

テスト済み回路設計集“Circuits from the Lab™”は共通の設計課題を対象とし、迅速で容易なシステム統合のために製作されました。さらに詳しい情報又は支援は [www.analog.com/jp/CN0554](http://www.analog.com/jp/CN0554) をご覧ください。

#### 接続または参考にしたデバイス

|          |                                                              |
|----------|--------------------------------------------------------------|
| LTC2688  | 16 チャンネル、16 ビットの電圧出力 SoftSpan™ DAC                           |
| AD7124-8 | PGA とリファレンスを内蔵した、8 チャンネル、低ノイズ、低消費電力、24 ビット、シグマ・デルタ (Σ-Δ) ADC |
| LT8582   | フォルト保護機能付きデュアル 3A 昇圧/反転/SEPIC DC/DC コンバータ                    |
| LT3090   | プログラマブルな電流制限機能を備えた、-36V、600mA、負電圧のリニア電圧レギュレータ                |
| LT1790   | マイクロパワー SOT-23 低ドロップアウト・リファレンス・ファミリ                          |
| ADR4525  | 超低ノイズの高精度 2.5V 電圧リファレンス                                      |
| LT5400   | クワッド整合抵抗ネットワーク                                               |
| ADM7160  | 超低ノイズ、200mA のリニア電圧レギュレータ                                     |

## Raspberry Pi プラットフォーム対応 ±10V アナログ入力および±15V アナログ出力

### 評価と設計支援

- ▶ 回路評価用ボード
  - ▶ CN0554 回路評価用ボード (EVAL-CN0554-RPIZ)
- ▶ 設計および統合ファイル
  - ▶ 回路図、PCB レイアウト・データ、部品表、ソフトウェア

### 回路の機能とその利点

世界がデジタル化への道を歩み続け、コンピュータの能力やデジタル機能がますます重要になっている一方、環境を計測したり現実世界のデバイスと相互作用したりするには、依然としてアナログ機能が必要です。デジタル領域とアナログ領域の境界で処理を行うために、多くの産業、計測、自動化アプリケーションへの適用を考慮されたプロセッサには、ミックスドシグナルの入出力を備え、またより多くのソフトウェア・プログラマブル・レンジを処理できることが求められます。

図 1 に示す回路は、柔軟なマルチチャンネルのミックスドシグナル・アナログ入出力 (I/O) モジュールです。16 個のシングルエンド・アナログ出力は、0V~5V、±5V、0V~10V、±15V の

レンジがソフトウェアで設定可能です。また、8 チャンネルの完全差動アナログ入力は、0V~2.5V、±13.75V、0V~27.5V の入力レンジがハードウェアで選択可能です。

回路は Raspberry Pi の上面に直接取り付けよう設計されているため、広く用いられているこのシングル・ボード・コンピュータにアナログ I/O インターフェースを提供することができます。ソフトウェア制御は、Linux の産業用入出力 (I/O) フレームワークを介して行うことができるため、C、C#、MATLAB、Python などの言語に対応した、デバッグ/開発ユーティリティやクロスプラットフォーム・アプリケーション・プログラミング・インターフェース (API) のホストとすることができます。

ソフトウェアは、Raspberry Pi 上でローカルに実行することも、有線またはワイヤレスのネットワーク接続を介してリモートで実行することも可能です。モジュールの 5V 電源は、Raspberry Pi のインターフェース・コネクタを通じて供給されるため、電源を追加する必要はありません。これらの特長によって、ローカルおよびリモートの低消費電力高精度アナログ I/O アプリケーション向けに最適なシステムを構築できます。

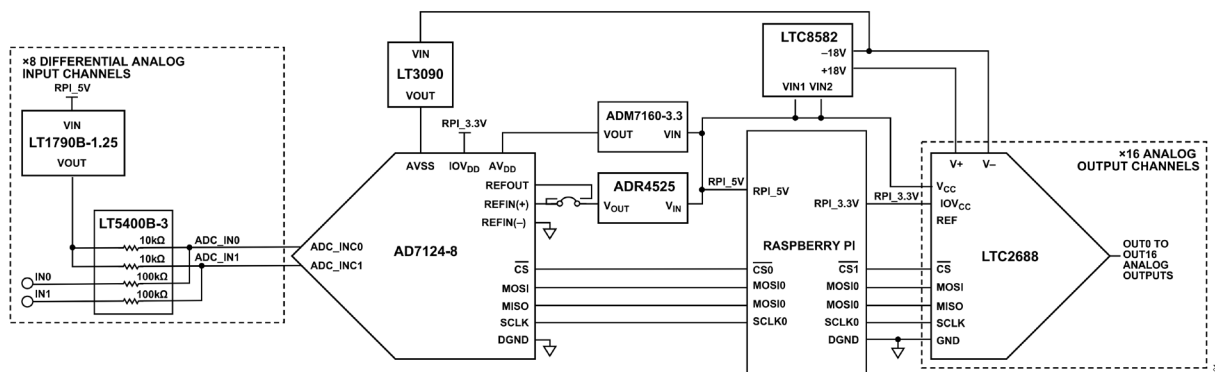


図 1. CN0554 の簡略化したブロック図

回路の説明

CN0554 は、高精度アプリケーション向けのフル機能アナログ I/O システムを可能にします。回路は、A/D 変換 (ADC) 部と D/A 変換 (DAC) 部の 2 つの主要部分に分割できます。

