HICALIのノイズ評価No.1
kTCノイズ

吉川智裕、馬場淳一

2003年2月20日

1　kTCノイズとは

kTCノイズは、CCDの出力アンプで生じるノイズである。CCDにたまった電荷を出力する時に電荷をコンデンサにチャージし、MOSFETを介して電荷を電圧として出力する。このコンデンサは、1ピクセル読み出す毎に元の電位にリセットしてやらなければならないが、電源からの電流によってリセットしても物質内の電子の熱運動(Johnson noise)によって、リセットした時の電位は幅をもって変動する。このときの変動によるノイズは、以下の式で与えられる。

$$\sigma_{kTC} = \frac{\sqrt{kTC}}{e} \tag{1}$$

ここで、kはボルツマン定数、Tはを動作させる温度[K]、CはCCDのアウトプットコンデンサの容量である。

一般に、Johnson noiseのバンド幅は、抵抗が小さいときに大きい。出力コンデンサのリセットのスイッチとして使うMOSFETはonのときに抵抗が小さく、offのときに抵抗が大きい。そのため、コンデンサをチャージするためにonにしているときは、出力の値が大きく変動する。offになったときはノイズのバンド幅が小さいので、変動しているそのときの値でほぼフリーズする。つまり、onのときのふらつきによって、offになったときの値は毎回変わってしまう。

通常の読み出しの場合、offになったときの電圧の上に、読みだし電荷による電圧が重なった電圧をA/Dコンバータでサンプリングしてデータとして取り出す。ところが、ピクセル毎にリセットの電圧が異なるため、読みだしノイズになってしまうのである。

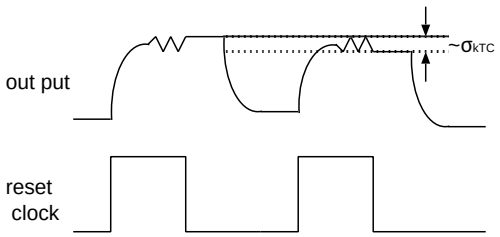

図 1: kTC ノイズ

1.1 HICALI の kTC ノイズの見積り

HICALI で、kTC ノイズが理論的にいくらになるかを評価する。HICALI を動作させる温度 T=170K、HICALI で使っている CCD、TC-215 の出力コンデンサの容量は、データシートの値から、Image-area well capacity = 6.0×10^4 electrons、Saturation signal = 320mV であるので、これらの値が対応していると考えて、

$$C = \frac{60000 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.32V} = 3.0 \times 10^{-2} pF \tag{2}$$

これらを前の kTC ノイズの式に代入すると、

$$\sigma_{kTC} = 52.3 electrons \tag{3}$$

となる。

1.2 Correlated Double Sampling

kTC ノイズは、リセット電圧のふらつきによるものであるから、リセット電圧と信号の電圧の両方を A/D コンバータでサンプリングし、それらを引き算することで取り除くことができる。これを、Correlated Double Sampling(CDS) という。通常、CDS はリセット電圧と信号の電圧をそれぞれ積分回路で積分し、その平均値同士の差を取って出力値とする。しかし、HICALI のプリアンプはそのような構造になっていないので、リセット電圧と信号の電圧の両方を複数回サンプリングし、その値の平均の差を取ることで、CDS を実現した。

また、複数回サンプリングしてその平均を取ることによって、CDS 以外のノイズを除けることも期待できる。一つのピクセルを読み出している時、理想的にはそのピクセルの電圧で、一定な電圧が出力されていると考えるが、実際は高周波のノイズがのって出力はふらついている。また、出力 MOSFET の 1/f ノイズによっても、出力はふらつく。しかし、これらのノイズは A/D コンバータが複数回サンプリングすることによって、平均化し、取り除くことができるのである。

