オペアンプ AC 特性のサミングノード法による並列試験

荻原	岳,	片山	翔吾,	青木	里穂,	中谷	隆之	(群馬)	大学)
佐藤	賢央	.,石田	嵩,	岡本	智之,	市川	保(口	ーム	(株))
王	建龍,	桑名	杏奈,	畠山	一実,	小林	春夫	(群馬)	大学)

Parallel Testing of Operational Amplifier AC Characteristics Using Summing Node Method

Gaku Ogihara, Shogo Katayama, Riho Aoki, Takayuki Nakatani (Gunma University) Keno Sato, Takashi Ishida, Toshiyuki Okamoto, Tamotsu Ichikawa (ROHM Semiconductor) Jianlong Wang, Anna Kuwana, Kazumi Hatayama, Haruo Kobayashi (Gunma University)

キーワード オペアンプ, AC 特性, NULL 回路法, FFT, マルチチャンネル測定, サミングノード (Operational Amplifier, AC Characteristics, Null Method, FFT, Multi-channel Measurement, Summing Node)

1. はじめに

従来、オペアンプの特性試験には NULL 回路法が用いられてき た。[1-3] NULL 法は被試験デバイス (DUT) 出力に積分回路に 加え、この積分回路出力を DUT 入力に負帰還をかける。試験信号 の印加点及び設定スイッチを切り替えることにより、オペアンプ の DC 特性および AC 特性試験が可能となり、測定時間を問題と しないデバイス試験・評価では有効な試験方法であるが、半導体 試験装置 (ATE)を用いた量産試験 (テスト)では、積分回路を含 む NULL 回路の応答特性により試験時間 (=テストコスト)が問 題となる。そこで NULL 法に代わる AC 特性並列試験方法を検討 した。

2. 研究内容

被試験デバイスを反転増幅回路構成(サミングノード法)と しFFT ベース法により、デバイスの開ループ利得(AoL),電源電 圧変動除去比(PSRR),同相ノイズ除去比(CMRR)のAC特性 を同時試験可能な測定手法を考案した。実デバイス(ADI製CMOS オペアンプ AD8571)を用い、NULL法と本FFTベースの試験方法 による測定結果およびSPICEシミュレーションによる結果を比較 した。また本試験法に準拠した回路を使用して複数デバイスの AoLマルチチャンネル測定が可能であることを実機測定にて確認 した。

3. FFT 法

この節では FFT ベース法の概略を説明する。FFT ベース法は、 異なる周波数の信号を複数入力し、それらの信号を最終的に一つ にまとめて FFT することで各周波数成分の強度を同時に測定する 手法である。これにより測定特性ごとに周波数を設定し、FFT 後 に設定した周波数成分を分析することでその特性が得られる。

次に提案する回路構成を示す。図1の回路は DUT を反転増幅 回路構成にすることで反転入力端子(サミングノード)に電源電 圧の変動や同相ノイズの影響が現れることが特徴である。補助ア ンプ(Summing Amp: LF356)はサミングノード [4,5] に現れる信 号を100倍(+40dB)に増幅し測定を容易にしている。この補助ア ンプの出力(Sum Amp out)と DUT 出力(DUT out)をFFT 解析 することにより AOL, PSRR, CMRR などの AC 特性を明らかとす ることが本試験法の特徴である。

4. 複数オペアンプの開ループ利得同時測定

複数デバイスの AOL を同時測定するために、図1の回路を DUT の個数分用意する。上記回路で得られた複数の DUT 出力(DUT out) と補助アンプ出力(Sum Amp out)を別々の加算回路で加算し、その出力を FFT 解析し複数デバイスの AOL 同時測定する。



図 1. 提案サミングノード回路の基本形 Fig 1. Basic form of the proposed summing node circuit



図 2. 4ch AOL 同時測定実験で使用した加算回路 Fig 2. Summing circuit used in 4ch AOL simultaneous measurement experiment

