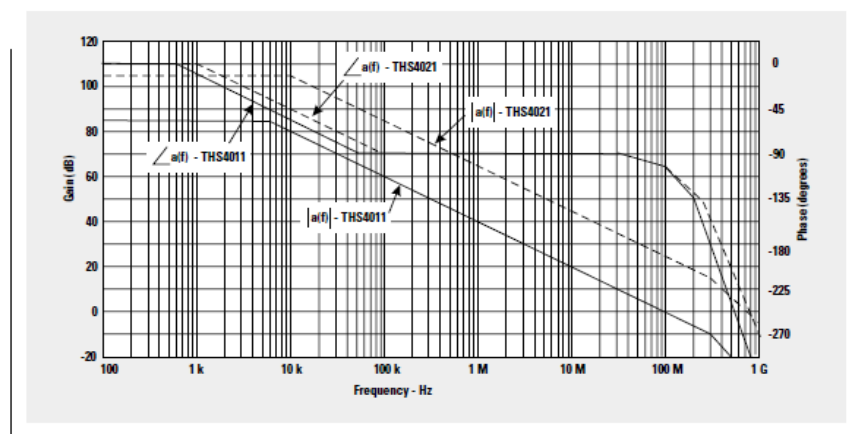


非補償オペアンプの使用によるパフォーマンスの向上

Jim Karki

Systems Specialist, High-Speed Amplifiers

図1. THS4011とTHS4021の開ループ・ゲインと位相



はじめに

目的とする用途でノイズ、スルー・レート、歪み特性を最適な値にする必要がある場合は、Decompensated (以下、軽補償) または非補償型のオペアンプを使用したくなります。

オペアンプ製品THS4011は、内部でエミッタ縮退とドミナント・ポールで補償しているため、外部補償の必要がありません。差動アンプ・ペアのエミッタのリード線に抵抗を配置すると負帰還が生成され、差動アンプ段のゲインが減少します。この現象が「エミッタ縮退」と呼ばれるものです。アンプの中間段に配置されたコンデンサにより、ドミナント・ポールの補償が行われます。

THS4021では入力ペアのエミッタ縮退を使用せず、ドミナント・ポールの静電容量を小さくしてあります。

THS4021は、軽補償型オペアンプと呼ばれます。ここで言う「軽補償」とは、補償を緩和していることで、「非補償」は補償を全くしてないことを指します。補償をしないと、次のような結果になります。

- ・ 開ループ・ゲインが高くなる
- ・ スルー・レートが増加する
- ・ 入力換算ノイズが低くなる
- ・ ユニティ・ゲインで安定させるために外部補償が必要

図2. 負帰還のあるオペアンプのモデル

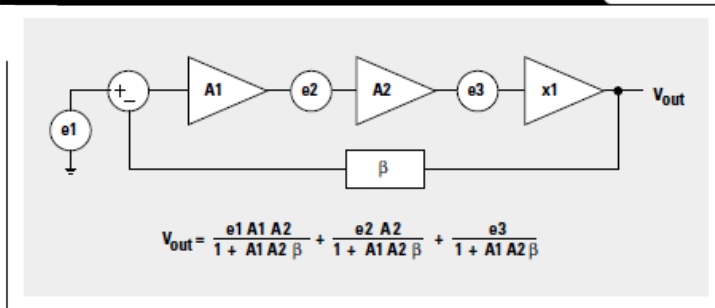
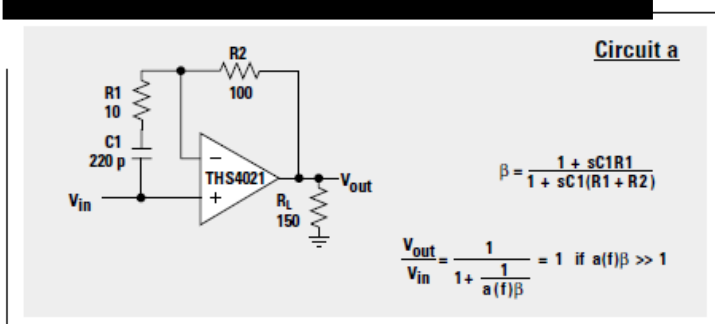


図1は、THS4011とTHS4021の開ループ・ゲイン、 $f|a(f)|$ 、位相 $\angle a(f)$ です。THS4021では、 $|a(f)|$ が約20dB高くなっていることに注目してください。また、THS4011とTHS4021の両方について、グラフ上の次の2つの点に注目してください。

- THS4011の $|a(f)| = 0 \text{ dB}$ と $\angle a(f) \approx -105^\circ$
- THS4021の $|a(f)| = 20 \text{ dB}$ と $\angle a(f) \approx -130^\circ$