アナログ入力

CN0554 は、オンボードの LT5400 外付け整合抵抗ネットワークを通じて減衰した入力に対して最大で 11 倍の電圧のアナログ入力レンジを実現します。このデバイスではジャンパの選択によりアナログ入力電圧レンジを増加します。

表 1 に、CN0554 の全ジャンパ選択とそれに対応するアナログ入力電圧レンジを示します。

表 1. アナログ入力範囲

| Jumper Configuration                 | Input Range   |
|--------------------------------------|---------------|
| Short Pins 1 and 3, and Pins 2 and 4 | ±13.75 V      |
| Short Pins 3 and 5, and Pins 2 and 6 | 0 V to 27.5 V |
| No Connection                        | 0 V to 2.5 V  |

A/D 変換

CN0554 は、設定可能なアナログ入力を備えた 24 ビット Σ-Δ ADC AD7124-8 を用いることを特色としています。8 チャンネルの完全差動入力または 16 チャンネルのシングルエンド入力が、プログラマブル・ゲイン、フィルタ設定、出力データ・レートなどと共に、ソフトウェアで設定できます。

外部電圧リファレンスは、AD7124-8 の内部バンドギャップ・リファレンスを用いるか、高精度低消費電力低ノイズ電圧リファレンスである ADR4525 の 2.5V 出力を用いるかを、ジャンパにより選択できます。リファレンス電圧のドリフトは ADC の精度に直接影響するため、CN0554 では外部リファレンスを用いています。内部リファレンスに比べ温度ドリフト性能が優れているためです。

AD7124-8 の Σ-Δ アーキテクチャは、小信号センサー測定において、また更には工業環境などのノイズの多い環境においても、高い分解能とノイズ除去性能を示します。出力データ・レートは、1.17SPS~19.2kSPS の範囲で設定可能で、これに対応して測定分解能は 24nV rms~72μV rms となります。またいくつかのフィルタ・モードが利用できます。これにより、CN0554 の分解能、データ・レート、ノイズ除去性能を、広範なアプリケーションに対して最適化できます。

D/A 変換

CN0554 は、電圧出力 DAC LTC2688 を使い、16 個のシングルエンド 16 ビット・アナログ出力を備えています。各チャンネルは、最大 20mA の電流を入出力できるレール to レール出力バッファを内蔵しています。

LT8582 は LTC2688 に±18V の電源レールを供給し、これにより DAC は最大±15V のアナログ出力レンジを十分に活用できます。各チャンネルの出力レンジは、表 2 に示す 5 つのレンジに個別に設定できます。電圧リファレンスは、内部の 4.096V を用いるか、または ADC 用の ADR4525 2.5V リファレンスを用いるかを、ソフトウェアにより設定できます。各チャンネルは、5% のオーバーレンジにも対応します。

表 2. 電圧出力レンジのスケールリング

| Output Range Scaling                     | Internal Reference (V <sub>REF</sub> = 4.096 V) | External Reference (V <sub>REF</sub> = 2.5 V) |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0 V to 5 V × (V <sub>REF</sub> / 4.096)  | 0 V to 5 V                                      | 0 V to 3.05 V                                 |
| 0 V to 10 V × (V <sub>REF</sub> / 4.096) | 0 V to 10 V                                     | 0 V to 6.10 V                                 |
| ±5 V × (V <sub>REF</sub> / 4.096)        | ±5 V                                            | ±3.05 V                                       |
| ±10 V × (V <sub>REF</sub> / 4.096)       | ±10 V                                           | ±6.10 V                                       |
| ±15 V × (V <sub>REF</sub> / 4.096)       | ±15 V                                           | ±9.15 V                                       |

トグルおよびディザ機能

CN0554 は、トグルとディザの両機能をサポートします。トグル機能では、SPI トランザクションを用いることなく、DAC 出力を 2 つの異なる DAC コード間で高速に切り替えることができます。そのため、通信のトランザクションは不要となります。トグル機能の例としては、微小な DC バイアスを除去することや、オン状態とオフ状態を独立して切り替えることが挙げられます。

ディザリングは高精度アプリケーションにおける量子化誤差を除去するもので、非直線性を複数の出力コードに広げることによって行われます。この機能は、信号の平均 DC 値を中心として AC 信号を重ねることが必要な多くのアプリケーションにおいて有用です。1 つの例は光学アプリケーションで、この場合、光経路の 2 次特性が微小 AC 信号に対する応答によって測定できます。更に、ディザによって、スプール・バルブなどの機械システムでの静止摩擦が低減できるため、スプールの位置が変わった場合の応答速度が向上できます。

