

**フォトダイオード・アンプ（電流電圧変換）の周波数特性を考える（後編）**
**周波数特性の改善方法を考える**

著者：石井 聡

**はじめに**

フォトダイオード・アンプ（電流電圧変換）回路は簡単そうでも奥の深い回路です。その考察とか解析で最初にひっかかるところが、周波数特性とノイズ特性についてではないでしょうか。この技術ノートはその後編としてお届けするものです。

前回はフォトダイオード・アンプの周波数特性を決める支配的要因がフォトダイオード自体の接合容量 $C_j$ だと説明し、帰還抵抗 $R_F$ とで形成される時定数により、ループ・ゲインが $-12\text{dB/Oct}$ で低下を始め、本来の（1次遅れ系の） $-6\text{dB/Oct}$ よりも低下が急になり、より高速なOPアンプに変えても、思ったように周波数特性が伸びないということ、改善率がGB積の比の平方根になるということを説明しました。

今回はもう少しこのようすを見ていき、どのようにすれば周波数特性を改善できるかを考えていきましょう。

**いきなり本題からそれる「酔」技術ノート**

フォトダイオードは半導体ですので、当然ながら半導体物理を基礎にしています。ここで出てくる用語に「フェルミ準位」とか「フェルミ・エネルギー」というものがあります。この業績を残したエンリコ・フェルミ（Enrico Fermi）[1]は物理学者ですが、理系以外の一般人にも活用できる「フェルミ推定」[2]という手法を編み出した人でもあります。

私も初めてフェルミ推定という用語を聞いたときは「エンリコ・フェルミと同じ名なんだな、面白いものだ」と思いました。少して、これがこの物理学者が編み出した手法、つまり同じ人であることを知り、たいへん驚いたものでした。

今回の技術ノートは、いつものように（？）いきなり横道にそれてみたいと思います（笑）。それこそ、好き勝手に執筆しているというのが丸見えなわけですが（汗）…。

**フェルミ推定を活用してみる**

Wikipediaのページ[2]にも説明がありますが、ビジネス・シーンや、コンサルティング・ファームの面接試験などで良く出てくるのがこの「フェルミ推定」なのです。たとえば、『東京都23区内にある公衆トイレの数は？』などを概略値として推定するという考え方です。

そういう私は（横道がさらに横道にそれますが）、理系人だからでしょうか、気持的にはこのフェルミ推定などの概算値というものが「どうもじっくりこない（こんないい加減さでは）」と永く思っていました。たとえば「競合A社の売上げを推定する」とか、「マーケット規模を推定する」などです。しかし工学にも「Rule of Thumb」[3, 4]（Wikipediaの日本語サイトでは「経験則」となっていますね）が存在することに気づき、また「当たらずも遠からず」と「闇夜に鉄砲」という慣用句の対比を考えると、この「概算値」というのも、意外と根拠があるな（めくら減法よりは断然良い）、と思ったものでした。その

[2]においても、「理工学でも使われる」とあり、はっと、自らの修行の足りなさを恥じるべきだとも気がつきました…。

今回はこのフェルミ推定チックに、私が普段とみに出くわす、「マーフィーの法則[5]」（[5]から引用して、その例を挙げると『食パンを落とすと必ずバターが付いているほうが下』など）ネタを解析して（という横道にそれて）みたいと思います。

**着替えロッカー・ルームで隣に人がかならずやってくる「マーフィーの法則」とフェルミ推定**

私は個人的な事情により、東京湾アクアラインを挟んで東西にある、2か所のスポーツ・ジム（企業としての資本関係は全く別です）に、それぞれ、時々、行きます（図1）。スポーツとかいっても、トレーニング・マシンで筋骨隆々になるわけではなく、ランニング・マシン上を少し早めに歩いて、プールに入るという程度ですが…（バーベル持って自己流で筋トレしたところ、肩を痛めてしまいました…T^T）。

ジムですから当然、着替えをします。そして2か所のジムともども当然、着替えロッカー・ルームがあります。入室すると東のジムは大体誰もおらず、西のジムは人が誰もいないブロックを探してそこで着替えを開始します。そうすると、エクササイズから上がった人が戻ってきて、部屋／ブロックに入ってきます。そして、そうすると…、とても高い確率で（どちらのジムでも）私の隣のロッカーを開けるのです。その部屋、もしくはそのブロックには誰もいないにも関わらず…。広いロッカー・ルームやブロックでふたりだけで隣のロッカー…。あんまりいい気持ちはしないものです。「これはマーフィーの法則だなあ」と、いつも甚く（いたく）感じていたものでした。



