

## 5.6 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の電圧ノイズ密度を持つ最小ノイズのゼロ・ドリフト・アンプ

著者: Vicky Wong

### はじめに

センサーは一般に低い出力電圧を発生するため、高いゲインと正確な DC 性能を持つシグナル・コンディショニング回路を必要としますが、特に DC または低周波および低レベルの電圧測定では、アンプのオフセット電圧、ドリフト、1/f ノイズによる誤差が発生します。このため、オフセット電圧、ドリフトを小さくし、さらに 1/f ノイズをなくして最適なシグナル・コンディショニングを実現することが不可欠です。極めて低いオフセット電圧とドリフト、高いオープン・ループ・ゲイン、高い電源除去比、高い同相モード除去比、1/f ノイズなしを実現するようにデザインされたゼロ・ドリフト・アンプは、高精度アプリケーションのデザインで大きなメリットを提供します。

### オート・ゼロ機能対チョッピング

ゼロ・ドリフト・アンプは名前が示すように、オフセット電圧ドリフトがほぼゼロです。このアンプは DC 誤差を連続的に自己補正するため、可能な限り正確になります。ゼロ・ドリフト・アンプは、オート・ゼロ機能またはチョッピングの 2 つの技術を使ってデザインすることができます。各技術にはそれぞれ利点と欠点があるため、異なるアプリケーションで使用されます。

オート・ゼロ機能ではサンプル・アンド・ホールド技術を使うので、ベースバンドに折り返されるノイズのために帯域内電圧ノイズが増えます。これに対して、チョッピングでは信号の変調と復調を使うので、ベースバンド・ノイズは比較的小さくなりますが、チョッピング周波数とその高調波周波数でノイズ・スペクトルが発生します。このため、チョップ・アンプは DC または低周波アプリケーションに適し、オート・ゼロ・アンプは比較的帯域の広いアプリケーションに適します。

### ADA4528-1 対従来型チョップ・アンプ

従来、チョップ・アンプではベースバンド・ノイズ(表 1 参照)がかなり大きく、さらにチョッピング周波数が低かったため、用途は DC および 100 Hz 以下のアプリケーションに限定されてきました。アナログ・デバイセズは、広い有効帯域幅を持つチョップ・アンプを必要とするアプリケーション向けに、半導体業界で現在提供している最も低いノイズを持つチョップ・アンプ ADA4528-1 の提供を開始しています。ADA4528-1 では、新しいチョッピング技術(自動補正帰還ループ付き)を採用し、従来型チョップ・アンプのチョッピング周波数に比べて 5~10 倍のチョッピング周波数を使用しています。

チョッピング周波数 = 200 kHz かつ超低電圧ノイズ密度 = 5.6 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  のこのデザイン・ブレイクスルーにより、従来型チョップ・アンプが使用できなかった広帯域のアプリケーションで ADA4528-1 を使用できるようになりました。さらに、ADA4528-1 は 0.3  $\mu\text{V}$  のオフセット電圧、0.002  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  のオフセット電圧ドリフト、158 dB の同相モード除去比、150 dB の電源除去比を提供します。これらの仕様は、高ゲイン低ノイズの高精度アプリケーションで低レベル信号の増幅を必要とするアプリケーションに最適です。このようなアプリケーションとしては、高精度重量計、センサー・フロントエンド、ロード・セルとブリッジ・トランスジューサ、熱電対センサーのインターフェース、医用計装などがあります。

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、各社の所有に属します。※日本語資料は 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。

## 目次

はじめに.....	1	広帯域ノイズと外部ソース抵抗の考慮事項.....	4
オート・ゼロ機能対チョッピング.....	1	出力換算ノイズ成分の計算.....	5
ADA4528-1 対従来型チョッパ・アンプ.....	1	電圧リップル.....	6
改訂履歴.....	2	計装アンプとしてのADA4528-1.....	7
ADA4528-1 チョッパのアーキテクチャ.....	3	結論.....	8
ノイズ特性.....	4		
1/fノイズ.....	4		