トグル動作

図 2 に示すように、各チャンネルがトグル動作に対応しており、ソフトウェアで設定された 2 つの値の間における出力電圧の切替を制御できます。この切替は、トグル信号によって制御されます。この信号は、Raspberry Pi から供給された 3 種類の外部デジタル入力 (TGP0、TGP1、TGP2 と記しています) のいずれか、または内蔵のソフトウェア制御レジスタから供給されます。3 種のデジタル信号のうちの 2 つ、TGP0 および TGP1 は、Raspberry Pi のデジタル出力に接続され、パルス幅変調 (PWM) をサポートします。

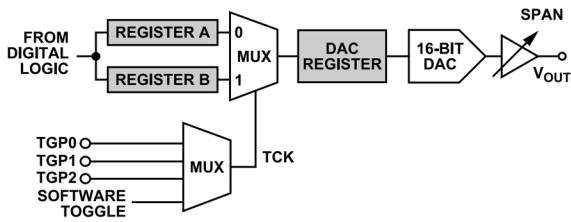


図 2. トグル動作とディザ動作のブロック図

図 3 は、CN0554 が実行するトグル動作の一例を示すものです。出力電圧は、トグル・ピンに応じてゼロスケールとフルスケールの間を上下し、ピーク to ピーク電圧の測定値は 1kHz で 33.0V です。

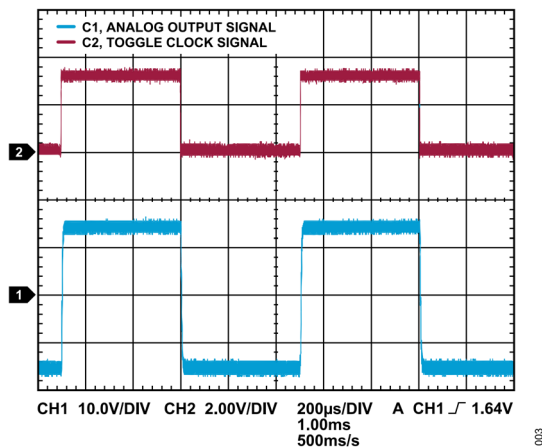


図 3. ゼロスケールからフルスケールへの出力電圧トグル

### ディザ動作

CN0554 では、各チャンネルが、アナログ出力にサイン波ディザ信号を付加するディザ動作をサポートしています。このサイン波は、式 1 から導かれる値からなるルックアップ・テーブルを用いて生成されます。

$$D(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{N}n + \varphi_0\right) \quad (1)$$

ここで、

$n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 、

$N$  は信号周期、

$\varphi_0$  は、信号位相角の初期値です。

CN0554 では、ディザ信号の振幅、周期、位相角が設定可能です。

ディザ信号の振幅はソフトウェアで設定でき、その範囲は 0 から設定最大出力電圧の 25% までです。

ディザの周波数を設定するには、ディザ・クロック入力が必要です。これは、Raspberry Pi から供給される 3 つの外部デジタル入力 TGP0、TGP1、TGP2 のいずれかを選択できます。外部入力のうち TGP0 および TGP1 の 2 つは、PWM 機能を持つ Raspberry Pi のデジタル出力に接続されているため、クロック周波数が容易に設定できます。

ディザ信号の周波数は、ディザ・クロック入力をソフトウェア設定可能な分周器で 4、8、16、32、または 64 のいずれかに分周して設定されます。したがって、発生するディザ信号の周波数は、式 2 を用いて計算できます。

$$f_{\text{signal}} = \frac{f_{\text{PWM}}}{N} \quad (2)$$

ここで、

$f_{\text{signal}}$  は、発生するディザ信号の周波数、

$f_{\text{PWM}}$  は、PWM クロック周波数、

$N$  は分周数です。

ディザの位相角は、0、90、180、270 の 4 通りの値に設定できます。これらのすべてのパラメータにより、ディザリングする DAC チャンネル出力を高精度に制御できます。

図 4 に、最大信号周期時のミッドスケール出力電圧における CN0554 のディザ動作例を示します。ディザ・クロックが 1kHz の場合にピーク to ピーク電圧は 15.04V となっています。