図1. 私の利用している西のスポーツ・ジムのロッカー（この技術ノートをご覧の、一部の方の勤務先に近いジムのロッカーである可能性がかなり高い！接近遭遇しているかも！）

アナログ・デバイス株式会社は、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・デバイス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、それぞれの所有者の財産です。  
©2020 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Rev. 0

## アナログ電子回路技術ノート

## TNJ-065

そこで、ロッカーが数十個ある当該ロッカー・ルーム（ブロック）において、自分が着替えているタイミングで、隣に人がやってくる確率の概略値を、フェルミ推定で求めてみましょう。

- ・ジムは1日14時間稼働し、ロッカーは40個あるとする
- ・一人の人が2時間ジムを利用し、前後5分（合計10分）でロッカーを利用すると仮定する

・ロッカー・ルーム（ブロック）には120人が立ち入ると仮定すれば、1日の1個のロッカー使用回数は3回になる

・1個のロッカーは14時間中6時間の占有と計算でき、稼働率が43%となり、西のジムの状況に近い…。いい感じだ…

・1個のロッカー前に人がいる時間は1日あたり30分となる

・これは14時間換算なので私の行く時間帯を7時間とすると、その時間帯で1日あたり（半分の）15分。これから占有率は15分/(7時間×60分)=3.57%

・私自身はあるロッカーを10分間利用するとする。これは2.38%の占拠率

・自分の左右のロッカーを対象とすると、占拠率は3.57×2=7.14%

・私が着替えている時間に隣のロッカーが使われる確率は（この導出自体が厳密に正しいかはわからないが）7.14%×2.38%=0.17%=1700ppm…

考え方や、確率論としての正しさ、計算方法には間違いもあると思いますが、このようにフェルミ推定モデルをしてみると、なんと0.17%、1700ppmという、とんでもない低い確率が得られます。しかし私は結構高い頻度でこのシミュレーションにぶつかるのでした（涙）。これはそれぞれ、「マーフィーの法則」そのものなのでした（涙）。

## OPアンプのモデルを定義して周波数特性を考える

ゴミネタすいません…（汗）。本題に戻しましょう（汗）。前回の続きとなりますが、まず、はじめに直球勝負で、フォトダイオード・アンプの周波数特性を求めてみます。これをあまりやっていると読者の皆さんも数式げんりモードになる心配がありますので、興味のない方は読み飛ばしてください。

図2は前回のTNJ-064で使用したAD8066を用いたフォトダイオード・アンプです。なお計算が厄介になるので、 $C_C$ は無視して考えていきます。

### AD8066 を数式モデルで表しておく

さて、OPアンプの周波数特性を数式モデルで表すと、単純な表現方法であれば

$$A(f) = \frac{A_{OLDC}}{1 + j2\pi f C_P R_P} \quad (1)$$

という式で、DCでのオープン・ループ・ゲイン $A_{OLDC}$ をもつ1次遅れ系として表すことができます。

AD8066のデータシート[6]を見ると、オープン・ループ・ゲイン $A_{OLDC}$ は114dB（ただし1kΩ負荷抵抗時。真値としては500,000）とあります。 $GBW = 65\text{MHz}$ ですから、式(1)を $A(f) = 1$ 、 $f = GBW$ とすることで

$$C_P R_P \approx \frac{A_{OLDC}}{2\pi \cdot GBW} = \frac{500,000}{2\pi \times 65\text{MHz}} = 0.0012\text{sec} \quad (2)$$

となり、オープン・ループ・ゲインの-3dBカットオフ周波数が $f_{3dB} = 130\text{Hz}$ となるAD8066の簡易的数式モデルを構成できます。この計算が正しいかどうか、数値計算ソフトで上記の式と値を使って計算したものを図3に示します。

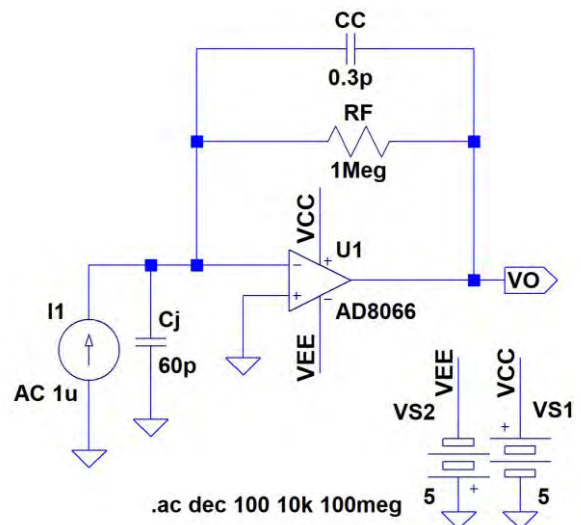


図2. GB積65MHzのAD8066を用いたフォトダイオード・アンプのシミュレーション回路図。ここでは $C_C$ は無視して議論を進める（TNJ-064の図5再掲）

