

Компьютерная обработка астрономических изображений

Получение изображений на ПЗС, базовые манипуляции.

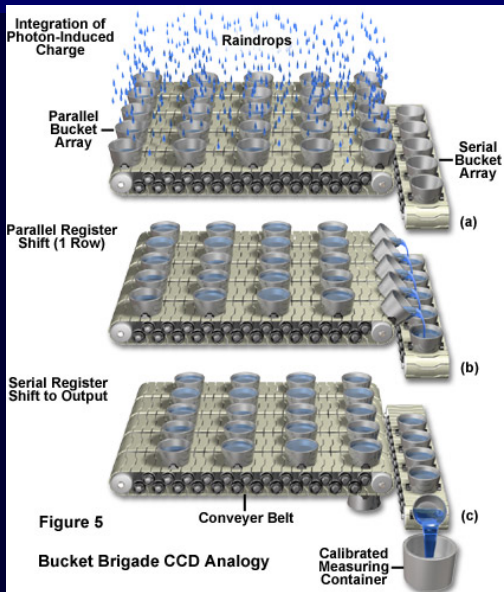
Емельянов Эдуард Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
Лаборатория физики оптических транзиентов



- 1 ПЗС светоприемники
- 2 Характеристики детекторов
- 3 Шумы
- 4 Первичная обработка снимков
- 5 Получение характеристик ПЗС

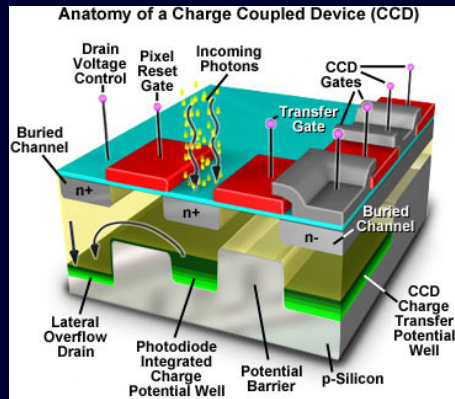


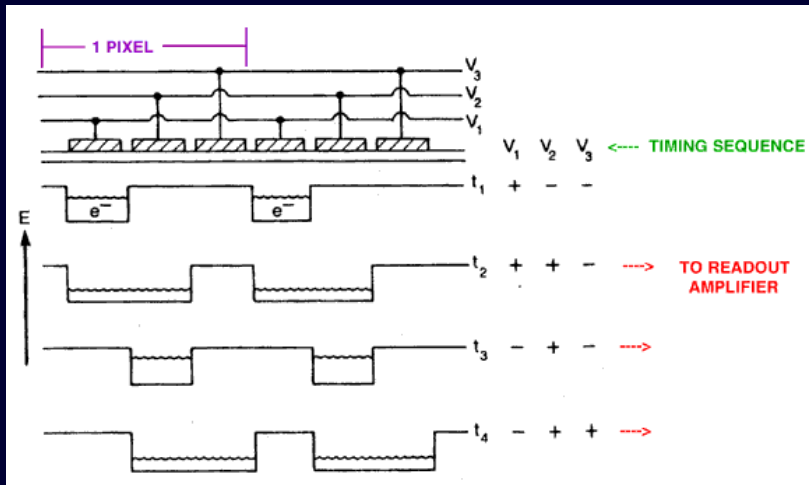


1969, Уиллард Бойл и Джордж Смит, лаборатории Белла.

1975 — первая ПЗС 100x100 (Steven Sasson, Kodak).

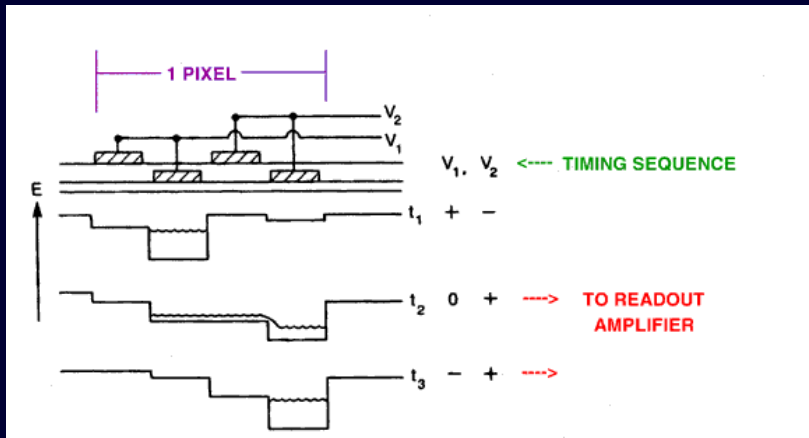
1976 — запуск спутника-шпиона с ПЗС 800x800.