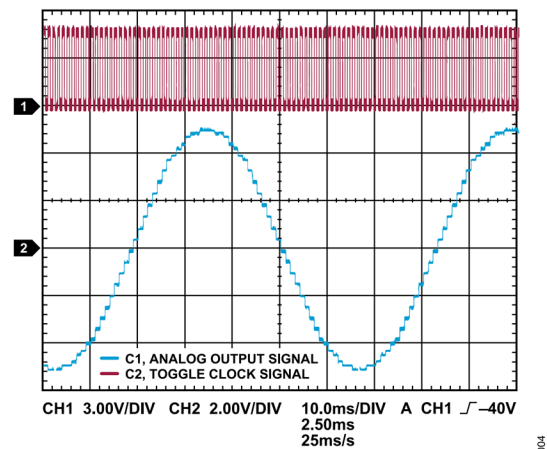


図 4. 最大信号周期時のミッドスケール出力電圧

図 5 には、最小信号周期時のミッドスケール出力電圧でのディザ動作を示します。ディザ・クロックが 1kHz の場合にピーク to ピーク電圧は 17.6V となっています。

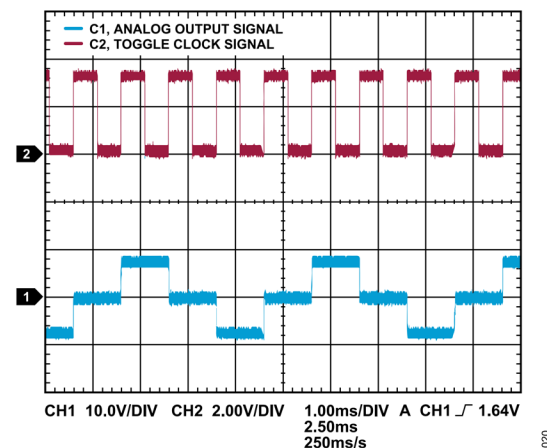


図 5. 最小信号周期時のミッドスケール出力電圧

## システム性能

## アナログ入力のノイズ性能

図 6 にミッドスケール入力 (5V) でのノイズ特性、図 7 にフルスケール (10V) でのノイズ特性を示します。

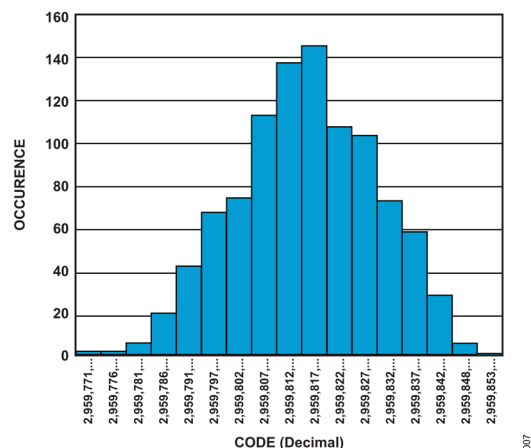


図 6. ミッドスケール・アナログ入力のノイズ・ヒストグラム

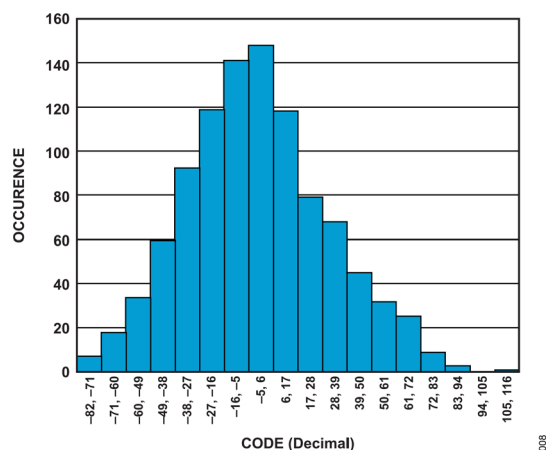


図 7. フルスケール・アナログ入力のノイズ・ヒストグラム

## アナログ出力のノイズ性能

LT8582 のスイッチング・レギュレータ出力は、バイパスしてフィルタリングすることでノイズを低減できます。図 8 にゼロスケール出力での AC 結合信号ノイズを示します。最小ピーク to ピーク・ノイズが 14.4mV であることが示されています。

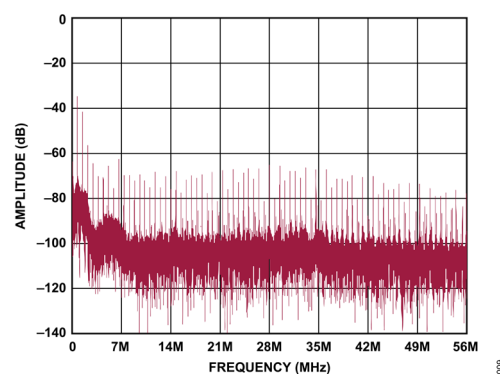
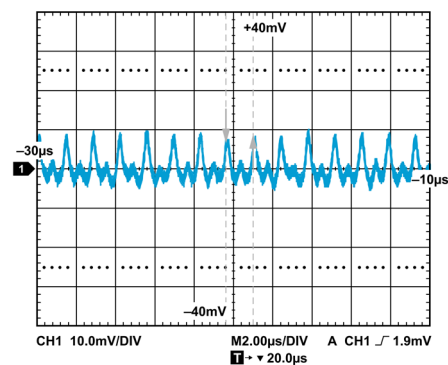