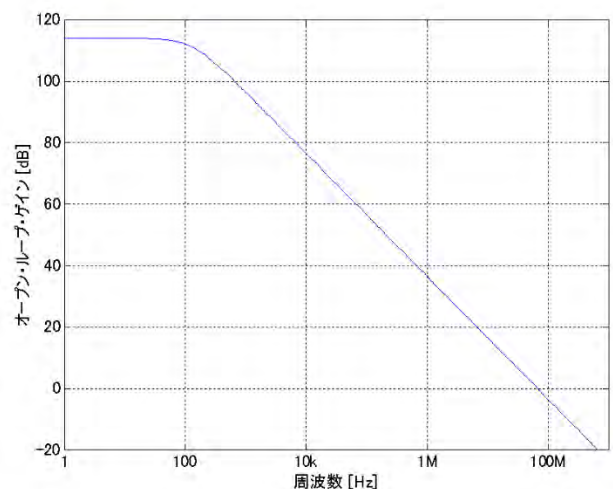


図3. AD8066を数式でモデル化したものを数値計算ソフトウェアで計算したオープン・ループ・ゲイン特性

たしかによく見るオープン・ループ・ゲイン特性になっていることが分かります。

以降の計算で用いる $C_j R_F$ についても計算しておく、図2から

$$C_j R_F = 60 \times 10^{-6} \text{ sec}$$

前回のTNJ-064の式(12)を使って（変形して）、またリアクタンス $X_{Cj}$ の表記をもとに戻して、

$$\begin{aligned} V_o &= -\frac{A(f)X_{Cj}}{R_F + X_{Cj} + A(f)X_{Cj}} V_D \\ &= -\frac{\frac{A_{OLDC}}{1 + j2\pi f C_P R_P} \cdot \frac{1}{j2\pi f C_j}}{R_F + \left[1 + \frac{A_{OLDC}}{1 + j2\pi f C_P R_P}\right] \frac{1}{j2\pi f C_j}} V_D \end{aligned} \quad (3)$$

さらに $s = j2\pi f$ として、ラプラス演算子を使って見た目をさっぱりとさせてみると

## アナログ電子回路技術ノート

TNJ-065

$$\begin{aligned}
 V_O(s) &= -\frac{\frac{A_{OLDC}}{1+sC_P R_P}}{sC_J R_F + \left[1 + \frac{A_{OLDC}}{1+sC_P R_P}\right]} V_D \\
 &= -\frac{A_{OLDC}}{(sC_J R_F + 1)(1+sC_P R_P) + A_{OLDC}} V_D \\
 &= -\frac{A_{OLDC}}{s^2 C_J R_F C_P R_P + s(C_J R_F + C_P R_P) + 1 + A_{OLDC}} V_D \quad (4)
 \end{aligned}$$

これから $V_O(f)$ のポール（-3dBになる周波数）を得てみます。

$$s^2 C_J R_F C_P R_P + s(C_J R_F + C_P R_P) + 1 + A_{OLDC} = 0 \quad (5)$$

から

$$\begin{aligned}
 s &= \frac{-(C_J R_F + C_P R_P)}{2C_J R_F C_P R_P} \\
 &\quad \pm \sqrt{\frac{(C_J R_F + C_P R_P)^2 - 4C_J R_F C_P R_P(1 + A_{OLDC})}{2C_J R_F C_P R_P}} \quad (6)
 \end{aligned}$$

$A_{OLDC}$ が十分大きいことから、根号の中は虚数となります。その結果、ふたつのポール $s$ は共役複素数となり、2次LPF特性になります。これを $s_{p\pm}$ と表しましょう。 $A_{OLDC}$ が十分大きいことから

$$(C_J R_F + C_P R_P)^2 \ll 4C_J R_F C_P R_P(1 + A_{OLDC}) \quad (7)$$

とすれば…と持っていきたいので（汗）、まずホントにそうかを図2のAD8066の数値で確認してみましょう。

$$(C_J R_F + C_P R_P)^2 = 1.44 \times 10^{-6}$$

$$4C_J R_F C_P R_P(1 + A_{OLDC}) = 0.144$$

なるほどです。ということで

$$(C_J R_F + C_P R_P)^2 \ll 4C_J R_F C_P R_P(1 + A_{OLDC}) \quad (7) \text{再掲}$$

となりますから、式(6)から $(C_J R_F + C_P R_P)^2$ を省略し、さらにカッコ内の「1+」も省略し

$$\begin{aligned}
 s_{p1,p2} &= \frac{-(C_J R_F + C_P R_P) \pm j\sqrt{4C_J R_F C_P R_P A_{OLDC}}}{2C_J R_F C_P R_P} \\
 &= -\frac{C_J R_F + C_P R_P}{2C_J R_F C_P R_P} \pm j\sqrt{\frac{A_{OLDC}}{C_J R_F C_P R_P}} \quad (8)
 \end{aligned}$$

