

StudentZone——2021年12月

ADALM2000による実習： CMOSのアンプ段

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、CMOS (Complementary MOS : 相補型MOS) トランジスタで構成したアンプ回路を取り上げます。具体的には、高いゲインを実現する反転アンプについて検討します。

背景

図1に示したのは、CMOSトランジスタで構成したインバータの回路です。ご覧のように、1個のPMOSトランジスタ (M1) と1個のNMOSトランジスタ (M2) で構成されています。多くの場合、CMOSインバータは反転素子として使われますが、ゲインの高いアンプ回路 (反転アンプ) だとも見なすこともできます。一般に、CMOSの製造プロセスは、NMOSとPMOSの閾値電圧 V_{TH} がほぼ等しくなるように制御されます。その結果、相補型のMOSトランジスタ回路が実現されます。CMOSインバータの場合、NMOSトランジスタとPMOSトランジスタのゲートの幅と長さの比 (W/L) を調整し、両方のトランスコンダクタンスも等しくなるように設計されます。

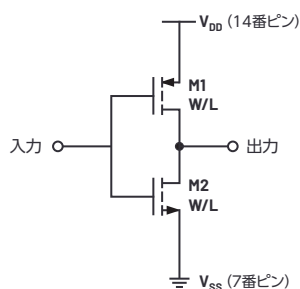


図1. CMOSインバータの回路。これは反転アンプ回路だとも見なすこともできます。ピン番号はCD4007の例です。

準備するもの

- ▶ アクティブ・ラーニング・モジュール [ADALM2000]
- ▶ ソルダーレス・ブレッドボード
- ▶ ジャンパ線
- ▶ 抵抗：100kΩ (3個)、10kΩ (1個)、4.7kΩ (1個)
- ▶ コンデンサ：22μF (2個)、1μF (2個)、10pF (1個)
- ▶ CMOSインバータ：「CD4069A」、「CD4069UB」、「CD74HCU04」、「CD4007」のうちいずれか (1個)

説明

まず、図2に示すごく単純な回路を構成します。これを使って、シンプルなCMOSアンプの入出力信号を観察し、伝達関数を確認してみます。まず、ADALM2000の正の電源 V_p (5V) をCMOSインバータIC「CD4007」の V_{DD} (14番ピン) に接続し、グラウンドをGND (7番ピン) に接続します。

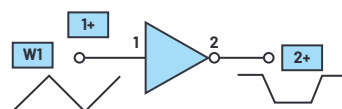


図2. CMOSインバータを評価するための回路。アンプ回路であるとし、伝達関数を確認します。

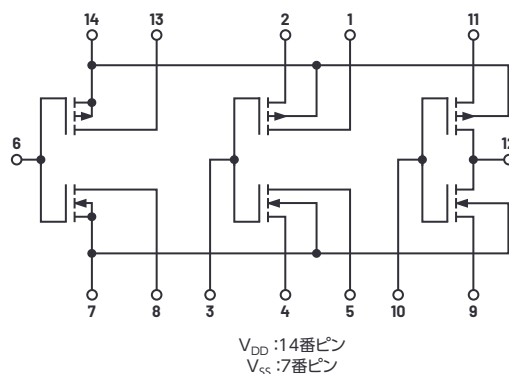


図3. CD4007のピン配置

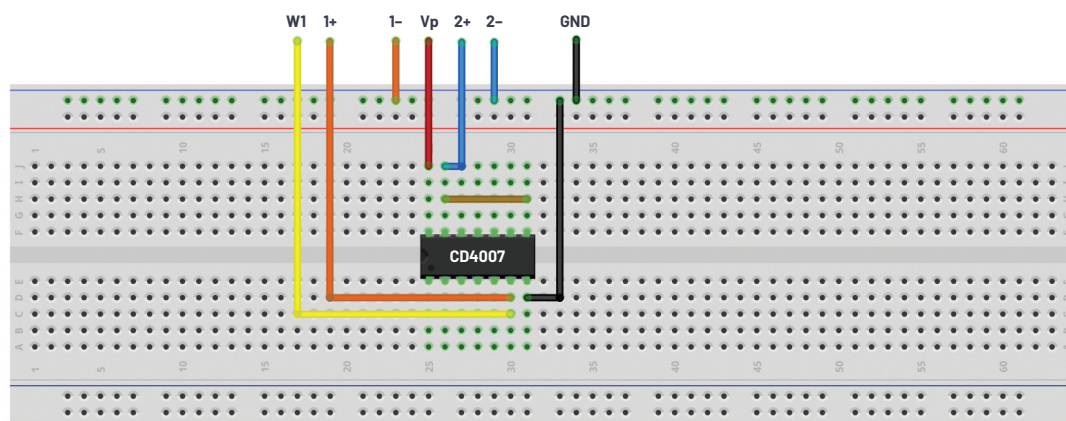


図4. 図2の回路を実装したブレッドボード

ピン番号については図3を参照してください。また、インバータの入力（1番ピン）とオシロスコープの入力（1+）に任意波形ジェネレータ（AWG）の出力（W1）を接続します。そして、インバータの出力（2番ピン）をオシロスコープの入力（2+）に接続してください。CD4069A(UB)を使用する場合には、 V_{SS} （7番ピン）をグラウンドではなくボードの負電源 V_n に接続しても構いません。同ICは、5Vより高い電源電圧にも対応するからです。

