

StudentZone——2020年8月

バイポーラ・トランジスタで構成したカレント・ミラー

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、バイポーラ・トランジスタ（BJT）で構成した電流源やカレント・ミラーについて学びます。電流源では、出力抵抗が高いこと、許容電圧範囲が広いこと、電源電圧や温度といった外部要因の変動を排除できることなどが重要になります。

背景

カレント・ミラーとは、入力端子に流入／流出する電流を複製（コピー）する回路のことです。複製された電流は出力端子に現れます。2個のトランジスタを使ってシンプルに実装されたカレント・ミラーは、次のような基本的な関係に基づいて動作します。すなわち、サイズが等しい2つのトランジスタでは、温度と V_{BE} が等しい場合、ドレイン電流またはコレクタ電流が等しくなるというものです。カレント・ミラーの重要な特徴は、値が比較的大きい出力抵抗により、負荷の条件にかかわらず出力電流を一定に保てるということです。また、入力抵抗の値が比較的小さいので、駆動条件にかかわらず入力電流を一定に保つことができます。これもカレント・ミラーの特徴の1つです。多くの場合、複製される電流は可変の信号として扱われます。カレント・ミラーは、増幅段においてバイアス電流とアクティブな負荷を提供するという目的でよく使用されます。

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：1k Ω （2個。抵抗値ができるだけ近いもの。あるいは、値が3桁以上のもの）
- ▶ 小信号NPNトランジスタ：「2N3904」（2個）または「SSM2212」（2個）
- ▶ デュアル・オペアンプ：「ADTL082」など（1個）
- ▶ デカップリング・コンデンサ：4.7 μ F（2個）

説明

今回は、バイポーラ・トランジスタを使用したエミッタ接地回路（共通エミッタ・アンプ）を取り上げました。カレント・ミラーの動作を観測するには、その回路を再利用するとよいでしょう（図1）。今回は、入力抵抗 R_1 と出力抵抗 R_2 の値を1k Ω とします。なお、 R_1 と R_2 については必ず実際の値を正確に（最大限の有効桁数で）測定してください。これは、カレント・ミラーの入出力電流を正確に測定する上で重要になります。 I_{IN} の値は、ADALM2000の任意波形ジェネレータ（AWG）のW2から出力される電圧を R_1 の値で割ることによって得られます。 I_{OUT} の値は、オシロスコープのチャンネル2で測定した電圧を R_2 の値で割ることによって求められます。ダイオード接続したトランジスタQ1は、図に示したように、トランジスタQ2のベース端子とエミッタ端子に接続します。

このカレント・ミラー回路において、オペアンプはミラー入力ノード（ベース）における実質的なグラウンドとして機能します。AWGのW2の電圧ステップを、1k Ω の抵抗を流れる電流ステップに変換するために使用します。

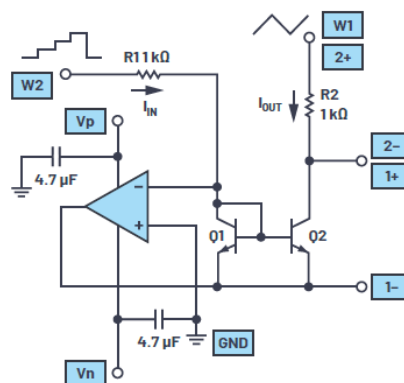


図1. カレント・ミラーの評価用回路

なお、オペアンプを使うことなく、図2に示すようなシンプルな回路でもカレント・ミラーを実現することができます。

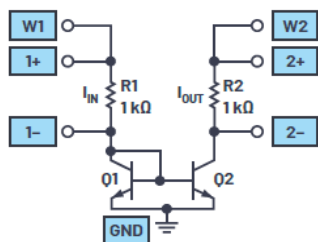


図2. カレント・ミラーのシンプルな評価用回路

ハードウェアの設定

AWGのW2を制御するために、[stairstep.csv](#)というファイルを読み込みます。振幅は3Vp-p、オフセットは1.5Vに設定します。出力デバイスとなるQ2の V_{CE} を、オシロスコプの入力1+と1-によって差動で測定します。カレント・ミラーの出力電流は、オシロスコプの入力2+と2-をR2の両端に接続することで測定します。AWGのW1からは、周波数が40Hzの三角波が出力されます。それを使用してコレクタ電圧を掃引します。なお、オペアンプを使用した図1の回路を選択した場合には、電源Vp (5V)とVn (-5V) が正しく接続されていることを確認してください。

