

この製品の回路ノートに(CN-0411)間違いがありましたので、お詫びして訂正いたします。
この正誤表は、2019年3月26日現在、アナログ・デバイセズ株式会社で確認した誤りを記したものです。

なお、英語のデータシート改版時に、これらの誤りが訂正される場合があります。

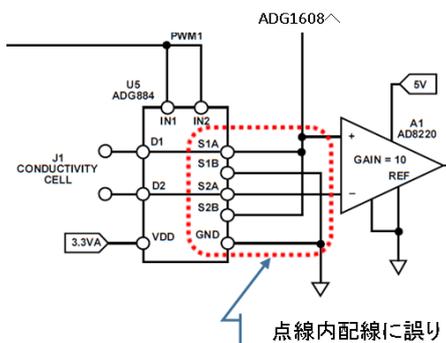
正誤表作成年月日：2019年3月26日

製品名：CN-0411 (回路ノート)

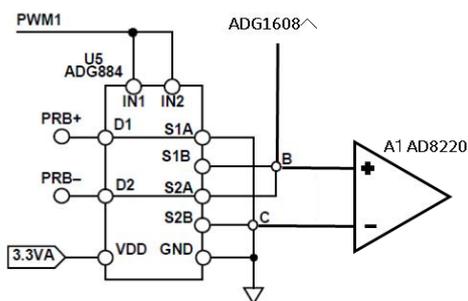
対象となるデータシートのリビジョン(Rev)：Rev.0

訂正箇所①：2ページ 回路図 U5 (ADG884) 周辺配線図

【誤】



【正】



アナログ・デバイセズ株式会社

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	愛知県名古屋市西区牛島町 6-1 名古 屋ルーセントタワー 40F 電話 052 (569) 6300

訂正箇所② : 5 ページ Fig9 タイミング・ダイアグラム

【誤】

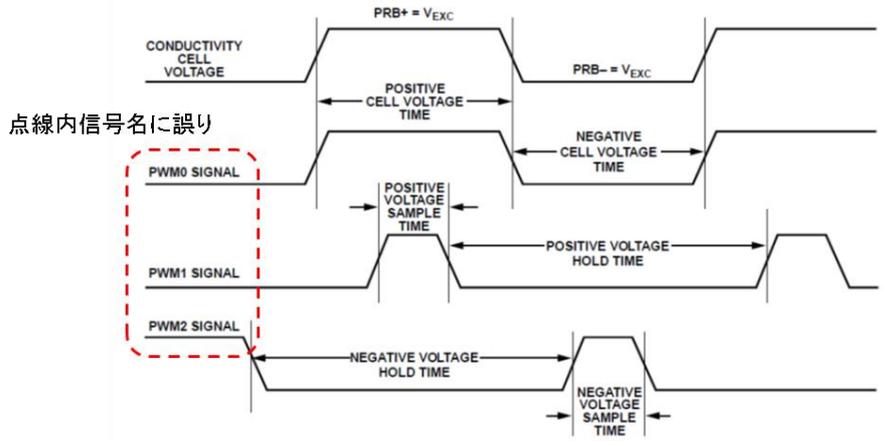


Figure 9. Conductivity Cell Voltage and PWM Signals Switching Diagram

【正】

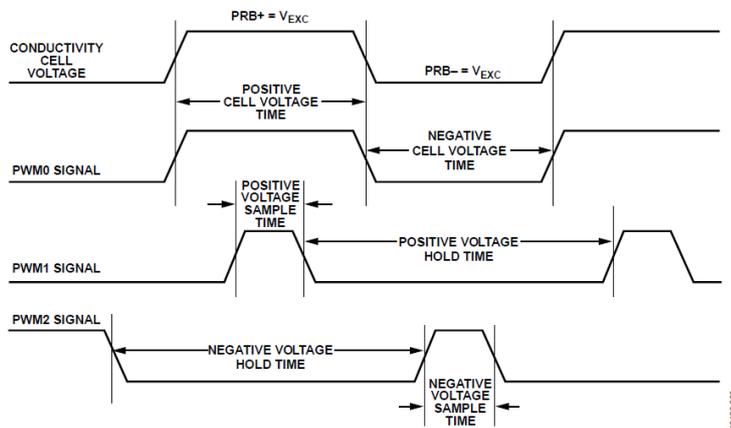


Figure 9. Conductivity Cell Voltage and PWM Signals Switching Diagram

アナログ・デバイセズ株式会社

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 愛知県名古屋市西区牛島町 6-1 名古
 屋ルーセントタワー 40F
 電話 052 (569) 6300

接続または参考にしたデバイス

AD7124-8	A/D コンバータ、24 ビット、8 チャンネル、低ノイズ、低消費電力、 Σ - Δ 型、PGA / リファレンス内蔵
AD8628	オペアンプ、ゼロ・ドリフト、単電源動作、レール to レール入出力
ADG836	マルチプレクサ、デュアル SPDT/2:1、0.5 Ω 、CMOS、1.65~3.6V
AD8220	計装用アンプ、JFET 入力、レール to レール出力
ADG884	2:1 MUX/SPDT スイッチ、デュアル、0.5 Ω 、オーディオ向け、CMOS
ADG1608	マルチプレクサ、8 チャンネル、オン抵抗 4.5 Ω 、 $\pm 5V$ / $+12V$ / $+5V$ / $+3.3V$
AD5683R	D/A コンバータ、16 ビット、 ± 2 (16 ビット) LSB の INL 性能、2ppm/ $^{\circ}C$ のリファレンス内蔵、超小型、SPI インターフェース、nanoDAC+

Circuits from the Lab™ Reference Circuits 実用回路集

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 <http://www.analog.com/jp/CN0411> をご覧ください。

水質モニタリングのための TDS 測定システム

評価と設計支援

回路評価用ボード

CN-0411 回路評価用ボード (EVAL-CN0411-ARDZ)

ADICUP360 開発ボード (EVAL-ADICUP360)

設計および統合ファイル

回路図、レイアウト・ファイル、部品表、ソフトウェア

回路の機能とその利点

水システムに存在する総溶解固形分 (TDS) は、水溶性の無機塩と少量の有機物質からなり、水質の重要な指標です。TDS は、イオンの性質、温度、数などに依存した要因で決まる、溶液の電気伝導度 (導電率) から導くことができます。正確さでは重量法が勝りますが、溶液の導電率測定は、低コストで素早く容易にシステムの TDS を決めることができます。前者では、水を蒸発させ、残留物の重量を計測します。これは実験室の設備では可能ですが、現場では実用的ではありません。

図 1 に示す回路は、溶液の導電率に基づく TDS 測定システムです。この設計は、単電源動作が可能な部品を組み合わせることで回路の複雑さを最小限に抑えており、低消費電力の携帯型計測器アプリケーションに最適なものとなっています。

溶液の導電率測定を最も簡単に行う方法は、2 線式導電率セルです。導電率測定では、25 $^{\circ}C$ (または他のリファレンス温度) 以外の温度で測定した場合、温度補償が必要です。このシステムは、100 Ω または 1000 Ω の 2 線式測温抵抗体 (RTD) を使用し、室温を基準として導電率測定を行うことができ、また、様々なセル定数と動作パラメータの 2 線式導電率セルに適応できます。