ハードウェアの設定

図4に、図2のCMOSアンプ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4V、オフセットが2.5V、周波数が1kHzの三角波を生成するように設定します。オシロスコープの両チャンネルは1V/divに設定してください。なお、CD4069Aを V_p と V_n に接続している場合には、ピークtoピークの振幅を8V、オフセットを0Vに設定します。

手順

図2のアンプ回路について、出力の勾配を測定し、DCゲインを計算します。それには、出力振幅の中心（約2.5V）において、入力電圧の変化に対する出力電圧の変化の比を算出します。反転アンプであることから、算出した値は負の値になることに注意してください。

オシロスコープ機能による信号の表示にはソフトウェア・パッケージ「Scopy」を使用します。取得した信号波形の例を図5に示しました。

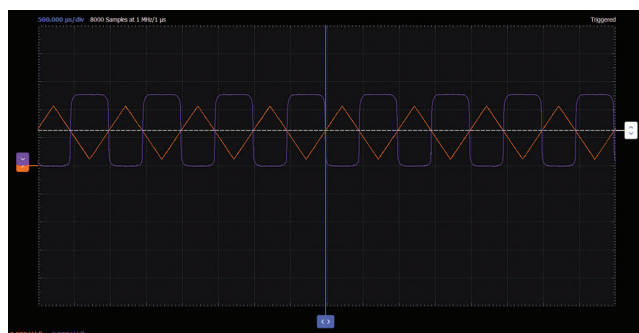


図5. 図2の回路の入出力波形

負帰還経路の追加

続いて、CMOSインバータの入出力に負帰還経路を追加します。
つまり、単一段のアンプ回路を構成します（図6）。

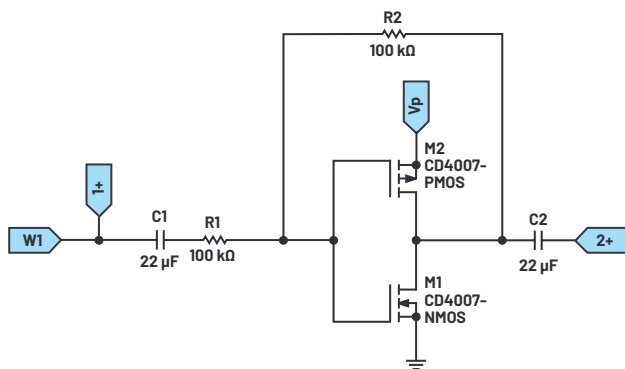


図6. 単一段のアンプ回路

ハードウェアの設定

図7に示したのが、図6の回路を実装したブレッドボードです。
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。

手順

アンプ回路の入力にAWGの出力を印加し、回路全体のゲインを10kHz～100kHzの範囲で測定します。ネットワーク・アナライザ機能を使用し、ボード線図を取得してください。つまり、周波数を横軸とし、回路全体のゲインと位相をプロットするということです。