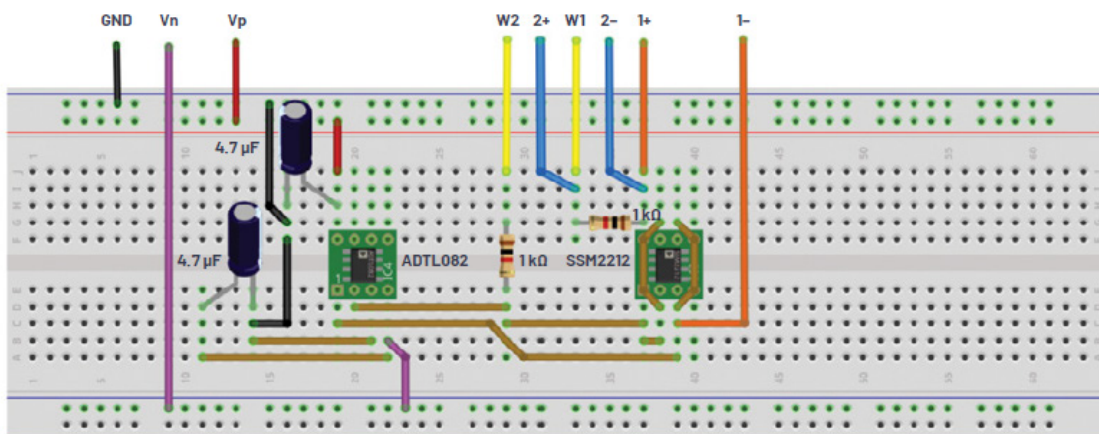


図3. 図1の回路（オペアンプあり）を実装したブレッドボード

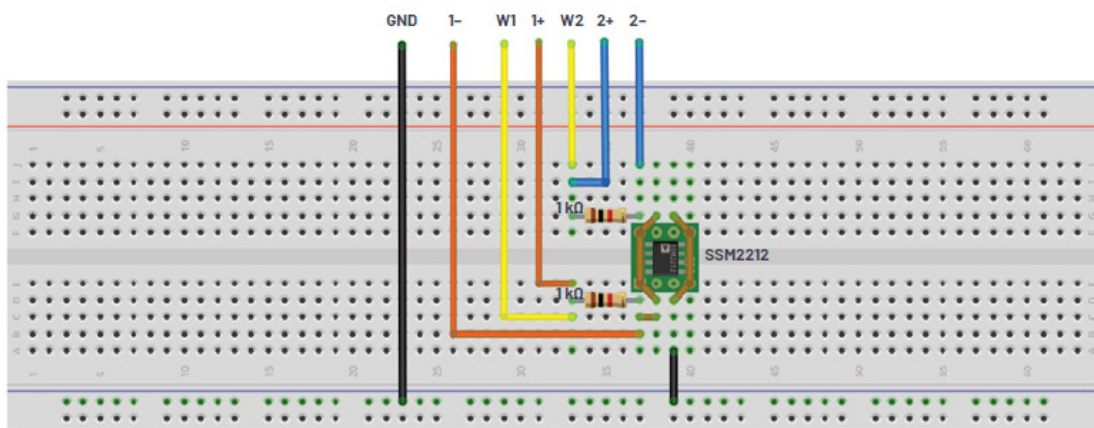


図4. 図2の回路（オペアンプなし）を実装したブレッドボード

手順

入力信号と出力信号の複数の周期が表示されるようにオシロスコープを設定します。図1の回路を使用する場合には、電源が投入されていることを確認してください。

ソフトウェア・パッケージ「Scopy」を使って、オシロスコープ上に2つの波形をプロットしてください（図5）。また、LTspice®によって図1の回路のシミュレーションを実行し、プロットを取得してみてください。