図3. 外部補償型のTHS4021(非反転オペアンプ)



したがって、THS4011では開ループ・ゲイン +1での位相マージンが75°となり、外部補償は不要です。THS4021に開ループ・ゲイン+10(または-9)を与えると、THS4021の位相マージンは50°となります。これより低いゲインが必要なら、別の補償手段を講じます。

この資料は、Texas Instruments Incorporated (TI) が英文で記述した資料を、皆様のご理解の一助として頂くために日本テキサス・インスツルメンツ(日本TI)が英文から和文へ翻訳して作成したものです。
資料によっては正規英語版資料の更新に対応していないものがあります。
日本TIによる和文資料は、あくまでもTI正規英語版をご理解頂くための補助的参考資料としてご使用下さい。
製品のご検討およびご採用にあたりましては必ず正規英語版の最新資料をご確認下さい。
TIおよび日本TIは、正規英語版にて更新の情報を提供しているにもかかわらず、更新以前の情報に基づいて発生した問題や障害等につきましては如何なる責任も負いません。

この記事では、閉ループ・ゲインを+1または-1に保ちながら、THS4021を外部的に補償して動作を安定させる方法を紹介し、歪み、過渡応答、ノイズ特性を比較するために、外部補償を使用した場合のTHS4011およびTHS4021がテスト対象となります。また、入手可能な部品の選定を心がけています。帰還については簡単に説明していますが、読者が帰還理論、安定性の尺度、補償などについて詳しい知識を持っていることを前提としています。そうでない場合は、参考文献1と2をお読みください。

帰還と誤差

帰還理論では、ループ・ゲインが増加すればアンプ内の誤差源が減少することを予測しています。図2は、負帰還のあるオペアンプのモデルです。入力段がA1、中間段がA2、出力段がx1バッファであり、Bは帰還係数です。開ループ・ゲインはa(f) = A1A2であり、ループ・ゲインは(f)B = A1A2Bです。e1、e2、e3は、オペアンプ内の汎用誤差源です。次の考察では、個別の誤差源に起因する出力応答を解析します。

e1は入力での誤差源を表しており、アンプの全開ループ・ゲインにより増幅されます。他のすべての誤差源を0に設定して、かつ帰還がない場合は、V_{out} = e1A1A2となりますが、帰還がある場合は次のようになります。

$$V_{out} = \frac{e1}{\beta + \frac{1}{A1A2}} \approx \frac{e1}{\beta} \quad (A1A2 \gg 1 \text{ の場合})$$

e2は中間段での誤差源を表しており、A2のみにより増幅されます。他のすべての誤差源を0に設定して、かつ帰還がない場合は、V_{out} = e2A2となりますが、帰還がある場合は次のようになります。

$$V_{out} = \frac{e2}{A1\beta + \frac{1}{A2}} \approx \frac{e2}{A1\beta} \quad (A2 \gg 1 \text{ の場合})$$

e3は出力段での誤差源を表しており、出力に対してゲイン+1でバッファリングされます。

他のすべての誤差源を0に設定して、かつ帰還がない場合は、V_{out} = e3となりますが、帰還がある場合は次のようになります。

$$V_{out} = \frac{e3}{1 + A1A2\beta} \approx 0 \quad (A1A2\beta \gg 1 \text{ の場合})$$

一般に帰還は、入力で生成された誤差を減少させる効果はありませんが、アンプ内部で生成された誤差に対しては効

図4. 2つのコンデンサ使用の、外部補償型のTHS4021 (反転オペアンプ)

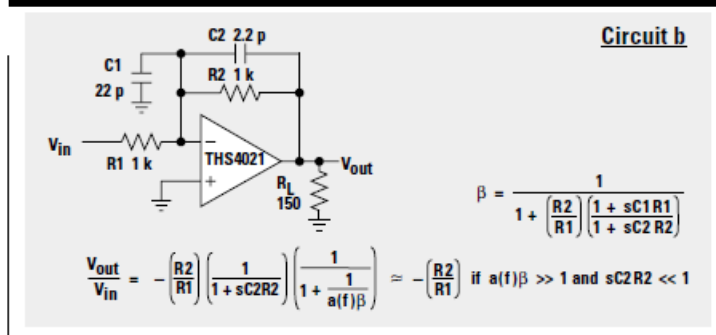


図5. 1つのコンデンサを使用した、外部補償型のTHS4021 (反転オペアンプ)

