

オペアンプ試験技術 Null 法の実験評価

片山 翔吾* 青木 里穂 佐々木 優斗 町田 恒介 中谷 隆之
王 建龍 桑名 杏奈 畠山 一実 小林 春夫 (群馬大学)
佐藤 賢央 石田 嵩 岡本 智之 市川 保 (ローム(株))

Testing Technique of Operational Amplifier

Shogo Katayama*, Riho Aoki, Yuto Sasaki, Kosuke Machida, Takayuki Nakatani,
Jianlong Wang, Anna Kuwana, Kazumi Hatayama, Haruo Kobayashi (Gunma University),
Keno Sato, Takashi Ishida, Toshiyuki Okamoto, Tamotsu Ichikawa (Rohm Semiconductor)

キーワード：高精度オペアンプ，オフセット電圧，Null 法，DC-AC 変換，低レベル DC 電圧測定，熱起電力
(High Precision Operational Amplifier, Offset Voltage, Null method, DC-AC Conversion, Low Level DC Voltage Measurement, Thermo-electromotive Force)

1. はじめに

近年，IoT の普及により各種センサの需要が高まっている。IoT 機器では，各種センサを用いるために，高精度なオペアンプや ADC などのアナログ回路が必要となり，半導体テストではこれらのアナログ素子の特性を低コストで行うことが要求される。オペアンプは差動入力，シングルエンド出力，きわめて高いゲインを有する。特にオープンループゲインは 10^7 以上にもなり，微小電圧誤差の発生を抑えることは非常に困難である。[1-5]

オペアンプの測定は従来から Null 法や高精度デジタル電圧計を用いた測定手法が用いられているが，入力オフセット電圧が μV オーダーとなる低オフセットオペアンプではノイズや熱起電力による影響が大きく，またテストコストの削減には測定時間の短縮や同時測定が必要となる。[6]

本論文では，Null 回路による測定と DC-AC 変換スペクトラム測定を用いた高精度 DC 電圧測定を検討し，両者について実装回路を用いた入力オフセット電圧測定の検証結果を示す。

なお，Null 法を用いた測定を高速化するための素子パラメータのシミュレーション検討を [7] で報告している。

2. オペアンプ測定手法

〈2・1〉 Null 法

Null 法は図 1 で示す Null 回路 [1] を用いた測定手法であり，1 つの回路で多数の DC パラメータを測定することが可能である。Null 回路は DUT アンプと積分器を構成した補助オペアンプから構成され，きわめて高い DC オープンループゲインを持つ安定したループを形成する。こ

のとき補助オペアンプの DC オープンループゲインは 10^7 以上であればよく，DUT より高い性能は必要としない。測定パラメータの設定は測定はスイッチ $S_1 \sim S_4$ の切換え及び，DUT の電源ピン $+VP$ ， $-VP$ に印加する電圧の変更により行う。[1]

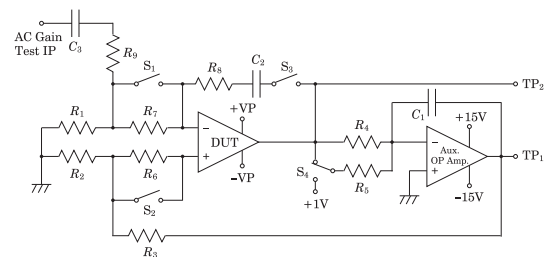


図 1 Null 回路
Fig.1. Null circuit

3. 実装回路による検証

〈3・1〉 測定対象

本論文では低オフセットオペアンプとして，Auto Zero オフセット電圧キャンセル回路を搭載した AD8571 について Null 法，DC-AC 変換による入力オフセット電圧測定を行う。

AD8571 は 4 個準備し，それぞれ No.1, No.2, No.3, No.4 と試料番号を付した。

〈3・2〉 Null 回路の構成

A, B2 種類の Null 回路を作成して 4 個の AD8571 の入力オフセット電圧測定を行った。図 2 に Null 回路の回路図を示す。図 3(a), (b) にそれぞれ作成した Null 回路 A, Null 回路 B を示す。回路 A, B の DUT 及び補助オペア

