

StudentZone——2021年5月 ADALM2000による実習： NMOSトランジスタで構成した ソース・フォロワ

著者：Doug Mercer、コンサルティング・フェロー
Antoniu Miclaus、システム・アプリケーション・エンジニア

目的

今回は、NMOSトランジスタで構成したシンプルなソース・フォロワ回路について検討します。ソース・フォロワ回路は、ドレイン接地回路（ドレイン共通回路）と呼ばれることもあります。

準備するもの

- ▶ アクティブ・ラーニング・モジュール「ADALM2000」
- ▶ ソルダレス・ブレッドボード
- ▶ ジャンパ線
- ▶ 抵抗：2.2kΩ（1個、 R_L として使用）
- ▶ 小信号NMOSトランジスタ：エンハンスメント型の「CD4007」または「ZVN2110A」（1個、M1として使用）

説明

まずは図1の回路を取り上げます。図2に、この回路を実装したブレッドボードを示しました。トランジスタM1のゲートには、

任意波形ジェネレータ（AWG）の出力（W1）を接続します。このノードには、オシロスコープのシングルエンド入力1（1+）も接続しています。また、M1のドレイン端子には正の電源 V_p を接続してください。M1のソースには、2.2kΩの負荷抵抗 R_L とオシロスコープのシングルエンド入力2（2+）を接続します。 R_L のもう一端は負電源 V_n に接続しましょう。入力と出力の電位差を測定する際には、オシロスコープの入力2+をM1のゲート、入力2-をソースに接続してください。

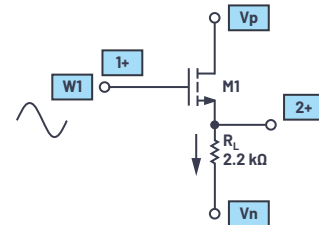


図1. ソース・フォロワ回路

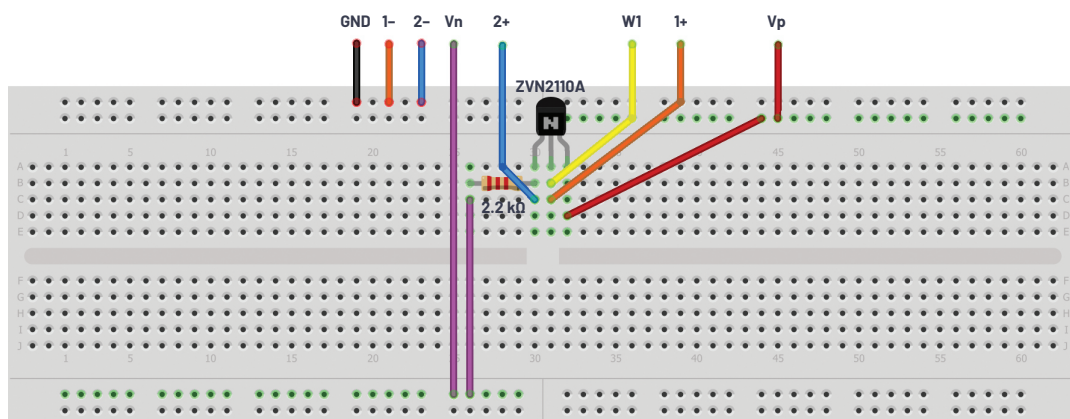


図2. 図1の回路を実装したブレッドボード

ハードウェアの設定

AWGは、ピークtoピークの振幅が2V、オフセットが0V、周波数が1kHzの正弦波を生成するように設定します。オシロスコープの入力2+によって、M1のソースの電圧を測定します。オシロスコープの入力1+は、AWGの出力を表示するために使用します。入出力の電位差を測定する際には、オシロスコープの入力2+、2-を使用して両者の差分を表示します。

手順

オシロスコープは、測定の対象とする2つの信号の数周期分が表示されるように設定します。また、オシロスコープによる波形の表示には、ソフトウェア・パッケージ「Scopy」を使用します。取得した波形の例を図3に示しました。

