

McLean 輪読第 6 回 p.298-304

学籍番号 05-162003 理学部天文学科 4 年 小川貴士

2017 年 5 月 31 日

8.6 信号処理とデジタル化

- アンプ/変換ともに一定の時間がかかる
- A/D(analog/digital) 変換器は高精度:16-bit A/D converter *1

8.6.1 相関二重サンプリング (correlated double-sampling; CDS)

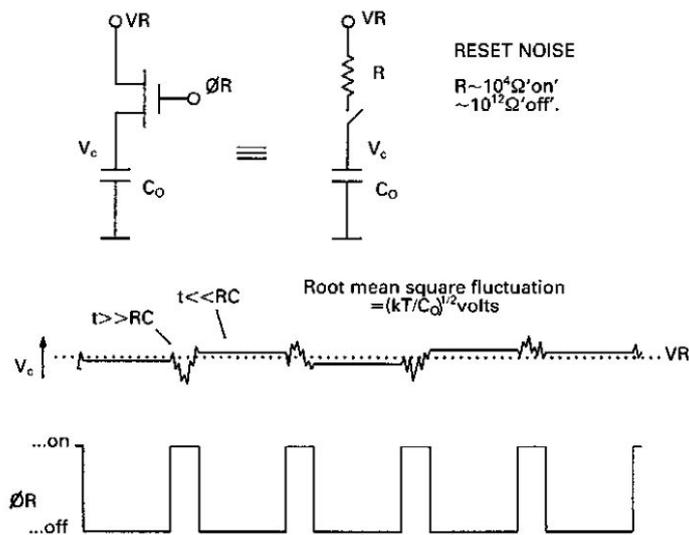


図 1 reset noise

- reset transistor から一定のパルス電圧を送ることでコンデンサーの電位をリセットする (V_{RD})
- パルス ON → 指数関数的に変化し V_{RD} へ
- パルス OFF → 指数関数的に変化していき一定値へ

*1 10[V] なら 65,536 分割して 152.5[μ V] 単位になる

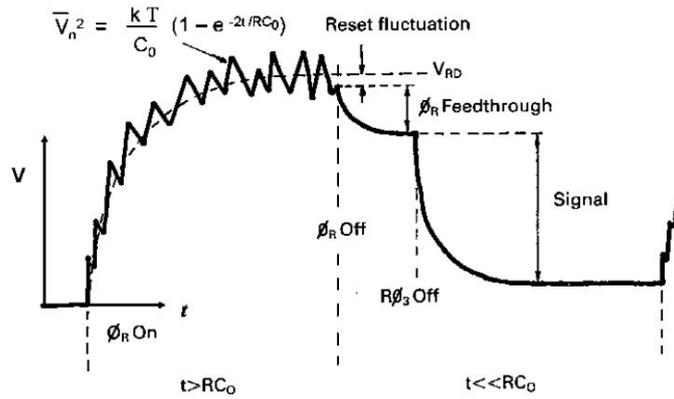


図 2 reset noise

reset noise は

$$\sqrt{\frac{kT}{C}} [\text{V}]$$

$$\text{or } \frac{\sqrt{kTC}}{e} [\text{electrons}] \quad (1)$$

*2これが MOSFET の読み出しノイズをかなり超える大きさ → 除去したい

*3

- ノイズを含めると、スイッチ ON 後の電位は $V_{RESET} - \sqrt{\frac{kT}{C}}$ から $V_{RESET} + \sqrt{\frac{kT}{C}}$ のどこにおさまる。
- 電流の漏れ出しの時間 (ミリ秒) が時定数 RC(秒) よりずっと小さい → 上記の電位は一定値とみなせる
- 2つ電圧を測って引き算すればノイズが消える? (後述)

