

SPICE

実用電子回路講座



第20回 トランジスタで作る超低雑音アンプ その3

遠坂 俊昭
Toshiaki Enzaka

バイポーラ・トランジスタ入力型のシミュレーション解析

今回と次回は、トランジスタ入力型とFET入力型の2種類の低雑音増幅回路を試作します。2種類とも連載第17回(2006年7月号)で紹介した低雑音OPアンプの性能を少しでも上回るよう、入力換算雑音電圧1nV/√Hzを切ることを目標にしました。

ディスクリート増幅回路ならではの、高出力特性の

実現も目標にしました。OPアンプを上回る電圧を出力できるように、電源電圧は±24Vとし、100Ωの抵抗を駆動できる仕様としました。出力に50Ωの抵抗を挿入すれば、50Ωの同軸ケーブルを接続して、安定してフルスイングさせることもできます。

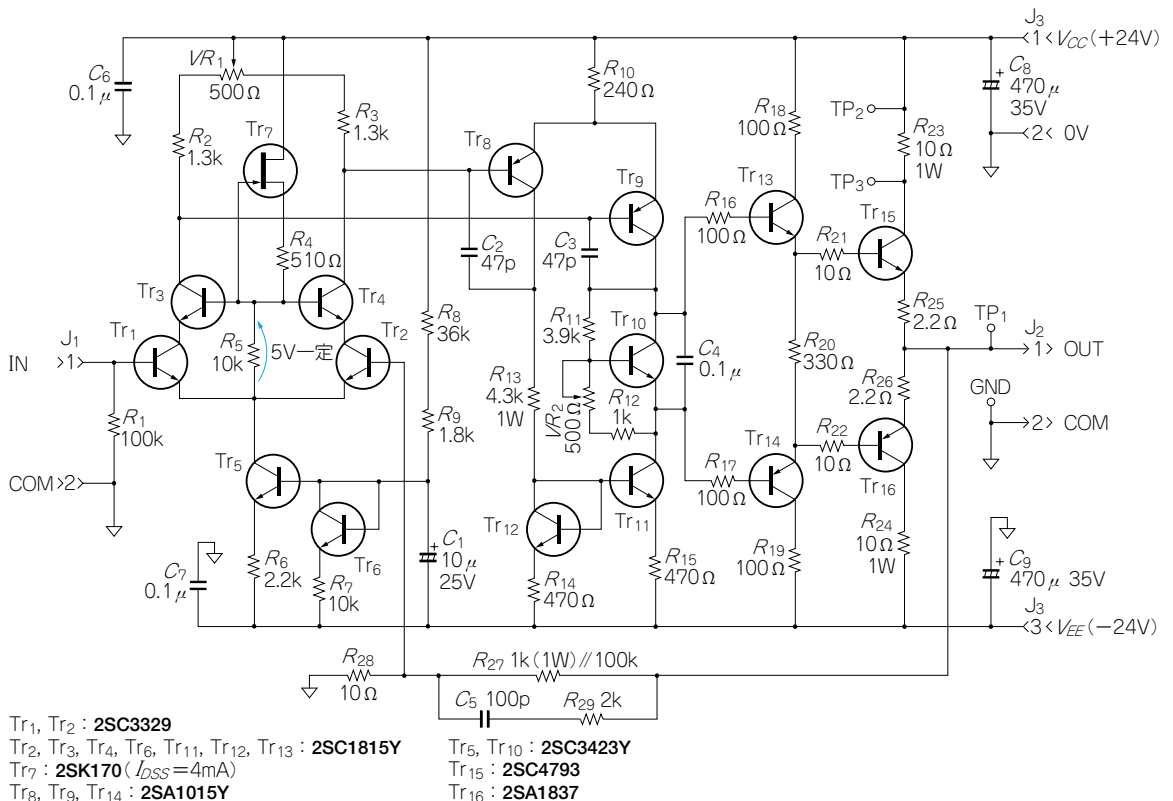


図20-1 バイポーラ・トランジスタ入力型の超低雑音増幅回路
 入力換算雑音電圧1nV/√Hz以下、電源電圧±24V、100Ω駆動可能

Keywords

PSpice, 差動電圧増幅, 2SC3329, 2SK170, ノイズ・フィギュア, PSpice Model Editor Demo, TORAGIライブラリ, 位相補償

回路構成

図20-1に、バイポーラ・トランジスタ入力型の低雑音増幅回路の全回路を示します。

■ 初段

● 低雑音で高い安定性が実現できる差動増幅回路

差動増幅回路は、電源に含まれる雑音の影響を受けやすいシングルのエミッタ共通増幅回路に比べて、直流安定性とPSRR(Power Supply Rejection Ratio)が良く、低雑音特性を実現しやすい回路です。