式(2)から

$$s_{p\pm} = -\frac{C_J R_F + C_P R_P}{2C_J R_F C_P R_P} \pm j\sqrt{\frac{2\pi GBW}{C_J R_F}} \quad (9)$$

これから入出力伝達関数は

$$\frac{V_O(s)}{V_D} = -\frac{A_{OLDC}}{(s - s_{p+})(s - s_{p-})} \quad (10)$$

となります。ただし $s_{p+}, s_{p-}$ はこれまでの説明のとおり共役複素数のポール $s_{p\pm}$ です。

### カットオフ周波数 $\omega_0$ は

つづいてこの2次LPF特性のカットオフ周波数 $\omega_0$ を求めてみましょう。TNJ-046 [7]において、あるポール $s_{p\pm}$ が与えられたとき、そのカットオフ周波数 $\omega_0$ については、「 $s_{p\pm}$ の位置は、『中心から半径 $\omega_0$ の位置』（この図では $\omega_0 = 1$ ）」と説明しました。つまりポールの大きさ（ベクトルとしてのノルム）がカットオフ周波数 $\omega_0$ に相当するわけです。そこで式(9)からカットオフ周波数 $\omega_0$ を計算してみましょう。

$$\omega_0^2 = \left(\frac{C_J R_F + C_P R_P}{2C_J R_F C_P R_P}\right)^2 + \frac{2\pi GBW}{C_J R_F} \quad (11)$$

ここで図2の回路においては $C_J R_F \ll C_P R_P$ ですから、上式の右辺1項は並列接続的な計算になり、 $C_J R_F$ が支配的になることから（分母・分子を $C_P R_P$ で割ってみると分かりやすいでしょう）

$$\omega_0^2 = \left(\frac{1}{2C_J R_F}\right)^2 + \frac{2\pi GBW}{C_J R_F} \quad (12)$$

さらに

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{1}{2C_J R_F}\right)^2 + \frac{2\pi GBW}{C_J R_F}} \quad (13)$$

が得られます。実際の図2の回路の数値を代入してみると

$$\left(\frac{1}{2C_J R_F}\right)^2 = 69.4 \times 10^6$$

$$\frac{2\pi GBW}{C_J R_F} = 6.81 \times 10^{12}$$

ですから、またここでも式(13)の第1項を無視できて、

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2\pi GBW}{C_J R_F}} = 2.61 \text{ Mrad/sec} \quad (= 415 \text{ kHz})$$

を得ることができます。周波数に直すと415kHzです。図2の回路のカットオフ周波数を確認するために、前回のTNJ-064の図6の周波数特性がピークになる周波数を見てみると、339kHzであり、だいたい近い値になっていることが分かります。若干の差異は、図2の回路では、安定化容量 $C_C$ （補償容量）が接続されていることにより、周波数特性が幾ぶん変わることが理由なはず（以下にも示します）。

この結果から分かることは、

- ・フォトダイオード・アンプのカットオフ周波数 $\omega_0$ は、OPアンプの $GBW$ を、接合容量と帰還抵抗でできる時定数 $C_J R_F$ で割ったものの平方根になる。時定数 $C_J R_F$ が大きければ $\omega_0$ も小さくなる

- ・OPアンプの $GBW$ を大きくしても、フォトダイオード・アンプのカットオフ周波数 $\omega_0$ は $GBW$ の平方根としての改善効果しかない

この結果は前回のTNJ-064の検討結果と符合していますね。

### この計算のままだとフォトダイオード・アンプは正帰還とになってしまうため補償容量で補正している

ところで詳細の説明は割愛しますが、この2次ポール $s_{p\pm}$ のQ値は非常に大きくなります。これはOPアンプ自体の時定数 $C_P R_P$ で位相が $90^\circ$ 回転し、さらに $C_J R_F$ でも $90^\circ$ 回転することで、位相が合計で $180^\circ$ 回転し、正帰還に近くなるからです。 $\omega_0$ の周波数でゲイン・ピークが大きくなってしまいます。図2で安定化容量 $C_C$ （補償容量）を0pFにしてシミュレーションすると分かります。

実際はこの $C_C$ が接続されますから、これで「ゼロ」が形成され、それで位相が引き戻され安定したフォトダイオード・アンプが実現できることになります（ちょっと難しい話題なので読み飛ばしていただいて結構です）。