図 8. ADC チャンネルと DAC チャンネルのループバックからのゼロスケール AC 結合ノイズ信号

図 9 には、ミッドスケール出力でピーク to ピーク・ノイズが 13.4mV であることを示します。

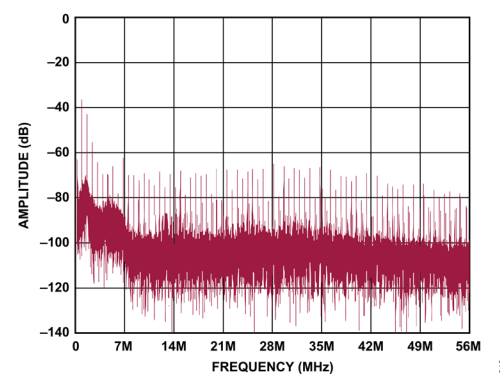
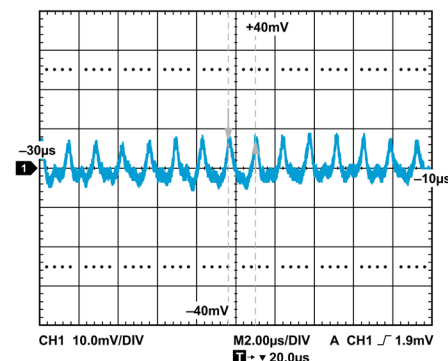


図 9. ADC チャンネルと DAC チャンネルのループバックからのミッドスケール AC 結合ノイズ信号

図 10 では、このボードがフルスケール出力で発生する最大ピーク to ピーク・ノイズが 17.6mV であることが示されています。

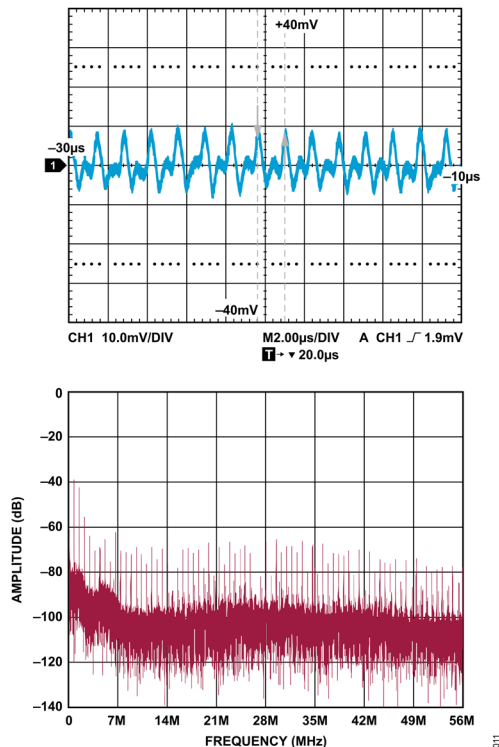


図 10. ADC チャンネルと DAC チャンネルのループバックからのフルスケール AC 結合ノイズ信号

## アナログ出力の直線性

積分非直線性 (INL) は、DAC の伝達関数の上下両端を結ぶ直線からの最大偏差 (LSB 単位) の測定値を表します。また、微分非直線性 (DNL) は、隣接する 2 つのコードの間における測定された変化と理想的な 1LSB 変化との差を表します。微分非直線性の仕様が  $\pm 1\text{LSB}$  以内の場合は、単調増加性が確保されます。

図 11 に、LSB 単位で測定した出力電圧の DNL を示します。これは、1 チャンネルの場合について LTC2688 出力にセットした 16 ビットの値と比較したものです。

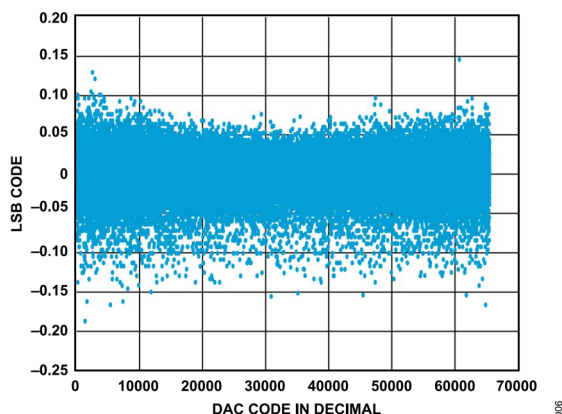


図 11. 出力電圧の微分非直線性

図 12 に、LSB 単位で測定した出力電圧の積分 INL を示します。これは、1 チャンネルの場合について LTC2688 出力にセットした 16 ビットの値と比較したものです。