## 改訂履歴

### 5/11—Rev. 0 to Rev. A

Added ADA4528-1 vs. Traditional Chopper Amplifiers

Section.....	1
Changes to Figure 11.....	7

### 4/11—Revision 0: Initial Version

## ADA4528-1 チョップパのアーキテクチャ

ADA4528-1 は、チョップ・アンプのオフセット関連リップルを抑える特許取得済みの新しい技術を採用しています。この技術は、AC領域でリップルをフィルタで除去する他のチョップ技術とは異なり、DC領域でアンプの初期オフセットをゼロにします。ADA4528-1 は自動補正帰還(ACFB)と呼ばれるローカル帰還ループを使ってオフセットをゼロにするため、出力全体でリップルを防止します。

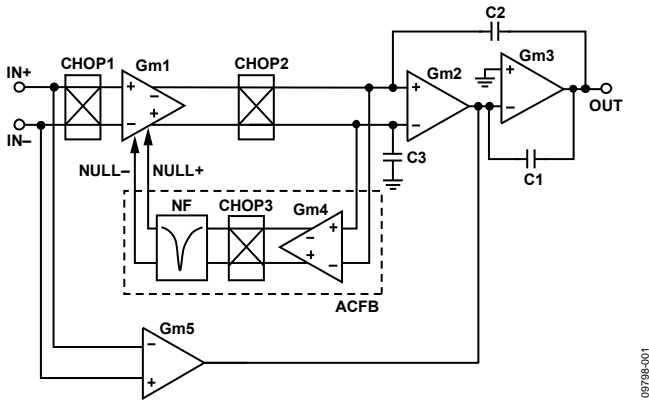


図 1.アンプのブロック図

図 1 に、ADA4528-1 アンプのブロック図を示します。このアンプは、自動補正帰還(ACFB)を持つ高いDCゲイン・パスと高周波フィード・フォワード・パスの並列で構成されています。高いDCゲイン・パスは、入力チョッピング・スイッチ回路(CHOP1)、初段の相互コンダクタンス・アンプ(Gm1)、出力チョッピング・スイッチ回路(CHOP2)、2番目と3番目の相互コンダクタンス・アンプ(Gm2 と Gm3)から構成されています。ACFBループには、4番目の相互コンダクタンス・アンプ(Gm4)、チョッピング・スイッチ回路(CHOP3)、スイッチド・キャパシタ・ノッチ・フィルタ(NF)が含まれています。最後に、高周波フィード・フォワード・パスは5番目の相互コンダクタンス・アンプ(Gm5)から構成されています。すべてのチョッピング・スイッチ回路のチョッピング周波数 $f_{\text{CHOP}}$ は、200 kHzで動作するようにデザインされています。

入力ベースバンド信号は、最初に CHOP1 により変調されます。次に、CHOP2 が入力信号を復調し、Gm1 の初期オフセットと 1/f ノイズをチョッピング周波数へ変調します。次に、ACFB ル

ープ内の Gm4 が CHOP2 出力で変調されてリップルを検出します。リップルはCHOP3によりDC領域へ復調され、ノッチ・フィルタを経由して、Gm1 のヌル入力端子 (NULL+と NULL-)に入力されます。Gm1 は初期オフセットと 1/f ノイズをゼロにします。もし、ここで初期オフセットと 1/f ノイズを除去しないと、変調されたリップルとして全体出力に現れてしまいます。この連続 ACFB ループの方法では、変調されたリップルが除去されます。

さらに、CHOP3 は CHOP2 出力の所望のベースバンド信号をチョッピング周波数へ変調します。クロック周波数と同期しているノッチ・フィルタは、チョッピング周波数の信号(したがって変調された成分)をフィルタ処理します。このため、ACFB ループは所望の入力ベースバンド信号を乱すことなく、不要なオフセット電圧と 1/f ノイズを選択的に除去します。

高周波フィード・フォワード・パスは、チョッピング周波数付近またはそれ以上の高周波入力信号を増幅するように機能します。また、ACFBループにより発生した位相シフトをバイパスします。この結果、ADA4528-1 は-20 dB/ディケードの標準ゲイン・ロールオフと 4 MHzのユニティ・ゲイン帯域幅を持つこととなります(図 2 参照)。この高い帯域幅により、ADA4528-1 は最小ゲイン誤差に対して十分なループ・ゲインを持つ高ゲインに設定することができます。