またここまでのポールを求める計算においても、安定化容量 $C_C$ （補償容量）が接続されることにより、本来はゼロが式中に追加され、カットオフ周波数が若干変わります。しかしここではややこしくなるばかりなので、計算は割愛します（諦めます…、でしょうか…笑）。

## アナログ電子回路技術ノート

TNJ-065

## フォトダイオード・アンプの周波数特性を改善する

数式ばかりで飽き飽きだという方も多いかと思い、いよいよ実践でどのようにすれば周波数特性を改善できるかについて踏み込んでみます。

高い電流電圧変換率（トランス・インピーダンス）を実現するには、帰還抵抗 $R_F$ を大きくする必要があります。そしてここまでの説明でお分かりいただけたように、フォトダイオード・アンプの周波数特性の制限要因としてフォトダイオードの接合容量 $C_j$ があります。大きな $R_F$ と大きな $C_j$ であれば、低い周波数で $R_F$ と $C_j$ によるカットオフ周波数が形成されてしまいます。

単純には「接合容量 $C_j$ を減らすことができれば…」という思考になるものかと思います。

## 逆バイアスをかけてフォトダイオードの接合容量を減らす

図 4 のようにフォトダイオードに逆方向電圧（逆バイアス）を加えることで、接合容量 $C_j$ の低減が可能です。

図 5 は[8]から引用した、フォトダイオード S2506-02（浜松ホトニクス）の接合容量 $C_j$ の逆電圧特性です。S2506-02 は秋月電子でも購入できます。そういう私も以前、セミナー資料作成用に秋月電子で 2 個買いました。「接合容量」という表記ではなく、周囲の寄生容量も含めて「端子間容量」として特性が記載されています。S2506-02 はゼロ・バイアスで約 60pF、12V 逆バイアスで 15pF です。なお逆方向電圧に正しく反比例して接合容量が低減するものではなく、いくらかの非線形特性があることが一般的です。

一方で逆方向電圧により、リーク電流に相当する「暗電流」というものが増加します。S2506-02 ではデータシート[8]によると、12V 逆バイアスで 0.1nA Typ, 20nA Max, 温度係数 1.15 倍/℃となっています。無視できない大きさです。暗電流により出力にオフセット電圧が生じたりしますので要注意です。

暗電流をキャンセルする方法も提案されています。[9]はこの一例です。この回路を図 6 に示します。

## 帰還抵抗を低下させる（ノイズ特性は劣化する）

図 7 のように帰還抵抗値 $R_F$ を低下させて、後段に増幅用 OP アンプを用意し、系全体の増幅度を同一に維持したまま周波数特性を向上させる方法も考えられます。抵抗値を $1/n$ にすると、周波数特性は $n$ 倍に改善しますが、ノイズ特性は $\sqrt{n}$ 倍で劣化しますので注意が必要です。周波数特性とノイズ特性とのトレードオフになる方法です。