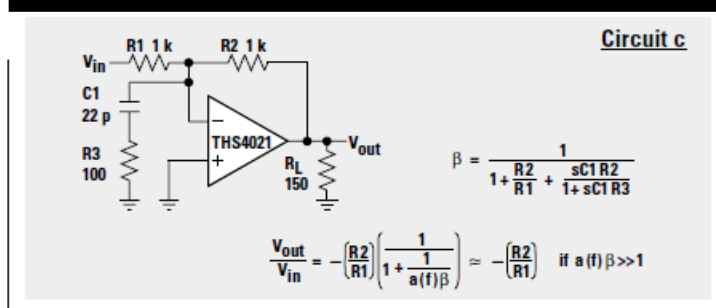


図6. 内部補償型のTHS4011(非反転オペアンプ)

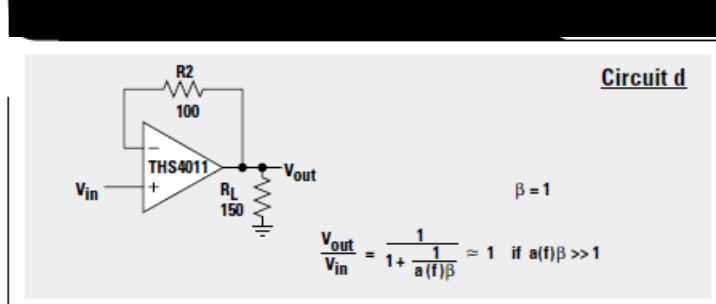
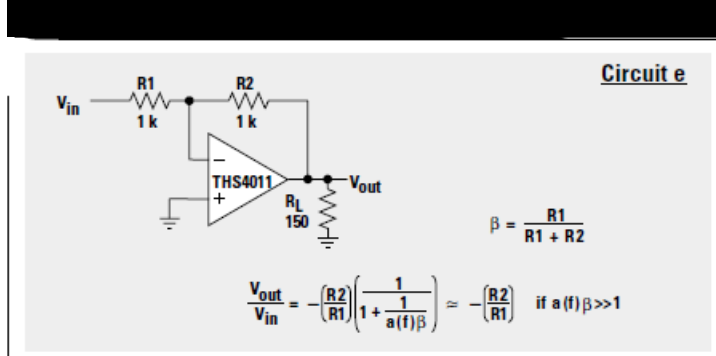


図7. 内部補償型のTHS4011(反転オペアンプ)



果があり、出力段誤差の減少に対しては最も有効です。THS4021の増加した開ループ・ゲインの優位性により、オペアンプの中間段と出力段で生成される歪み成分が減少することが期待できます。

テスト回路

図3~7に、テスト回路を記載します。回路a、b、cは、外部補償を備えたTHS4021です。回路dとeはTHS4011です。すべての回路では、理想ゲイン+1か-1を持っています。後述するテスト・データは、示された部品値によるこれらの回路のテスト結果に基づきます。

解析

回路a、b、cの安定性を判定するために、回路のループ・ゲイン $a(f)\beta$ に注目してみます。図8は、オペアンプ製品THS4021の開ループ・ゲイン $a(f)$ のボード線図と、帰還係数の逆数 $1/\beta$ です。ボード線図上では、 $a(f)\beta$ は $a(f)$ 曲線と $1/\beta$ 曲線間の差として見る事が可能です。 $a(f)$ と $1/\beta$ の交差点の狭まりの程度を見れば、安定性の度合いが分かります。

図9は、 $a(f)\beta$ の振幅と位相を使用して、わずかに異なる視点から同じ情報を見た結果です。これにより、位相マージン(この場合は約45°)が判定しやすくなっています。

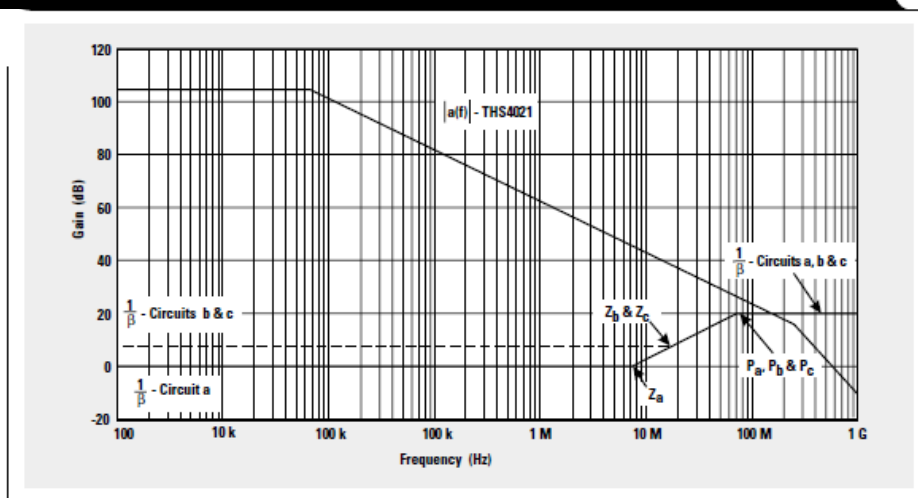
設計

ここでの設計とは、帰還ネットワークの極とゼロの配置を選択することを意味します。次に示す式は、図8のボード線図に示されているポイントに対応しています。

回路 a: $Z_a = \frac{1}{2\pi C1(R1+R2)}$ および $P_a = \frac{1}{2\pi C1R1}$

回路 b: $Z_b = \frac{2}{2\pi C1R1}$ および $P_b = \frac{1}{2\pi C2R2}$
(R1 = R2の場合)