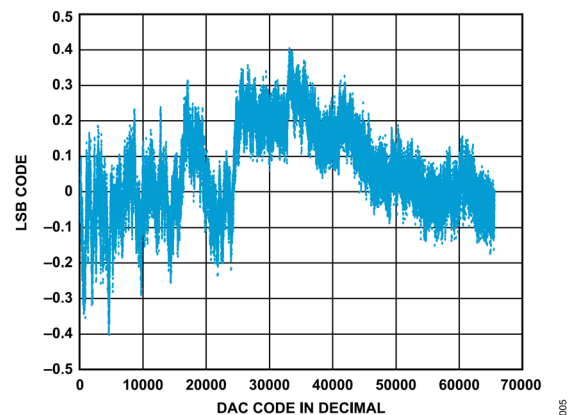


図 12. 出力電圧の積分非直線性

## 電源アーキテクチャ

CN0554 は、Raspberry Pi の 40 ピン・インターフェース・コネクタから直接電力を引き出します。図 13 に CN0554 の電源ツリーの全体図を示します。

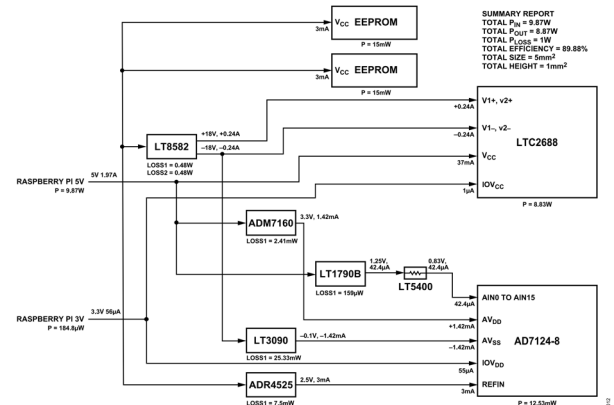


図 13. CN0554 の電源ツリー

2 つの独立したチャンネルからなるスイッチング DC/DC コンバータ LT8582 は、Raspberry Pi からの 5V 電源を昇圧して反転する機能を担います。

LT8582 は、18V と -18V のレールを出力し、これらは ADC と DAC の両方で、必要な電力を供給するために用いられます。CN0554 は、LT8582 のフォルト保護機能を通じて、入力の上昇過電圧および温度過上昇保護も行います。

超低ノイズ、低ドロップアウト・レギュレータの ADM7160 は、AD7124-8 に 3.3V アナログ電源レールを供給します。このレギュレータは、Raspberry Pi のインターフェース・コネクタで 5V レールから給電されます。AD7124-8 デジタル I/O 電源は、Raspberry Pi の 3.3V レールに直接接続されています。

LT3090 は、-18V レールを -0.1V にレギュレーションし、わずかに負のアナログ電源を AD7124-8 に提供します。これらの電源レールは、入力バッファがイネーブルされている場合でも、アナログ入力の絶対電圧がグラウンドからリファレンス電圧までの全範囲にわたるよう設計されています。

## バリエーション回路

AD7124-4 は、シングルエンド・チャンネルが 8 個、差動チャンネルが 4 個となるだけで、AD7124-8 の代わりに使用できます。それにより、余分なチャンネルが不要なアプリケーションでコストを削減できます。

LTC2686 は LTC2688 に対する 8 チャンネルの代替品です。このデバイスは、出力駆動電流が 55mA と高く、また、高容量性負荷を駆動するための補償ピンを備えています。

LT8582 は、必要な出力範囲が 0V~5V だけである場合は、正の 5V 単電源で置き換えることができます。DAC に対する代替電源オプションでは、出力電流のより低い昇圧または反転レギュレータを考慮できます。このボードは、全チャンネルで DAC のフル出力電流をサポートするよう設計されているためです。

もしくは、アプリケーションによっては、低ドロップアウト電圧レギュレータのような昇圧または反転レギュレータの低ノイズのポストレギュレーションを追加することもできます。

## 回路の評価とテスト

このセクションでは、EVAL-CN0554-RPIZ を評価するためのセットアップと手順を説明します。詳細については、CN0554 のユーザ・ガイドを参照してください。

### 必要な装置

- ▶ EVAL-CN0554-RPIZ 回路評価用ボード
- ▶ Raspberry Pi 4 Model B
- ▶ HDMI 付きディスプレイ・モニタ
- ▶ マイクロ HDMI-HDMI 変換アダプタ
- ▶ USB キーボードおよびマウス
- ▶ 16GB 以上の SD カード
- ▶ アナログ・デバイス製の Kuiper Linux イメージ
- ▶ 5V、3A USB Type-C 電源アダプタ
- ▶ メス・メス・ループバック・ジャンパ・ケーブル
- ▶ オシロスコープ
- ▶ デジタル電圧計 (6 桁以上)

### 開始にあたって

CN0554 評価用ボードは、デフォルトで、テスト用に適切なシャント位置に設定されています。シャントの位置を確認するには、EVAL-CN0554-RPIZ ユーザ・ガイドを参照してください。