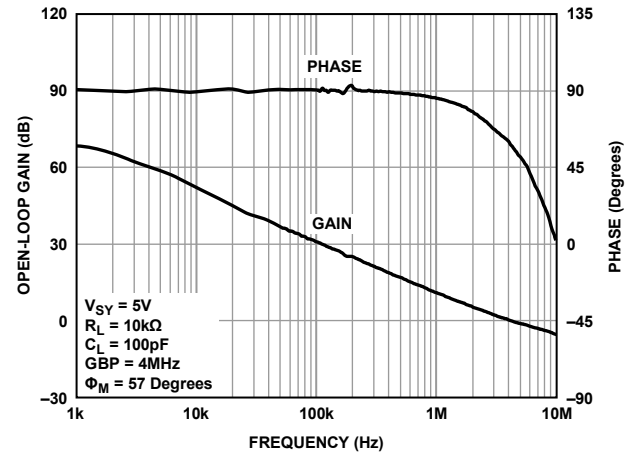


図 2.オープン・ループ・ゲインおよび位相の周波数特性

## ノイズ特性

### 1/fノイズ

"ピンク・ノイズ"とも呼ばれる 1/fノイズは、半導体デバイスに固有で周波数が小さくなると大きくなります。このため、DCまたは低周波で支配的なノイズになります。アンプの 1/fコーナ周波数は、フリッカ・ノイズが広帯域ノイズに等しくなる周波数です。図 3 に、ゼロ・ドリフト技術を採用していないアンプの例を示します。1/fコーナ周波数は 800 Hzです。DCまたは低周波アプリケーションでは 1/fノイズが支配的なノイズ成分であるため、回路のノイズ・ゲインで増幅されると、大きな出力電圧オフセットが発生しますが、ゼロ・ドリフト・アンプは 1/fノイズを持ちません。ゼロ・ドリフト・アンプでは、電圧ノイズを再成型して 1/fノイズをなくします。1/fノイズは低速で変化するオフセットとして現れるため、チョッピング技術で効果的に除去することができます。補正は、ノイズ周波数がDCに近づくほど効果的になり、周波数の低下とともに指数的にノイズが増加する傾向をなくします。図 4 に、1/f電圧ノイズのない ADA4528-1 の電圧ノイズ密度を示します。チョッピング技術により、ADA4528-1 の電圧ノイズは、電源電圧= 2.5 Vかつ 0.1 Hz ~ 10 Hzで 97 nV p-pと小さくなり、1/fノイズに弱い標準の低ノイズ・アンプに比べてはるかに低い低周波ノイズになります。

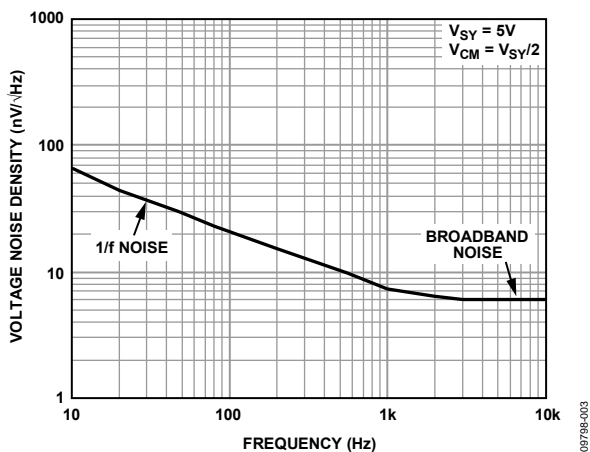


図 3.非ゼロ・ドリフト・アンプの電圧ノイズ密度周波数特性

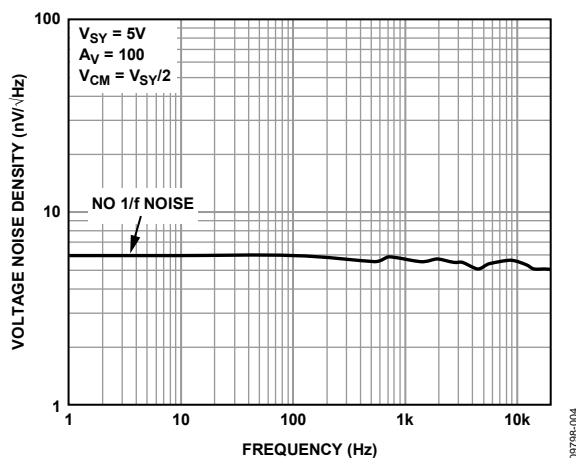


図 4.ADA4528-1 ゼロ・ドリフト・アンプの電圧ノイズ密度周波数特性

### 広帯域ノイズと外部ソース抵抗の考慮事項

ADA4528-1 は、1 kHzで 5.6 nV/√Hzの電圧ノイズ密度( $V_{SV} = 2.5 V$ で $A_V = 100$ )を持つ現在業界に存在する最小ノイズのゼロ・ドリフト・アンプです。したがって、システムの全体低ノイズ性能を維持するため外部入力ソース抵抗に対する考慮は重要です。