図8. テスト回路の開ループ・ゲインと反転帰還係数のボード線図



回路 c: $Z_c = \frac{2}{2\pi C1R2}$ および $P_c = \frac{1}{2\pi C1R3}$
(R1 = R2の場合)

極とゼロは、最大周波数範囲に渡って最大余剰ループ・ゲインを得ながら、かつ安定性を保つよう選択されます。外部補償された回路では高周波数側で帰還量を減少させ、 $1/\beta$ が $a(f)$ と交差する点で $1/\beta = 20\text{dB}$ となるようにします。これにより、THS4021の安定に必要とされる、最小ゲイン10という条件が満たされます。つまり、最小ゲイン10の規定が本当に意味するのは、 $a(f)$ との交差点で $1/\beta \geq 10$ (20dB)となる必要があるということです。

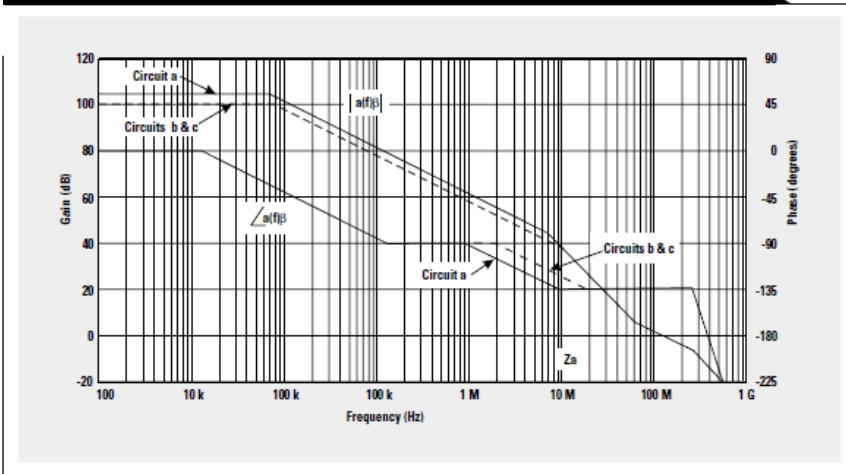
設計に際しては、まず極の位置を選択して、製造ばらつきに備えた余裕を与えるようにします。ここに示す例では、 $a(f)$ が最小ゲイン指定値(20dB)に等しくなる周波数の約1/2の周波数で、極が選択されます。部品値を計算した後、都合の良い標準値を選択します。

極の位置が決まると、次に示すように、アンプの最小ゲイン指定値と低周波での $1/\beta$ の差分値で極周波数を除算して、ゼロを求めます。

$$Z_a = \frac{P_a}{10^{20}}, Z_b = \frac{P_b}{10^{20}}, \text{ and } Z_c = \frac{P_c}{10^{20}}$$

別の方法として、少し直観的に回路を眺めることで、次のような関係に考え至ることも可能です。回路aでは、高周波帰還係数がR1対R2という比率で設定されているため、 $R1 = R2/10$ となります。回路bでは、高周波帰還係数がC1対C2という比率で設定されているため、 $C1 = C2 \times 10$ となります。回路cでは、高周波帰還係数がR1 || R3対R2という比率で設定されているため、 $R3 = R2/10$ となります。このよう

図9. $a(f)\beta$ の振幅と位相のボード線図 (回路a、回路b、回路c)



に、極の配置が決まれば、完全な解が迅速に求められます。

部品の選定

部品値を選択する際は、実用性に目を向ける必要があります。ここで取り上げたアンプは何百MHzもで動作させることが可能な高速アンプであるため、抵抗値を低く保って寄生静電容量が結果に影響しすぎないようにする必要があります。但し、抵抗値が低くなりすぎないようにする必要もあります。アンプにかかる負荷が大きくなりすぎるためです。次に示すコメントは、回路のテスト中に行われた観察に基づくものです。

- ・ 回路aでは、100Ω～500Ω範囲の帰還抵抗値が最良という結果になりました。49.9Ωおよび1kΩという値では、特性が低下する結果になりました。
- ・ 回路bと回路cでは、200Ω～1kΩ範囲の帰還抵抗値が最良という結果になりました。100Ωという値では、特性が低下する結果になりました。1kΩより高い値では、コンデンサの値が小さくなりすぎた(2.2 pF*より低くなった)ため、テストは実施しませんでした。

