

トランスインピーダンス・アンプの直感的な補償方法

Tony Wang, Barry Erhman

High-Performance Linear Products

トランスインピーダンス・アンプは、低レベルのフォトダイオード電流を、使用可能な電圧信号に変換するために使用されます。アンプを正しく動作させるためには経験に基づいて補償を行う必要がありますが、経験に頼る場合があまりにも多いのが実情です。関与する部品のすべてを見れば、この問題が容易に理解できると思われます。図1は、標準的なフォトダイオードのアプリケーションです。

理想的なトランスインピーダンス伝達関数を調べると、次のようになります。

$$V_{OUT} = -I_S \cdot Z_F = -I_S \cdot \frac{R_F}{1+j2\pi f R_F C_F} \quad (1)$$

上の式が示しているのは、周波数レスポンスが厳密に帰還ネットワークに起因しているということであって、トランスインピーダンス・アンプが発振しやすいのは何故かということはありません。図2を見ると、安定性の問題についてより多くのことが洞察できます。フォトダイオードは、等価抵抗 R_D と静電容量 C_D が並列になった理想の電流ソースに置き換えられています。オペアンプの入力静電容量には十分に注意する必要があり、 C_D の一部に含めて考える必要があります。

回路の安定性を決めるのは、この構成のノイズ・ゲイン(つまり非反転側の閉ループ・ゲイン)です。どのようなノイズ信号であれ、たとえそれがどのくらい小さな信号であっても、不安定な回路を発振させるきっかけとなる可能性があるためです。調べてみると、伝達関数は次のようになることが分かります。

$$A_{CL}(f) = \frac{R_F + R_D}{R_D} \cdot \frac{1+j2\pi f \left(\frac{R_F R_D}{R_F + R_D} \right) (C_F + C_D)}{1+j2\pi f R_F C_F}$$

$$A_{CL}(f) = \frac{R_F + R_D}{R_D} \cdot \frac{1+j\frac{f}{f_z}}{1+j\frac{f}{f_p}} \quad (2)$$

DCゲインは、抵抗のみによって設定されます。極周波数 f_p は、帰還ネットワークによって、トランスインピーダンス関数の中に設定されます。ゼロ周波数 f_z は、(a) 帰還の静電容量とダイオードの静電容量の和、および (b) 帰還抵抗とダイオード抵抗の並列結合によって決まります。

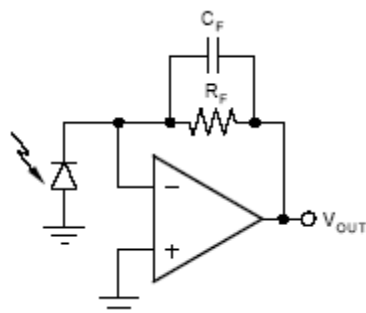


図1. 標準的なフォトダイオード・トランスインピーダンス・アンプ

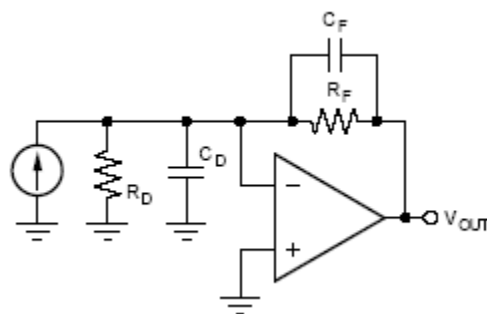


図2. 理想的な部品でモデリングしたフォトダイオード

通常、帰還抵抗はフォトダイオードの等価抵抗よりもずっと小さくなっています。このため、DC抵抗ゲインはユニティ・ゲインとなります。低周波領域では、並列結合の値は帰還抵抗単体の値と基本的に等しくなります。したがって図3に示すように、 f_z は常に f_p よりも低くなります。