Тактирование ПЗС

Двухфазное



Характеристики детекторов

Размер, количество пикселей (каналов), чувствительность в зависимости от длины волны (квантовая эффективность) и доступный спектральный диапазон, глубина потенциальной ямы, динамический диапазон, линейность, временное разрешение, возможность работы в режиме счета фотонов, шумовые характеристики (темновой, считывания), стабильность, цена.

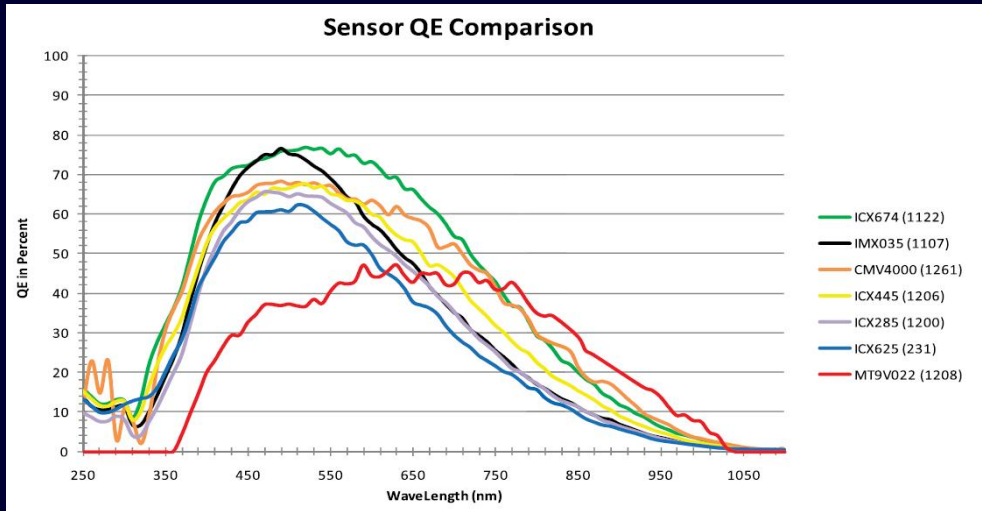
Эволюция детекторов

Историческая эволюция: глаз \Rightarrow фотопластинка \Rightarrow одноканальные фотоэлектрические приемники \Rightarrow сканеры фотопластинок \Rightarrow телевизионные сканеры \Rightarrow полупроводниковые устройства (фотодиоды, ПЗС, композитные ИК приемники, болометры, лавинные фотодиоды, КМОП) \Rightarrow устройства, измеряющие энергию фотона (STJ — на сверхпроводящих туннельных переходах, transition-edge sensor — повышение сопротивления свехпроводящего перехода).

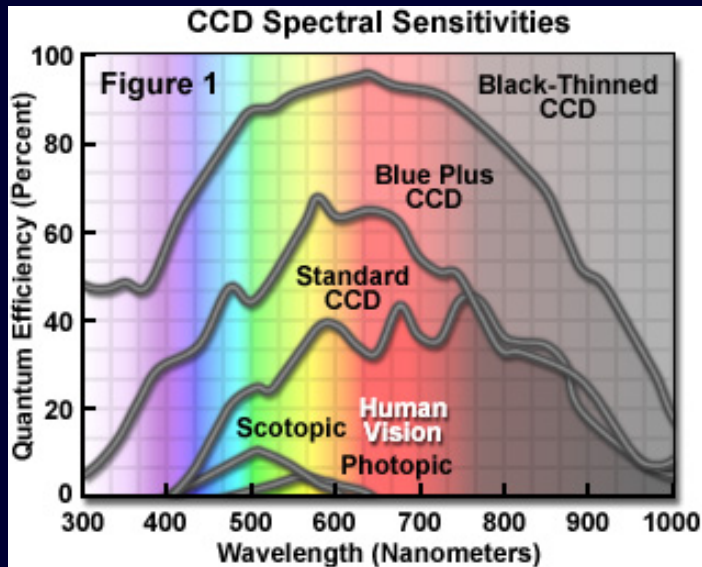


Квантовая эффективность ПЗС

QE — отношение количества падающих фотонов к детектируемым.