*評価用基板において、帰還の両端間で約0.6pFの寄生静電容量が観測され、その結果、部品としての帰還容量に迫る値となった。

THD

次に答えを出すべき疑問は、実験室で回路がテストされた時に、実際にどのようなことが起きるかということです。回路は、Texas Instrumentsから入手できるTHS4011とTHS4021の評価用基板を使用して構築し、テストします。図10は、THDを測定するために使用される基本的なテスト・システムです。

フィルタは、約80dBの帯域外除去比を持つ6次の楕円フィルタです。ジェネレータとテスト回路の間には正弦ジェネレータから来る高調波を除去する目的で、ローパス・フィルタ(LPF)が挿入されています。テスト回路とスペクトラム・アナライザの間には、大振幅の基本波を除去して、スペクトラム・アナライザ入力回路自体の高調波の発生を防ぐために、ハイパス・フィルタ(HPF)が挿入されています。表1は、各フィルタに適用される基本波周波数とコーナー周波数です。

表1. フィルタのカットオフ周波数

基本波(Hz)	LPF (Hz)	HPF (Hz)
1 M	1.1 M	1.9 M
2 M	2.2 M	3.8 M
4 M	4.4 M	7.6 M
8 M	8.8 M	15.2 M
16 M	17.6 M	30.4 M

図11は、非反転アンプのテスト結果です。周波数が低い場合には回路aの歪み特性の方が回路dよりも良くなっていますが、周波数が高くなるとこの傾向は低下します。

図10. THDテストのセットアップ

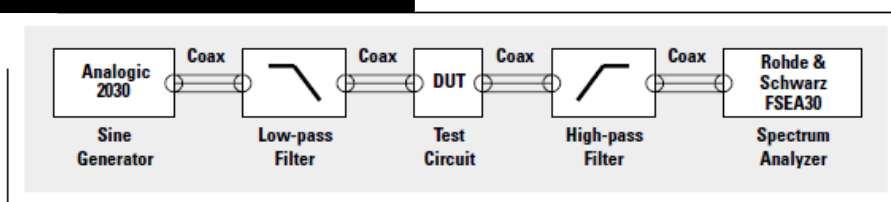


図11. THD vs. 周波数 (非反転アンプ)、 $V_{out} = 2V_{p-p}$

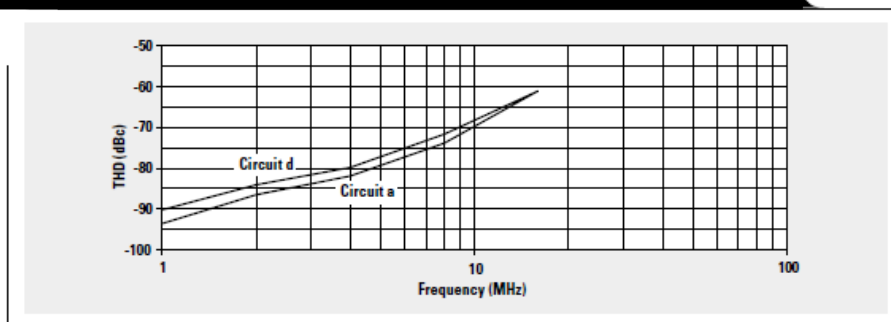
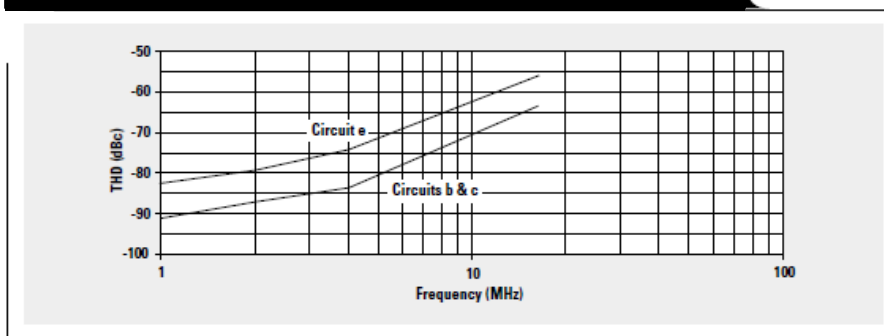