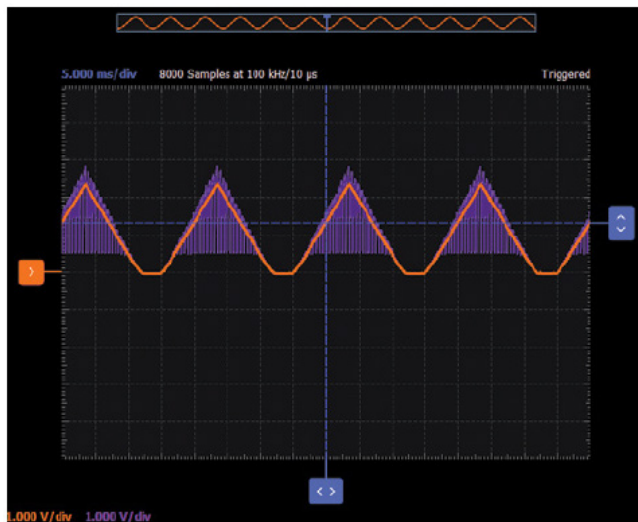


図5. カレント・ミラー回路の信号波形。Scopyによって取得しました。
W2の出力周波数は10kHzです。

次に、W1の周波数を200Hzに変更し、2つの波形をプロットします。この条件下におけるLTspiceのシミュレーション結果を図6に示しました。

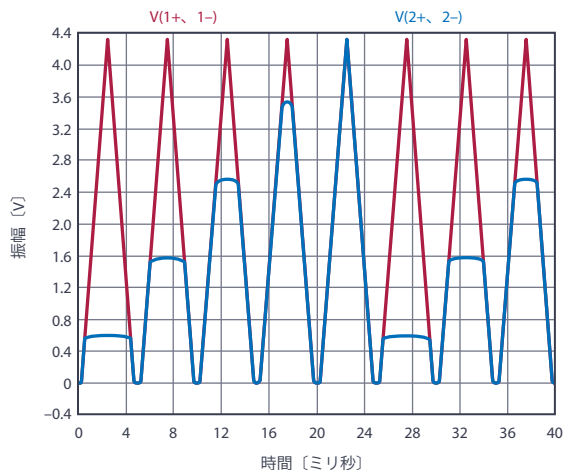


図6. LTspiceによるカレント・ミラー回路のシミュレーション結果。
W1の周波数は200Hz、W2の周波数は40Hzです。

ベース電流を補償したカレント・ミラー

図2に示したシンプルなカレント・ミラー回路に変更を施し、ベース電流を補償するためのトランジスタQ3を追加します（図7）。図2の回路では、Q1のコレクタをベースに接続していましたが、図7の回路では、その配線をエミッタ・フォロワ・バッファで置き換えています。この同バッファにより、カレント・ミラー回路の改善が図れます。エミッタ・フォロワ・バッファ段（Q2）の電流ゲインにより、Q1とQ2の有限のベース電流に起因するゲイン誤差を大幅に低減することができるのです。