実際の同時測定試験では DUT (AD8571) を 4 個用意し、4ch 分 の信号発生器を使用して測定を行った。入力信号(図 1: Sig IN) の強度は 100mVrms(-20dB)とし、10 倍の増幅器を用いて DUT 出 力にて 1Vrms (0 dB) となるように設定した。さらに各信号の周 波数は 100Hz 刻み (1ch から 4ch まで順に 1kHz, 1.1kHz, 1.2kHz, 1.3kHz) に設定して測定試験を行った。100Hz 刻みの場合の測定 結果を図 3 に示す。表測定結果と各 DUT の開ループ利得を示す。





表 1.100Hz 刻み時の測定結果と開ループ利得 Table 1. Measurement results and open loop gain with 100Hz frequency interval

項目 ch	DUTout[dB]	SUMout[dB]	補正値[dB]	Aol[dB]
Ch1(1.0kHz)	-0.149	-21.4	+0	61.251
Ch2(1.1kHz)	-0.149	-20.6	+0.81	61.261
Ch3(1.2kHz)	-0.149	-19.8	+1.57	61.221
Ch4(1.3kHz)	-0.149	-19.0	+2.27	61.121

表1に記載がある補正値に関して、オペアンプの伝達関数はカ ットオフ周波数以降、周波数が高くなるにつれ、利得が線形的に 下がる性質を持つ。故にここではシミュレータにより算出した数 値を用いて1kHz時の値へと補正した。尚、開ループ利得の導出式 は、DUT 出力レベルと補助アンプ出力レベル、補助アンプの閉ル ープゲイン ACL を用いて以下の式で得られる。

$$Aol = DUTout - (SUMout - A_{cL}) + (補正値) [dB]$$
 (1)

表1より、本実験で導出された AoL 値は AD8571 のデータシー トに記載されたグラフから読み取った動作周波数 1kHz 時の AOL 値(表3を参照のこと)とほぼ同値であるといえる。さらに多数 のチャンネルを同時に使用することによりデバイス試験時間の大 幅な短縮が期待できる。

5. 各測定手法による AC 特性評価

本節では AC 特性同時試験に言及する前に NULL 法と本試験法 で得られる AC 特性の違いについて個別に AC 解析した場合のシ ミュレーションと実験の結果を示す。試験対象には ADI 社製の AD8571を使用し、シミュレーション(LTspice を使用)では AD8571 マクロモデルを用いて AC 解析を行った。

5.1. シミュレーション

5.1.1. NULL 法による AC 特性測定

A

NULL 回路構成にて、AD8571 マクロモデルを用いて、+Vs 電 源、-Vs 電源に AC 信号を印加し、PSRR, CMRR 特性を AC 解析し た。DUT の AC ゲインは 20dB に設定した。PSRR, CMRR の導出 式は DUT の電源電圧重畳レベル V(ac)と DUT 出力レベル V(out)、 さらに DUT の閉ループゲイン ACL[dB]を用いて以下の式で得ら れる。

$$PSRR, CMRR = 20\log_{10} \frac{V(ac)}{V(out)} + A_{CL} \ [dB]$$
(2)

AoLの導出式はDUT出力レベル V(out)とDUT入力レベル V(in) より以下の式で得られる

$$AOL = 20 \log_{10} \frac{V(out)}{V(in)} \ [dB]$$
(3)



図 5-1(a). NULL 法 PSRR, CMRR 測定回路 Fig 5-1(a). NULL method PSRR, CMRR measurement circuit



図 5-1(b). NULL 法 AOL 測定回路 Fig 5-1(b). NULL method AOL measurement circuit

5.1.2. サミングノード法による AC 特性測定

反転増幅器構成(サミングノード法)によるシミュレーション で使用した回路図を図 5-2(a),図 5-2(b)に示す。

サミングノード法における PSRR, CMRR の導出式は DUT の電 源電圧重畳レベル V(ac)と DUT 入力(サミングノード)レベル V(in) を用いて以下に表される。NULL 法の時とは違い、DUT 入力電圧 から直接求めているため閉ループゲインを考慮した補正は必要な い。

$$PSRR, CMRR = 20\log_{10} \frac{V(ac)}{V(in)} \quad [dB]$$
(4)