図12は、反転アンプの場合のテスト結果です。テストされたすべての周波数で、回路bと回路cの歪み特性が回路eよりも良くなっています。

内部補償されたTHS4011を使用する回路と比べてループ・ゲインが高くなっているため、全体的に外部補償されたTHS4021回路の歪み特性の方が良くなっています。

図12. THD vs 周波数 (反転アンプ)、 $V_{out} = 2V_{p-p}$



過渡応答

図13と図14は、立ち上がり時間と立ち下がり時間が0.9nsの正のパルス2Vを入力した結果による、回路a、b、d、eの過渡応答です。回路cは示されていませんが、回路bとほとんど同じです。

回路aとdのスルー・レートは似ているように見えますが、入力パルスに対する応答は回路aの方が早くなっています。回路aでは約30%のオーバーシュートを示していますが、セトリング時間はほとんど同じに見えます。入力パルスに対する応答は回路bの方が早く、スルー・レートが回路eの約2倍になっています。また、セトリングにかかる時間もわずかに短くなっています。

ノイズ

オペアンプの入力換算白色雑音の仕様値は、THS4021の場合は

$$\frac{1.5 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

となり、THS4011の場合は

$$\frac{7.5 \text{ nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

となります。

動作周波数の大部分において、各回路のノイズ・ゲインが基本的に同じであり、抵抗ノイズもほぼ同じであれば、外部補償回路の場合はノイズ特性が5倍良くなるはずですが、ノイズをユニティ・ゲインにより測定するという方法は、あまり現実的ではありません。比較を目的としてノイズを測定する場合は、各オペアンプを非反転ゲイン1000で構成し、出力をRMS電圧計で測定するという方法を取ります。図15は、テスト用のシステムです。

予測される出力ノイズは、次の式で概算できます。

$$E_n = e_n \times A \times \sqrt{LPF}$$

E_n は出力ノイズのRMS(実効値)、 e_n はオペアンプの入力換算白色雑音の仕様値、 A は理想閉ループ・ゲイン、 LPF はローパス・フィルタのコーナー周波数(137.5 kHz)です。

THS4011を使用した場合のノイズの概算値は2.78mV RMSであり、測定値は2.47mVでした。THS4021を使用した場合のノイズの概算値は0.56mV RMSであり、測定値は0.57mVでした。予測された通り、約5:1という比率が観察されました。

図13. 過渡応答(非反転アンプ)

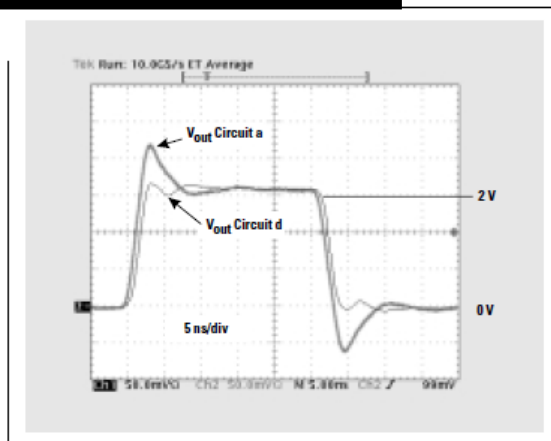
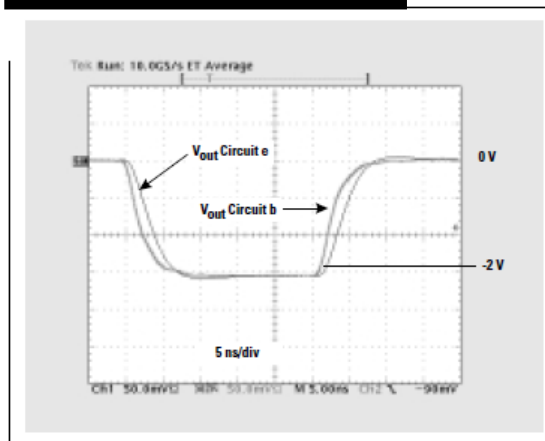


図14. 過渡応答(反転アンプ)



結論

歪み、過渡応答、ノイズ特性を調べるために、5つの異なる回路がテストされました。非反転アンプの場合として回路aと回路dを比較し、反転アンプの場合として回路bおよび回路cを回路eと比較した結果、外部補償型のTHS4021を使用する場合と 内部補償型のTHS4011を使用する場合について、次のような結論が導き出されました(表2参照)。

反転アンプの場合については、回路bおよび回路cを回路eと比較した結果、テストされた周波数全体で、THD特性の大幅な向上が見られました。回路bと回路 cの間には、大幅な差はありませんでした。

非反転アンプの場合については、回路aと回路dを比較した結果、やはりTHD特性の向上が見られましたが、周波数が高くなるにつれてその向上の度合いは小さくなり、16MHzではまったく向上が見られませんでした。

過渡応答については複雑な結果が示されました。反転アンプを比較すると、スルー・レートとセトリング時間はいくらか向上していますが、非反転アンプの場合にはほとんど変化していないように見えます。非反転アンプの回路aはかなりのオーバーシュートを示していますが、用途によっては好ましくない結果といえます。