アンプ・デザインで考慮する必要のある入力換算の総合ノイズ ( $e_n$  total)は基本的に、入力電圧ノイズ、入力電流ノイズ、外部抵抗の熱ノイズ(ジョンソン)の 3 種類のノイズの関数になっています。入力電圧ノイズと入力電流ノイズは通常、データシートの電氣的仕様のセクションで規定されています。外部ソース抵抗の熱ノイズは次式で計算されます。

$$V_{RS} = \sqrt{4 kTR_S}$$

ここで、

$k$  はボルツマン定数( $1.38 \times 10^{-23} J/K$ )。

$T$  はケルビン(K)で表した温度。

$R_S$  は合計入力ソース抵抗( $\Omega$ )。

これらの相関のないノイズ・ソースは、次式を使って 2 乗平均(rss)をとることにより加算することができます。

$$e_n \text{ total} = \sqrt{[e_n^2 + 4 kTR_S + (i_n \times R_S)^2]}$$

ここで、

$e_n$  はアンプの入力電圧ノイズ(V/√Hz)。

$i_n$  はアンプの入力電流ノイズ(A/√Hz)。

特定帯域幅での等価総合 rms ノイズは次のように表されます。

$$e_{n,RMS} = e_n \text{ total} \sqrt{BW}$$

ここで、

$BW$  は Hz で表した帯域幅です。

この解析は、フラット・バンド・ノイズ計算に対して有効です。注目の帯域にチョッピング周波数が含まれる場合は、チョッピング周波数でのノイズ・スペクトルの影響を考慮するため計算はさらに複雑になります(図8参照)。

電圧ノイズ密度はアンプのゲイン設定に依存することがあります。図5に、主要競合他社のゼロ・ドリフト・アンプの電圧ノイズ密度対クローズド・ループ・ゲインを示します。アンプの電圧ノイズ密度は、クローズド・ループ・ゲインが1000から1へ減少すると、11 nV/√Hzから21 nV/√Hzへ増加しています。図6に、 $A_V = 1, 10, 100$ の3つのゲイン設定に対してADA4528-1の電圧ノイズ密度周波数特性を示します。ADA4528-1は、ゲイン設定に関係なく6 nV/√Hz~7 nV/√Hzの一定電圧ノイズ密度を提供します。