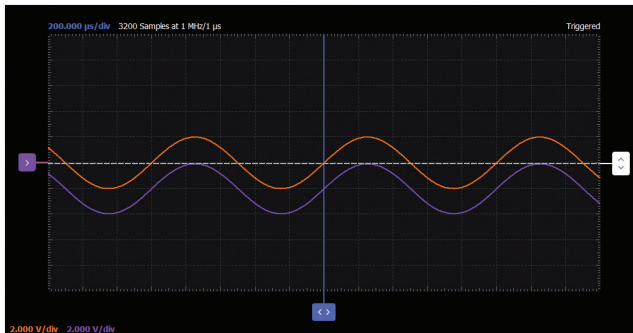


図3. 図1の回路の信号波形。
入力信号と出力信号の波形を示しました。

図1のソース・フォロワ回路では、理想的にはゲイン (V_{OUT}/V_{IN}) が1になります。しかし、実際のゲインは1よりもやや小さくなります。現実の回路のゲインは以下の式で表されます。

$$A = \frac{R_L}{R_L + r_s} \quad (1)$$

この式から、1に近いゲインを得るには、 R_L を大きくするか、 r_s を小さくすればよいことがわかります。 r_s の値は、ドレイン電流 I_D の関数として表されます。 I_D が増加すると r_s は小さくなります。また、この回路では I_D は R_L に依存します。 R_L の値が大きいほど、 I_D の値は小さくなります。これら2つの効果は、単純な抵抗性の負荷が接続されたソース・フォロワ回路では互いに相反する作用

をもたらします。そのため、ソース・フォロワ回路のゲインを最適化するには、他方に影響を及ぼすことなく、 r_s を小さくするか、 R_L を大きくする必要があります。ここで重要なのは、MOSトランジスタの場合、 $I_D = I_S$ ($I_G = 0$) であるということです。また、 I_D の値は以下の式で表されます。

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad (2)$$

この式において、 $\mu_n C_{ox}/2$ ($= K$) と λ は、プロセス技術によって決まる定数です。

ソース・フォロワ回路を別の視点から見ると、トランジスタの V_{th} に起因する本質的なDCシフトにより、入出力の電位差は想定している振幅に対して一定になるはずですが、シンプルな抵抗負荷である R_L の存在により、 I_D は出力の上昇/下降に伴って増減します。ここで、 I_D は V_{GS} の2乗に依存することがわかっています。この例では、振幅が-1V～1Vの範囲で変動するので、 I_D の最小値は $1V/2.2k\Omega$ で0.45mA、最大値は $6V/2.2k\Omega$ で2.7mAとなります。つまり、 V_{GS} も大きく変化することになります。このような考察を踏まえると、ソース・フォロワ回路の改良案が導き出されます。

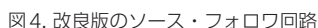
改良版のソース・フォロワ回路

ソース・フォロワ回路の改良策として、M1のソースに R_L を付加する代わりに、[StudentZone](#)の過去の実習で扱ったカレント・ミラーを使用することにします。それにより、M1のソース電流がほぼ一定になるようにします。カレント・ミラーでは、広い範囲の電圧に対してほぼ一定のシンク電流が流れます。その電流がM1に流れることにより、 V_{GS} がほぼ一定になります。カレント・ミラーは出力抵抗が非常に大きいので、その電流によって設定される小さな値に r_s の値を保ちながら、実質的に R_L の値を高めることができます。

追加で準備するもの

- ▶ 抵抗：3.2k Ω (1個。1k Ω の抵抗と2.2k Ω の抵抗を直列に接続して使用)
- ▶ 小信号 NMOS トランジスタ：ZVN2110A (1個。M1として使用)
- ▶ 小信号 NMOS トランジスタ：CD4007 (2個。M2、M3として使用)

図4に示したのが改良版の回路です。図5には、この回路を実装したブレッドボードを示しました。



AWGは、ピークtoピークの振幅が2V、オフセットが0V、周波数が1kHzの正弦波を生成するように設定します。オシロスコープの入力2+によって、M1のソース電圧を測定します。オシロスコープの入力1+は、AWGの出力を表示するために使用します。入出力の電位差を測定する際には、オシロスコープの入力2+、2-を使用して両者の差分を表示します。

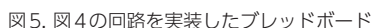
測定の対象とする2つの信号の数周期分が表示されるようにオシロスコープを設定します。取得した波形の例を図6に示しました。



最後に、ソース・フォロワ回路の出力インピーダンスを確認するための実験を行います。

ソース・フォロワ回路の重要な性質は、電力／電流に対するゲインを提供することです。高抵抗（高インピーダンス）の回路によって、低抵抗（低インピーダンス）の負荷を駆動できるようにすると言い換えることもできます。以下では、ソース・フォロワ回路の出カインピーダンスを測定してみましょう。