動作周波数の大部分で回路のノイズ・ゲインが基本的に同じであり、抵抗ノイズがほぼ同じであれば、ノイズ特性は外部補償回路の方が良くなるはずですが、実験データは、約5:1という比率を示しており、これはオペアンプのノイズ仕様値の差と一致しています。

参考文献

この記事に関連する詳細な情報を記載したAcrobat Reader ファイルを、www-s.ti.com/sc/techlit/litnumberからダウンロードできます。その際、“litnumber”の部分で、次に記載する資料の TI文書番号(Lit. #)に置き換えてください。

資料タイトル

TI Lit.

1. “Feedback Amplifier Analysis Tools”
sloa017
2. “Stability Analysis of Voltage-Feedback Op Amps”
sloa020

関連ウェブサイト

amplifier.ti.com

製品のデータ・シートは下記からダウンロードできます。

www.ti.com/sc/docs/products/analog/device.html

“device”の部分で、ths4011またはths4021に置き換えてください。

表2. テスト結果の比較

回路	説明	テスト・パラメータ	コメント
a	THS4021 (外部補償型非反転アンプ)	歪み	4dBの向上が1MHzで見られる(周波数が高くなるにつれて向上の度合いが減少)
		過渡応答	初期応答はより高速だが、スルー・レートとセトリング時間は同程度
		ノイズ	5倍の向上
b	THS4021 (2つのコンデンサを使用した外部補償型反転アンプ)	歪み	テスト対象の全周波数で7~9dBの向上
		過渡応答	初期応答、スルー・レート、セトリング時間がより高速
		ノイズ	5倍の向上
c	THS4021 (1つのコンデンサを使用した外部補償型反転アンプ)	歪み	テスト対象の全周波数で7~9dBの向上
		過渡応答	初期応答、スルー・レート、セトリング時間がより高速
		ノイズ	5倍の向上

ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社（以下TIJといいます）及びTexas Instruments Incorporated（TIJの親会社、以下TIJないしTexas Instruments Incorporatedを総称してTIといいます）は、その製品及びサービスを任意に修正し、改善、改良、その他の変更をし、もしくは製品の製造中止またはサービスの提供を中止する権利を留保します。従いまして、お客様は、発注される前に、関連する最新の情報を取得して頂き、その情報が現在有効かつ完全なものであるかどうかをご確認下さい。全ての製品は、お客様とTIJとの間取引契約が締結されている場合は、当該契約条件に基づき、また当該取引契約が締結されていない場合は、ご注文の受諾の際に提示されるTIJの標準販売契約約款に従って販売されます。

TIは、そのハードウェア製品が、TIの標準保証条件に従い販売時の仕様に対応した性能を有していること、またはお客様とTIJとの間で合意された保証条件に従い合意された仕様に対応した性能を有していることを保証します。検査およびその他の品質管理技法は、TIが当該保証を支援するのに必要とみなす範囲で行なわれております。各デバイスの全てのパラメーターに関する固有の検査は、政府がそれ等の実行を義務づけている場合を除き、必ずしも行なわれておりません。

TIは、製品のアプリケーションに関する支援もしくはお客様の製品の設計について責任を負うことはありません。TI製部品を使用しているお客様の製品及びそのアプリケーションについての責任はお客様にあります。TI製部品を使用したお客様の製品及びアプリケーションについて想定される危険を最小のものとするため、適切な設計上および操作上の安全対策は、必ずお客様にてお取り下さい。

TIは、TIの製品もしくはサービスが使用されている組み合わせ、機械装置、もしくは方法に関連しているTIの特許権、著作権、回路配置利用権、その他のTIの知的財産権に基づいて何らかのライセンスを許諾するということは明示的にも黙示的にも保証も表明もしていません。TIが第三者の製品もしくはサービスについて情報を提供することは、TIが当該製品もしくはサービスを使用することについてライセンスを与えたり、保証もしくは承認するということを意味しません。そのような情報を使用するには第三者の特許その他の知的財産権に基づき当該第三者からライセンスを得なければならない場合もあり、またTIの特許その他の知的財産権に基づきTIからライセンスを得て頂かなければならない場合もあります。

TIのデータ・ブックもしくはデータ・シートの中にある情報を複製することは、その情報に一切の変更を加えること無く、かつその情報と結び付けられた全ての保証、条件、制限及び通知と共に複製がなされる限りにおいて許されるものとします。当該情報に変更を加えて複製することは不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような変更された情報や複製については何の義務も責任も負いません。

