

StudentZone—2021年4月 ADALM2000による実習： バイポーラ・トランジスタで構成した エミッタ・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、NPNトランジスタを使用してシンプルなエミッタ・フォロワ回路（アンプ）を構成し、その動作を確認します。この種の回路はコレクタ接地回路とも呼ばれます。

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NPNトランジスタ：[2N3904]（1個。Q1として使用）

説明

図1に示したのが、NPNトランジスタを使って構成したエミッタ・フォロワ回路です。NPNトランジスタQ1のベースには、任意波形ジェネレータ（AWG）の出力（W1）を接続しています。このノードには、オシロスコプのシングルエンド入力1（1+）も接続しています。また、Q1のコレクタには正の電源V_pを接続しています。Q1のエミッタには、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+）を接続してください。R_Lのもう一端は、負の電源V_nに接続します。オシロスコープの2+をQ1のベースに、同2-を同エミッタに接続することで、この回路の入力と出力の差を差動で測定します。

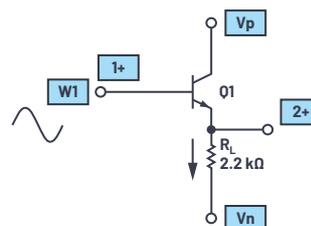


図1. エミッタ・フォロワ回路

ハードウェアの設定

AWGは、ピークtoピークの振幅が4V、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（2+）を使って、エミッタの電圧を測定します。オシロスコープの入力1（1+）は、AWGの出力を表示するために使用します。入力と出力の差を測定する際には、オシロスコープの入力2（2+、2-）を使用して両者の差分を表示します。

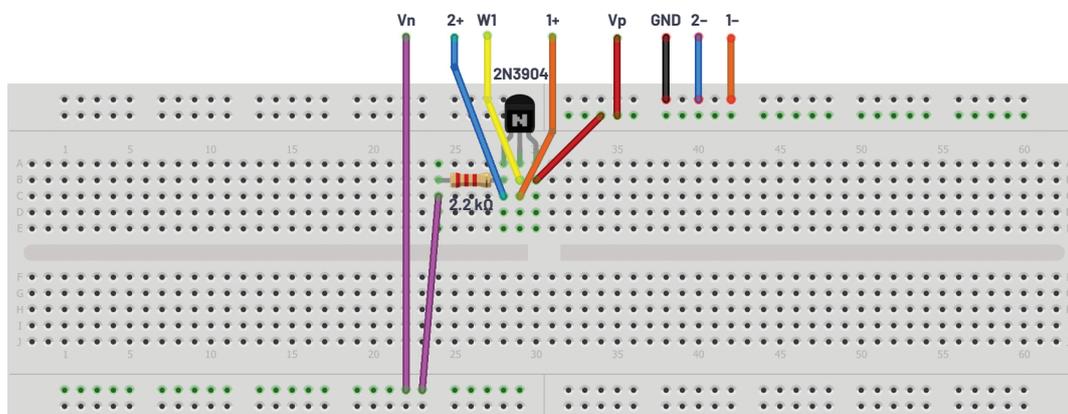


図2. 図1の回路を実装したブレッドボード

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を取り込め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。

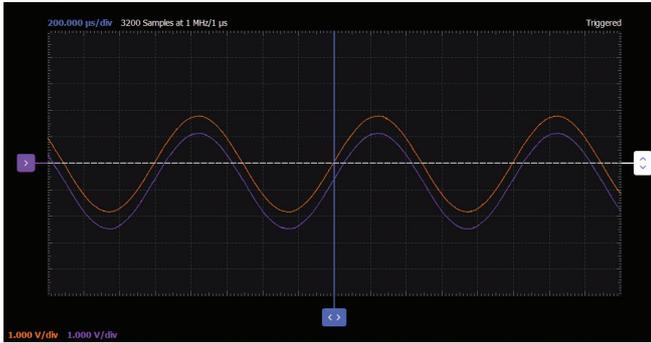


図3. 図1の回路の信号波形

図1のエミッタ・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、図3を見るとゲインは1よりやや小さくなっていることがわかります。この回路の実際のゲインは次式で表されます。