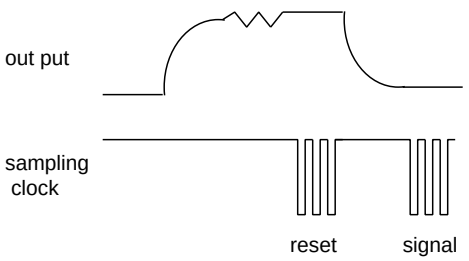

図 2: Correlated Double Sampling

2 実験と結果

実験は、2002 年 11 月 18 日と 2003 年 2 月 11 日に行なった。実験の方法は、1 回の測定で 2 枚の画像を取り、2 枚の画像の差を取ったものの画像全体の標準偏差を求めて $\sqrt{2}$ で割り、それをノイズとした。画像は、データをとる毎に 3 回の wipe かけた後、直ちに読みだしをした。2 枚の画像の差を取ったのは、ピクセル毎と出力アンプ毎の特性を消して全体の平均を取るためで、$\sqrt{2}$ で割ったのは、2 枚の画像のノイズを 1 枚当たりのノイズに直すためである。

また、CDS によってどの程度ノイズが取り去られたかを確認するために、CDS を行わない普通の読みだしと、CDS を行う読みだしの両方を試した。CDS を行う読みだしにおいては、CDS 回数を標準の 3 回から、最大 50 回まで変えて試した。CDS 回数の標準が 3 回というのは、A/D コンバータの限界から、CDS を行わない読みだしとほぼ同じ速度で読み出しをするために可能な最大の CDS 回数だからである。そのため、3 回を超える CDS を行うためには読み出しを遅くしなければならず、CDS を 1 回増やす当たり約 3 秒読みだし時間が増加する。

実験で得られる値は A/D コンバータでデジタルに変換された最小ビットの値なので、それを electron 数に変換してやる必要がある。以下の式によってそれを与える。

Image-area well capacity $= 6.0\times10^4$ electrons、Saturation signal $= 320$mV であるから、electron1 個に対応する出力電圧は、

$$\frac{300mV}{600000electrons} \sim 5.3\mu V/electrons \tag{4}$$

A/D コンバータは、10V の電圧を 16bit $= 65535$ に分けるので、

$$1ADU = \frac{10\,V}{65536} \sim 153\mu V \tag{5}$$

プリアンプのゲインが 5 であることを考慮して、

$$1ADU = \frac{153\mu V}{5.3\mu V/electrons \times 5} \sim 5.7electrons \tag{6}$$

よって得られた ADU に 5.7 をかければ、electron 数に直すことができる。

2.1 2002年11月18日の実験

2002年11月18日、上記の方法で実験を行なった。実験の結果を次に示す。

CDS	ADU	electrons	removed noise
0	23.1	93.1	
3	13.4	54.0	75.8
4	12.5	50.4	78.3
8	11.2	45.1	81.4
16	7.1	28.6	88.6
32	6.15	24.8	89.7
50	6.93	27.9	88.8

ここで、ADUは、2枚の画像の差を取った時の画像全体の標準偏差をADUで表したもの。electronsは、1枚あたりの標準偏差をelectron単位で表したもので、

$$electrons = ADU \times 5.7 \div \sqrt{2} \tag{7}$$

removed noiseは、CDSを行わなかった時と比べて減ったノイズを表し、

$$removed\ noise = \sqrt{\sigma_0^2 - \sigma_{CDS}^2} \tag{8}$$

ここで、σ_0はCDSを行わなかった時のノイズ、σ_{CDS}はCDSを行った時のノイズを表す。

この結果から、十分サンプルを増やすと、ノイズが減らなくなり、27程度でとまることがわかる。これは、CDSにより、kTCノイズが除かれた結果、CDSでは除けない回路のノイズやCCDの特性によるノイズが残っているためと考えられる。そこで、回路ノイズ$\sim$27 electronとして、3、4、8回サンプルの場合には除き切れなかったkTCノイズを評価すると、

$$3\text{回} \sim 47 electrons$$
$$4\text{回} \sim 43 electrons$$
$$8\text{回} \sim 36 electrons$$

