

CCD 解体新書 その3

「CCD 検出器のノイズとは」

上野 宗孝

〈東京大学教養学部宇宙地球科学 〒153 東京都目黒区駒場3-8-1〉

E-mail: ueno@chianti.c.u-tokyo.ac.jp

今回は CCD 検出器の持つノイズについて詳しく紹介します。CCD 検出器は光子を電子に変換して検出器内に蓄え、最終的にその電荷量を電圧の形で読み出します。それぞれの画素に蓄積された電荷量をどれだけ正確に測定できるかが、ノイズの問題となります。CCD の持つノイズは量子効率と並んで観測時の S/N を左右する重要な要素です。実際に観測を行っている時、ノイズの無い検出器があればよいのにとしばしば考えたりしますが、いくつかのノイズは原理的にも避けがたい存在ですから、ここは一つ仲良く付き合っていく必要があると思います。

CCD カメラのノイズは、一般的に以下の5種類のノイズに分類されます。

1. 読み出しノイズ
2. 暗電流に起因するショットノイズ
3. 画面上の感度の不均一性により生じるノイズ
4. 転送効率に起因するノイズ
5. 信号電荷そのものにより生じるショットノイズ

以上の5項目の中で5番目のノイズだけは原理的に避けがたいノイズです。これは生成された(=蓄積された)電荷量の平方根に比例する統計的なノイズ(ポアソンノイズ)です、逆に言えば1~4のノイズ値が5のノイズ値と比較して十分に小さいことが理想的な状態と言えます。

それではそれぞれのノイズについて考えて行きましょう。1の読み出しノイズは CCD 検出器のアンプ自身から発生するランダムなノイズと CCD をコントロールする電気回路から発生するノイズとを含めて取り扱われています。CCD をコ

ントロールする電気回路から発生するノイズには、ランダムなノイズ成分と電気回路から発生する系統的なノイズ(これには外部から混入するノイズも含まれる)に分類されますが、分類自身はそれほど重要ではありません。一般的に天文用に開発されたシステムでは、CCD 検出器自身に起因するノイズと比較して、CCD にとっては外因的な存在である駆動回路側からのノイズの方が十分小さくなるように設計されているのが望ましいわけですが、実際にはそうでないケースも多いようです。例えば望遠鏡などから混入される商用電源のノイズを拾って(いわゆるハムと呼ばれる雑音成分)、画面に周期的な模様が現れる場合や、コントロール回路内部からのデジタル信号を自分自身で拾っているケースも見かけます。先に述べた CCD 固有の読み出し雑音に関しては、後半で詳しく触れることにします。

次に2と3のノイズはデータ解析の際に暗電流の差し引きやフラットフィールドング操作を行った上でも残る成分という意味です。暗電流により生じる電荷が存在すれば、きちんと差し引きを行った場合でも、暗電流により生じた電荷量の平方根に相当するノイズ成分(統計的なノイズ)が残ります。またフラットフィールドングに関してもこの処理が完全である場合を除いて、3のノイズは残存します。

4の転送効率に起因するノイズの問題は CCD における電荷転送の問題として別の回に詳しく紹介する予定です。CCD の転送効率には電荷量に対する依存性があり、これも正しく電荷量を測定するには深刻な問題となる場合があります。

ここで1~5に取り上げたノイズの一般的な傾

向を理解するため、CCDにおけるノイズと蓄積電荷量の代表的な関係を図1に示します。グラフに示した例は読み出しノイズが10電子数、フラットフィールドを行う際のエラーが1%と言うもので、暗電流は十分に小さく無視できる場合を想定しています。このグラフから理解されるように、蓄積された電荷が少ない領域では読み出しノイズが支配的ですが、蓄積電荷量が増加するとともに、蓄積された電荷量の平方根に比例するショットノイズが支配的な要因となります。これらのノイズが入れ替わる領域は蓄積電荷量が読み出し雑音の2乗を越える領域で、通常これよりも蓄積電荷量が多くなりショットノイズが支配的になる領域をバックグラウンドリミット領域と呼んでいます。そしてさらに蓄積電荷量が増大するとフラットフィールドエラーによって生じるノイズが支配的となります。この領域に達してしまうと、露出時間を長くして蓄積電荷量をいくら増大させてもS/Nが全く向上しないこととなります。この意味においては究極的な感度の観測を行うときにはこのフラットフィールドの問題を克服することが必要です。フラットフィールドの問題は詳しく触れる必要があるため今回は棚上げとします。