導電率セルの電極に容量効果と分極効果があるため、励起信号は、分極効果を抑制できるだけの高周波でありながら、容量効果を抑制できるだけの長周期の両極性矩形波であることが必要です。導電性電極の損傷を防ぐため、信号の DC オフセットと振幅はゼロに近いくらい非常に小さいことが必要です。

この回路は、1 μS ~0.1S の範囲の導電率を測定できます。マルチプレクサが様々な値の 7 個の高精度抵抗を切り替え、導電率プローブの信号を測定する際のゲインを設定します。このシステムは、ソフトウェアに実装された自動範囲設定プロシージャによって、導電率測定のゲイン設定を自動で決定することができます。更に、このシステムは、高導電率の範囲で補正することで、精度を向上させることもできます。

アナログ・デバイセズ社は、提供する情報が正確で信頼できるものであることを期していますが、その情報の利用に関して、あるいは利用によって生じる第三者の特許やその他の権利の侵害に関して一切の責任を負いません。また、アナログ・デバイセズ社の特許または特許の権利の使用を明示的または暗示的に許諾するものでもありません。仕様は、予告なく変更される場合があります。本紙記載の商標および登録商標は、それぞれの所有者の財産です。※日本語版資料は REVISION が古い場合があります。最新の内容については、英語版をご参照ください。

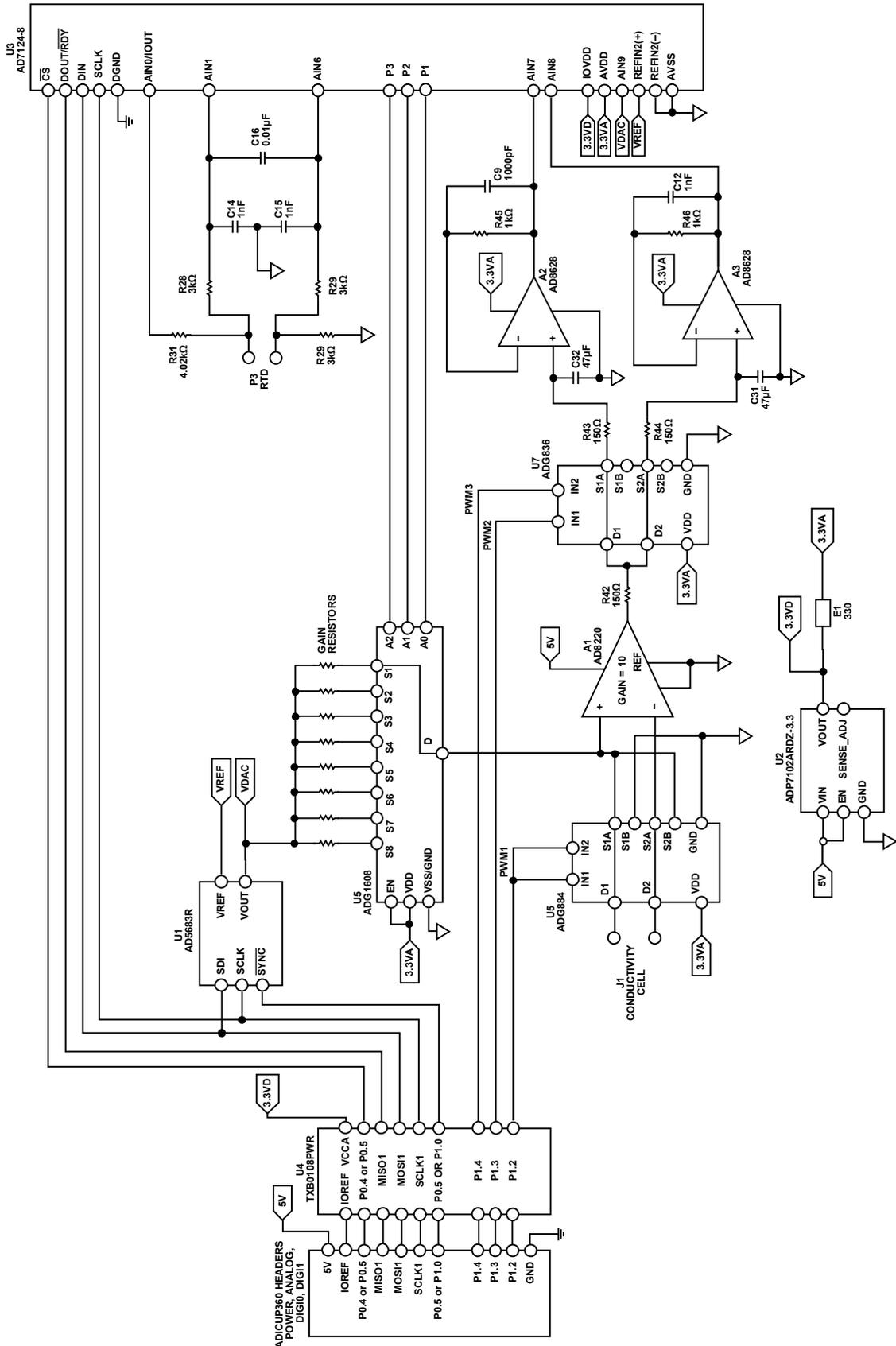


図 1. 総溶解固形分測定システムの簡略化回路図

回路の説明

導電率と総溶解固形分（TDS）の理論

溶液中の TDS は主に無機塩で構成されており、この無機塩は水などの極性溶媒が存在する場合にイオンに分離します。2つの電極を通じて電位が溶液に印加されると、イオンの移動により電流が生じます。この電流は電気分解が無視できる場合、オームの法則に従います。従って、溶液の抵抗 R は、式 1 で計算できます。

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho L}{A} \quad (1)$$

ここで、
 V は 2つの電極に印加された電位差、
 I は 2つの電極間を流れる電流の測定値、
 ρ は $\Omega \text{ cm}$ を単位とする物質の抵抗率、
 L は 2つの電極間の距離、
 A は電極の面積です。

コンダクタンス G は抵抗の逆数でジーメンズ (S) を単位として測定され、導電率 Y は抵抗率の逆数で、S/cm、mS/cm、または $\mu\text{S/cm}$ を単位として測定されます。式 1 を変形して、2電極間の電位差とこの電極を流れる電流からコンダクタンスを求めることができます。導電率は、電極配置に関連する係数をコンダクタンスに乗じた値です (式 2 参照)。

$$Y = \frac{L}{A} \times G, G = \frac{I}{V} \quad (2)$$

通常、導電率は、導電率プローブまたは導電率セルと呼ばれる 2電極センサーを使用して測定します。図 2 に示すように、導電率セルを溶液に浸し、励起電圧をこのセルに印加します。

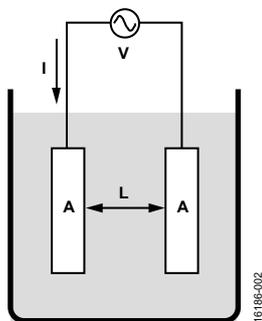


図 2. 溶液中に配置された導電率セル

導電率セル定数、あるいは単にセル定数、 K_{CELL} は、2つの電極間の距離と各電極面積との比で、これを用いて式 2 は式 3 のようにまとめられます。セル定数の単位は cm^{-1} ですが、導電率プローブのメーカーはこの単位を省略する場合があります。

$$Y = K_{\text{CELL}} \times G \quad (3)$$

通常の測定システムでは、電流と電圧の測定値からコンダクタンスを計算します。導電率の値の範囲は非常に広いので、通常の測定器では、極端な値 ($1\mu\text{S}$ 以下や 0.1S 以上など) を持つコンダクタンスの測定が困難な場合があります。適切なセル定数の導電率セルを選択することで、導電率測定の範囲を広げることができます。 $0.1\mu\text{S/cm}$ 未満の導電率は、セル定数の小さい導電率セルを使用すれば、低いコンダクタンスで測定できます。