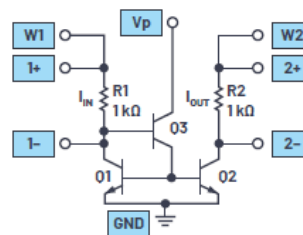


図7. ベース電流を補償したカレント・ミラー回路

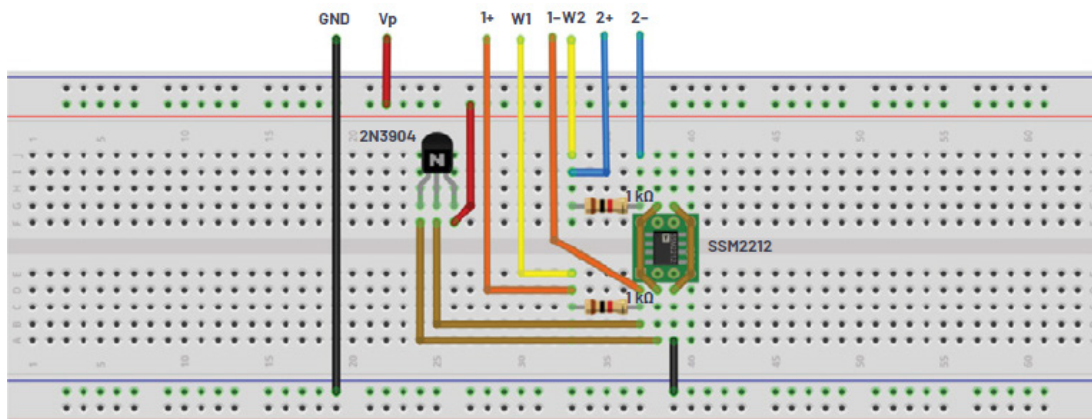


図8. 図7の回路を実装したブレッドボード

ハードウェアの設定

AWGのW2用にstairstep.csvを読み込みます。振幅は3Vp-p、オフセットは1.5Vに設定します。オシロスコープの入力1+と1-により、Q2の V_{CE} を差動で測定します。カレント・ミラーの出力電流は、オシロスコープの入力2+と2-をR2の両端に接続することで測定します。AWGのW1から周波数が40Hzの三角波を出力し、それによってコレクタ電圧を掃引します。Q3のコレクタには、正電源 V_p (+5V) を接続してください。

手順

入力信号と出力信号の複数の周期が表示されるようにオシロスコープを設定します。また、正電源を投入してください。

Scopyを使って、オシロスコープ上に2つの波形をプロットしてください (図9)。また、LTspiceによって、この回路のシミュレーションを実行してみてください。

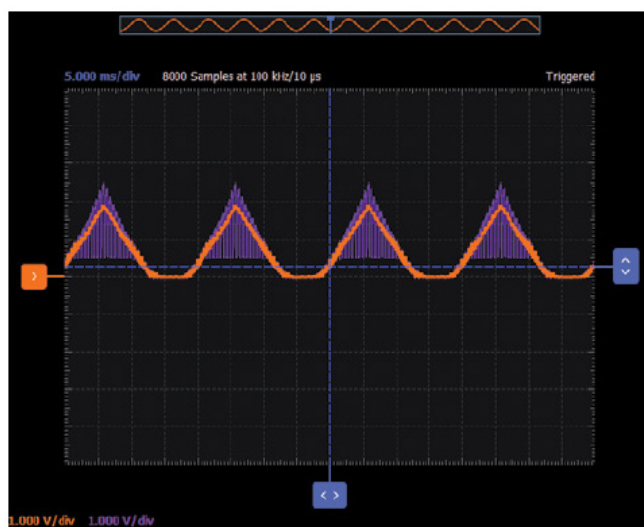


図9. 図7のカレント・ミラー回路の信号波形。Scopyによって取得しました。W2の周波数は10kHzです。

ウィルソン・カレント・ミラー

ウィルソン・カレント・ミラーは、George Wilson氏にちなんで名付けられた回路です。ウィルソン電流源とも呼ばれます。基本的なカレント・ミラー回路を改良し、より安定した定電流ソース/点電流シンクとして機能するように設計されています。具体的には、入出力間の電流ゲインがはるかに正確になります。ウィルソン・カレント・ミラーは、図2のカレント・ミラー回路を図10のように変更することで実現します。

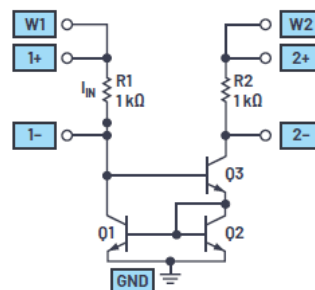


図10. ウィルソン・カレント・ミラーの構成

ハードウェアの設定

AWGのW2用にstairstep.csvを読み込みます。振幅は3Vp-p、オフセットは1.5Vに設定してください。オシロスコープの入力1+と1-を使って、Q2の V_{CE} を差動で測定します。カレント・ミラーの出力電流は、オシロスコープの入力2+と2-をR2の両端に接続することによって測定します。AWGのW1から周波数が40Hzの三角波を出力し、コレクタ電圧を掃引します。