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

この式を見ると、1に近いゲインを得るには、 R_L を大きくするか、 r_e を小さくする必要があります。また、 r_e はエミッタ電流 I_E の関数であり、 I_E が増加すると r_e が小さくなることもわかっています。更に、この回路から、 I_E が R_L に依存し、 R_L が大きくなると I_E が減少することもわかります。これら2つの効果は、単純な抵抗性の負荷が接続されたエミッタ・フォロワでは相反して作用します。そのため、エミッタ・フォロワのゲインを最適化するには、他に影響が及ばないように r_e を小さくするか R_L を大きくする方法が必要になります。別の見方をすると、エミッタ・フォロワではトランジスタの V_{BE} によってDCレベルのシフトが生じるので、入力と出力の差は想定範囲内で一定になるはず。また、 R_L は単純な抵抗性の負荷であるため、出力電圧が上下に振れると I_E はそれに伴って増減します。 V_{BE} は I_E の指数関数として表され、 I_E が2倍に増加すると約18mV (室温) 変化することがわかっています。この例では、入力信号が-2V~2Vの範囲で変化するので、 I_E の最小値は $2V/2.2k\Omega$ で0.91mA、最大値は $6V/2.2k\Omega$ で2.7mAとなります。そのため、 V_{BE} は28mV変化することになります。この結果から、エミッタ・フォロワの有効な改善策が導き出されます。それは、エミッタの負荷抵抗

をカレント・ミラーに置き換えるというものです。それにより、トランジスタのエミッタ電流を固定します。2020年8月の記事「ADALM2000による実習：バイポーラ・トランジスタで構成したカレント・ミラー」で説明したように、カレント・ミラーは広い電圧範囲に対応してほぼ一定の値で電流をシンクします。トランジスタに流れる電流がほぼ一定なので、 V_{BE} もほぼ一定になります。別の見方をすると、出力抵抗の値が非常に高い電流源では、その電流によって r_e の値を低く保ちながら、効果的に R_L の値を高めることができます。以下、上記の内容で改善を図ったエミッタ・フォロワ回路を紹介します。

改良版のエミッタ・フォロワ回路

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NPNトランジスタ：2N3904 (1個。Q1として使用)
- ▶ 小信号NPNトランジスタ：2個入りデュアル・トランジスタ [SSM2212] (1個。 V_{BE} が最適にマッチングしたQ2とQ3を実現するために使用)

説明

図4に、改良版のエミッタ・フォロワ回路を示しました。

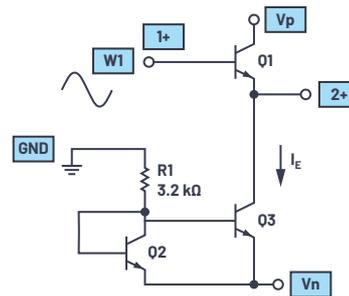


図4. 改良版のエミッタ・フォロワ回路

ハードウェアの設定

AWGは、ピークtoピークの振幅が3V、オフセットが0V、周波数が100Hzの三角波を生成するように設定します。オシロスコープの入力2 (2+) は、Q1のエミッタの電圧を測定するために使用します。AWGの出力W1の信号を表示するために、オシロスコープの入力1 (1+) をQ1のベースに接続してください。入力と出力の差を測定する際には、オシロスコープの入力2 (2+, 2-) を使用して両者の差分を表示します。