ンプ LF356 は共通とするため IC ソケットを用い、抵抗には 1% 級の金属皮膜抵抗を使用した。

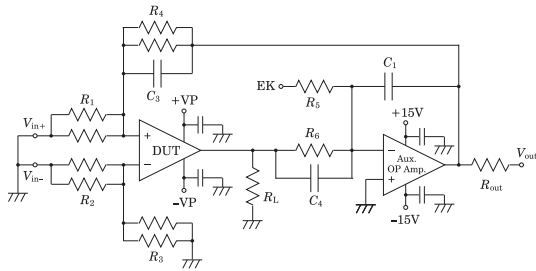
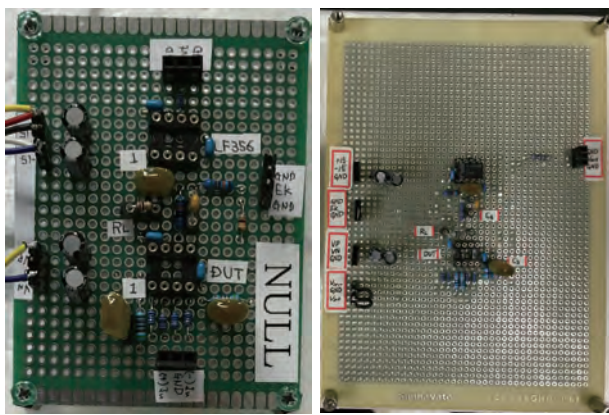


図 2 Null 実験回路
Fig.2. Null experimental circuit

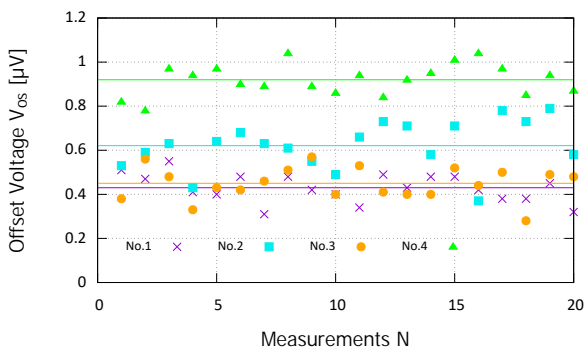


(a) Null circuit A (b) Null circuit B

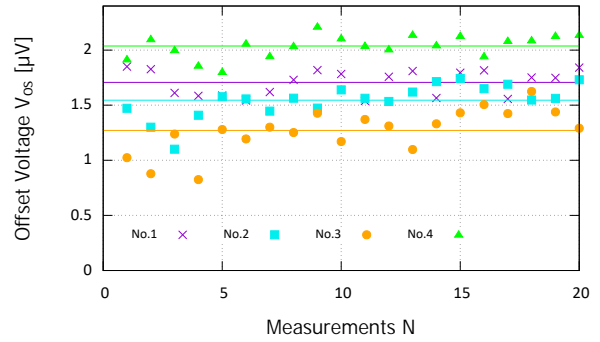
図 3 実装した Null 回路
Fig.3. Implemented Null circuit

〈3・3〉 Null 法による入力オフセット電圧測定結果

Null 回路の出力をデジタル電圧計で各オペアンプにつき 20 回測定した。Null 回路のゲインは 1,000 倍であり、入力オフセット電圧に換算するため測定値を 1/1,000 とした。結果を図 4 に示す。実線は測定値を平均したものである。



(a) Null circuit A



(b) Null circuit B

図 4 Null 法による測定結果
Fig.4. Measurement result of Null method

Null 回路 A, B ではオフセット電圧 V_{os} は約 $1\mu\text{V}$ の差が生じている。これは A, B 基板 DUT 入力部 (IN+, IN-) での熱起電力 (EMF) の相違によるものと考えられる。