- ▶ 抵抗：4.7k Ω (1 個)
- ▶ 抵抗：10k Ω (1 個)
- ▶ 小信号 NMOS トランジスタ:CD4007 または ZVN2110A (1 個。M1 として使用)



説明

図7に示したのが測定用の回路です。AWGからの信号をM1のソース（出力）に印加するために、抵抗R2を追加しています。M1のゲート（入力）はグラウンドに接続しています。図8に、この回路を実装したブレッドボードを示しました。

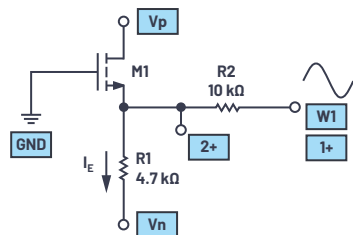


図7. 出力インピーダンスを測定するための回路

手順

M1のソースで測定した電圧の値をプロットします。測定の対象とする2つの信号の数周期分が表示されるようにオシロスコープを設定してください。取得した波形の例を図9に示しました。



図9. 図7の回路の信号波形

ハードウェアの設定

AWGは、ピークtoピークの振幅が2V、オフセットがM1の V_{GS} の符号を反転した値（約-V）、周波数が1kHzの正弦波を生成するように設定します。それにより、M1のソースには $\pm 0.1\text{mA}$ ($1\text{V}/10\text{k}\Omega$) の電流が印加されます。オシロスコープの入力2+により、ソースにおける電圧の変化を測定します。

問題：

ソース・フォロワ回路のゲインを改善する（1に近づける）方法を2つ挙げ、その概要を簡単に説明してください。

答えは[StudentZone](#)で確認できます。

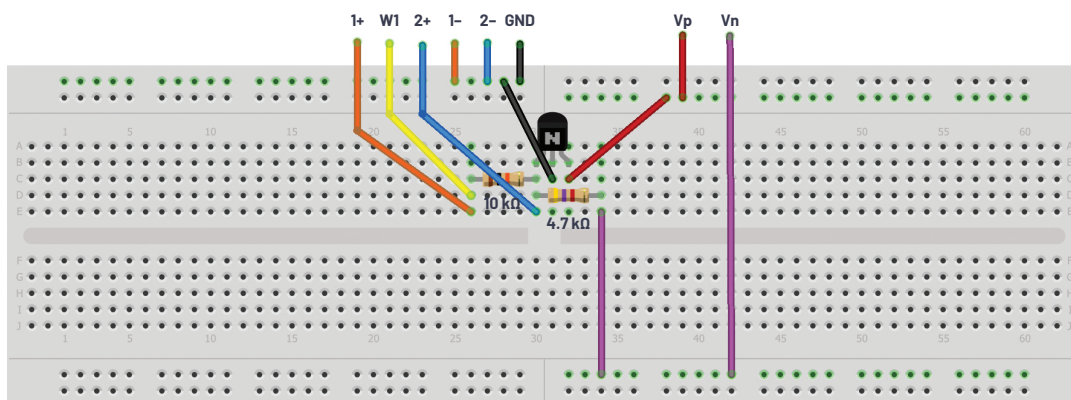


図8. 図7の回路を実装したブレッドボード



著者について

Doug Mercer (doug.mercer@analog.com) は、1977年にレンセラー工科大学で電気電子工学の学士号を取得しました。同年にアナログ・デバイセズに入社して以来、直接または間接的に30種以上のデータ・コンバータ製品の開発に携わりました。また、13件の特許を保有しています。1995年にはアナログ・デバイセズのフェローに任命されました。2009年にフルタイム勤務からは退きましたが、名誉フェローとして仕事を続けており、Active Learning Programにもかかわっています。2016年に、レンセラー工科大学 電気/コンピュータ/システム・エンジニアリング学部のEngineer in Residenceに指名されました。



著者について

Antoni Miclaus (antoni.miclaus@analog.com) は、アナログ・デバイセズのシステム・アプリケーション・エンジニアです。アカデミック・プログラムや、Circuits from the Lab® 向けの組み込みソフトウェア、QAプロセス・マネジメントなどに携わっています。2017年2月から、ルーマニアのクルジュナポカで勤務しています。現在、バベシュボヨイ大学においてソフトウェア・エンジニアリングに関する修士課程にも取り組んでいます。また、クルジュナポカ技術大学で電子工学と通信工学の学士号を取得しています。