これに対して、 0.1S/cm を超える導電率は、セル定数の大きい導電率セルを使用すれば、高いコンダクタンスで測定できます。代表的なセル定数とこれに対応する導電率測定値の範囲を表 1 に示します。

表 1. 導電率セル定数と導電率範囲

Cell Constant	Range of Measured Conductivity
0.01	< $0.1 \mu\text{S/cm}$
0.1	$0.1 \mu\text{S/cm}$ to $100 \mu\text{S/cm}$
1	$100 \mu\text{S/cm}$ to 10mS/cm
10	10mS/cm to 1S/cm

各導電率セルには定格励起電圧があり、電極を損傷しないよう、この値を超えてはいけません。いずれの電極にも DC 電圧は印加しないでください。

誘電特性

溶液の分極と誘電特性は、主として、導電率セルで測定される電圧信号と電流の精度に影響します。分極は、電極表面の近くで発生するイオンの蓄積と化学反応によって生じます。溶液の誘電特性は、周波数に依存するインピーダンスと電極間容量に影響します。コンダクタンスの測定精度を最大化するために使用する手法の 1 つは、両極性パルス励起を用いるものです。励起電圧 $+V_{\text{EXC}}$ が時間 t_1 の間印加され、次に逆の励起電圧 $-V_{\text{EXC}}$ が時間 t_2 の間印加されます。更に、 t_1 と t_2 、 $+V_{\text{EXC}}$ と $-V_{\text{EXC}}$ は共に、1%以内の誤差で等しい長さおよび大きさである必要があります。信号の周波数 $(t_1 + t_2)^{-1}$ は、コンダクタンス測定範囲になるよう調整する必要があります。通常、 μS の範囲では 94Hz に、mS の範囲では 2.4kHz にします。これらの周波数は、電極間容量の効果を抑制し、同時に電極表面のイオン蓄積も防止するものです。

導電率測定

導電率測定のフロントエンドは、図 3 に示すような分圧器ネットワークに簡略化できます。

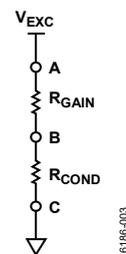


図 3. 2個の直列抵抗で簡略化した導電率回路図

R_{COND} で簡略化された導電率セルと溶液の電圧と電流の大きさは、 R_{GAIN} で設定されます。ノード B とノード C は定期的に切り替わり、 R_{COND} の両端に両極性矩形波を発生させます。ノード A で、マルチプレクサが様々なゲイン抵抗を切り替えます。

ノード A で分圧器に印加される励起電圧は、16 ビット SPI 電圧 D/A コンバータ (DAC) の **AD5683R** を使用して生成されます。これによって、分圧器に印加する矩形波信号の大きさは、ユーザ設定が可能となります。プローブの定格を超えない範囲で信号が最大となるよう励起電圧を選択します。ソフトウェアのデフォルトでは、0.4V の励起電圧を印加します。また、AD5683R は、デフォルトでシステムに 2.5V のリファレンス電圧を供給します。ただし、外部リファレンス電圧を使用するよう設定することも可能です。

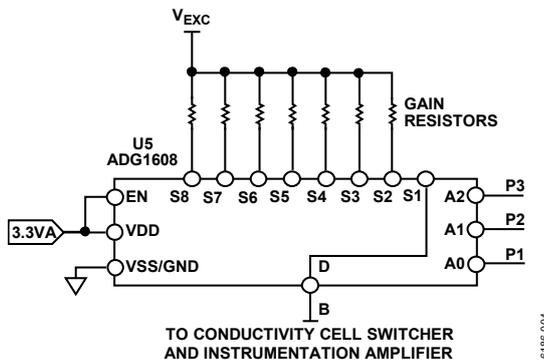


図 4. ゲイン抵抗のマルチプレクス

図 4 にゲイン設定用の抵抗とスイッチを示します。ここで、 $R_1 = 20\Omega$ 、 $R_2 = 200\Omega$ 、 $R_3 = 2k\Omega$ 、 $R_4 = 20k\Omega$ 、 $R_5 = 200k\Omega$ 、 $R_6 = 2M\Omega$ 、 $R_7 = 20M\Omega$ で、P1、P2、P3 は、**AD7124-8** の GPIO 出力です。

この回路は $1\mu S \sim 1S$ の範囲のコンダクタンスに対応します。導電率セルの分圧器は、図 4 に示すように、**ADG1608** を使用して 7 個のゲイン抵抗を切り替えることで、これらの範囲を適切な尺度で測定します。**ADG1608** は、5V 単電源動作時に 12.5Ω (代表値) のオン抵抗を持つ、8 チャンネルのマルチプレクサです。導電率測定が 20Ω と 200Ω のレンジで行われる場合、このオン抵抗は無視できない大きさです。 20Ω の抵抗に接続する **ADG1608** のピン S2 と 200Ω に接続するピン S3 は、A/D コンバータ (ADC) の 2 つの入力チャンネルにも接続されています。システムは、 20Ω と 200Ω のレンジでの測定誤差に対して初期キャリブレーションを実行するようにも設定可能です。 20Ω と 200Ω の高精度抵抗に接続される 3 オプション (6 ピン) のジャンパ選択ヘッダ (P5) を、図 5 に示します。ピン 1 とピン 2 を短絡させると、システムが導電率セルに印加される信号を測定するよう設定され、ピン 3 とピン 4 またはピン 5 とピン 6 を短絡させると、システムが高精度抵抗に印加される信号を測定するよう設定されます。

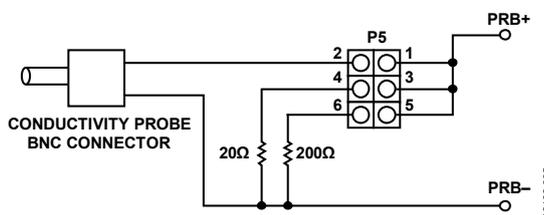


図 5. 導電率セルの接続

図 6 に示すように、**ADG884** を使用して、セルに両極性信号が加わるよう導電率セルが切り替えられます。**ADG884** のオン抵抗は 0.5Ω (代表値) で、3.3V 単電源で動作します。切替えはマイクロコントローラ・ボードの PWM 信号で制御されます。この信号の周波数は、低導電率測定では 94Hz、高導電率測定では 2.4kHz となるよう、ユーザ設定が可能です。