〈3・4〉 DC-AC 変換スペクトラム測定の構成

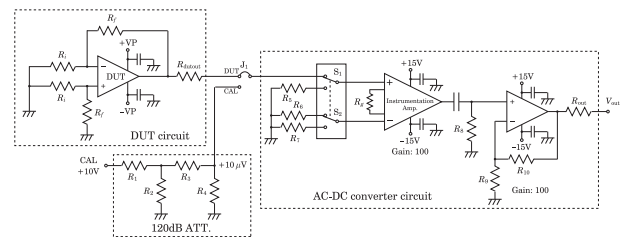


図 5 DC-AC 変換回路

Fig.5. DC-AC converter circuit

図 5 に DC-AC 変換スペクトラム測定に用いる回路を示す。DC-AC 変換回路は TC4053 によるスイッチング回路の後段に計装増幅回路と AC 増幅器を接続し 10^4 倍のゲインを設定している。DC-AC 変換回路の出力は NI 社製 USB-6003 を用いてデータ収録を行う。USB-6003 による収録データは LabVIEW を用いた FFT スペクトラム測定プログラムを用い DC-AC 変換クロック周波数のスペクトラムを測定する。

測定準備として J_1 を CAL 側に変更し DC-AC 変換回路の入力に 10^{-6} 倍 (120dB) のアッテネータを介し 10V の直流電圧を印加して FFT スペクトラム測定結果を $10\mu\text{V}$ に較正する。DUT は差動増幅回路を構成して DC-AC 変換回路の入力に接続する。DUT の入力抵抗 R_i は 100Ω 固定として R_f を変化させることでゲインを変更する。FFT のスペクトラム測定の結果を DUT のゲインで除すことで換算入力オフセット電圧を得る。

〈3・5〉 DC-AC 変換スペクトラム測定の結果

サンプリング周波数 100kHz, サンプリング数 10,000 で試料 No.1 を測定した。DUT のゲインは 1,000 倍として、DC-AC 変換クロックは 1kHz を入力した。LabVIEW による FFT スペクトラム測定プログラムは収録データを 10,000 サンプル収録した時点で FFT を行い、その結果を 100 回平均している。また、オシロスコープの入力に DC-AC 変換出力を接続して、FFT 機能を用いスペクトラムを測定した。オシロスコープの平均化数は 64 であり、時間ドメインで平均化を行った後に FFT を行っている。

図 6 に LabVIEW のプログラムで測定されたスペクトラム、図 7 にオシロスコープの FFT 機能で測定されたスペクトラムをそれぞれ示す。

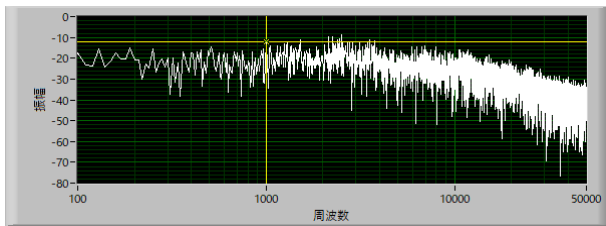


図 6 DC-AC 変換の出力スペクトラム (LabVIEW)
Fig.6. Spectrum of DC-AC converter out (LabVIEW)

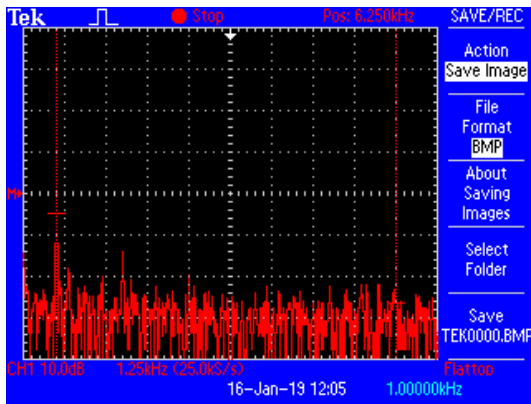


図 7 DC-AC 変換の出力スペクトラム (オシロスコープ)
Fig.7. Spectrum of DC-AC converter out (Oscilloscope)

LabVIEW のプログラムにより得られたスペクトラムはノイズフロアが大きく、1kHz のスペクトラムは測定できない。オシロスコープの FFT 機能ではノイズフロアは比較的低く、スペクトラムが測定できた。

〈3・6〉 平均化手法改良の結果

〈3・5〉で平均化手法の違いによりノイズの影響が異なったことから、LabVIEW の測定プログラムに時間ドメインでの同期アベレージング機能を実装した。平均化数は 10, DC-AC 変換クロックを 1kHz として DUT のゲインを 10 倍, 100 倍, 1,000 倍と変化させ各オペアンプにつき 100