図4に示すのは、閉ループ・レスポンス曲線が開ループ・ゲイン曲線と交差する場合を三通り想定した結果です。 f_p が開ループ・ゲイン曲線の外側になると、安定性の劣化が発生します。 f_{p1} では、必ず回路の発振が起こります。 f_p が開ループ・ゲイン曲線の内側にあれば、トランスインピーダンス回路は無条件に安定します。これが f_{p2} の場合ですが、安定性と引き換えに、トランスインピーダンス帯域幅が狭まります。最も妥当な解決法は、 f_{p3} の場合に示すように、 f_p が開ループ・ゲイン曲線上に来るようにすることです。

f_p は帰還ネットワークによって決まるので、 C_F の選択は思慮深く行う必要があります。ノイズ・ゲインを表す高周波数の漸近線が静電容量値のみによって決まることに着目すれば、このプロセスは次のように大幅に簡素化できます。

$$A_{CL}(f \gg f_p) = \frac{C_F + C_D}{C_F} \tag{3}$$

この値は、 f_p におけるオペアンプの開ループ・ゲインと等しくなるはずですが。開ループ・ゲインを求めるには、オペアンプのゲイン帯域幅積(GBW)を f_p で割ります。これら2つの式をイコールで結ぶと、次のようになります。

$$\frac{GBW}{f_p} = \frac{C_F + C_D}{C_F} \tag{4}$$

単純な代入の結果、ひとつの二次方程式が導かれます。この式の唯一の、実数であり正の値である解は次の通りです。

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBW} \left[1 + \sqrt{1 + 8\pi R_F C_D GBW} \right] \tag{5}$$

この単純な式により、オペアンプのゲイン帯域幅の最小値とフォトダイオードの静電容量の最大値が決まれば、適切な帰還コンデンサ C_F を選定して安定性が保証できるようになります。

さらに考察すれば、簡素化のためのいくつかの仮定やちょっとした代数式が得られます。

$$f_p \approx \sqrt{\frac{GBW}{2\pi R_F C_D}} \tag{6}$$

この結果が示すのは、どのようなオペアンプとフォトダイオードを使用した場合でも、トランスインピーダンス帯域幅は帰還抵抗の平方根と反比例の関係になるということです。したがって、帯域幅が決定的に重要な要件となる場合の最良のアプローチは、中程度の値のトランスインピーダンス・ゲイン段を選択して、後段に広帯域幅の電圧ゲイン段を付加するという方法になるでしょう。

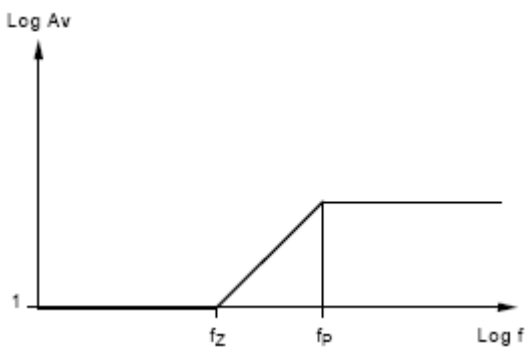


図3. ノイズ解析のボード線図

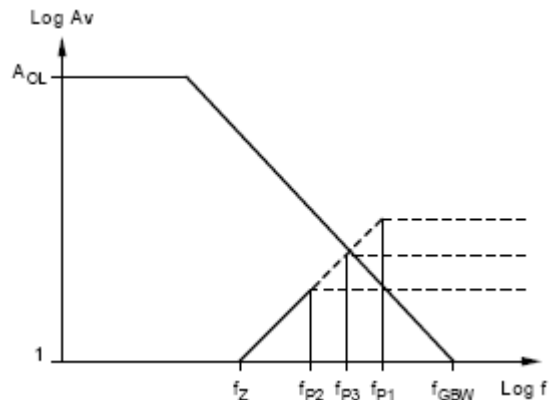


図4. オペアンプの開ループ・ゲインと交差する様々な帰還レスポンス

ご注意

日本テキサス・インスツルメンツ株式会社(以下TIJといひます)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といひます)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との間に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るとか、保証もしくは承認をする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 © 2009, 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。

マウンタやはんだ付け設備等、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。)

直射日光があたる状態で保管・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