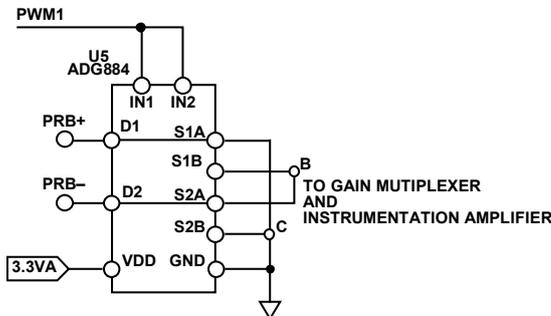


図 6. **ADG884** を使用して導電率セルの両極性パルスを実行する導電率セル・スイッチャ

導電率セルに印加される信号は、図 7 に示すように、最大 0.25V の入力信号に対し 5V 単電源で動作する低入力バイアス電流計装アンプ、**AD8220** を使用して、10 倍のゲインで増幅されます。ユーザ設定可能なジャンパ・セレクト P6 もあり、システム・ゼロスケール・キャリブレーションが可能です。

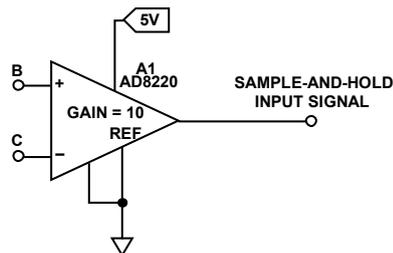


図 7. **AD8220** 計装アンプ

この計装アンプの出力は 2 つの並列なサンプル&ホールド回路に入力されます。図 8 に示すように、**AD8220** の出力のサンプリングは、チャージ・インジェクションが低く最大 2.5V の入力信号に対し 3.3V 単電源で動作する、デュアル SPDT スwitch の **ADG836** によって制御されます。

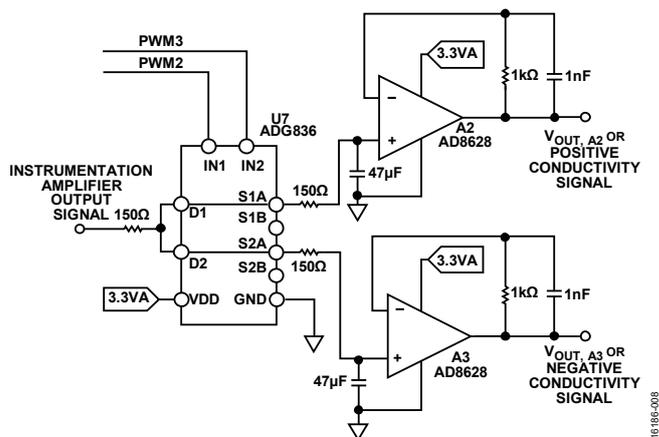


図 8. **ADG836** と **AD8628** を使用するサンプル&ホールド設計

このスイッチは、メインの PWM1 の正と負のサイクルの中間で PWM1 と PWM2 を使用する、2 つの並列のサンプル&ホールド回路に接続されます。3 つの PWM 信号と導電率セル電圧のスイッチング図を図 9 に示します。

このサンプリング手法によって、PWM1 の信号状態の変化が開始する時に発生する電極の容量による影響と、各状態が終了する時に発生する電極の分極による影響が抑制されます。これによって、サンプル&ホールド回路の出力は、導電率セルの正負それぞれの電圧の 10 倍に相当する 2 つの DC レベルとなります。

スイッチングによる最大のチャージ・インジェクションは 40pC で、これにより $40\text{pC} \div 47\mu\text{F} \approx 851\text{nV}$ の誤差が生じます。最も厳しいケースの電圧降下は、低周波数スイッチングの周期の 2 分の 1 とドループ・レートとの積で、このドループ・レートは、ADG836 の最も厳しいケースのリーク電流と AD8628 の最も厳しいケースのバイアス電流を保持容量で割ったものです。式 4 に示すように、この電圧降下は理論的には 23nV となります。

$$V_{\text{DROP}} = \frac{(0.2\text{nA}) \times (5.32\text{ms})}{47\mu\text{F}} \approx 23\text{nV} \quad (4)$$

A2 と A3 の AD8628 バッファ・アンプの出力は、シングルエンド ADC の AD7124-8 の入力チャンネル、AIN7 および AIN8 にそれぞれ印加されます。これらの入力チャンネルは、デフォルトで AD5683 のリファレンス電圧を参照します。AD7124-8 は、単一サンプリングを行うか連続サンプリングを行うかをユーザが設定できます。更に、ユーザ設定により、P5 の選択可能な高精度抵抗を使用してシステム・ゼロスケール・キャリブレーションを実行することや、20Ω や 200Ω のゲイン抵抗からの入力チャンネルを使用してマルチプレクサのオン抵抗を読み出すことも、可能です。

正負の出力電圧は、式 5 を用いて、24 ビット・ユニポーラ ADC のコードから計算できます。

$$V_{\text{OUT,A2 or A3}} = \frac{\text{ADC}_{\text{CODE}} \times V_{\text{REF}}}{10 \times (2^{24} - 1)} \quad (5)$$

ここで、 ADC_{CODE} は、信号サンプリングの 24 ビット・ユニポーラ・コード、 V_{REF} はデフォルトの 2.5V です。

式 6 は、AD8628 の出力電圧から導電率セルのピーク to ピーク電圧を求めるための計算式です。

$$V_{\text{COND,PP}} = 0.1 \times V_{\text{OUT,A2}} + 0.1 \times V_{\text{OUT,A3}} \quad (6)$$

導電率セルを流れる電流は、ピーク to ピークのセル電圧、ゲイン抵抗、励起電圧すなわち DAC 電圧を用いて、式 7 で計算できます。

$$I_{\text{COND,PP}} = \frac{2 \times V_{\text{DAC}} - V_{\text{COND,PP}}}{R_{\text{GAIN}}} \quad (7)$$

溶液の導電率 Y_{SOL} は式 8 で与えられます。

$$Y_{\text{SOL}} = K_{\text{CELL}} \times \frac{I_{\text{COND,PP}}}{V_{\text{COND,PP}}} \quad (8)$$

ここで、 K_{CELL} は導電率セル定数です。

式 6 と式 7 を式 8 に代入して、次式が得られます。

$$Y_{\text{SOL}} = K_{\text{CELL}} \times \frac{1}{R_{\text{GAIN}}} \times \left(\frac{2 \times V_{\text{DAC}}}{0.1 \times (V_{\text{OUT,A2}} + V_{\text{OUT,A3}})} - 1 \right) \quad (9)$$

式 9 は、導電率セル定数、励起電圧、使用するゲイン抵抗、各サンプル&ホールド・チャンネルの 2 つの電圧出力の和によって、導電率の測定値が決まることを示しています。