それでは最初に戻って読み出しノイズについて触れます。読み出しノイズとは一般的にCCDに

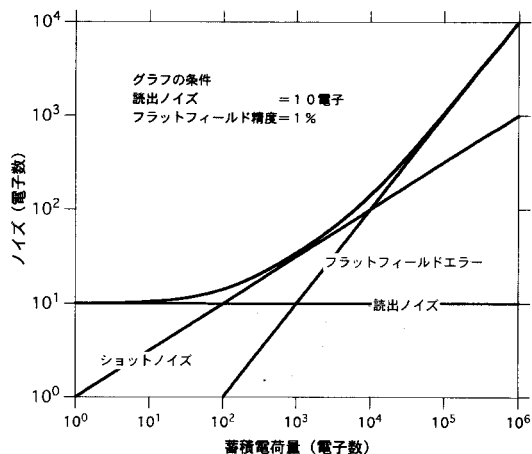


図1 典型的な CCD ノイズの蓄積電荷依存性

搭載されているアンプから発生するランダムノイズの事を指していますが、同一の CCD であっても駆動の方法を変えることにより、カメラシステムとして見た際のノイズの大きさは大きくも小さくもなります。これは CCD をコントロールする電気回路で余計なノイズを発生し、全体のノイズが増加してしまうという効果を全く抜きにしても生じる現象です。この現象は CCD のピクセルを読み出す速度の変化に起因する効果で、同一の CCD でも一般的に速いスピードで信号の読み出しを行う際には読み出しノイズがそれに伴って大きくなります。図2に CCD の出力回路の代表例を示します。この回路の中では一部の部品を模式的に表しています(例えばリセットスイッチは実際には MOS 型の FET が用いられます)が、ノイズに直接関係する部分はそのまま書いてあります。基本的に CCD の最終段から送られた電荷は出力 FET (Field Effect Transistor; 電界効果トランジスタ) のゲートそのものである最終の『バケツ』に運ばれます。この電荷量を Q_d としますと、コンデンサー C_G の両端に得られる電圧 V_d はクーロンの法則にしたがって $V_d = Q_d / C_G$ となります。そしてこの電圧は増幅率約 1 倍の FET のソースフォロア回路を通して外部に電圧信号として取り出されます。リセットスイッチは送られてきた各画素からの電荷を測定後に排出するためのもので、通常各画素の電荷が送られる直前に毎回リセットスイッチを閉じ、『バケツ』の中身を空に

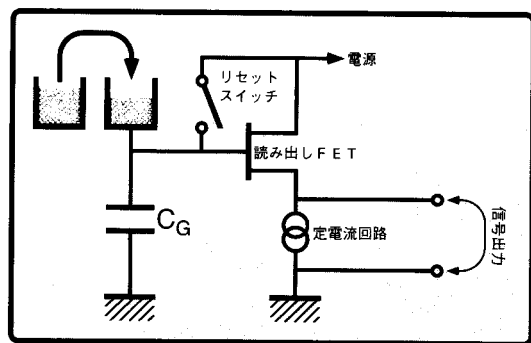


図2 CCD の出力回路

します。但しこの時 CCD 検出器の温度が有限であると、『バケツ』の中の電荷は完全には 0 にならずに、ある大きさのゆらぎを持ってしまいます。これは通常リセットノイズとか kTC ノイズとか呼ばれているもので、動作温度にも依存しますが、アンプ自身から発生するランダムノイズと比較しても無視できない大きさになります。このノイズはコンデンサーに接続されたスイッチが ON の状態から OFF の状態に切り替わる途中で生じる電子の熱ゆらぎに起因し、ノイズの大きさが kTC の平方根に比例することから、 kTC ノイズと呼ばれています (k : ボルツマン定数, T : 温度, C : コンデンサーの容量)。従って読み出し雑音が問題となるような低雑音の CCD カメラでは必ずリセットスイッチを操作した後の『バケツが空』の状態の電圧と、電荷を注入した後の『バケツが満』の状態の電圧の差を調べて信号電荷量として測定しています。しかし当然ながら 2 回電圧を測定するわけですからノイズに関しては $\sqrt{2}$ 倍損をしていることになります。このためもし非常に温度が低い状況で CCD を用いることができる場合には、 kTC ノイズがアンプの持つノイズと比較して小さくなる場合も考えられ、差を取らない方が得になる場合も有り得ます。