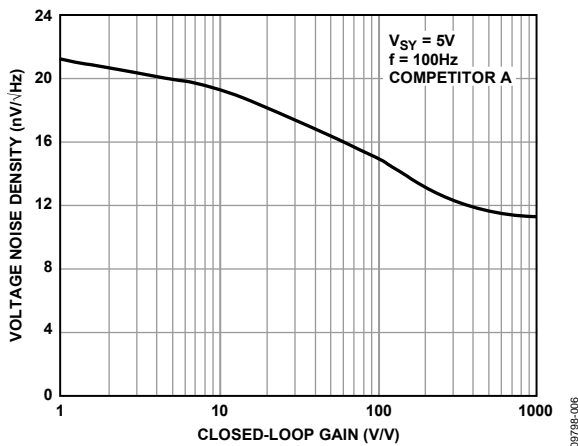


図5.競合他社Aのクローズド・ループ・ゲイン対電圧ノイズ密度

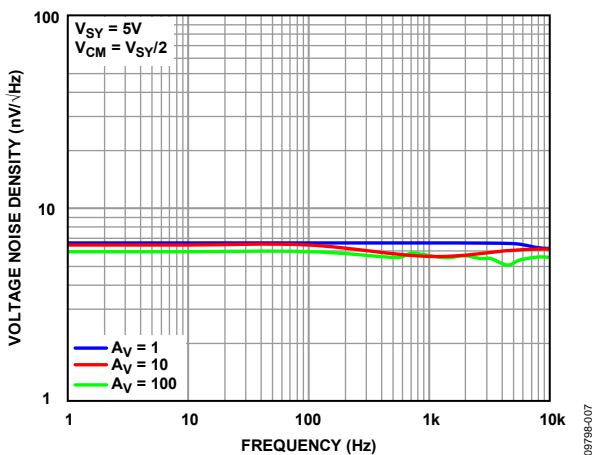


図6.ADA4528-1の電圧ノイズ密度周波数特性

表1.出力ノイズの計算値( $V_{SY} = 5V$ )

Noise Source	Value (at $f = 1\text{ kHz}$ )	Thermal Noise (nV/√Hz)	Total Noise RTO (nV/√Hz)	Output Noise Contribution (%)
$R_S$	100 $\Omega$	1.283	128.3	4.43
$R_F$	10 k $\Omega$	12.83	12.83	0.04
Voltage Noise	5.9 nV/√Hz	N/A <sup>1</sup>	595.9	95.52
Current Noise	0.5 pA/√Hz	N/A	5	0.01

<sup>1</sup> N/Aは適用なし

### 出力換算ノイズ成分の計算

図7に、非反転構成のADA4528-1を示します。外部抵抗ノイズ、アンプ電圧ノイズ、アンプ電流ノイズの出力換算(RTO)ノイズ成分は、次のように計算されます。

$$\text{ノイズ} \cdot \text{ゲイン} = 1 + R_F/R_S$$

$$V_{RS} = \sqrt{4kTR_S}$$

$$V_{RF} = \sqrt{4kTR_F}$$

$$R_S \text{ 熱ノイズに起因する誤差} = V_{RS} \times R_F/R_S$$

$$R_F \text{ 熱ノイズに起因する誤差} = V_{RF}$$

$$\text{アンプ電圧ノイズに起因する誤差} = e_n \times (1 + R_F/R_S)$$

$$\text{アンプ電流ノイズに起因する誤差} = i_n \times R_F$$

計算結果については表1を参照してください。

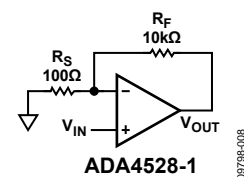


図7.非反転ゲイン構成

## 電圧リップル

チョッパ・アンプが初期オフセット電圧をゼロにしますが、電圧リップルは残ります。これらの電圧リップルには 2 つのソースがあります。

リップルの 1 つ目のタイプは、 $G_{m1}$  の初期オフセットに対応する残留リップルの一部です(図 1 参照)。このリップルは、チョッピング周波数(200 kHz)とその高調波周波数で高いノイズ・スペクトルを発生します。図 8 に、3 つのゲイン設定に対する ADA4528-1 の電圧ノイズ密度周波数特性を示します。ユニティ・ゲイン設定のアンプは、200 kHz で 50 nV/√Hz のノイズ・スペクトルを持ちます。このノイズ・スペクトルは、オペアンプがチョッピング周波数より高いクロズド・ループ帯域幅を持つときに大きくなりますが、ゲインが高くなると、アンプの自然なゲイン・ロールオフ特性のためノイズ・スペクトルは小さくなります。このため、ADA4528-1 は極めて低いノイズ、オフセット電圧、ドリフト能力を持つ高い DC ゲイン設定での使用に優れています。

出力でのノイズを小さくするためには、アンプの周りに帰還コンデンサを接続してください。図 9 と図 10 に、構成とそれに対応する電圧ノイズ密度の周波数特性を示します。ノイズを小さくするために帰還コンデンサを使用すると、アンプ帯域幅が減少します。