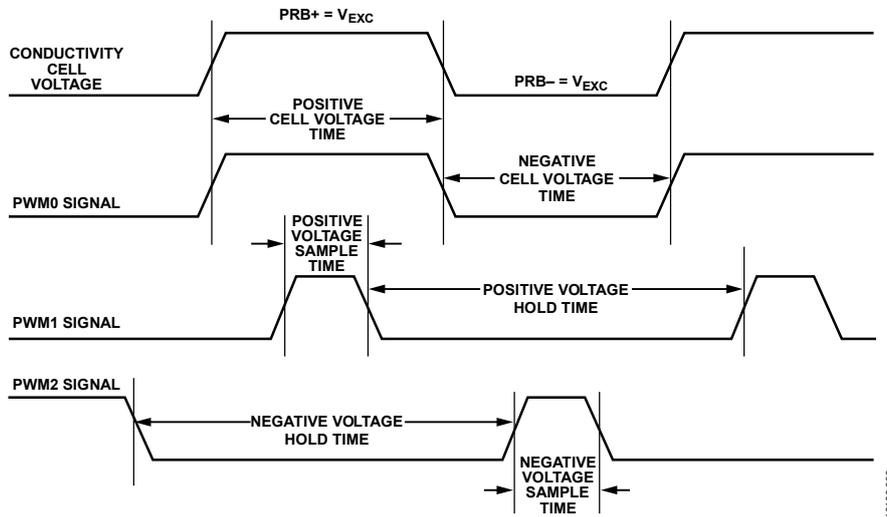


図 9. 導電率セル電圧と PWM 信号のスイッチング図

温度補償

導電率測定は温度にも依存し、コンダクタンスは温度上昇と共に増加します。市販のほとんどの導電率プローブは RTD を内蔵しており、温度補償が容易になっています。

導電率測定値を標準のリファレンス温度に補償する代表的な方法は、式 10 に示すように、温度係数 α に依存する線形関数を使用するもので、この方法は、溶液中のイオン種に基づきます。通常、リファレンス温度は 25°C に設定されます。

$$Y_{REF} = \frac{Y}{1 + \alpha(T - T_{REF})} \quad (10)$$

ここで、

Y_{REF} は T_{REF} を基準とする導電率、

Y は温度 T での導電率、

T_{REF} はリファレンス温度、

T は溶液の温度、

α は温度係数です。

一般的な塩溶液の α の代表値を表 2 に示します。

表 2. 一般的な塩溶液の温度係数

Salt Solution	Temperature Coefficient (α)
Potassium Chloride (KCl)	1.88
Sodium Chloride (NaCl)	2.14

mg/L を単位とする溶液の TDS は、式 11 を用いてリファレンスを基準とした導電率測定から計算できます。

$$TDS = k_e \times Y_{REF} \quad (11)$$

ここで k_e は TDS の係数です。

この TDS 係数は、式 12 に示すように、TDS が既知の溶液の導電率を、リファレンスを基準として測定することで計算できます。

$$k_e = \frac{TDS_{REF,STD}}{Y_{REF,STD}} \quad (12)$$

ここで、

$TDS_{REF,STD}$ は T_{REF} における溶液の既知の TDS 値、

$Y_{REF,STD}$ は T_{REF} における溶液の導電率の測定値です。

導電率の測定では、イオンの組成や個々の種類を識別することはできません。従って、TDS の係数は、溶液の種類による固有の範囲で変動します。一般的な塩溶液について、TDS 係数の代表的な範囲を表 3 に示します。

表 3. 一般的な塩溶液の TDS 係数

Salt Solution	Range of TDS Factor (k_e)
Potassium Chloride (KCl)	0.50 to 0.57
Sodium Chloride (NaCl)	0.47 to 0.50

温度測定

導電率は溶液の温度に応じて著しく変動し、また、温度係数も溶液の種類によって大きく異なります。溶液の温度測定を最も簡単に行う方法は、2 線式 RTD です。図 10 に、このフロントエンドの簡略化した回路図を示します。

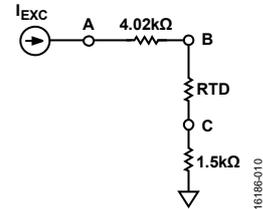


図 10.2 線式 RTD の簡略化した回路図

AD7124-8 には、ソフトウェア設定可能な 2 個の整合された定電流源があります。この電流源は 8 通りの電流出力値が選択可能で、いずれのアナログ入力チャンネルにも使用可能です。RTD 抵抗ネットワークの励起電流は 250μA に設定され、AIN0 チャンネルから供給されます。ノード A とノード B は AD7124-8 の外部リファレンス入力に接続されます。ノード B とノード C は差動 RTD 信号を構成し、AD7124-8 のアナログ入力チャンネルに接続されていることに注意してください。両差動入力は、図 11 に示すように、一般的な 2 個の同一の RC ローパス・フィルタに送られます。

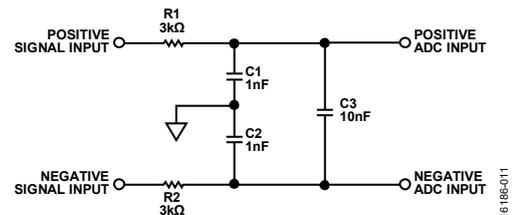


図 11. 差動入力用の一般的な RC ローパス・フィルタ

このローパス・フィルタ回路によって、差動とコモンモードの両方のノイズ信号を減衰できます。図 11 に示す大きな値の R_1 と R_2 も、30V の誤配線からの保護に有効です。C1 と C2 は、コモンモード・コンデンサで、差動モード・コンデンサ C3 の 10 分の 1 に設定されています。これはコモンモード・コンデンサ間の不整合によるノイズの影響を削減します。コモンモード・カットオフ周波数 (f_{CM}) は、差動モード・カットオフ周波数 (f_{DM}) のおよそ 20 倍の大きさで、それぞれ 53kHz と 2.5kHz です。計算式を式 13 に示します。

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}; \text{ for } R_1 = R_2 \text{ and } C_1 = C_2$$

$$f_{DM} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_2)\left(C_3 + \frac{C_1 \text{ or } C_2}{2}\right)}; \text{ for } C_1 = C_2 \quad (13)$$

ここで、

f_{CM} はコモンモード・カットオフ周波数、

f_{DM} は差動モード・カットオフ周波数です。

RTDの全抵抗値は4.02kΩを基準とするかこれを上限とし、リファレンス電圧は $250\mu\text{A} \times 4.02\text{k}\Omega = 1.005\text{V}$ となります。更に、システムはPt100 RTDとPt1000 RTDの両方に対応します。RTDの抵抗値 (R_{RTD}) は、式14を用いて、24ビット・ユニポーラADCのコードから計算できます。

$$R_{RTD} = \frac{ADC_{CODE} \times R_{REF}}{2^{24} - 1} \quad (14)$$

ここで、 ADC_{CODE} は、信号サンプリングの24ビット・ユニポーラ・コード、 R_{REF} はリファレンス抵抗で、 $R_{REF} = 4.02\text{k}\Omega$ です。

RTDの抵抗と温度の関係を求めるには、Callendar-Van Dusenの式を用います。温度が 0°C 以上または抵抗が R_0 以上の場合、摂氏単位の温度は、Callendar-Van Dusenの式から直接導かれる式15で計算できます。

$$T_{RTD} = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_{RTD}}{R_0}\right)}}{2B} \quad (15)$$

ここで、

$$A = 3.9083 \times 10^{-3},$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7},$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12},$$

R_0 は 0°C でのRTDの抵抗、

R_{RTD} は T_{RTD} でのRTDの抵抗、

T_{RTD} は摂氏単位の温度です。

0°C 未満の温度または R_0 未満の抵抗の場合は、式16に示す最適近似多項式を使用します。

$$T_{RTD} = C_1 + C_2 R_{RTD} + C_3 R_{RTD}^2 + C_4 R_{RTD}^3 + C_5 R_{RTD}^4 + C_6 R_{RTD}^5 \quad (16)$$

ここで、

$$C_1 = -242.02,$$

$$C_2 = 2.2228,$$

$$C_3 = 2.589 \times 10^{-3},$$

$$C_4 = 48.26 \times 10^{-3},$$

$$C_5 = 1.5243 \times 10^{-10},$$

R_{RTD} は T_{RTD} でのRTD抵抗、

T_{RTD} は摂氏単位の温度です。

ソフトウェア操作の設定

提供されるソフトウェアでは、TDS測定用に次の6個のパラメータを設定します。

- 導電率セルの励起電圧
- マルチプレクサが選択するゲイン抵抗
- 使用するRTDの値
- 導電率セルのスイッチング周波数
- 導電率プローブのセル定数
- 測定対象の溶液の種類