それではこのような回路では、読み出しノイズはどのように見積ればよいのでしょうか。通常の CCD コントロール回路では先に触れた『差』電圧を適当な大きさに増幅した後、A/D 変換回路によって電圧信号をデジタル信号に変換してコンピューターへと取り込みます。図 2 に紹介したような回路でノイズ源となるのは読み出しの FET から発生するノイズです。一般的に CCD の読み出し回路に用いられている FET は MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) 型の FET と呼ばれるトランジスタです。このタイプのトランジスタの持つノイズは、図 3 に示すようにノイズ密度が周波数にほとんど依存しない種類のノイズ (ホワイトノイズ) と周波数にノイズ密度が反比例する種類

のノイズ ($1/f$ ノイズ) の 2 成分から表されます。これらのノイズ成分を持つ信号を先程述べたように『バケツが空』の状態と『バケツが満』の状態の電圧差を取りながら測定をしますので、実効的には図 3 に示されるような応答特性を持った電気回路を通して測定を行うこととなります。時間差の小さな 2 回の電圧差を取得していることによって、原理的に周波数の低い領域の信号はキャンセルされることとなります。また周波数の高い領域は電気回路で低周波透過型フィルターを用いて制限するのが一般的です。この結果、最終的には図 3 の 2 つのグラフを数学的に掛け合わせた面積にノイズ電圧が比例することになります。従って同一の CCD でも高速度で読み出しを行う際には、(グラフが対数スケールで書かれていることを注意して頂ければ) 実効的な面積が大きくなり、その結果読み出しノイズが大きくなる事が理解されると思います。従って低雑音で CCD の読み出しを行うためには、駆動の速度を落とすことが近道です。しかしそれではどこまでもノイズは小さくなるのかと言いますと、実は図 3 を見て頂けると判るように FET のノイズは $1/f$ 成分のため低周波数領域で急速に大きく立ち上がります。このため読み出し速度を非常に下げた場合には、アンプの周波数特性も全体的に低周波側にずれてしまう結果となり、 $1/f$ 成分が無視できなくなります。このためそれぞれの CCD には読み出しノイズの下限値が定義できることにはならず (そのような記述は見たことがありません)。

ここまで書いたのはノイズを電圧だけから見た側面です。しかし読み出しノイズはもう一つ大きなパラメーターに依存することを忘れてはいけません。先程の図 2 の回路を見て頂ければ判るように電子 1 個に対して得られる電圧は q_e/C_G (q_e は電子の素電荷) となります。従ってノイズが電圧で見た場合に同一であっても、電子数に換算する際の係数は C_G に依存することになります。通常の CCD では C_G の値が 0.1 pF 以下のオーダーに

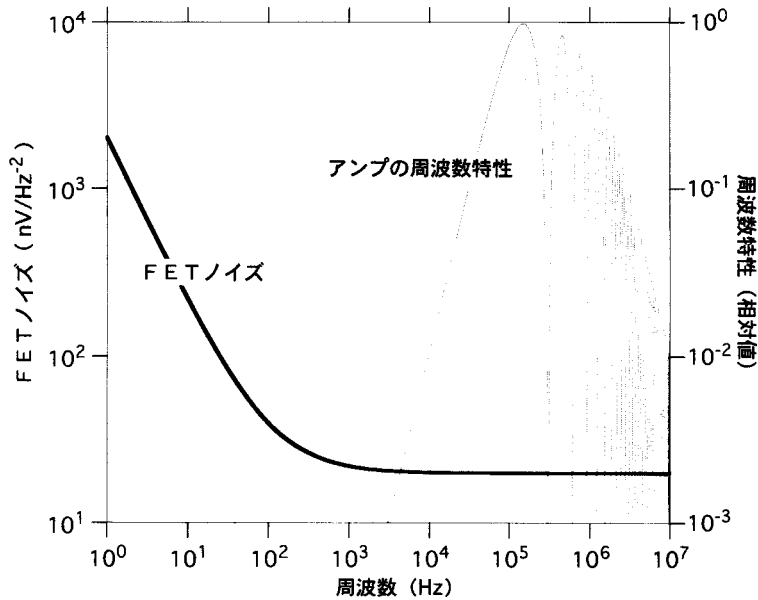


図3 典型的な周波数特性

設定されている場合が多く、この結果電子1個当たり数 μV の電圧が得られることとなります。読み出しノイズが小さいものを実現しようとするとCCDの C_0 の値を小さくすることがFET自身のノイズ密度を小さくすることと並んで重要です。しかし C_0 の値はFETのゲート電極の大きさで決まっているため、この値を極端に小さくすることは技術的に容易なことではありません。またこのサイズを通常サイズよりも大幅に小さくするとFETのゲートで発生するノイズ密度が急激に大きくなる事が知られており、ある一定以上は小さくしても得になることはないようです。逆に赤外線CCDでは測定可能な電荷量を拡大するため C_0 の値を大きめに設定しているものも多く、このためこのようなCCDでは読み出しノイズもそれに比例して大きくなっています。