評価テストを実行するには、次の手順に従います。

1. 図 14 に示すように、EVAL-CN0554-RPIZ を Raspberry Pi に接続します。

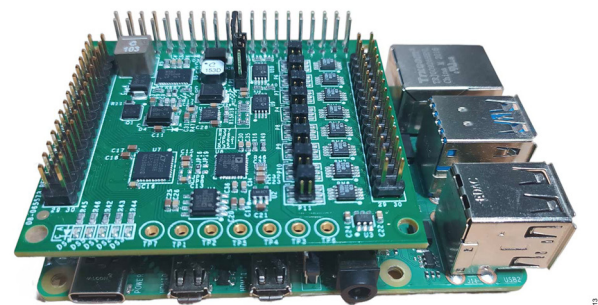


図 14. Raspberry Pi に取り付けした EVAL-CN0554-RPIZ

2. Kuiper Linux イメージが格納されている SD カードを Raspberry Pi に挿入します。
3. 図 15 に示すように、メス・メス・ループバック・ジャンパ・ケーブルを用いて ADC 入力チャンネルと DAC 出力チャンネルを接続します。

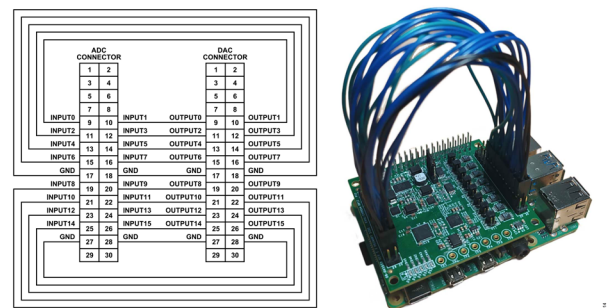


図 15. ループバック接続を行った EVAL-CN0554-RPIZ のテスト用セットアップ

4. Raspberry Pi からディスプレイ・モニタに HDMI ケーブルを接続した後、キーボードとマウスを USB ポートに接続します。
5. USB Type-C アダプタを使用して Raspberry Pi に通電し、Raspberry Pi が起動するのを待ちます。

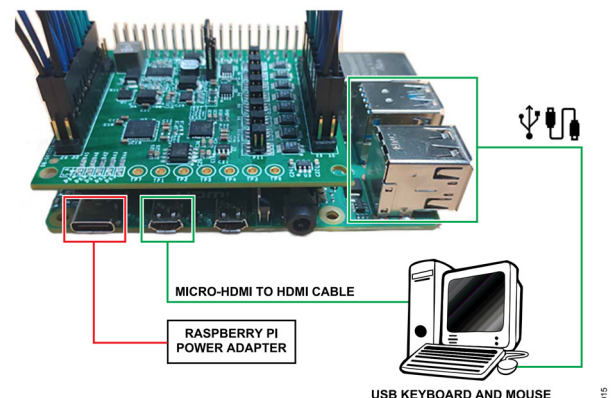


図 16. システムのテスト用セットアップ

6. IIO Oscilloscope を開き、図 17 に示すように [DMM] タブと [Debug] タブをアンドックします。

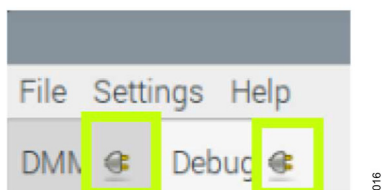


図 17. IIO Oscilloscope の[DMM]タブと[Debug]タブ

7. [DMM]ウィンドウで、デバイスに「ad7124」を選択し、測定チャンネルに、例えば「ad7124-8:voltage0-voltage1」を選択します。「プレイ」ボタンをクリックし、測定を開始します。

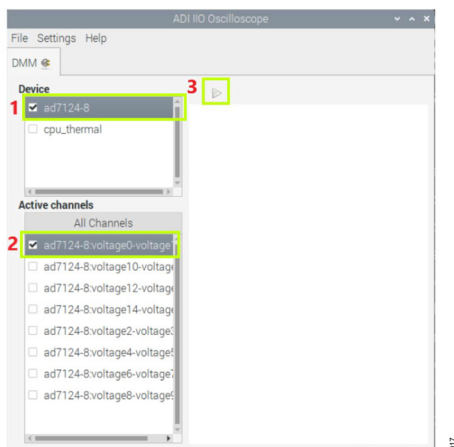


図 18. IIO Oscilloscope の[DMM]ウィンドウ

8. [Debug]ウィンドウの[Device Selection]で「Itc2688」を選択します。[IIO Device Attributes]のセクションで、「output voltage1」チャンネルを選択し、「raw 属性」を選択します。値を「32768」に設定し、「Write」をクリックします。これにより、出力電圧が、デフォルト出力レンジ 0V~5V の半分である約 2.5V に設定されます。