*2 kTC ノイズ

*3 室温で $400\sqrt{C}$ electrons、120[K] で $250\sqrt{C}$ 。典型的には < 80 electron 程度

積分 CDS 回路

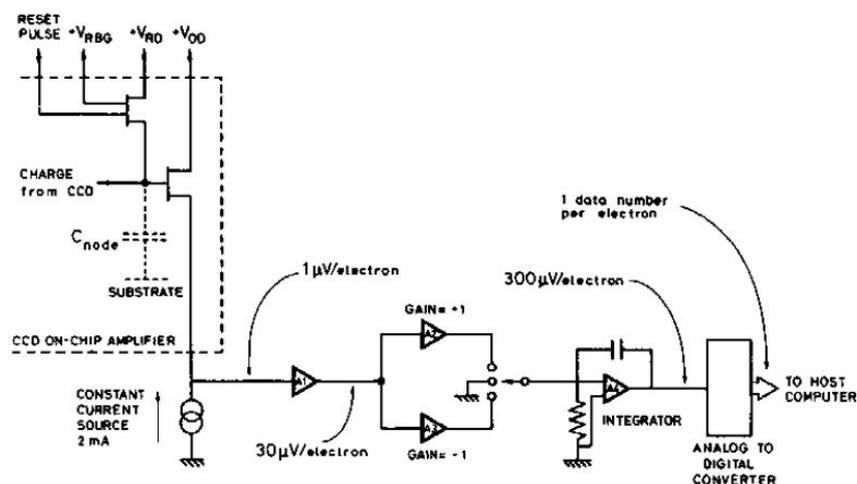


図3 積分 CDS 回路

積分すれば高周波数ノイズはカット除去でき、 $1/f$ ゆらぎノイズの影響も減らせる

- 低ノイズアンプ A1 で増幅
- A1-A3(gain=-1)-A4 に一定時間 (e.g. $20[\mu\text{s}]$) つなぐ → A4 にリセット電圧 ($\times(-1)$) が溜まっていく (integrated)
- 画像中央付近のスイッチをグラウンドにつ数マイクロ秒つなぐ → horizontal register から output の電極に電荷が移動する
- A1-A2(gain=+1)-A4 にスイッチを切り替えて一定時間繋ぐ → A4 にリセット電圧が溜まっていく
- A4 には、最終的に「電圧の差」が出る → ノイズが消える

A4 の電圧値は sample-and-hold 回路で「凍結」されて高速 A/D 変換器に送られる。

Dynamic range

- 全体の系のゲインの二乗平均平方根 (root-mean-square;RMS) が A/D 変換器の「ビット」(あるいは data numbers;DNs) と一致するべきである*4。
- 読み出す電子の数は最大値 (飽和する値)500,000 以下だが、ノイズはものによっては電子 5 個分くらい → この比を dynamic range と呼ぶ*5*6
- ex. ゲインが 1electron/DN とすると、読み出しノイズは 5DN → サチるのが 65,536DN(?) であり、full-well の 13% しか使えていない*7
- ex. ゲインが 5electrons/DN とすると、読み出しノイズは 1DN →65% 使えている
- full-well を 250,000 程度にするという策がある → 最大の dynamic range を 50,000:1 程度にする*8
- もし、photon の流れが CCD をほとんど埋め尽くすとき、dynamic range は読み出しノイズではなく photon のノイズによる*9
- 天文学の low-light level では高いゲインで低い well の部分を使う*10

デジタル化ノイズ

Merline and Howell,1995 によるとデジタル化ノイズは $0.289g$ (g は electrons/DN のゲイン) である。読み出しノイズを R とすると、全体のノイズは $\sqrt{R^2 + (0.289g)^2}$ となる。

*4 ?

*5 この場合 100,000:1

*6 16-bit A/D 変換器では 65,536:1

*7 500,000 に対して?

*8 65,536:1 より小さい

*9 photon ノイズは

$$\begin{aligned}\sqrt{N} &= \sqrt{250,000} \\ &= 500\end{aligned}$$

dynamic range は

$$250,000/500 = 500 \quad (2)$$

となり小さい。

*10 5 electrons/DN →2DN の読み出しノイズ、A/D は full-well の 65%。

10 ボルト,16-bit A/D 変換器では $152.6[\mu\text{V}/\text{DN}]$ または $30.5[\text{electrons}/\text{DN}]$ 。通常は CCD は $2[\mu\text{V}/\text{electron}]$ より A/D に合わせるために増幅ゲインは 15 必要。