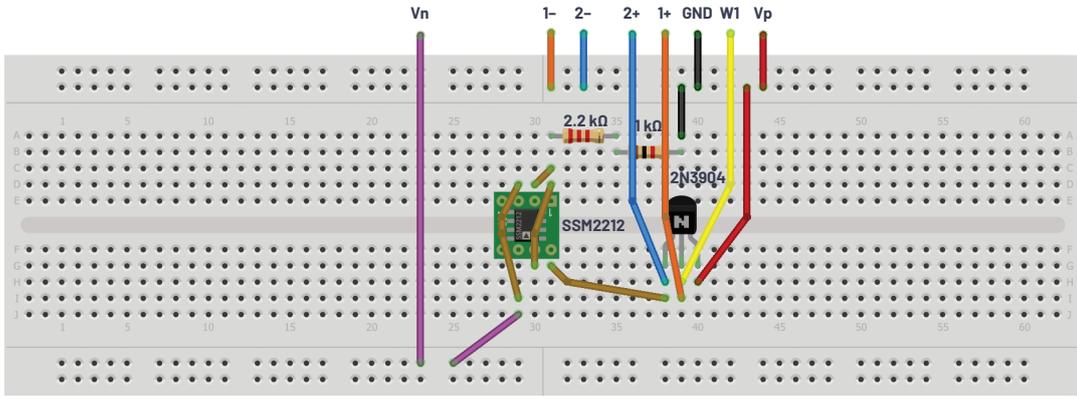


図5. 図4の回路を実装したブレッドボード

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を取り込めるように設定します。取得した波形の例を図6に示しました。図7に示したのは、入出力の差分の算出結果です。

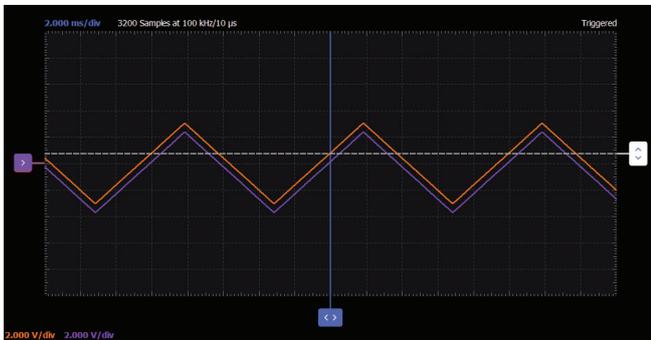


図6. 図4の回路の信号波形

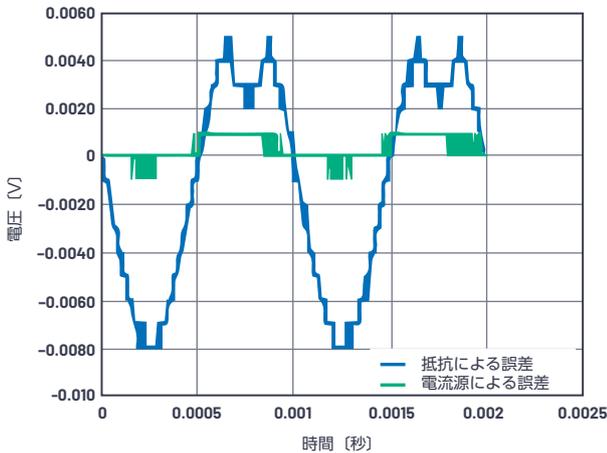


図7. 入力と出力の差分。抵抗と電流源の負荷による誤差をExcelで算出して示しました。

オフセットを抑えたエミッタ・フォロワ回路

ここまで示した回路には、 $-V_{BE}$ のオフセットが含まれていました。続いては、このオフセットの影響を緩和した回路を示します。その回路は、NPNトランジスタで構成したエミッタ・フォロワに

おける V_{BE} のシフト・ダウンを一部相殺するというものです。そのために、PNPトランジスタで構成したエミッタ・フォロワにおける V_{BE} のシフト・アップを利用します。

準備するもの

- ▶ 抵抗：6.8kΩ (1個)
- ▶ 抵抗：10kΩ (1個)
- ▶ コンデンサ：0.01 μF (1個)
- ▶ 小信号 PNP トランジスタ：「2N3906」(1個。Q1として使用)
- ▶ 小信号 NPN トランジスタ：2N3904 (3個。Q2、Q3、Q4として使用)。または 2N3904 (1個) と 2個入りデュアル・トランジスタ SSM2212 (1個)

説明

上述した回路を図8に示しました。AWGの出力W1は、PNPトランジスタQ1のベースに接続しています。Q1のコレクタは、NPNトランジスタQ3に接続しています。Q3はダイオード接続されており、カレント・ミラーの入力として機能します。Q1のエミッタは、抵抗R1とNPNトランジスタQ2のベースに接続してください。オシロスコープの入力2 (2+) は、Q2のエミッタとNPNトランジスタQ4のコレクタに接続されています。Q3とQ4のエミッタは、負の電源Vnに接続しています。最適なマッチングを実現するために、Q3とQ4には、SSM2212が内蔵するトランジスタ・ペアを使用するとよいでしょう。