TIの製品もしくはサービスについてTIにより示された数値、特性、条件その他のパラメーターと異なる、あるいは、それを超えてなされた説明で当該TI製品もしくはサービスを再販売することは、当該TI製品もしくはサービスに対する全ての明示的保証、及び何らかの黙示的保証を無効にし、かつ不正で誤認を生じさせる行為です。TIは、そのような説明については何の義務も責任もありません。

TIは、TIの製品が、安全でないことが致命的となる用途ないしアプリケーション（例えば、生命維持装置のように、TI製品に不良があった場合に、その不良により相当な確率で死傷等の重篤な事故が発生するようなもの）に使用されることを認めておりません。但し、お客様とTIの双方の権限有る役員が書面でそのような使用について明確に合意した場合は除きます。たとえTIがアプリケーションに関連した情報やサポートを提供したとしても、お客様は、そのようなアプリケーションの安全面及び規制面から見た諸問題を解決するために必要とされる専門的知識及び技術を持ち、かつ、お客様の製品について、またTI製品をそのような安全でないことが致命的となる用途に使用することについて、お客様が全ての法的責任、規制を遵守する責任、及び安全に関する要求事項を満足させる責任を負っていることを認め、かつそのことに同意します。さらに、もし万一、TIの製品がそのような安全でないことが致命的となる用途に使用されたことによって損害が発生し、TIないしその代表者がその損害を賠償した場合は、お客様がTIないしその代表者にその全額の補償をするものとします。

TI製品は、軍事的用途もしくは宇宙航空アプリケーションないし軍事的環境、航空宇宙環境にて使用されるようには設計もされていませんし、使用されることを意図されていません。但し、当該TI製品が、軍需対応グレード品、若しくは「強化プラスチック」製品としてTIが特別に指定した製品である場合は除きます。TIが軍需対応グレード品として指定した製品のみが軍需品の仕様書に合致いたします。お客様は、TIが軍需対応グレード品として指定していない製品を、軍事的用途もしくは軍事的環境下で使用することは、もっぱらお客様の危険負担においてなされるということ、及び、お客様がもっぱら責任をもって、そのような使用に関して必要とされる全ての法的要求事項及び規制上の要求事項を満足させなければならないことを認め、かつ同意します。

TI製品は、自動車用アプリケーションないし自動車の環境において使用されるようには設計されていませんし、また使用されることを意図されていません。但し、TIがISO/TS 16949の要求事項を満たしていると特別に指定したTI製品は除きます。お客様は、お客様が当該TI指定品以外のTI製品を自動車用アプリケーションに使用しても、TIは当該要求事項を満たしていなかったことについて、いかなる責任も負わないことを認め、かつ同意します。

Copyright © 2011, Texas Instruments Incorporated
日本語版 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

弊社半導体製品の取り扱い・保管について

半導体製品は、取り扱い、保管・輸送環境、基板実装条件によっては、お客様での実装前後に破壊/劣化、または故障を起こすことがあります。

弊社半導体製品のお取り扱い、ご使用にあたっては下記の点を遵守して下さい。

1. 静電気

- 素手で半導体製品単体を触らないこと。どうしても触る必要がある場合は、リストストラップ等で人体からアースをとり、導電性手袋等をして取り扱うこと。
- 弊社出荷梱包単位（外装から取り出された内装及び個装）又は製品単品で取り扱いを行う場合は、接地された導電性のテーブル上で（導電性マットにアースをとったもの等）、アースをした作業者が行うこと。また、コンテナ等も、導電性のものを使うこと。
- マウンタやんだ付け設備等、半導体の実装に関わる全ての装置類は、静電気の帯電を防止する措置を施すこと。
- 前記のリストストラップ・導電性手袋・テーブル表面及び実装装置類の接地等の静電気帯電防止措置は、常に管理されその機能が確認されていること。

2. 温・湿度環境

- 温度：0～40℃、相対湿度：40～85%で保管・輸送及び取り扱いを行うこと。（但し、結露しないこと。）

- 直射日光が当たる状態で保管・輸送しないこと。
3. 防湿梱包
 - 防湿梱包品は、開封後は個別推奨保管環境及び期間に従い基板実装すること。
 4. 機械的衝撃
 - 梱包品（外装、内装、個装）及び製品単品を落下させたり、衝撃を与えないこと。
 5. 熱衝撃
 - はんだ付け時は、最低限260℃以上の高温状態に、10秒以上さらさないこと。（個別推奨条件がある時はそれに従うこと。）
 6. 汚染
 - はんだ付け性を損なう、又はアルミ配線腐食の原因となるような汚染物質（硫黄、塩素等ハロゲン）のある環境で保管・輸送しないこと。
 - はんだ付け後は十分にフラックスの洗浄を行うこと。（不純物含有率が一定以下に保証された無洗浄タイプのフラックスは除く。）

以上