少

従来方式との比較



PWM変調後の出力FFTを比較

右図赤 従来PWM変調方式 三角波400kHz
 緑 提案遅延変調方式、三角波400kHz

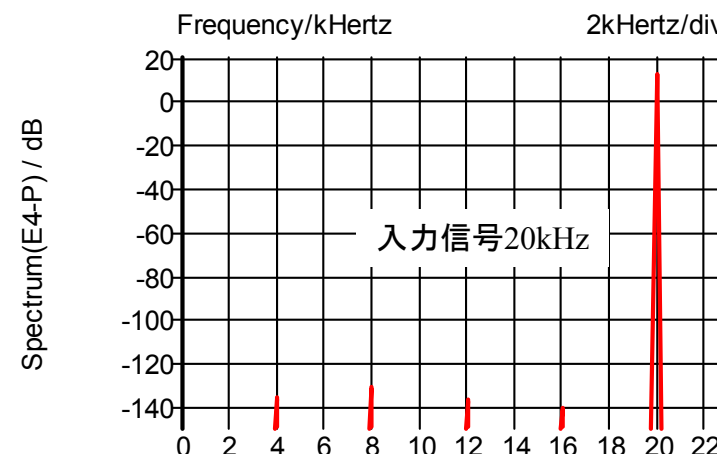
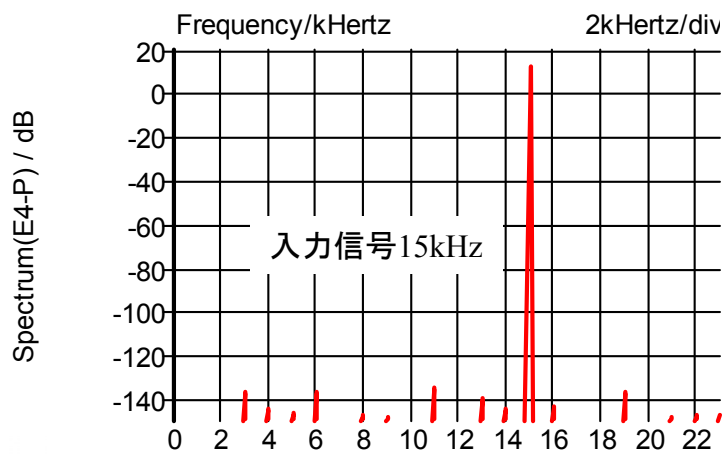
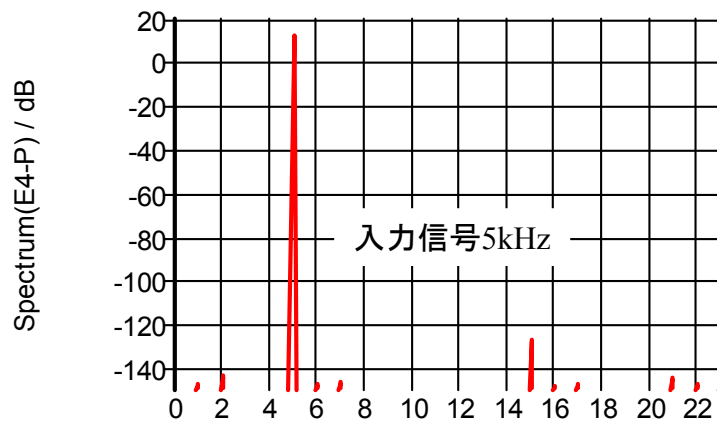
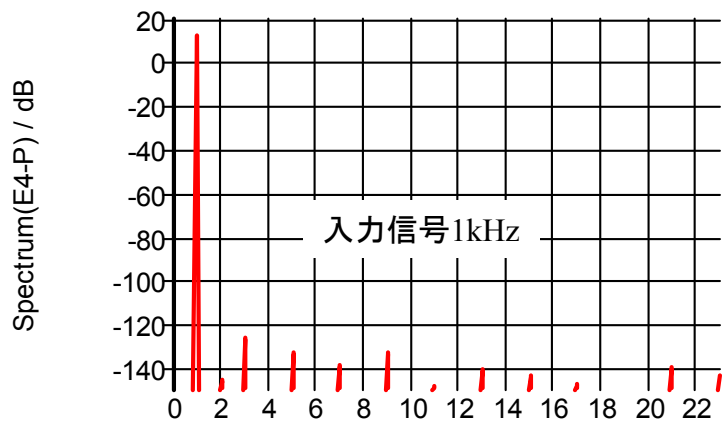
400kHzのキャリアを 49.2dB減少させた
 800kHzのキャリアの増加はなし。