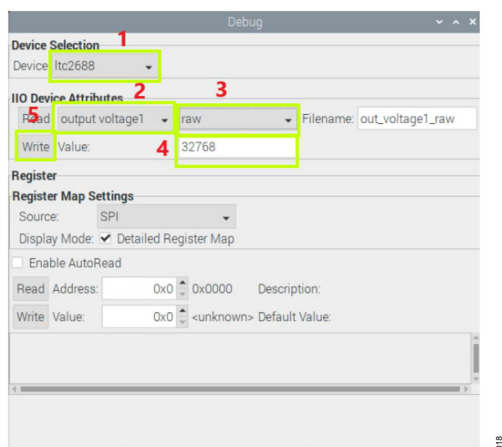


図 19. IIO Oscilloscope の[Debug]ウィンドウ

9. DMM の測定値は、デフォルトの入力電圧の減衰の結果である、おおよそ 0.227V または 2.5V の 1/11 になるはずですが。

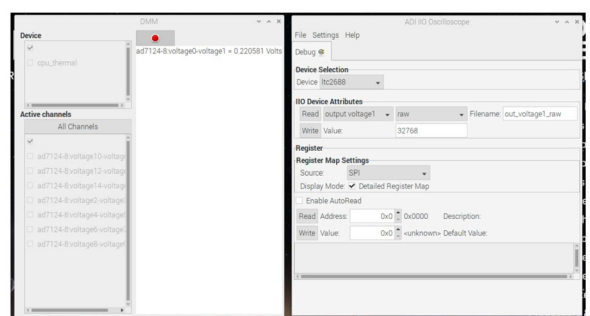


図 20. CN0554 アナログ I/O のループバック測定

## 更に詳しい資料

## CN0554 設計サポート・パッケージ

Thoren, Mark、Suteu, Cristina. 「ミックスドモード・シグナル・チェーンのノイズ解析に Python を使用する簡単な方法」、アナログ・デバイセス。

教育ビデオ: "Using Raspberry Pi with Connected Analog as Lab Instrumentation.", アナログ・デバイセス。

Fortunato, Mark. 「ミックスドシグナルチップを使用する PCB の適切なグラウンド処理 - 最小インピーダンスの経路をたどる」、maximintegrated.com.

Meneu, Jean Jacques. "Analog & Digital Grounding: Principles for Mixed-Signal Designs." Arrow.com

Deprey, Rebecca. "Using Analog Sensors with a Raspberry Pi." rebeccamdeprey.com

Introducing Raspberry Pi HATs. raspberrypi.com

## データシートと評価用ボード

LTC2688 データシート

AD7124-8 データシート

AD7124-8 評価用ボード

LT8582 データシート

LT8582 評価用ボード

LT3090 データシート

LT3090 評価用ボード

LT1790 データシート

ADR4525 データシート

LT5400 データシート

ADM7160 データシート

ADM7160 評価用ボード

## 改訂履歴

11/2022—Revision 0: Initial Version



## ESD に関する注意

ESD（静電放電）の影響を受けやすいデバイスです。電荷を帯びたデバイスや回路ボードは、検知されないまま放電することがあります。本製品は当社独自の特許技術である ESD 保護回路を内蔵してはいますが、デバイスが高エネルギーの静電放電を被った場合、損傷を生じる可能性があります。したがって、性能劣化や機能低下を防止するため、ESD に対する適切な予防措置を講じることをお勧めします。

（最初のページから続く）「Circuits from the Lab／実用回路集」はアナログ・デバイセス製品専用で作られており、アナログ・デバイセスまたはそのライセンスの供与者の知的所有物です。お客さまは製品設計で「Circuits from the Lab／実用回路集」を使用することはできますが、その回路例を利用もしくは適用したことにより、特許権またはその他の知的所有権のもとでの暗示的許可、またはその他の方法でのライセンスを許諾するものではありません。アナログ・デバイセスの提供する情報は正確でかつ信頼できるものであることを期しています。しかし、「Circuits from the Lab／実用回路集」は現状のまま、かつ商品性、非侵害性、特定目的との適合性の暗示的保証を含むがこれに限定されないいかなる種類の明示的、暗示的、法的な保証なしで供給されるものであり、アナログ・デバイセスはその利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許権もしくはその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。アナログ・デバイセスはいつでも予告なく「Circuits from the Lab／実用回路集」を変更する権利を留保しますが、それを行う義務はありません。商標および登録商標は各社の所有に属します。



©2022-2022 Analog Devices, Inc. All rights reserved. 商標および登録商標は各社の所有に属します。

本 社／〒105-6891 東京都港区海岸 1-16-1 ニューピア竹芝サウスタワービル 10F  
電話 03 (5402) 8200

大 阪営業所／〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36 新大阪トラストタワー 10F  
電話 06 (6350) 6868

名古屋営業所／〒451-6038 愛知県名古屋市中区牛島町 6-1 名古屋ルーセントタワー 38F  
電話 052 (569) 6300

Rev. 0 | 8 of 8