となる。

この結果は、統計的に、

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{N}} \tag{9}$$

ただし、N:サンプル数。という性質にそれなりにフィットしている。

2.2 ノイズ対策

11 月 18 日の結果から、CDS によって kTC ノイズは確実に減少していること、kTC ノイズ以外のノイズが 27electron 程度あるということがわかった。27electron 程度のノイズであれば、観測にもある程度耐え得るレベルであるといえるが、CDS 回数は少なくとも 16 回以上にしなければならず、読み出しの時間が実用的な長さではない。読みだし時間を測定した実験を行ったところ、CDS なし、および、CDS が 3 回の読みだしでは 20 秒程度であるのに対して、CDS を 16 回行う読み出しでは、1 分ほどかかってしまうことがわかった。ノイズを実用的なレベルにするには、回路自体の 27electron のノイズを抑えるか、CDS 回数が少なくても十分に kTC ノイズの影響を抑えられるようにしなければならない。そのため、特にデュワー内の回路について、以下のようなノイズ対策を行った。

1. CCD の基板のグラウンドをアナログとデジタルに分け、基板全体に広くとった
2. CCD の基板のグラウンドをデュワーの外壁、およびコールドプレートに落とした
3. CCD の基板からデュワーのコネクタへの接続をアナログとデジタルに分け、配線をし直した

デジタルの回路とアナログの回路にわけたのは、デジタルのグラウンドには高周波のノイズがのりやすく、CCD の出力信号が使うアナログのグラウンドへの影響を極力小さくするためである。アナログのグラウンドとデジタルのグラウンドは、基板の表面と裏面に分け、ジャンパー線で一点でつないでいる。グラウンドをアナログとデジタルに分けること自体は、HICALI を制御しているバックプレーンでも施されており、それらは A/D コンバータの中でつながっているので、必ずしも基板上でつながなければならないものではないが、つないだ方がよいのかつながない方がよいのかは、実験してみないとわからないのでジャンパー線でつないでいる。また、1 点でつなぐことによってアナロググラウンドとデジタルグラウンドの間のインピーダンスが高くなり、デジタルグラウンドのノイズがアナロググラウンドに入りにくくなることが期待される。ここで、アナログの回路とは CCD に入力するバイアス電源と CCD 出力信号、デジタルの回路とは CCD に入力するクロックを指す。

2. について、コールドプレートとデュワーの外壁は絶縁されているため、それぞれに対して接続をした。コールドプレートには、基板の下のスペーサから接続し、外壁には、コネクタから接続した。

3. については、やはりデジタル回路のノイズからアナログ回路を守るためであるが、この場合は、磁場によって生ずるノイズを避けることを目的とし

ている。やはり磁場によるノイズを避けるため、配線はすべてグラウンドの線とより線にした。これによって、電流の行きと帰りがペアになり、磁場を打ち消すことが期待される。

以上 3 点について、CCD のデュワー内のノイズ対策を行ったが、特にグラウンドの接続の方法については、実験によってどの方法がよいのかは決められなければならない。

2.3 2003 年 2 月 11 日の実験

前節に挙げたノイズ対策をした後、2003 年 2 月 11 日、前と同じように実験を行った。実験の結果を次に示す。

CDS	ADU	electrons	removed noise
0	15.32	61.7	
3	7.84	31.6	53.0
4	8.48	34.2	51.4
8	8.06	32.5	52.5
16	8.12	32.7	52.3
32	9.56	38.5	48.2
50	7.97	32.1	52.7

ただし、今回は CDS が 3 回の実験については 20 回繰返して実験したものの平均値を示した。時によってなぜかばらつきがあるが、大体、32-35electrons で CDS に関係なく落ち着いている。CDS 回数を増やしても前回の 27electrons まで落ちない原因は不明であるが、CDS が少なくてもノイズが減少していることがわかった。

また、今回 CDS によって除かれたノイズが、kTC ノイズの理論値である 52.3electrons に非常に近い値になった。それにくらべて前回の実験では、CDS によって除かれたノイズは理論値よりもかなり大きい。これは、kTC ノイズ以外にも、出力電圧をふらつかせるような他のノイズ源があったものが、前節のノイズ対策によって除かれ、ほぼ kTC ノイズのみになったものと考えられる。それによって、あまりサンプル数に関係なく kTC ノイズを除くことができるようになったと思われる。

参考文献

[1] Ian McLean(1997) *Electronic Imaging in Astronomy*

[2] James R. Janesick(2001) *Scientific Charge-Coupled Devices*