ここでは、LTspice®で取得したシミュレーション結果を示しておきます（図8）。

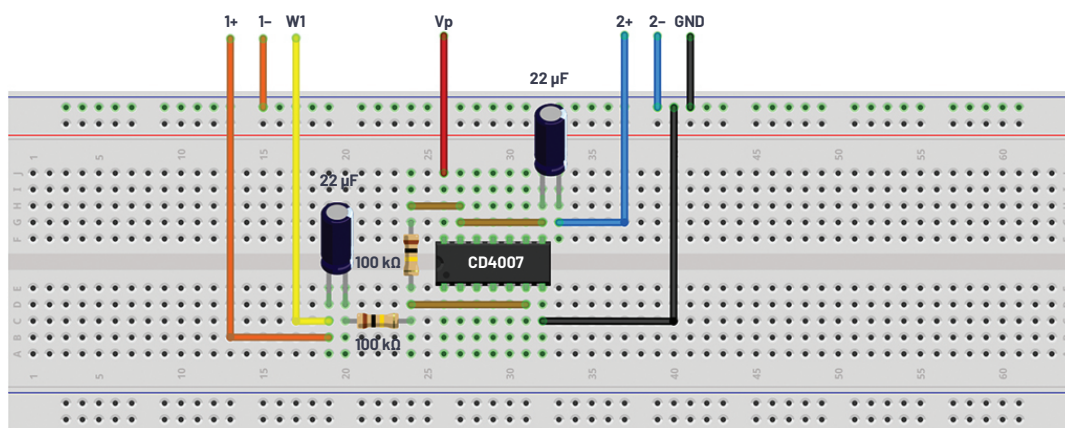


図7. 図6の回路を実装したブレッドボード

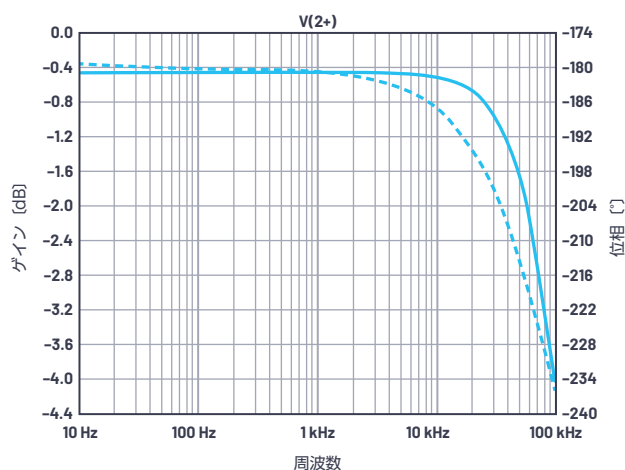


図8. 図6の回路のボード線図。
CD4007を使用して構成した単一段のアンプ回路のシミュレーション結果です。

段数を増やしてゲインを高める

次に、段数を増やすことによって更にゲインを高めてみます。具体的には、図9のような3段構成のアンプ回路を例にとります。

ハードウェアの設定

図9の回路を実装したブレッドボードを図10に示しました。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。

手順

アンプ回路の入力にAWGの出力を印加し、10kHz～100kHzの範囲で回路全体のゲインを測定します。ネットワーク・アナライザ機能を使用し、ボーデ線図を取得してください。図11にLTspiceによるシミュレーション結果を示しました。