時間によるノイズの減衰

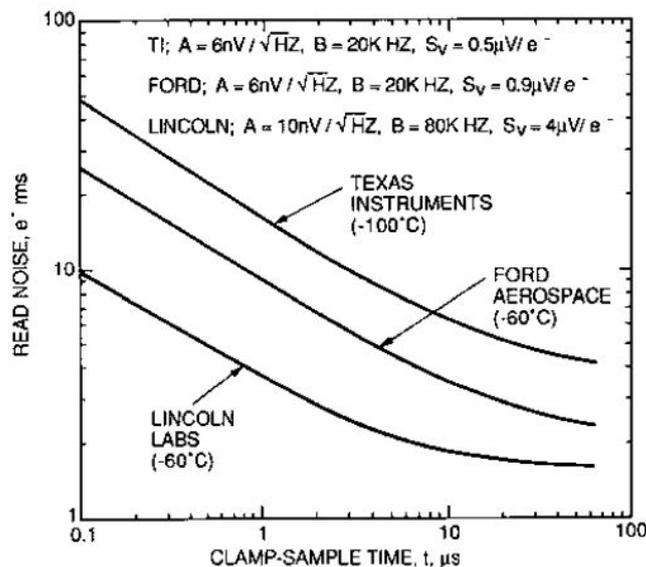


図4 noise vs CDS integration time

*11

- 時間をかければノイズは減る
- ノイズは感度 $S_V [\mu V/e^-]$ に反比例し、CDS を通した後のアンプのノイズ電圧 $V_n(f)$ に比例する。^{*12}

合計のノイズは、Janesick and Elliott(1992)によると

$$\sigma(e^-) = \frac{\sqrt{\Delta f}}{S_V} \left(\sigma_{CCD}^2 + \sigma_{A_1}^2 + \frac{\sigma_{A_2}^2}{A_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

となる。

- A_1 : プリアンプのゲイン
- Δf : ノイズのバンド幅 (Hz)
- S_V : 電極の感度 V/e^-
- $\sigma_{CCD}, \sigma_{A_1}, \sigma_{A_2}$: CCD アウトプット、プリアンプ、ポストアンプのホワイトノイズ

*11

- CDS integration time $8[\mu s]$ - 2 electrons noise
- ほとんどの CCD では $20 - 80[\mu s]$
- 2048×2048 CCD では、1 つあたり $20[\mu s]$ -合計読み出し時間 $80[s]$ /1 つあたり $50[\mu s]$ -合計読み出し時間 $200[s]$

*12 $V_n(f)$ はホワイトノイズ (周波数の依存性なし) と $1/f$ の項によって構成される

8.6.2 On-chip binning

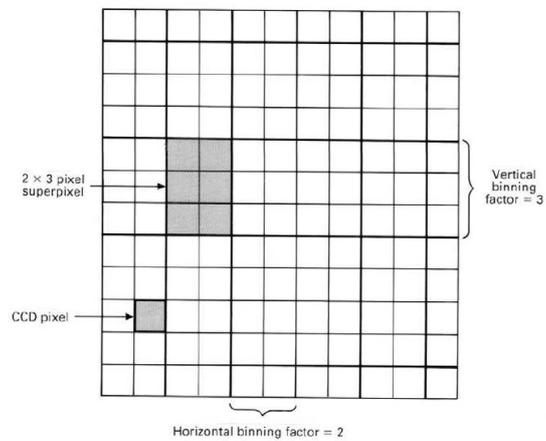


図5 on-chip binning

- 複数のピクセルを1つとしてみなす
- horizontal transfer を行わず複数続けて vertical transfer を行う/output をリセットせずに続けて horizontal transfer を行うことで実現^{*13}
- 高分解能をもつエシェレで×2 くらいのビニングをする
- 全波長帯で観測する際にスペクトル分解能を失わないためにビニングをする
- 弱いスペクトルを高い S/N 比で得るために ×15 かそれ以上でビニングをする
- 様々なシーイングの状況下での分解能を可視化するとき/非常に弱い天体を含む領域を最初に観測する際にも用いられる
- programmable design では”called up”という

^{*13} 1024 × 1024 を 4 × 4 に分けると、256 × 256