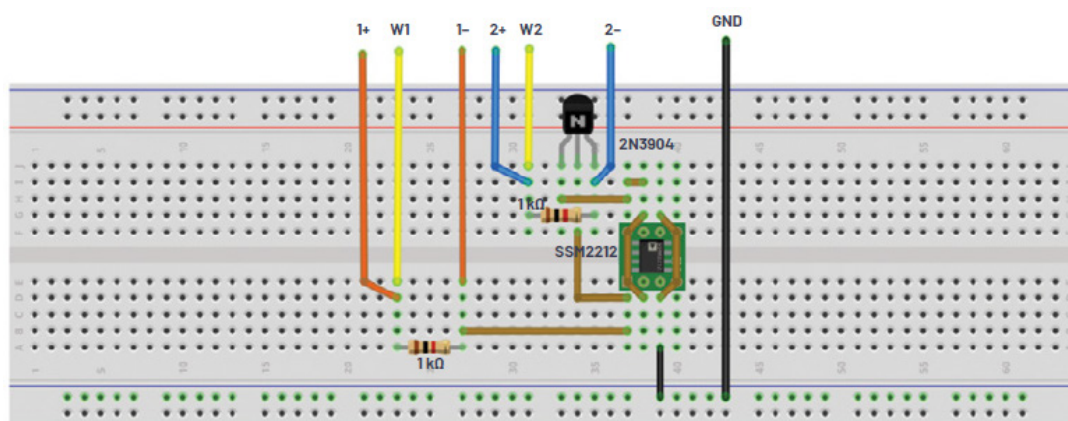


図11. 図10の回路を実装したブレッドボード

手順

入力信号と出力信号の複数の周期が表示されるようにオシロスコープを設定します。

Scopyを使って、オシロスコープ上に2つの波形をプロットしてください (図12)。また、LTspiceを使って、この回路のシミュレーションを実行してみてください。

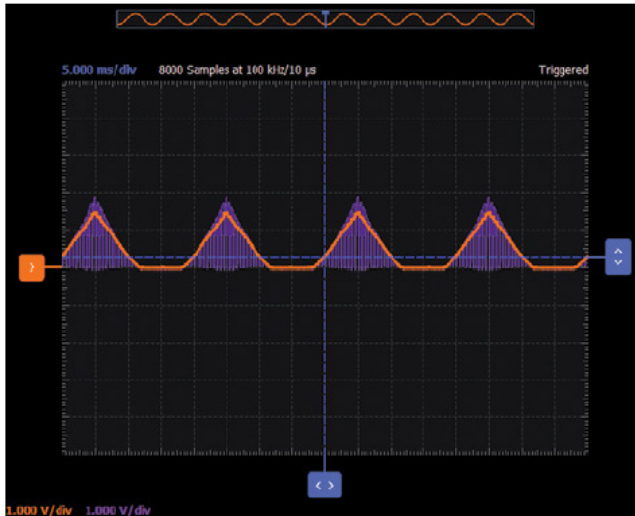


図12. ウィルソン・カレント・ミラーの信号波形。Scopyで取得しました。W2の周波数は10kHzです。

ウィドラー・カレント・ミラー

続いて、図2のカレント・ミラー回路に変更を施し、図13に示すウィドラー・カレント・ミラーを構成します。ウィドラー電流源は、2つのトランジスタで構成される基本的なカレント・ミラーを変更することで実現します。具体的には、出力トランジスタにエミッタ・ディジェネレーション抵抗を追加することにより、値がやや小さい抵抗を使って少ない電流を生成できるようにします。ウィドラー・カレント・ミラーは、MOSトランジスタを使って構成されることもあります。

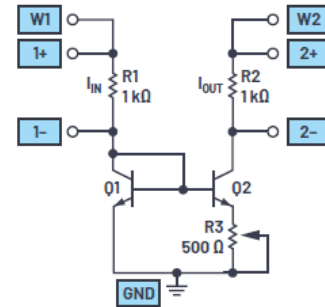


図13. ウィドラー・カレント・ミラーの構成

ハードウェアの設定

AWGのW2用にstairstep.csvを読み込みます。振幅は3Vp-p、オフセットは1.5Vに設定します。オシロスコープの入力1+と1-を使って、Q2の V_{CE} を差動で測定します。カレント・ミラーの出力電流は、オシロスコープの入力2+と2-をR2の両端に接続することで測定します。W1から出力される周波数が40Hzの三角波を使用して、コレクタ電圧を掃引します。