DACの電圧は $0\text{V} \sim 2.5\text{V}$ の任意の値に設定できます。起動時はDACの電圧は 400mV に設定されます。

選択するゲイン抵抗は、オープンまたは、 20Ω 、 200Ω 、 $2\text{k}\Omega$ 、 $20\text{k}\Omega$ 、 $200\text{k}\Omega$ 、 $2\text{M}\Omega$ 、 $20\text{M}\Omega$ の7通りの抵抗値のいずれかに設定できます。初期値として、ゲイン抵抗はオープンに設定されます。

使用するRTDの種類は、Pt100またはPt1000のいずれかに設定できます。初期値として、温度測定に使用するRTDの種類はPt100に設定されます。

PWM信号の周波数で、導電率セルに印加される両極性パルスの周波数が設定されます。ソフトウェアでは、 94Hz および 2.4kHz の2通りのPWM周波数オプション切替えだけができます。初期値として、PWM周波数は 94Hz に設定されます。

導電率プローブのセル定数には、0.1、1.0、10の3通りの固定オプションがあります。4番目のオプションでは、セル定数が0.1、1.0、10以外のプローブ用にユーザがカスタマイズした値を入力できます。デフォルトでは、セル定数は1.0に設定されています。

溶液の種類によって、TDSと温度補償を計算するために使用するTDS係数と温度係数が決まります。ソフトウェアに組み込まれているのは、塩化ナトリウム (NaCl) と塩化カリウム (KCl) の溶液用の設定だけです。ただし、ユーザは、その他の溶液のために、TDS係数と温度係数のカスタム値を別個に設定できます。初期値として、溶液の種類はNaClに設定されています。

これらのパラメータ以外に、ソフトウェアによって、単一変換モードのADCで測定するか、連続変換モードのADCで測定するかを切り替えることもできます。単一変換モードでは、導電率の読出しコマンドが発行されない場合、常にADCはアイドル・モードに入ります。このため、アクティブでない場合にボードの消費電力を抑えることができます。更に、この間DACの電圧値をゼロに設定可能で、ボードの消費電力を一層抑制できます。連続変換モードでは、ADCは常に導電率セル信号をサンプリングします。このため、各サンプリングの測定時間が短縮でき、溶液の導電率を連続的にモニタリングする場合に効果を発揮します。

導電率測定レンジの自動設定

目的の溶液タイプと使用する導電率プローブに対し、導電率測定レンジの広がりによって複数のゲイン抵抗の設定が必要となります。更に、励起電圧が導電率セルの定格電圧を超えることがないように、励起電圧値をゲイン抵抗に応じて変化させる必要があります。ソフトウェアには、ゲイン抵抗と励起電圧を自動的に溶液の導電率の範囲に設定する機能があります。これによって確実に、最も信頼し得る設定で導電率が測定できます。図 12 に、導電率測定レンジの自動設定の概要を示します。

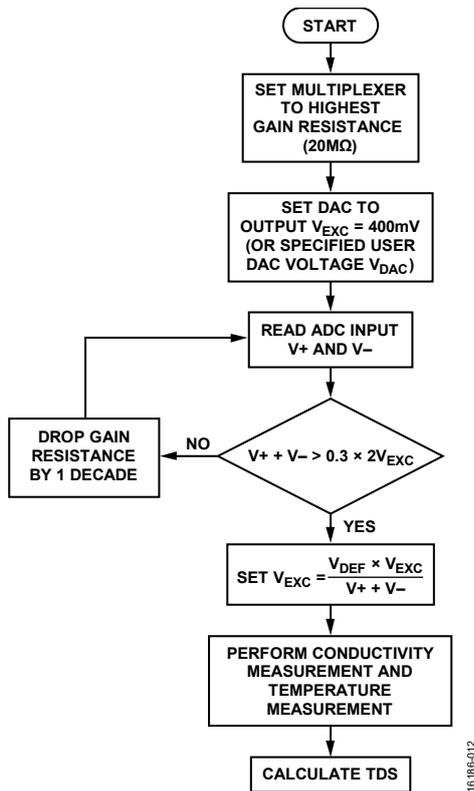


図 12. 導電率測定レンジの自動設定フローチャート

キャリブレーションの手順

このシステムでは、ゼロ・スケール・キャリブレーションとリファレンスの高精度抵抗を使用する方法の 2 通りのキャリブレーション方法があります。図 15 に示す測定値を得るために使用したキャリブレーション方法では、リファレンスの高精度抵抗を使用しており、これは図 5 に示した 20Ω または 200Ω の抵抗です。マルチプレクサのオン抵抗が導電率測定に著しい影響を及ぼすのは、これらの抵抗レンジです。このキャリブレーションの出力は、オフセット抵抗値で、これが導電率の計算に使用するゲイン抵抗に加算されます。このキャリブレーションを実行する手順を図 13 に示します。

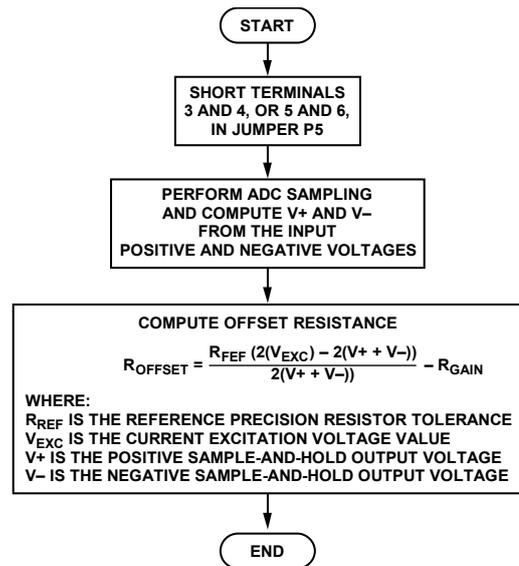


図 13. リファレンス抵抗を使用するキャリブレーション手順のフローチャート

ゼロ・スケール・キャリブレーションでは、サンプル&ホールド回路の出力バイアス電圧を除去する、AD7124-8 のゼロ・スケール・キャリブレーションを実行します。これによって、確実に導電率セルへのゼロ入力がある ADC のゼロ・コードに対応するようになります。CN-0411 ボードのジャンパ・ヘッダ P6 の Pin2 と Pin3 にジャンパを設置します。AD7124-8 には、導電率信号の正負両電圧についてシステム・ゼロスケール・キャリブレーションを実行するようコマンドが送られます。これによって、ADC のオフセット・レジスタにゼロ入力電圧レベルが保存され、サンプリングの読み出しごとに自動的に補正されます。

これら 2 つのキャリブレーション方法を実行する必要があるのは、どちらも各ボードについて一度だけです。ソフトウェアがキャリブレーション手順の出力を保存するためです。

