

第4章 周波数特性を犠牲にせず PWM信号から低ひずみの信号を再生する

高調波を除去する 出力フィルタの設計

黒田 徹
Tooru Kuroda

デジタル・アンプのD級出力段は、電源電圧間 (V_{DD} と V_{SS})の間で振幅するパルス信号(PWM信号)を出力しています。このパルス信号からアナログ・オーディオ信号を再生するためには、パルス信号をLPFに通して、高調波成分を除去する必要があります。

本章では、パルス信号にどんな周波数成分が含まれているのかを検討して、適切な特性のLPFを作る方法を解説します。 〈編集部〉

出力フィルタが必要な理由

● D級出力段のパルス信号がもつたくさんの高調波成分を取り除く

進化を続けるデジタル・アンプの変調方式は乱立しています。

大別するとパルス幅変調 (PWM) 方式 [図1(a)]と $\Delta\Sigma$ 変調(PDM)方式 [図1(b)]に分類できます。 $\Delta\Sigma$ 変調方式デジタル・アンプの中にはPWMを併用するものもあります。いずれにしても、次のような高周波雑音を発生します。

▶ PWMタイプ

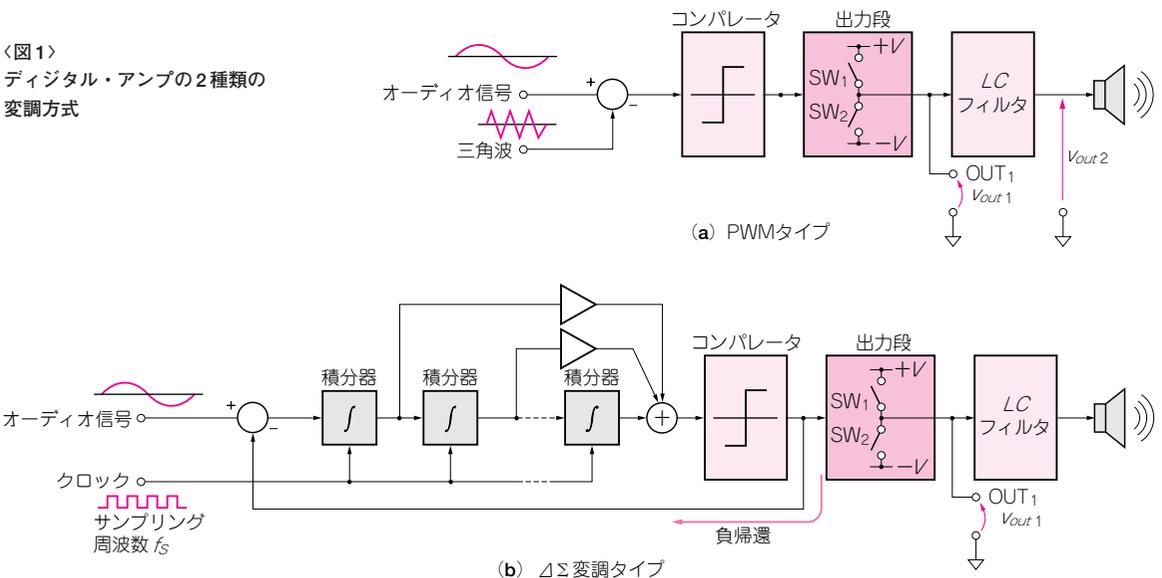
図1(a)の V_{out1} のスペクトル分布を図2(a)に示します。不要成分は次の二つの成分です。