左図赤 従来PWM変調方式 三角波800kHz
 緑 提案遅延変調方式、三角波400kHz

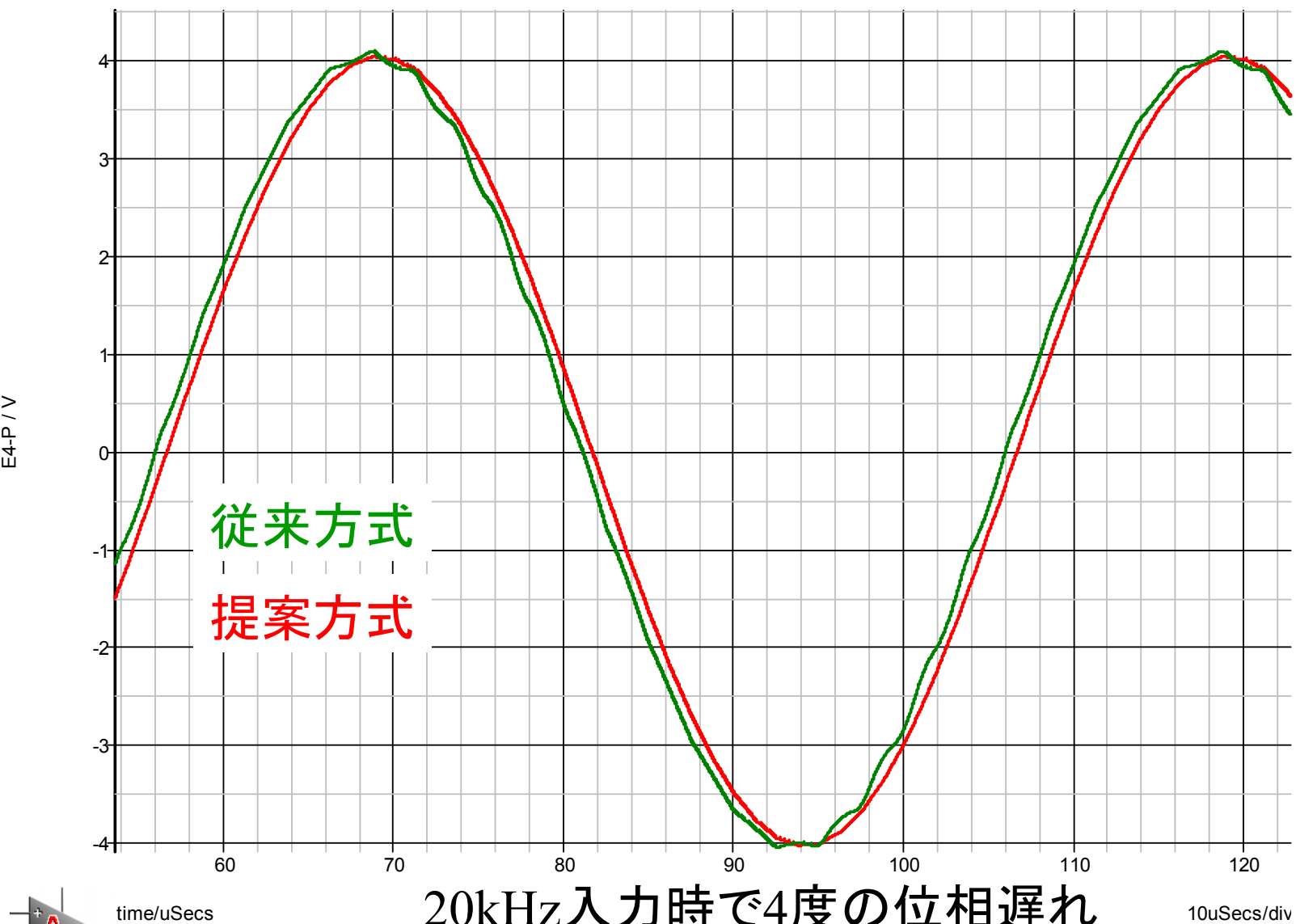
800kHzのキャリアを 9.6dB減少させた

提案方式2の副作用検証①ひずみ

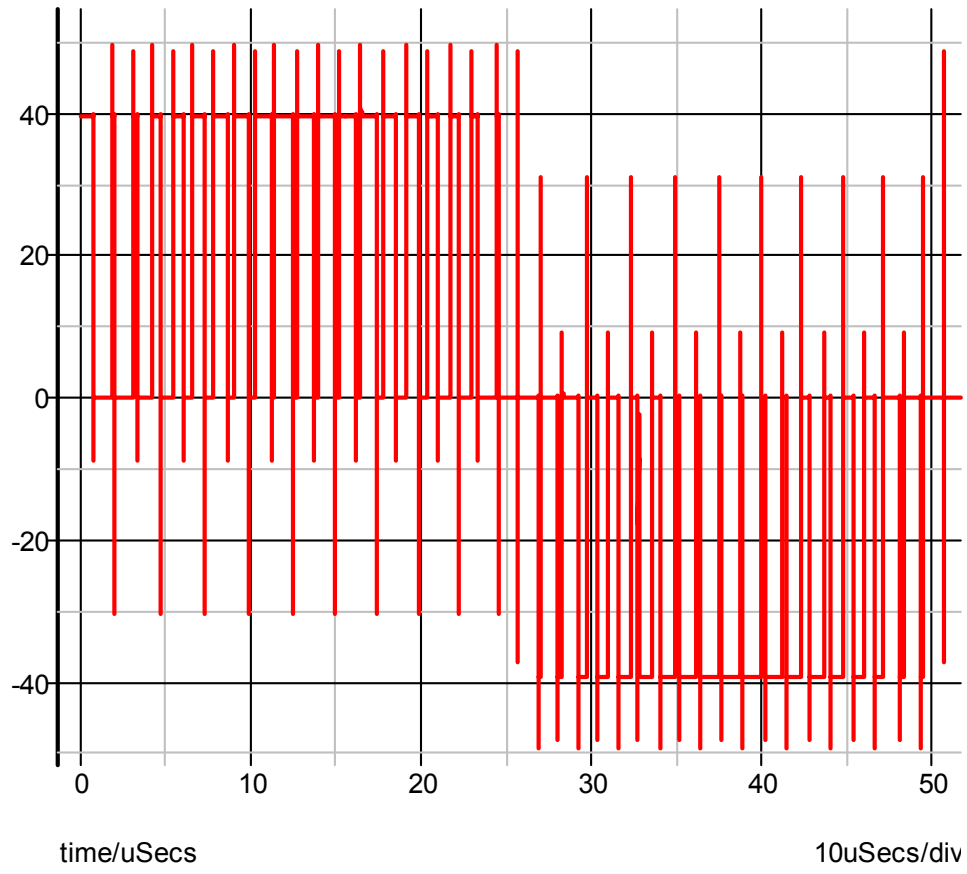
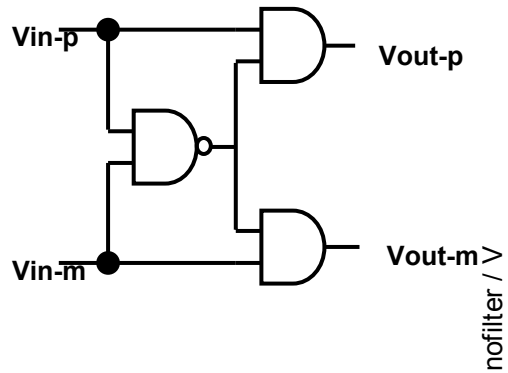
BTLの片方を遅らせているため、ひずみが必ず発生するがいずれも理想状態で130dB以上のSNDRをもつため、ひずみが無視できるレベルである。



提案方式2の副作用検証②位相遅れの検証



提案方式2も同じく提案方式1のロジック回路が必要



まとめと謝辞

- ◆ 変調キャリアを減少できる2種類の変調方式を提案した。そのうち、提案方式②については新規性がある。
- ◆ 提案方式①、②ともシミュレーションを通じてキャリア相殺が確認できた。
- ◆ 提案方式①、②を通じて、フィードバックキャリアだけではなく、EMIの低減が図れることが分かった。

本研究において、日本Victor近藤光先生よりさまざまなアドバイスをいただいております。アドバイスがあるからことのできた研究でもあり、近藤光先生に感謝の意を示します。

これからの課題

- ◆ 本研究において、シミュレーターはSimetrix DEMO版を使用しております。
- ◆ DEMO版では、提案方式を組み合わせた回路全体のシミュレーションを行う際、制限に引っかかり、シミュレーションが出来なかった。
- ◆ D級アンプのシミュレーションでは、膨大な点数を取る必要があり、現状私が使用しているPCではメモリが足りず、欲しい分が取れない。

今後、これらの問題を徐々に解決していく、
提案方式を組み合わせた回路全体のシミュレーションのすることが
必要だと考えております。

参考文献

- ◆ 本田 潤、D級/デジタル・アンプの製作と設計、CQ出版
- ◆ トランジスタ技術2003年8月号、CQ出版
- ◆ Class D Audio Amplifiers - Theory and Design, Sergio Sánchez Moreno, **Edited & Additional Text by Rod Elliott (ESP)**
<http://sound.westhost.com/articles/pwm.htm>
- ◆ IRF社 『Class D Audio Amplifier Design』
<http://www.irf.com/product-info/audio/classdtutorial.pdf>

ご静聴ありがとうございました