システムの精度

式 9 から、導電率の計算は、サンプル&ホールド回路の 2 つの出力電圧、R_{GAIN}、DAC の出力電圧によって決まることが分かります。MΩ 未満のレンジの R_{GAIN} の許容誤差は 0.1% ですが、2MΩ と 20MΩ の抵抗の許容誤差は 1% です。図 3 に示す単純な分圧器ネットワークの抵抗に、マルチプレクサ ADG1608 と導電率セル・スイッチ ADG884 のオン抵抗が加わります。これらは、それぞれ最大で 17.4Ω と 0.96Ω です。計装アンプからの入力バイアス電流と入力オフセット電流によって、ゲイン抵抗と溶液の抵抗に比例する電圧が生じます。B グレードの AD8220 には、各入力に対し最大 10pA の入力バイアス電流と 0.6pA の最大入力オフセット電流があり、合計の入力バイアス電流は 20.6pA になります。20MΩ の場合、これによって入力バイアス電圧は、20.6pA × 20MΩ = 412μV になります。更に、ゲインが 10 の AD8220 には、最大 0.2% のゲイン誤差があります。既知の高精度抵抗から直接導電率を計算するには、システムの精度を測定し、式 4 の電圧降下などのサンプル&ホールド回路で発生する要因も含め、これらの要因をすべて考慮することが必要です。

図 14 に、導電率測定の精度を測定した結果を示します。これは $1\mu\text{S}\sim 0.1\text{S}$ の導電率に対応する、 $1\text{M}\Omega\sim 10\Omega$ の高精度抵抗を使用して取得したものです。 $10\text{mS}\sim 100\text{mS}$ の範囲でシステム誤差が明らかに増加しています。この範囲では、オンボードの高精度抵抗 (図 5 参照) に対するキャリブレーション方法が必要です。

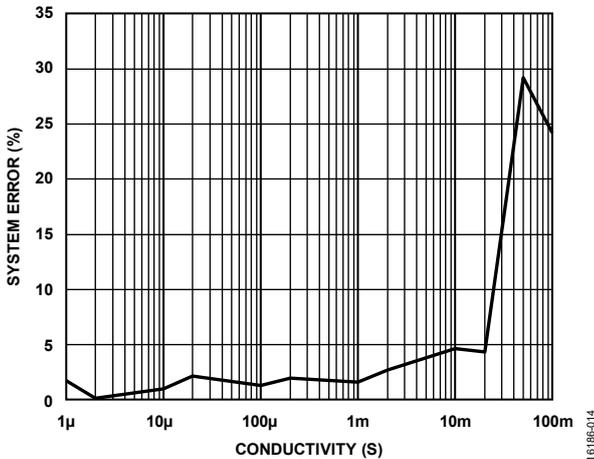


図 14. $1\mu\text{S}\sim 0.1\text{S}$ での導電率とシステム誤差 (%) の関係

キャリブレーションは各ボードで一度だけ実行され、オフセット抵抗が取得されます。これによってマルチプレクサのオン抵抗が分かれます。ソフトウェア・システムはこのオフセット抵抗値を保存し、キャリブレーションが再度実行されるまで、この後の導電率測定のすべてにおいて、この値を使用します。図 5 に示す 20Ω 高精度抵抗に対してキャリブレーションを行った場合の高導電率の誤差を、図 15 に示します。

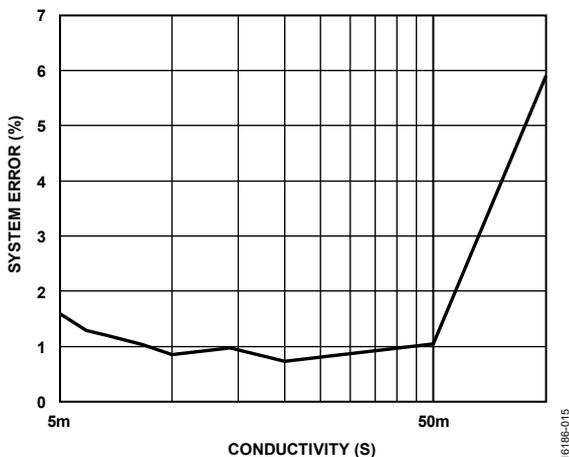


図 15. $1\text{mS}\sim 100\text{mS}$ での導電率とキャリブレーション後のシステム精度 (%) の関係

システム・ノイズ性能

図 16 に示すように、システムのノイズ・レベルは、 $100\mu\text{S}$ のコンダクタンスに対応する $10\text{k}\Omega$ 高精度抵抗に対して、わずか 15.99nS です。

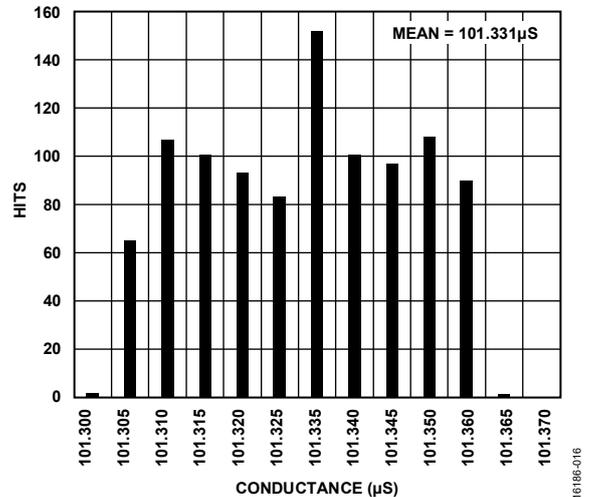


図 16. $100\mu\text{S}$ のコンダクタンスに対する CN-0411 のノイズ・レベル

バリエーション回路

ADG884 アナログ・スイッチを使用して、導電率セルの両端子を駆動する両極性励起信号をセルに供給できます。この他、セルの 1 端子をグラウンド電位に保持する方法もあります。これにより、接地された端子ではリークの影響を抑制できます。ただし、このような設計には、より複雑な励起回路が必要です。CN-0411 は、導電率セルの電圧信号だけを測定するようにすることで更に簡素化できます。セルを流れる電流を測定するためにトランスインピーダンス・アンプを使用すれば、ゲイン抵抗から電流値を計算する必要がなくなります。更に、可変ゲイン・アンプ (VGA) を使用すれば、マルチプレクサが分圧器ネットワークのゲイン抵抗を選択する必要がなくなります。CN-0359 は、より高性能な導電率測定ソリューションの一例です。

回路の評価とテスト

CN-0411 の回路セットアップは、[EVAL-CN0411-ARDZ](#) 評価用ボードと [EVAL-ADICUP360](#) ボードで構成されています。EVAL-CN0411-ARDZ は Arduino シールドのフォーム・ファクタで提供されるので、評価とプロトタイピングにピン互換の開発ボードを追加使用することが可能です。

CN-0411 デモ・ソフトウェア（詳細は CN-0411 ソフトウェア・ユーザ・ガイドを参照）を使用すれば、EVAL-ADICUP360 ボードにより EVAL-CN0411-ARDZ 評価用ボードを設定し、そこからデータを読み出すことができます。このデータは、シリアル・ポート・ターミナル・プログラムを使用して PC 上に表示することができます。