- ①搬送波の基本成分と奇数次高調波成分
- ②搬送波とオーディオ信号の変調積

搬送周波数(スイッチング周波数)がオーディオ帯域周波数の数十倍以上ならば、LPF(ロー・パス・フィルタ)でオーディオ成分と不要成分を容易に分離できます。

▶ $\Delta\Sigma$ 変調タイプ

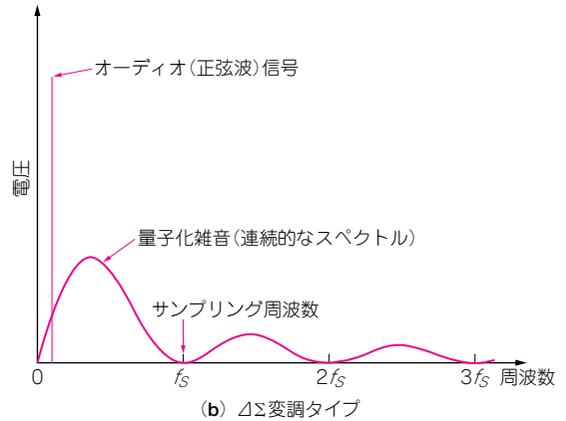
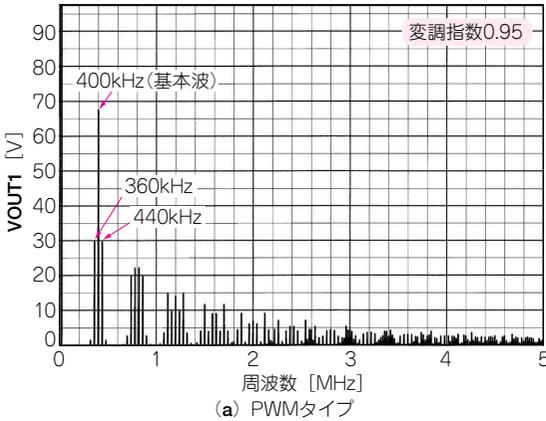
図1(b)の V_{out1} のスペクトル分布の概略を図2(b)に



Keywords

出力フィルタ, PWM, PDM, 変調指数, 残留雑音, バターワース, チェビシェフ, スプリアス, インピーダンス補正回路。

〈図2〉 D級出力段のパルス信号はたくさんの高調波成分を含む



示します。不要成分は、オーディオ信号とほとんど関係のない量子化雑音です。

オーディオ帯域内の量子化雑音を抑えるには積分器の段数を増やしたり、サンプリング周波数 f_s を上げねばなりません。量子化雑音スペクトルは $f_s/2$ において最大になります。

PWM 信号の高調波成分をもう少し詳しく調べてみよう

● SPICEでスペクトルを調べる

PWM方式にしる $\Delta\Sigma$ 変調方式にしる、100MHz以上に及ぶ高周波雑音が生じるので、出力段の後にLPFを挿入して、この高周波雑音をしゃ断しなければなりません。しゃ断しないとスピーカのボイス・コイルが焼損したり、アンプとスピーカをつなぐケーブルから電磁波が放射されます。

ここで、適切なフィルタを設計するために、SPICEを使って高周波雑音のスペクトル分布を詳しく調べてみましょう。 $\Delta\Sigma$ 変調型デジタル・アンプの回路方式は多様で、スペクトル分布も多様なため、一般的に論じるのは困難ですが、図1(a)に示すPWM方式は回路構造が簡単なため、その分布は理論的に説明され

ています⁽¹⁾⁽²⁾。

図3に示すのは、図1(a)の回路と等価なPWM機能をもつ回路です。この回路をSPICEシミュレーションを使って解析してみます。オーディオ信号は20kHz正弦波、搬送波は400kHz三角波です。電圧制御電流源($g_m = 100\text{ mS}$)と2個の1N4148と2個の直流電圧源はコンパレータを形成します。コンパレータの出力電圧は約 $\pm 10\text{ V}$ です。出力段のゲインは10倍で、出力電圧VOUT1は約 $\pm 100\text{ V}$ です。

● PWM変調の掛かりぐあいとスペクトルの変化

PWM波のスペクトルは変調指数 M によって複雑に変化します。変調指数とは三角波振幅に対するオーディオ信号振幅の比です。

実は図2(a)は、図3の回路において変調指数0.95としたときの、VOUT1の周波数特性解析結果です。図4に示すのは $M = 0.2$ と $M = 0.01$ のときの周波数特性の解析結果です。

変調指数 M が小さいときの雑音スペクトルは、搬送波の基本成分と奇数次高調波成分が大部分です。極端な話、 $M = 0$ ならば、つまりオーディオ信号がゼロならば、PWM波は周波数400kHzの方形波となるので、そのスペクトルは400kHz、400kHz $\times 3$ 、400

〈図3〉 D級出力段の高調波と出力フィルタの効果を調べる(シミュレーション回路)