回測定した。図 8 に時間ドメインで平均化後 FFT を行う LabVIEW のプログラムのスペクトラムを示す。

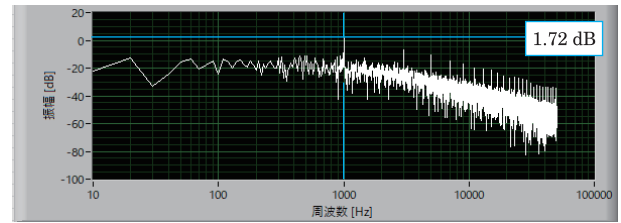
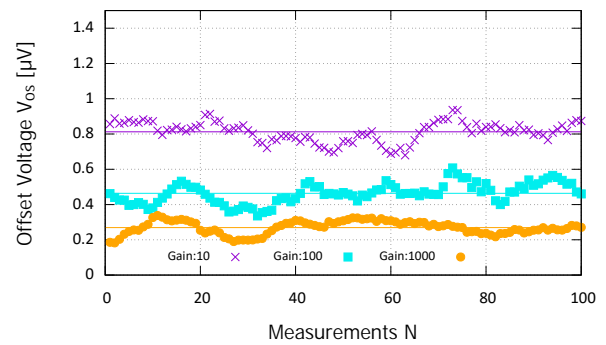
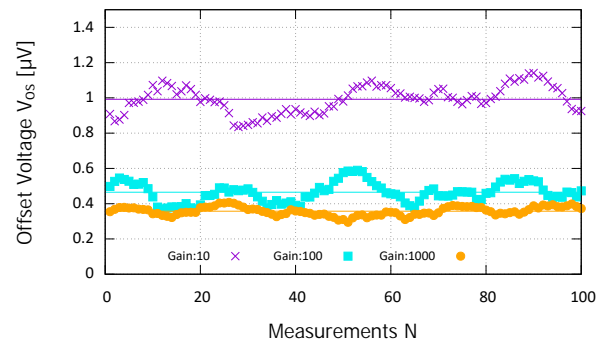


図 8 プログラム改良後のスペクトラム
Fig.8. Spectrum of DC-AC converter out (Improved program)

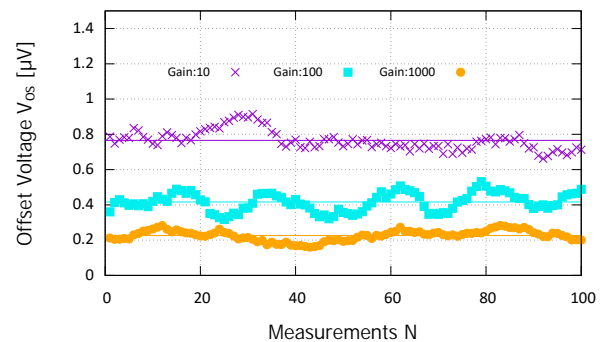
時間ドメインでの同期アベレージングによりノイズ低減を図れることが確認できる。図 9 では、各 DUT のゲインに対する入力オフセット電圧を示す。実線は測定値を平均したものである。