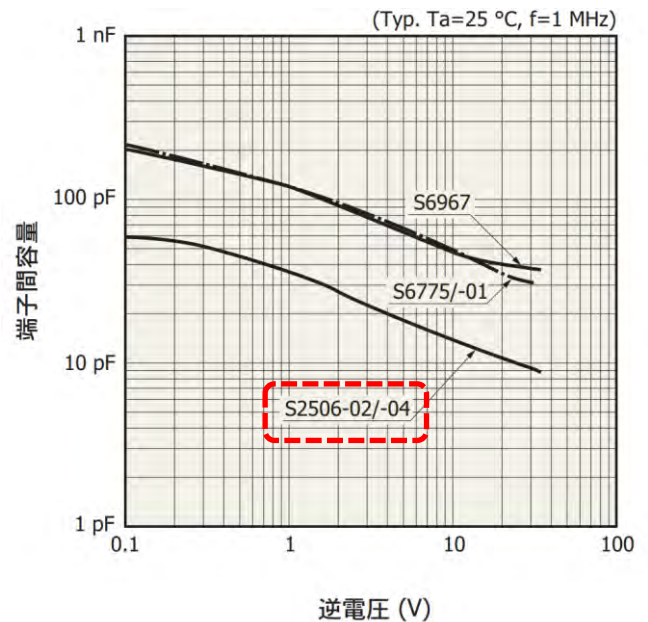


図 5. フォトダイオードに逆方向電圧（逆バイアス）を加えたときの端子間容量（浜松ホトニクス S2506-02 データシート[8]の p. 3 より引用）

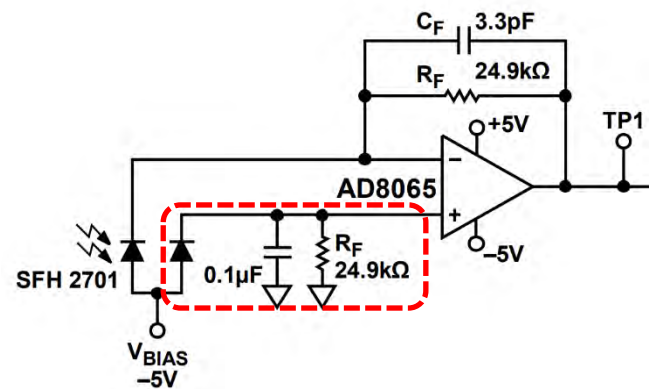


図 6. 暗電流によるオフセットをキャンセルする方法（[9]より引用）

## ブートストラップをかける

図 8 のように、接合型 FET (JFET) でフォトダイオードに「ブートストラップ」をかけることで、IV 変換周波数特性を改善できます[10]。「ブートストラップ」とは、沼の中に嵌（はま）り沈んでいくなかで、自分の靴紐を引っ張り、自らを引き上げることを語源としており、「自助努力で自身を良くする」というような意味合いのものです[11, 12]。

追加した JFET により接合容量 $C_j$ 両端の電圧を一定に維持し、回路動作として接合容量 $C_j$ の影響を低減させるというものです。なお図 8 で用いた FET は、[10]で紹介されている BF862 を用いましたが、BF862 は生産中止品になっています[13]。また BF862 の SPICE モデルは[14]からダウンロードできますが、これがこのまま LTspice ではシミュレーションできず、私は[15]から得た情報とそこにあった SPICE モデルを活用し、シミュレーションを行いました。オリジナルのモデルではイコール「=」が使われていますが、これが LTspice でエラーになること、また JFET シンボルが「Q」となっていますが、これも LTspice では「J」を使う必要があるところが、エラーの原因です。

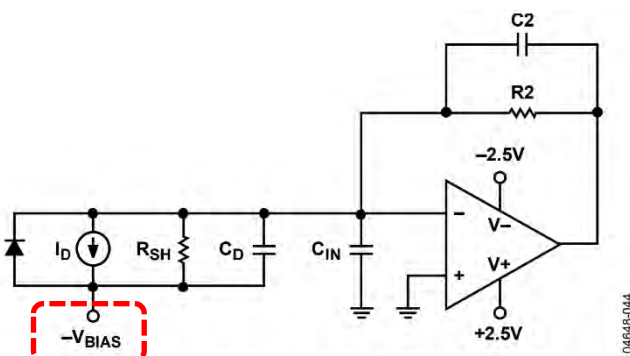


Figure 44. High Speed Photodiode Preamplifier

図 4. フォトダイオードに逆方向電圧（逆バイアス）を加える回路（AD8615/AD8616/AD8618 のデータシートより）

## アナログ電子回路技術ノート

TNJ-065

図 6 では、OP アンプに AD824 を使用しており、前回の TNJ-064 の図 3 を修正したものです。その図 3 と位相余裕が同じになるように、安定化容量  $C_C$  は調整しなおしてあります。

TNJ-064 の図 4 (同ノートの図 3 の結果) に示した、電流電圧変換周波数特性の  $-3\text{ dB}$  カットオフ周波数は  $108.6\text{ kHz}$  でした。図 8 のシミュレーション結果である図 9 では、 $-3\text{ dB}$  カットオフ周波数が  $326.6\text{ kHz}$  に伸びていることが分かります。