図 5-2(a). サミングノード法 PSRR, CMRR 測定回路 Fig 5-2(a). Summing node method PSRR, CMRR measurement circuit



図 5-2(b). サミングノード法 AoL 測定回路 Fig 5-2(b). Summing node method AoL measurement circuit

5.2. 実機測定

5.2.1. NULL 法による AC 特性測定

NULL 法を用いた実機測定において、試験回路はシミュレーション回路に準拠した回路を作成し使用した。また各特性の導出式 もシミュレーションの際の導出式と同様である(式(2),(3)を参照)。

実機測定の測定結果を図 5-3 に示す。図 5-3(a)には+Vs PSRR お よび-Vs PSRR を表示し、図 5-3(b)には CMRR と AOL を示す。



図 5·3(a). NULL 法による+Vs PSRR, -Vs PSRR 実測結果 Fig 5·3(a). + Vs PSRR, -Vs PSRR measurement result by NULL method



図 5-3(b). NULL 法による AOL, CMRR 実測結果 Fig 5-3(b). AOL, CMRR measurement result by NULL method

5.2.2. サミングノード法による AC 特性測定

改めて今回提案する回路について説明する。図 5-4(a)の回路で は、入力端子 Vin に 0.1Vp-p (-20dB)の信号を入力し、出力とし て DUT 反転入力(サミングノード)電圧(Vout2)と DUT 出力 (Vout1)を FFT して周波数伝達特性から開ループゲインを算出 する。この測定ではオシロスコープの FFT 機能を利用し、周波数 伝達特性を測定した。図中 R1, R2 で表される抵抗は入力信号の周 波数によりその値を変更し、10kHz までの周波数の場合、R1=100Ω, R2=10kΩ、20kHz 以上を扱う場合、R1:開放, R2:短絡と設定する。

PSRR, CMRR の測定には図 5-4(a)の回路の入力 Vin を接地し、 図 5-4(b)のような回路を DUT の電源回路として使用した。図中の +PSRR, -PSRR, CMRR 用の入力端子にそれぞれの試験信号 Vac を 入力し電源に重畳、その時の試験信号レベルは Vac=0.1Vrms(-20dB)であった。尚、Vac と Vout2 のスペクトラム解析結果より f=1kHz に お い て +Vs PSRR=98.5dB, -Vs PSRR=61.0dB, CMRR=61.3dB の結果が得られた。



図 5-4(a). サミングノード法 AoL 測定回路 Fig 5-4(a). Summing node method AOL

measurement circuit



図 5-4(b). PSRR, CMRR 測定用 DUT 電源回路 Fig 5-4(b). DUT power supply circuit for PSRR, CMRR measurement

5.3. まとめ

これまで述べた NULL 法とサミングノード法のそれぞれのシミ ュレーションと実機測定の結果を表 2 に示す。シミュレーション ではどの測定手法においても同様の数値が得られた。実機測定に おいても測定手法による違いは見られなかった。しかし、シミュ レーションと実測値間には違いが見受けられ、特に PSRR, CMRR のシミュレーション結果と実測値やデバイスのデータシートのカ タログ値との違いが顕著であった。これによりシミュレーション で使用した AD8571 マクロモデルの信頼性に疑問が生じる結果と なった。またデータシートの値と比較したとき CMRR 値がデータ シート値とシミュレーション、実測値間に 35dB の相違があった。

今後、AD8571 の測定回路や測定手法の精査が課題となる。以 上のことより DUT 出力やサミングノードを観測し、FFT 解析する ことでオペアンプの各 AC 特性を求める手法は、シミュレーショ ン結果に不安を残すものの、従来の NULL 法と比較しても簡易的 で有効であると結論付ける。

表 2. NULL 法と本試験法の比較 Table 2. Comparison of NULL method and summing node method

項目	シミュ	レーション	(1kHz)	実測(1kHz)			AD8571 Datasheet	
	NULL	DUT出力	SUM出力	NULL	DUT出力	SUM出力	typ(1kHz*5)	typ(DC)
AOL(dB)	63.6	\backslash	63.6	61.2	$\overline{)}$	61.4	61	145
+PSRR(dB)	63.1	63.2	63.1	97.6	95.7	98.5	96	130
-PSRR(dB)	57.7	57.7	57.7	61.6	61.4	61.0	64	130
CMRR(dB)	64.3	64.3	64.3	61.9	61.8	61.3	103	140