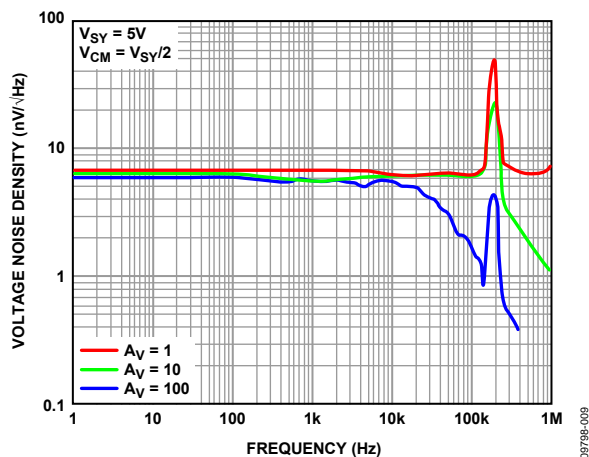


図 8. 様々なクロズド・ループ・ゲインでの電圧ノイズ密度周波数特性

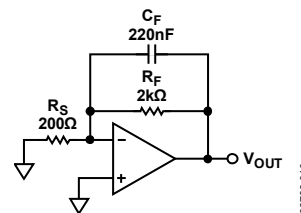


図 9. 帰還コンデンサの使用によるノイズの削減

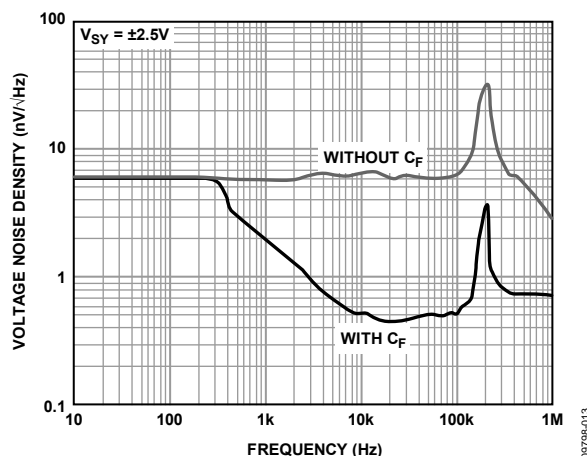


図 10. 帰還コンデンサを使用した場合の電圧ノイズ密度

電圧リップルの 2 つ目のソースは、入力信号周波数( $f_{IN}$ )とチョッピング周波数( $f_{CHOP}$ )との間の相互変調により発生するものです。相互変調歪み(IMD)は入力信号周波数の関数であるため、入力信号周波数がチョッピング周波数に近づくとも誤差が大きくなります。この相互変調により、2 次 IMD 積のノイズ・スペクトルが  $f_{CHOP} \pm f_{IN}$  で、3 次 IMD 積のノイズ・スペクトルが  $2f_{IN} \pm f_{CHOP}$  や  $2f_{CHOP} \pm f_{IN}$  など、それぞれ発生します。ADA4528-1 では、他のゼロ・ドリフト・アンプと比較して相互変調歪みが非常に低くなっています。180 kHz の 500 mV p-p 電圧の入力信号で、20 kHz で 14.6  $\mu$ V rms の歪みが発生します。

さらに、すべてのゼロ・ドリフト・アンプは、初期オフセットの残留リップルと相互変調歪みに敏感であることに注意してください。

## 計装アンプとしてのADA4528-1

ADA4528-1 は、極めて低いオフセット電圧とドリフト、高いオープン・ループ・ゲイン、高い同相モード除去比、高い電源除去比を持つため、ディスクリートの単電源計装アンプとして優れたオペアンプ選択肢になっています。

図 11 に、ADA4528-1 を使用した従来型 3 オペアンプ構成の計装アンプを示します。この計装アンプの高い CMRR にとって重要なのは、抵抗比と相対ドリフトが一致している抵抗素子です。真の差増幅のためには、抵抗比の一致 ( $R5/R2 = R6/R4$ ) が重要です。抵抗は、製造偏差、時間、温度に対して性能を決定する際に重要です。無限の同相モード除去比を持つ理想的なユニティ・ゲイン・ディファレンス・アンプでは、1% の抵抗不一致で 34 dB の同相モード除去比になります。このため、0.01% 以上の抵抗精度が推奨されます。

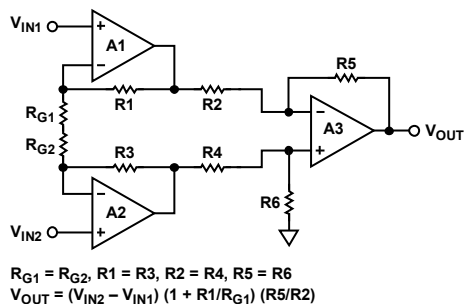


図 11. ディスクリート 3 オペアンプ構成の計装アンプ

ノイズを犠牲にすることなく外部抵抗を使うディスクリート計装アンプを構築するときは、選択する抵抗値に注意してください。RG1 と RG2 は熱ノイズを持ち、これらが計装アンプの総合ノイズ・ゲインで増幅されるため、出力での熱ノイズ成分を十分小さくし、かつ正確な測定値が得られるように十分小さい値に