## ブートストラップ回路の動作を解析してみる

このように回路を構成することで、周波数特性を改善できることが分かりました。つづいてこの回路動作のしくみをみてみましょう。

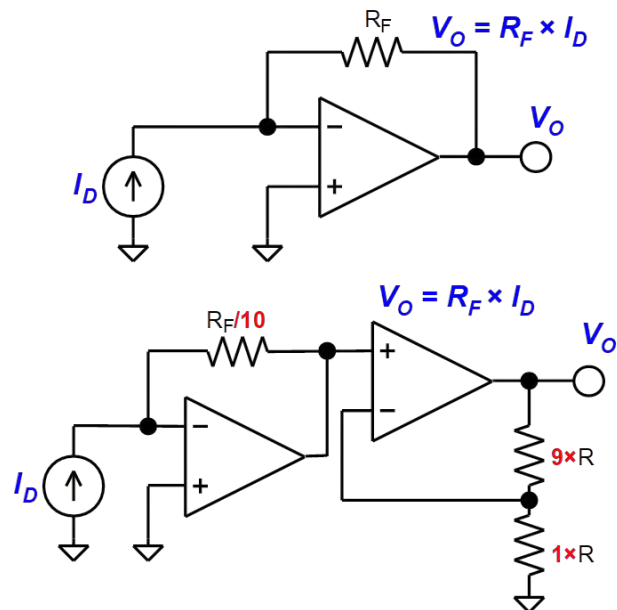


図 7. 帰還抵抗を低下させ後段の増幅用 OP アンプで系全体の増幅度を維持する

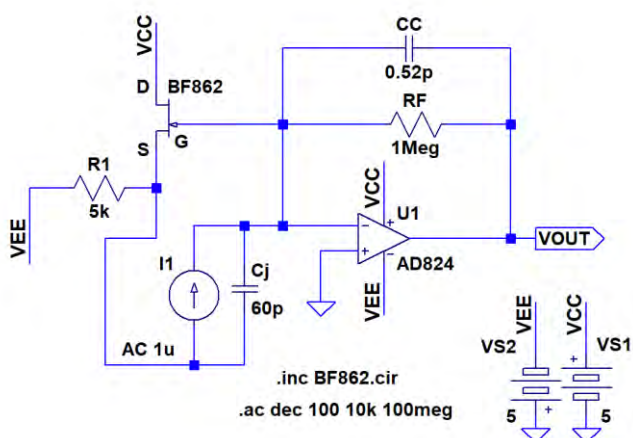


図 8. 接合型 FET (JFET) でフォトダイオードに「ブートストラップ」をかける

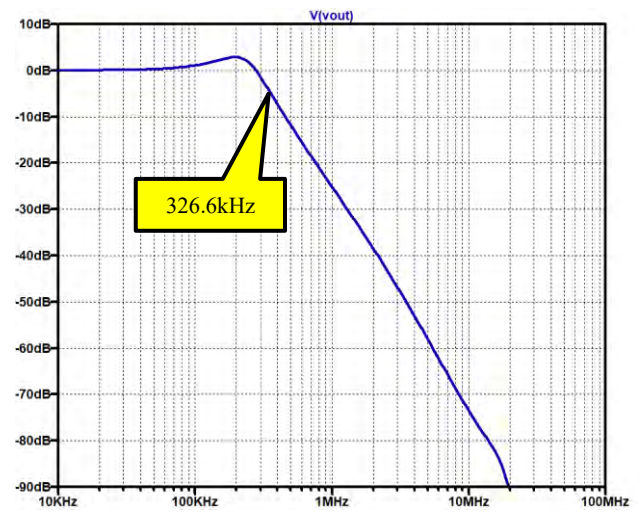


図 9. 図 8 のブートストラップをかけた回路の周波数特性

OP アンプは仮想ショートで動作すると一般的に言われますが、周波数が上昇してきて、OP アンプのオープン・ループ・ゲインが低下してくると、入力端子間の電位差が見えてくることになります（そうでなくても微小な電位差があります）。たとえばオープン・ループ・ゲインが  $20\text{ dB}$  まで低下した周波数において、出力が  $1\text{ Vp-p}$  だとすれば、入力端子間の電位差は  $10\text{ mVp-p}$  となります。

この入力端子間の電位差がフォトダイオードの接合容量  $C_j$  に加わることで、ここまで説明してきた周波数特性の劣化が生じるわけです。原理的には「入力端子間の電位差が変化しない」からなのです。

そこで「入力端子間の電位差が変化しないようにすればよい」と発想を転換できます。図 8 のように回路を構成すれば、JFET のゲートが OP アンプの反転入力端子に接続されているため、仮想ショートから外れた（入力端子間の電位差）ぶんの電圧でゲートが駆動されることになります。ソースは  $R1$  でマイナスイオン電源と接続されていますが、フォトダイオードの電流 ( $I1$ ) は非常に小さいため、 $R1$  の動作には影響を与えず、JFET はソース・フォロワとして動作します。

これにより JFET のソースは OP アンプの反転入力端子の電位変化 (JFET のゲート電位変化) に追従するかたち、つまり「ブートストラップ」されたかたちで動作することとなり、その結果、図 8 の  $I1$  と接合容量  $C_j$  から構成されるフォトダイオードの端子間電圧はいつも一定になります。

これにより接合容量  $C_j$  は充放電されなくなり、この容量を無視できるわけです。ここでは  $60\text{ pF}$  という幾分低めの接合容量で考えましたが、面積の広い大型フォトダイオードでは接合容量  $C_j$  も増加しますから、このブートストラップは周波数特性改善の手法として、さらに効力を発揮できることにも気がつきます。