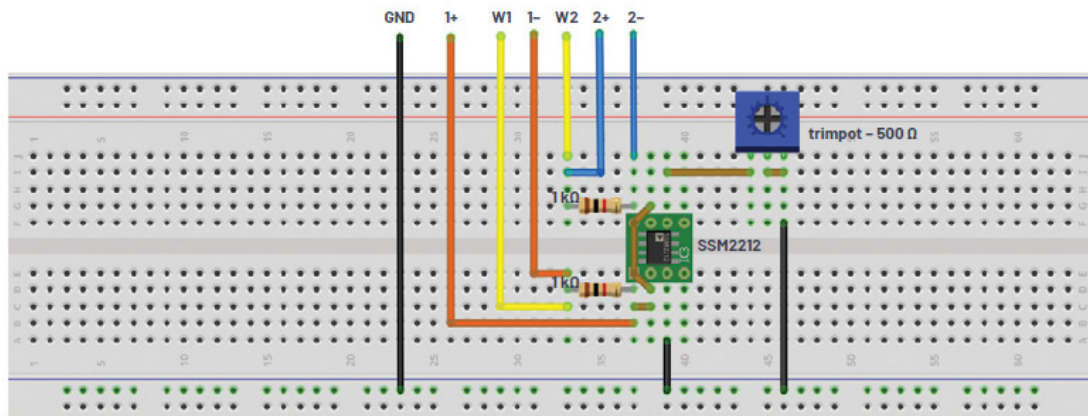


図14. 図13の回路を実装したブレッドボード

手順

入力信号と出力信号の複数の周期が表示されるようにオシロスコープを設定します。

Scopyを使って、オシロスコープ上に2つの波形をプロットしてください (図15)。また、LTspiceでこの回路のシミュレーションを実行してみてください。

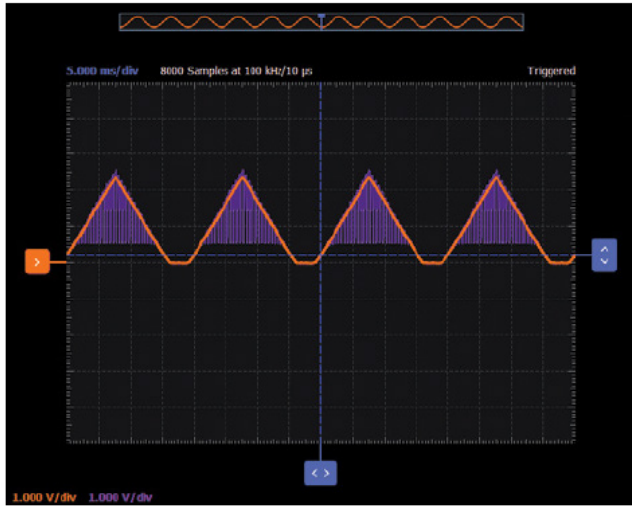


図15. ウィドラー・カレント・ミラーの信号波形。Scopyで取得しました。W2の周波数は10kHzです。

問題：

- ▶ ベース電流を補償したカレント・ミラー回路の長所と短所を1つずつ挙げなさい。
- ▶ ウィルソン・カレント・ミラーの長所と短所を1つずつ挙げなさい。

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。



想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

アナログ・デバイセズ株式会社

お住いの地域の本社、販売代理店などの情報は、analog.com/jp/contact をご覧ください。

オンラインサポートコミュニティEngineerZoneでは、アナログ・デバイセズのエキスパートへの質問、FAQの閲覧ができます。

©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
本紙記載の商標および登録商標は、各社の所有に属します。
Ahead of What's Possibleはアナログ・デバイセズの商標です。

AD5408-0-8/20

VISIT ANALOG.COM/JP