する必要があります。表 2 に、出力換算(RTO)の外部抵抗ノイズ成分を示します。

表 2. 熱ノイズ成分の例

Resistor	Value (Ω)	Resistor Thermal Noise (nV/√Hz)	Thermal Noise RTO (nV/√Hz)
RG1	400	2.57	128.30
RG2	400	2.57	128.30
R1	10 k	12.83	25.66
R2	10 k	12.83	25.66
R3	10 k	12.83	25.66
R4	10 k	12.83	25.66
R5	20 k	18.14	18.14
R6	20 k	18.14	18.14

A1 と A2 は  $1 + R1/RG1$  の高いゲインを持っていることに注意してください。この場合、アンプの入力オフセット電圧と入力電圧ノイズは重要です。同様に RG1 と RG2 についても、アンプの入力オフセット電圧と入力電圧ノイズが全体ノイズ・ゲインで増幅されます。このため、A1 と A2 には ADA4528-1 のような高精度低オフセット電圧かつ低ノイズのアンプを使ってください。これに対して、A3 ははるかに低いゲインで動作するため、オペアンプ条件が異なります。全体計装アンプ入力に換算された入力ノイズは、初段ステージのゲインで除算されるため、重要ではありません。

小さい電圧ドリフトを必要とする DC と低周波アプリケーションの場合には、A3 に対して AD8538 や AD8628 のようなゼロ・ドリフト・アンプを使用してください。電圧ドリフトが問題にならない場合は、AD8603 を使用してください。

## 結論

ADA4528-1 の主な特長は、

- オフセット電圧とドリフトが極めて小さい
- 1/f 電圧ノイズがない
- 電圧ノイズ密度が極めて小さい
- 同相モード除去比が高い
- 電源除去比が高い
- レール to レールの入力および出力

このデザイン・アーキテクチャは、DC または低周波帯域で正確で安定な性能を必要とする高ゲイン高精度のシグナル・コンディショニング・アプリケーションを特に対象としています。

その他のゼロ・ドリフト・アンプの選択については、表 3 を参照してください。

低ノイズ・オペアンプのセレクション・テーブルは、AN-940 アプリケーション・ノート「*Low Noise Amplifier Selection Guide for Optimal Noise Performance*」に記載してあります。

ノイズの詳細については、3 部構成のウェビナー・シリーズ「*Noise Optimization in Sensor Signal Conditioning Circuits*」をご覧ください。

- Part 1: [www.analog.com/webcast\\_noiseopt\\_part1](http://www.analog.com/webcast_noiseopt_part1)
- Part 2: [www.analog.com/webcast\\_noiseopt\\_part2](http://www.analog.com/webcast_noiseopt_part2)
- Part 3: [www.analog.com/webcast\\_noiseopt\\_part3](http://www.analog.com/webcast_noiseopt_part3)

表 3. ゼロ・ドリフトのシングル・アンプ

Part Number	V <sub>SV</sub> (V)	V <sub>OS</sub> Max (μV)	TCV <sub>OS</sub> Max (μV/C)	GBP (MHz)	I <sub>SV/Amp</sub> Max (mA)	e <sub>N</sub> at 1 kHz (nV/√Hz)	CMRR Min (db)	PSRR Min (db)	I <sub>B</sub> Max (pA)	R-R In	R-R Out
ADA4528-1	2.2 to 5.5	2.5	0.015	4	1.7	5.6	135	130	400	Yes	Yes
AD8628	2.7 to 5	5	0.02	2	1	22	110	115	100	Yes	Yes
AD8638	5 to 16	9	0.06	1.35	1.3	60	118	127	40	No	Yes
AD8538	2.7 to 5.5	13	0.1	0.43	0.18	50	110	105	25	Yes	Yes
ADA4051-1	1.8 to 5.5	15	0.1	0.115	0.018	95	105	110	50	Yes	Yes