一点、この回路には注意点があります。電源投入時の過渡的な変動で、 $Q1$  の JFET が順方向にバイアスされてしまう（ゲート電圧がソース電圧に対して高くなる）可能性があり、そうなるとその電圧関係でロックし、この回路は適切に動作しません。JFET のゲート・ソース間が順方向バイアスにならないような対策回路が必要です。

## アナログ電子回路技術ノート

TNJ-065

## まとめ

2 回の技術ノートで探究してみました「フォトダイオード・アンプ」。フォトダイオードの接合容量 $C_j$ が回路動作に悪影響を与えることが分かりました。この技術ノートでは周波数特性に着目して考えてきましたが、ノイズ特性についてもこの接合容量 $C_j$ がノイズ・ゲインの上昇として大きな障害になります。

このことは別の技術ノートであらためて説明してみたいと思います。

とはいえ「ちょっとまで。一体これはどうなるのか？」と日々出くわす疑問は増えるばかりで、それらを探究していくことで（探究していつてしまうことで）、この技術ノートで「フォトダイオード・アンプのノイズ特性の探究は何回先です」とお約束できない状態です（汗）。

物事を探究していけばいくほど、自分の知識の無さに気がつく、「無知の知[16]」を地でいく「一緒に学ぼう！回路設計 WEB ラボ」なのであります…。

## 日記（2019 年 9 月 18 日 水曜日）

2019 年 9 月 9 日（火）早朝、千葉県を主体に非常に強い台風 15 号が尋常ならぬ猛威をふるい、甚大な被害が発生。我が家も被災した。一晚をろうそく懐中電灯で過ごしたのち、電気はなんとか 10 日夕刻には復旧。電車も不通や間引き運転でかなり混乱していたため、11 日（水）は漸く開通した圏央道とアクアラインを経由して自家用車で通勤。

12 日（木）はアクアライン高速バスで、転職後初めて出勤し、図 1 の周辺で一泊避難した。13 日（金）の帰宅は、浜松町駅周辺のスーパーで購入した生鮮食料品のレジ袋 2 袋をもって、浜松町バスターミナルから高速バスに乗り込む。東京駅経由の都合上、大門交差点を左折し、第一京浜から中央通りを進む街並みは、何事もなかったような日常が営まれていた。

遊びで高速バスに乗っているならルンルンだろうが、流れるその普段の風景の街並みを見ながら、やはりどうしても沈んだ気持ちになってくる。

TNJ-064 と TNJ-065 は、その高速バスの中で、そんな気持ちで校正していたものである。

既に被災から 1 週間以上が経過したが、未だライフラインが復旧していないご家庭、家屋に相当な被害が及んだご家庭が多数あるようだ。同じ千葉県民として、早急なる復旧と、早く普段の日常生活に戻られることを、心からお祈りしております。

## 参考文献

- [1] エンリコ・フェルミ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/エンリコ・フェルミ>
- [2] フェルミ推定, <https://ja.wikipedia.org/wiki/フェルミ推定>
- [3] Rule of thumb, [https://en.wikipedia.org/wiki/Rule\\_of\\_thumb](https://en.wikipedia.org/wiki/Rule_of_thumb)
- [4] 経験則, <https://ja.wikipedia.org/wiki/経験則>
- [5] マーフィーの法則, <https://ja.wikipedia.org/wiki/マーフィーの法則>
- [6] AD8066 データシート, アナログ・デバイセス
- [7] 石井 聡; LTspice でサレン・キー型フィルタ（第 3 回）「因数分解された 2 次式が 1 段の 2 次 LPF に変換できるしくみを考える（前編）」, 回路設計 WEB ラボ, TNJ-046, アナログ・デバイセス
- [8] 浜松ホトニクス S2506-02 データシート
- [9] 2 MHz Bandwidth PIN Photodiode Preamplifier with Dark Current Compensation, Circuit Note CN-0272, Analog Devices
- [10] Glen Brisebois; Low Noise Amplifiers for Small and Large Area Photodiodes, Design Note 399, Analog Devices (former Linear Technology document)
- [11] Bootstrapping (electronics), [https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping\\_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrapping_(electronics))
- [12] ブートストラップ, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ブートストラップ>
- [13] BF862: N-channel junction FET ARCHIVED, NXP Semiconductors; <https://www.nxp.com/products/no-longer-manufactured/n-channel-junction-fet:BF862>
- [14] BF862 SPICE model; <https://www.nxp.com/downloads/en/spice-model/BF862.prm>
- [15] BF862 LTspice model?; diyAudio, <https://www.diyaudio.com/forums/solid-state/281387-bf862-ltspice-model.html>
- [16] 無知の知, Wikipedia, <https://ja.wikipedia.org/wiki/無知#無知の知>