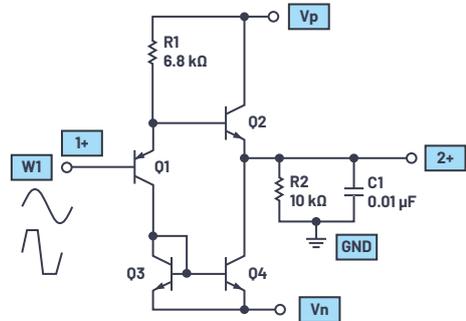


図8. オフセットを抑えたエミッタ・フォロワ回路

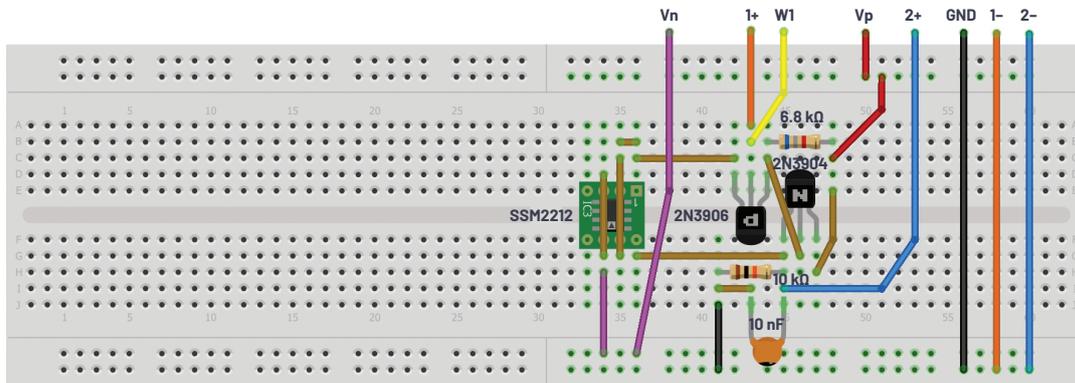


図9. 図8の回路を実装したブレッドボード

ハードウェアの設定

AWGは、ピークtoピークの振幅が4V、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は500mV/divに設定してください。

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を取り込めるように設定します。取得した波形の例を図10に示しました。

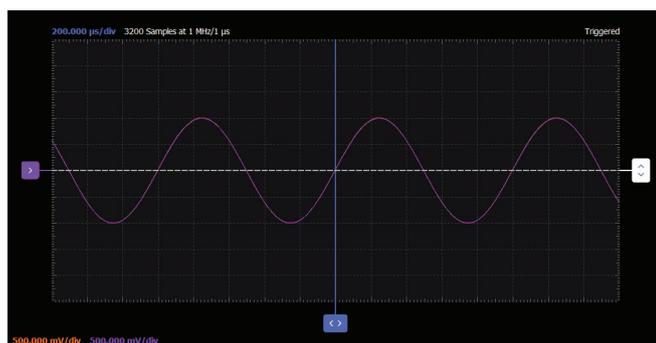


図10. 図8の回路の信号波形

シンプルなエミッタ・フォロワ回路では、容量性の負荷を駆動する際に1つの問題が明らかになることがあります。エミッタ電流は、信号源から供給されるベース電流の β 倍に制限されます。言い換えれば、エミッタ電流を制限する要素は β のみです。そのため、出力の立ち上がり時間は比較的短くなります。一方、立下がり時間はエミッタ抵抗または電流源によって制限されるので、かなり長くなります。以下では、この問題を改善した回路を紹介します。

スルー・レートのバランスを改善したエミッタ・フォロワ回路

準備するもの

- ▶ 抵抗：2.2k Ω (2個)
- ▶ 抵抗：10k Ω (1個)
- ▶ コンデンサ：0.01 μ F (1個)
- ▶ 小信号 PNP トランジスタ：2N3906 (3個。Q2、Q3、Q4として使用)。または 2N3906 (1個) と 2個入りデュアル・トランジスタ [SSM2220] (1個)
- ▶ 小信号 NPN トランジスタ：2N3904 (3個。Q1、Q5、Q6として使用)。または 2N3904 (1個) と 2個入りデュアル・トランジスタ SSM2212 (1個)