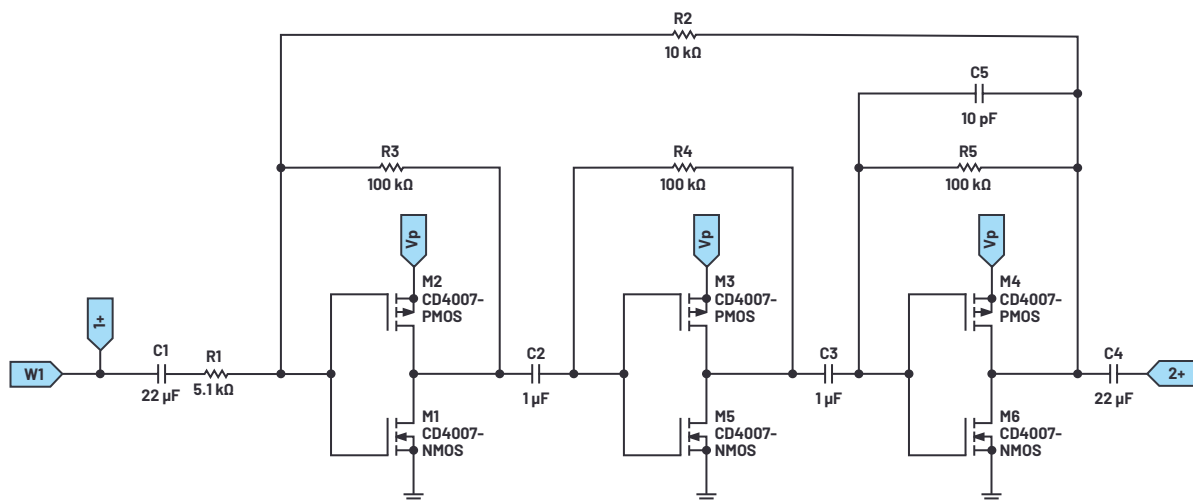


図9. 3段構成のアンプ回路

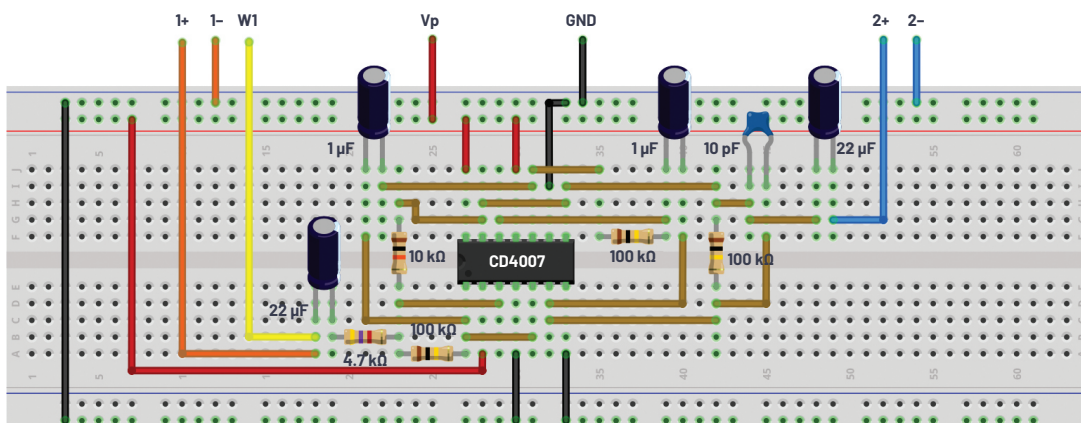


図10. 図9の回路を実装したブレッドボード

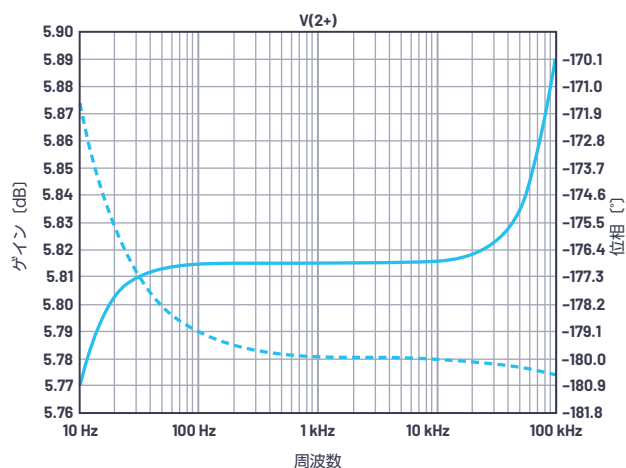


図11. 図9の回路のボーデ線図。
CD4007をベースとする3段構成のアンプ回路のシミュレーション結果です。

その他の回路

最後に、CMOSインバータをベースとするより高度な回路を紹介します。

チョッパ・アンプ

CMOSインバータを利用すれば、チョッパ・アンプを構成することができます。ここでは、インバータを6個内蔵するCD4069A(UB)を利用します。同ICは、バッファを内蔵していない製品です。これに、クワッド・タイプのアナログ・スイッチ「CD4066」を組み合わせ、図12の回路を構成します。この回路の左下にある2個のインバータは、方形波とその相補波形を生成します。それらによって、各スイッチ（CD4066）を制御します。図中のスイッチAと同Bは、入力用の単極双投（SPDT）スイッチとして機能します。同様に、スイッチCと同Dは、出力用のSPDTスイッチとして働きます。図の中央にあるインバータは、図6の回路と同様にAC結合のアンプ回路として使用しています。

この回路を動作させると、入力信号が入力側のスイッチによって変調されます。その信号がAC入力のアンプ回路によって増幅され、出力側のスイッチによって復調されます。出力部の20kΩの抵抗と560pFのコンデンサはローパス・フィルタとして機能します。その役割は、出力信号の周波数リップルを最小限に抑えることです。

問題

- ▶ 図6の回路の場合、インバータの出力に現れるゲインはいくつになるでしょうか。入力（W1）に対するインバータ出力のゲインを算出してください。
- ▶ 図6の回路のゲインを決めるのは、どのコンポーネントですか。

答えは[StudentZone](#)で確認できます。

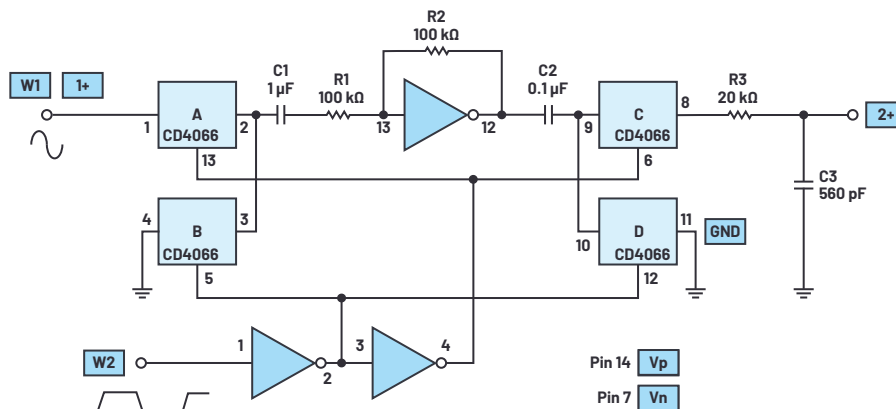


図12. CMOSインバータを利用して構成した
チョッパ・アンプ



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

Antoniu Miclaus (antoniu.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。