差動増幅回路の二つのトランジスタに特性のそろったものを使用すると、直流動作点の温度ドリフトが飛躍的に小さくなり、電源変動による影響も受けにくくなります。

本回路のように、差動増幅回路のゲインは、二つの出力ポイントの差分を取り出すとシングルのエミッタ共通増幅回路と同じになりますが、入力換算雑音電圧は3dB大きくなります。なぜなら、二つのトランジスタの雑音が合成されるからです[稿末の参考文献(1)の下巻 p.354を参照]。

Tr_5 は定電流回路を構成しており、 Tr_1 と Tr_2 の差動増幅回路をより理想的に動作させ、CMRR(Common Mode Rejection Ratio)やPSRRの特性を向上させる役割を果たします。

▶ 雑音性能を重視してエミッタ抵抗を入れない回路に

一般的な差動増幅回路は、 Tr_1 と Tr_2 のエミッタに抵抗を挿入し、素子のばらつきや直線性、温度安定性、周波数特性を改善しています。しかしこれらのエミッタ抵抗は、ゲインを低下させるだけでなく、熱雑音を発生させます。このため低雑音を重視する場合は通常、エミッタ抵抗を挿入しません。

● 入力容量とドリフトを小さくする

Tr_1 と Tr_2 のコレクタには、ベース共通増幅回路(Tr_3 と Tr_4)が接続されています。これをカスコード増幅回路と呼びます。この回路は、 Tr_1 のベースに信号が加えられても Tr_1 のコレクタ電圧が変化しません。このため、 Tr_1 と Tr_2 のコレクタ-ベース間の容量が電圧ゲイン倍されるミラー効果が発生せず、 Tr_1 と Tr_2 のベースから見た容量(入力容量)が小さくなります。

Tr_1 と Tr_2 のコレクタ-エミッタ間電圧(V_{CE})が低くなるため、 Tr_1 と Tr_2 の発熱が小さくなり、電源投入時の電圧ドリフトも少なくなります。

Tr_7 と R_4 は定電流源を構成しており、0.5mA一定の電流を出力しているため、 Tr_3 、 Tr_4 のベースと Tr_1 、 Tr_2 のエミッタ間の電圧は常に5V一定に保たれます。

■ 2 段目

● PNP型で差動増幅回路を構成し電源を有効利用

次段は、PNPトランジスタで構成された差動増幅回路です。この構成にすることで、増幅器全体に大きさが等しい正負の電源電圧を加えたとき、出力信号の正と負の飽和電圧が等しくなり、電源電圧を有効利用できます。

● 大きなゲインを稼ぐ

全体のゲインの大部分をここで稼ぎます。大きなゲインを得るために、 Tr_{11} と Tr_{12} による定電流回路を挿入したり、後段のエミッタ・フォロワを2段コンプリメンタリ構成にして、 Tr_9 の負荷インピーダンスを大きくしています。

Tr_{10} は、 $Tr_{13} \sim Tr_{16}$ のバイアス電圧を発生させるためのトランジスタです。 Tr_{15} 、 Tr_{16} と同じヒートシンクに取り付けて熱結合します。

■ 出力段

AB級動作のコンプリメンタリ・エミッタ・フォロワで、アイドル電流を5mA程度にします。

各CR部品の役割と定数の意味

■ 初段

● Tr_1 と Tr_2 のコレクタ電流

トランジスタ増幅回路を設計するときの基本は、初段のコレクタ電流を決定し、 V_{BE} が0.6V一定であると仮定することです。

図20-1で一番重要な作業は、 Tr_1 と Tr_2 のコレクタ電流の設定です。前回説明したようにエミッタ共通増幅回路は、コレクタ電流を多くするほど g_m が大きくなり、大きなゲインが得られます。ただしあまりに大きくしすぎると、トランジスタの許容損失を越えたり、ベース電流が増えて入力バイアス電流が大きくなり、入力雑音電流が増加します。

初段のトランジスタには入手しやすく、もっとも低雑音と思われる2SC3329を使用しました。今回は2SC3329BLが入手できず、2SC3329GRを使用しています。2SC3329BLのほうが h_{FE} が大きいため、入力バイアス電流を小さくできます。

第19回(2006年9月号)で説明したように、2SC3329のノイズ・フィギュア・チャートを利用してコレクタ電流を2mAに設定しました。信号源抵抗が20Ω(熱雑音0.575nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)のとき、1kHzにおけるノイズ・フィギュアは2dB(1.26倍)になり、入力換算雑音電圧密度は0.724nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ になります。2SC3329から発生