説明

図11に示す回路は、負荷電流が変化した場合、エミッタ・フォロワの電流を調整するために帰還回路を使用しています。出力を負にする際に流れる電流量は、PNPトランジスタQ3の電流のN (NPNトランジスタで構成したカレント・ミラーのゲイン) 倍程度になります。トランジスタの最適なマッチングを得るために、Q3とQ4にはSSM2220、Q5とQ6にはSSM2212を使用するとよいでしょう。なお、図11の回路の場合、NPNトランジスタで構成したカレント・ミラーのゲインは1になります。このゲインを高くするには、追加のNPNトランジスタ (SSM2212) をQ5と並列に接続します。

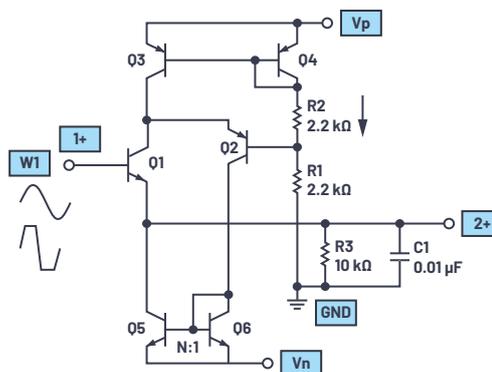


図11. スルー・レートのバランスを改善したエミッタ・フォロワ回路

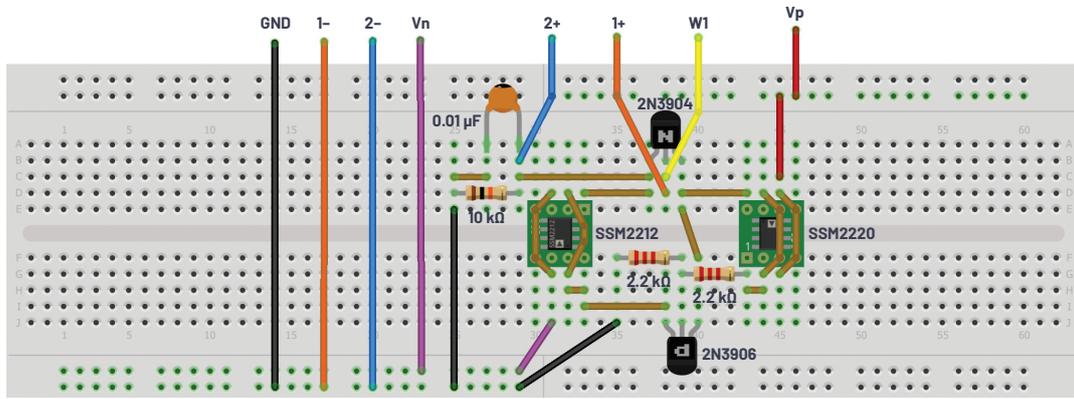


図 12. 図 11 の回路を実装したブレッドボード

ハードウェアの設定

AWGは、ピークtoピークの振幅が4V、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は1V/divに設定してください。

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を取り込めるように設定します。取得した波形の例を図13に示しました。

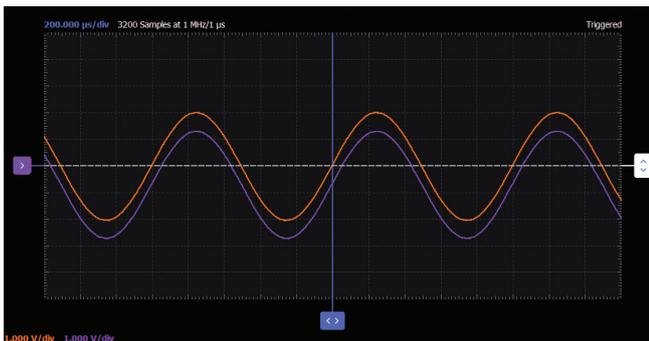


図 13. 図 11 の回路の信号波形

図1のエミッタ・フォロワ回路にはもう1つ改善点があります。それは r_e の値に関するものです。負帰還回路を利用すれば、 r_e の値を低減できます。その方法は、オープンループ・ゲインを高めて負帰還率を増大させるために、トランジスタを追加するというものです。具体的には、エミッタ・フォロワを構成するトランジ