しかし逆に非常に高速度で低雑音を要求される用途では、以上にまとめた要因で決まる値以上に読み出しノイズを小さくすることが必要となるで

しょう。このようなCCDを実現するためには、読み出しのバケツの部分の構造や回路に様々な工夫が必要となります。しかしこのような技術は今特集で触れるのには、いささか話が深入りすると考えられますので避けて通ることとします。

読み出し雑音に続いて、暗電流の問題に話題を移します。暗電流は光が当たっていない時にも生じる電流のため、このような名前が付いているのですが、基本的には熱エネルギーで励起された電子が、ある確率で検出器の半導体の持つエネルギーギャップを飛び越えてしまう現象です。このため暗電流には大きな温度依存性があります。最初の部分でも触れたように暗電流はきちんと差し引きを行っても、それによって生じた電荷量の平方根に相当するノイズが残ります。従って暗電流は小さいほうが好ましいこととなります。それではどの程度小さければよいかという問題は、CCDの用いられる状況によって変わってきます。背景光のもとと大きな広視野撮像では、それほど暗電

流値が低くなくても問題が生じないはずですが、高分散の分光器に CCD 検出器を用いる場合のように非常に背景光のフラックスが小さな環境では、暗電流値は非常に小さいことが要求されるでしょう。基本的には、背景光のフラックスにより生じる光電流と比較して、暗電流の方が十分に小さければ深刻な問題はないということになります。しかし実際には、暗電流が完璧に差し引きできるケースばかりではありません。暗電流の大きさは、先にも触れたように、非常に大きな温度依存性を持っています。従って CCD の動作温度が観測時と暗電流測定時に少しでも違っていると、暗電流の差し引きを行った際に残存成分が生じることとなります。このような場合には暗電流により生じるノイズはその平方根で定義されるショットノイズと比較して、はるかに大きなものとなります。従ってこの観点に立てば CCD は十二分な冷却をして用いることが望ましい状況と言えるでしょう。暗電流の絶対値自身が十分に小さければ、CCD 動作時に多少の温度変化が生じて、暗電流の差し引きが不完全な結果となった場合でも、全く問題にならないケースもありえます。温度を下げ過ぎたことによる転送効率の問題さえ生じない範囲であれば、十分な冷却を行うことは、後述するホットピクセルの問題も回避できるため、実用上大きなメリットがあります。しかし液体窒素などの極低温の冷媒を容易に手に入れることができない状況で、ペルチエ素子などの電子冷却素子によって冷却された CCD カメラを用いている環境では、十二分な冷却は容易なことではないでしょう。

ここでホットピクセルについて少し触れておきます。一般的にホットピクセルと言う言葉には明確な定義は無いようですが、ピクセルごとの暗電流の統計を取った際に、その分散の範囲から大きく外れるピクセルの事をさします。ホットピクセルの原因としてはいくつかの要因が考えられますが、一般的に半導体の結晶自身の欠陥や LSI 加工工程上のトラブルにより、特定のピクセルにおい

て電氣的に（非常に小さな範囲で）ショートを起こしていたり、実効的なバンドギャップエネルギーがやはり非常に小さな領域で小さくなっている場合が考えられます。このためホットピクセルの暗電流は、他のピクセルの暗電流と温度依存性が少し違ったふるまいをするのが普通です。特に実効的なバンドギャップが小さくなっている場合には、他のピクセルよりも大きな温度依存性を示す場合もあり、データを取り扱う際には注意が必要となります。しかし通常はこのホットピクセルの持つ大きな暗電流も温度に対する依存性を持つわけですから、冷却すれば減少することには変わりはありません。深刻となるケースとしては、長時間の露出を行う際にホットピクセルが暗電流で飽和し、その影響がそのピクセルを含むライン全体に溢れ出してしまう（ブルーミングと呼ばれる）現象を起こしてしまう場合があげられます。このような影響を出さないためにも、CCD の動作温度を下げることは有効です。それでも暗電流が下がりきらないピクセルは、暗電流による電荷が溢れ出ない範囲であれば、ホットピクセルに限って読み出しノイズが高くなることを覚悟して用いるということになるでしょう。

最後に余談であり、私事にわたることですが、この一連の特集は韓国ソウルにて原稿を書いております関係で、天文月報編集委員の方々の多大な協力の上に成り立っていることを付け加えさせていただきます。