(a) DUT No.1



(b) DUT No.2



Measurements N

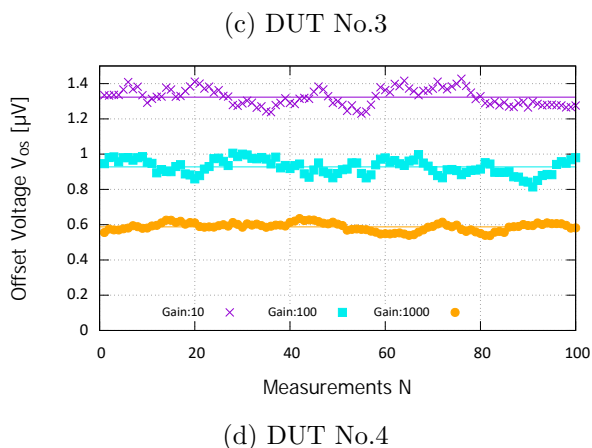


図9 DC-AC 変換スペクトラム測定結果

Fig.9. Measurement result of DC-AC & FFT

ゲインの増加に従いオフセット電圧が減少することが確認できる。図10にゲイン1,000倍のときの各DUTの入力オフセット電圧を示す。

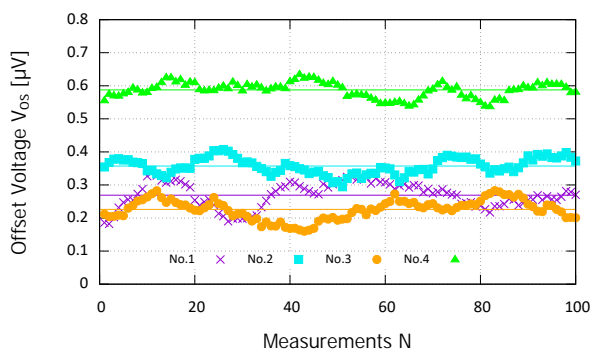


図10 DC-AC 変換スペクトラム測定結果

Fig.10. Measurement result of DC-AC & FFT

Null回路AとDC-AC変換スペクトラム測定による V_{os} 測定値を表1に示す。

表1 V_{os} 測定値

Table1. V_{os} measured value

試料	入力オフセット電圧 V_{os} [μV]	
	Null A	DC-AC
No.1	0.43	0.27
No.2	0.62	0.36
No.3	0.45	0.23
No.4	0.92	0.59

Null回路AとDC-AC変換による V_{os} 測定値は、試料によりほぼ同様の傾向を示している。DC-AC変換スペクトラム測定のほうが約 $0.2\mu\sim 0.3\mu V$ 低く観測されているが、これは各実験基板の熱起電力(EMF)の差によるものと推測される。

4. まとめ

本論文では、低オフセットオペアンプの入力オフセットを高精度に測定するために、Null法による測定とDC-AC変換スペクトラム測定を用いた高精度DC電圧測定を比較した。Null法では治具の作成者により測定結果に大きな誤差が生じた。これは熱起電力による影響であると考えられる。

DC-AC変換スペクトラム測定では時間ドメインでの同期アベレーシングによりノイズの影響を抑えることができた。これはAuto Zeroオフセット電圧キャンセル回路に起因するノイズが2kHz~4kHzの発生するAD8571の特性によるものであると考えられる。

5. 課題

今回はNull法による測定では熱起電力による影響を大きく受け、DC-AC変換スペクトラム測定ではノイズの影響を受けた。部品レイアウト手法の検討によるNull回路の熱起電力対策とスイッチング周波数やアベレーシング手法の検討によるDC-AC変換スペクトラム測定ノイズ対策及び測定時間短縮の検討を行っていく。

文献

- (1) James M. Bryant, "Simple Op Amp Measurements," Analog Dialogue, vol. 45. pp 21-23, 2011.
- (2) Analog Devices, Op Amp Applications Handbook, 2004.
- (3) Kumen Blake, "Op Amp Precision Design: PCB Layout Techniques," Microchip Technology Inc., Tech. Rep. AN1258, 2009.
- (4) Bob Dopkin, Analog Circuit Design, Linear Technology, 2013.
- (5) G. Robert, F. Taenzler, M. Burns, An Introduction to Mixed-Signal IC Test & Measurement, 2nd Edition, Oxford University Press (2012).
- (6) 町田 恒介, 佐々木 優斗, 中谷 隆之, 佐藤 賢央, 石田 嵩, 岡本 智之, 市川 保, 王 建龍, 桑名 杏奈, 畠山 一実, 小林 春夫, 「DC-AC 変換による低レベル DC 電圧測定技術」 電気学会 電子回路研究会, 東京 (2018 年 12 月)
- (7) 青木 里穂, 片山 翔吾, 佐々木 優斗, 町田 恒介, 中谷 隆之, 王 建龍, 桑名 杏奈, 畠山 一実, 小林 春夫, 佐藤 賢央, 石田 嵩, 岡本 智之, 市川 保, 「オペアンプ試験技術 Null 法のシミュレーション評価」 第 9 回群馬・栃木支所合同研究発表会, 小山高専 (2019 年 3 月)