スタのエミッタ電圧を100%帰還するためにトランジスタを追加します(図14)。このような構成の2つのトランジスタは、相補型の帰還ペアと呼ばれます。抵抗R2の値は、トランジスタQ1の I_C の値とコレクタの負荷を決定するので、優れた直線性を得る上で非常に重要です。

相補型の帰還ペアを使用したエミッタ・フォロワ回路

準備するもの

- ▶ 抵抗：2.2kΩ (1個)
- ▶ 抵抗：10kΩ (1個)
- ▶ 小信号 NPN トランジスタ：2N3904 (1個。Q1として使用)
- ▶ 小信号 PNP トランジスタ：2N3906 (1個。Q2として使用)

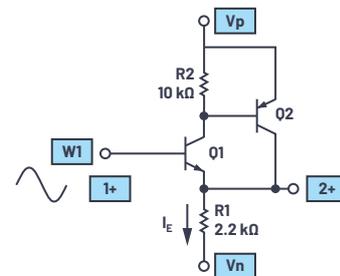


図 14. 相補型の帰還ペアを使用したエミッタ・フォロワ回路

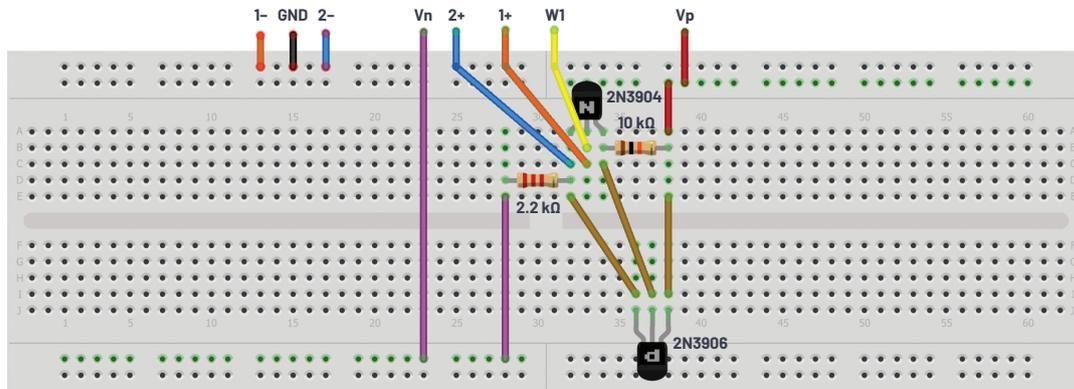


図 15. 図 14 の回路を実装したブレッドボード

説明

ブレッドボードを使用し、図 15 のように回路を構成します。

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 は 1V/div に設定してください。

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を取り込めるように設定します。取得した波形の例を図 16 に示しました。

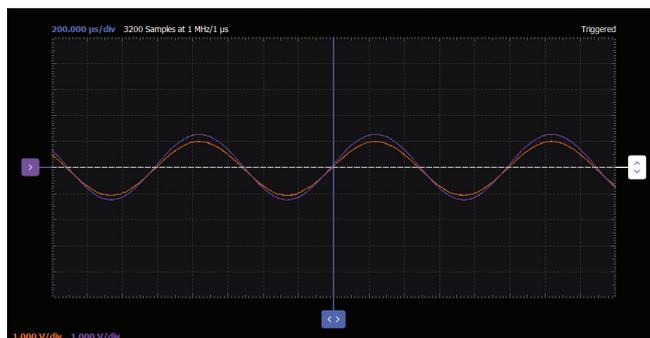


図 16. 図 14 の回路の信号波形

問題：

エミッタ・フォロワ回路の特性を表す 3 つの指標を挙げてください。

答えは [StudentZone](#) で確認できます。



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修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修士号を取得しています。