6. オペアンプ AC 特性同時測定

これまではオペアンプの一般的な AC 特性測定手法である NULL 回路法と反転増幅器回路構成による FFT 解析をベースとし たサミングノード法について各特性の個別測定について触れてき たが、ここからはサミングノード法と FFT 解析を生かしたオペア ンプの AC 特性同時測定について述べる。



Fig 6. Operational amplifier AC characteristics parallel measurement circuit

実験に使用した回路は図6である。図5-4(a),(b)と大きな変更は ないが、5.2.2 サミングノード法による AC 特性測定にて入力した 信号を4チャンネルとも同時に入力する点で異なる。

実験の結果を表3に示す。PSRR, CMRR は信号印加レベル、サ ミングノードアンプゲインなどから、AOL は DUT 出力レベル、サ ミングノードアンプゲインからそれぞれの数値を換算した値であ る。同時測定で得られた数値と個別に測定した際の数値との比較 を表3にまとめた。表3より個別測定と同時測定の誤差は1dB 程 度であり、実験においてオペアンプの AC 特性同時測定の有用性 を検証できた。

表 3. オペアンプ AC 特性同時測定実験結果

Table 3. AC characteristics parallel measurement results

項目	周波数 (kHz)	同時測定 (dB)	単独測定 (dB)	備考 信号印加レベル	DUTታ
Aol	1.0	61.7	61.4	反転入力10mVms	20
+Vs PSRR	1.1	98.1	98.5	100 mVms(=-20 dBV)	20
-Vs PSRR	1.2	60.1	61.0	100 mVms(=-20 dBV)	20
CMRR	1.3	59.3	61.3	100 mVms (=-20 dBV)	20

7. まとめ

本論文ではオペアンプの AC 特性 (AOL, PSRR, CMRR) 試験に おいて NULL 法、DUT 出力解析、サミングノードを FFT 解析す るいずれの手法でも同様の試験結果が得られたことをシミュレー ションと実験で検証した。また、サミングノードを FFT 解析する 手法 (サミングノード法) により AOL, PSRR, CMRR の AC 特性 を同時に試験することが可能であることを実験で検証した。

今後の課題として、サミングノードにおいて PSRR や CMRR を 観測できる理論的な考察と、オペアンプデバイスモデルを用いた シミュレーションを検討していく。

文献

- J. M. Bryant, "Simple Op Amp Measurements", Analog Dialogue, vol. 45, pp 21-23(2011)
- [2]. K. Blake, "Op Amp Precision Design: PCB Layout Techniques", Microchip Technology Inc., Tech. Rep. AN1258(2009)
- [3]. R. Aoki, S. Katayama, Y. Sasaki, K. Machida, T. Nakatani, J. Wang, A. Kuwana, K. Hatayama, H. Kobayashi, K. Sato, T. Ishida, T. Okamoto, T. Ichikawa, "Evaluation of Null Method for Operational Amplifier Short-Time Testing", IEEE International Conference on ASIC, Chongqing, China (Nov. 2019)
- [4]. Y. Sasaki, K. Machida, R. Aoki, S. Katayama, T. Nakatani, J. Wang, K. Sato, T. Ishida, T. Okamoto, T. Ichikawa, A. Kuwana, K. Hatayama, H. Kobayashi, "Accurate and Fast Testing Technique of Operational Amplifier DC Offset Voltage in μV-order by DC-AC Conversion", IEEE 3rd International Test Conference in Asia, Tokyo (Sept. 2019).
- [5]. G. Ogiwara, A. Kuwana, H. Kobayashi, "Parallel Low-Gain Amplifiers Equivalent to High-Gain Amplifier", 5th Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS20119 at Nikko), Nikko, Tochigi, Japan (Aug. 2019).