必要な装置

以下の装置類が必要になります。

- USB ポート付きで Windows® 7 (32 ビット) 以降を搭載の PC
- EVAL-CN0411-ARDZ 回路評価用ボード
- EVAL-ADICUP360 開発ボード
- CrossCore Embedded Studio
- マイクロ USB-USB 変換コネクタ
- RTD 付き 2 線式導電率セル

設計の開始にあたって

EVAL-CN0411-ARDZ の詳細なユーザ・ガイドは www.analog.com/jp/CN0411-UserGuide で入手できます。ハードウェアおよびソフトウェア動作のあらゆる細部や側面に関して、このユーザ・ガイドを参照してください。

EVAL-ADICUP360 の詳細なユーザ・ガイドも、www.analog.com/jp/EVAL-ADICUP360 で入手できます。

EVAL-ADICUP360 ボードと EVAL-CN0411-ARDZ ボードのジャンパを、CN-0411 ユーザ・ガイドに示されている位置にセットします。

CrossCore Embedded Studio と DEBUG USB 接続を使い、CN-0411 デモ・コードを EVAL-ADICUP360 ボードにダウンロードします。

コネクタを使って、EVAL-CN0411-ARDZ ボードを EVAL-ADICUP360 に接続します。導電率セルと RTD を EVAL-CN0411-ARDZ ボードに備わっている BNC コネクタや端子ブロックに接続します。

EVAL-ADICUP360 の USER USB ポートを PC に接続します。PC 上で適当なシリアル・ターミナル・ソフトウェアを起動して EVAL-ADICUP360 のシリアル・ポートに接続し、データの読み出しを開始します。

他の Arduino フォーム・ファクタ・プラットフォームも、EVAL-CN0411-ARDZ ボードのテストと評価に使用できます。ただし、ソフトウェアを新しいプロセッサやプラットフォームに移植する必要があります。

テスト・セットアップの機能ブロック図

図 17 に、EVAL-CN0411-ARDZ 回路ボードと EVAL-ADICUP360 ボードを使用した TDS と導電率の測定用テスト・セットアップの例を写真で示します。

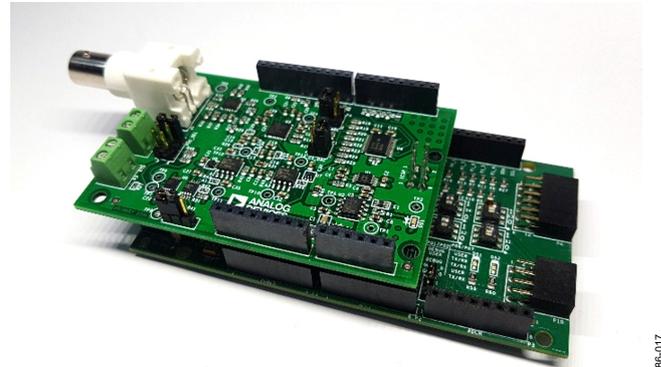


図 17. EVAL-CN0411-ARDZ と EVAL-ADICUP360 を使用した TDS と導電率の測定用テスト・セットアップ

図 18 にテスト・セットアップの機能ブロック図を示します。CN-0411 Design Support Package には、レイアウト、ガーバ・ファイル、部品表など、評価用ボードのすべての回路図が含まれています。

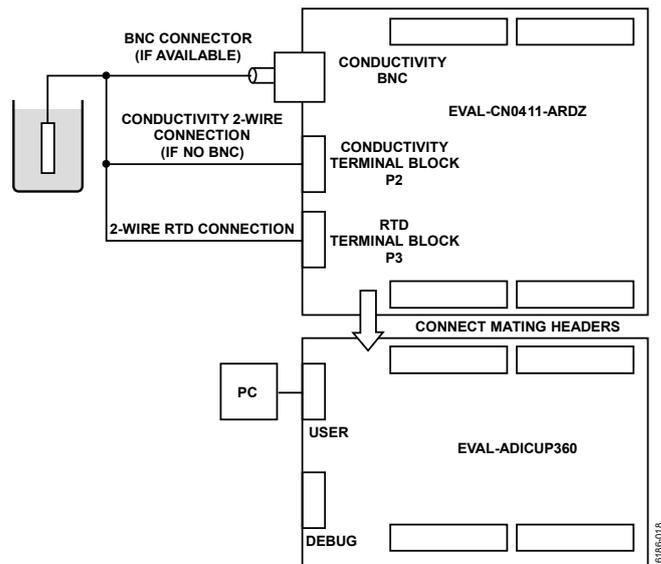


図 18. CN-0411 のテスト・セットアップ

テスト・セットアップ

溶液サンプルの導電率と TDS を測定するには、次の手順を実行します。

1. センサー・プローブを、可能ならば BNC コネクタを使用して、さもなければ端子ブロック P2 に配線して、CN-0411 システムに接続します。導電率プローブの RTD ワイヤを端子ブロック P3 に接続します。
2. プローブを、導電率セルの精度が最大となるように、できるだけ溶液サンプルの容器中央に浸します。
3. 端子ソフトウェアのシリアル・コマンドを使用して、セルの励起電圧と動作周波数を設定します。
4. 導電率プローブのセル定数を設定し、溶液の種類と ADC の変換モードを選択します。これらの設定の詳細については、CN-0411 ユーザ・ガイドを参照してください。
5. シリアル端子の指示に従い、導電率または TDS の測定を実行します。更に、いずれの測定前にもキャリブレーション・ルーチンを実行することができます。キャリブレーション手順の詳細については、CN-0411 ユーザ・ガイドを参照してください。

また、値が既知の高精度抵抗を使用すれば、導電率セルやサンプル溶液を使用しなくても、回路の性能を評価することができます。

ハードウェアとソフトウェアの動作の詳細情報は、www.analog.com/jp/CN0411-UserGuide にある CN-0411 ユーザ・ガイドで入手できます。

更に詳しい資料

CN-0411 Design Support Package:
www.analog.com/jp/CN0411-DesignSupport
EVAL-ADICUP360 User Guide.
APM Article. *ADI Water Analysis Solution for pH Meters and Conductivity Meters*. Analog Devices.
Coury, Lou Ph.D. *Conductance Measurements*. Bioanalytical Systems, Inc.
Conductivity Theory and Practice. Radiometer Analytical SAS.
Circuit Note CN-0381. *Completely Integrated 4-Wire RTD Measurement System Using a Low Power, Precision, 24-Bit, Sigma-Delta ADC*. Analog Devices.
Circuit Note CN-0359. *Fully Automatic High Performance Conductivity Measurement System*. Analog Devices.
Circuit Note CN-0349. *Fully Isolated Conductivity Measurement Data Acquisition System*. Analog Devices.

データシートと評価用ボード

CN-0411 回路評価用ボード (EVAL-CN0411-ARDZ)
EVAL-ADICUP360 開発ボード
ADuCM360 データシート
AD7124-8 データシート
AD8628 データシート
ADG836 データシート
AD8220 データシート
ADG884 データシート
ADG1608 データシート
AD5683R データシート

改訂履歴

12/2018—Revision 0: Initial Version

「Circuits from the Lab/実用回路集」はアナログ・デバイゼズ社製品専用で作られており、アナログ・デバイゼズ社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せんが、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・デバイゼズ社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・デバイゼズ社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・デバイゼズ社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。

©2019 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。