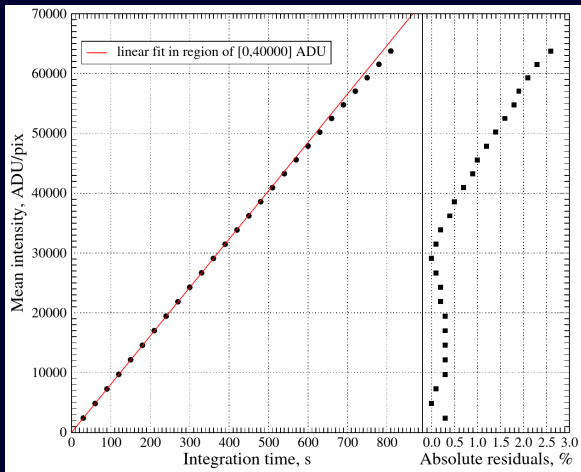


Квантовая эффективность ПЗС



Линейность

Линейность ПЗС-камеры Apogee Alta 16M-NC (Kodak KAF-16803).

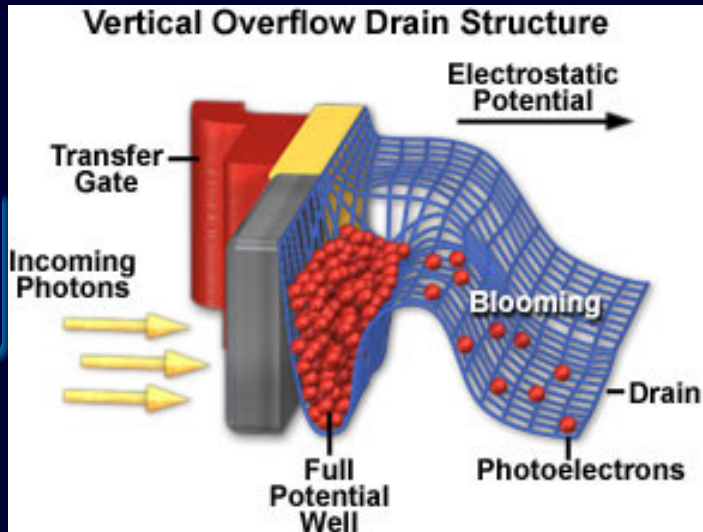


$\pm 0.5\%$ (2000 ÷ 40000 ADU); $\pm 1.0\%$ (0 ÷ 45000 ADU).



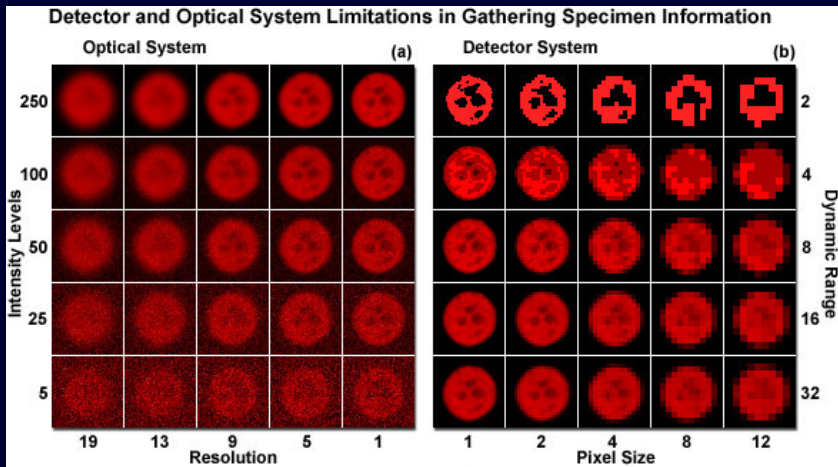
Динамический диапазон

Максимальный размах уровней сигнала, при котором он регистрируется без потерь. Идеал — бесконечный динамический диапазон.



Пространственное разрешение

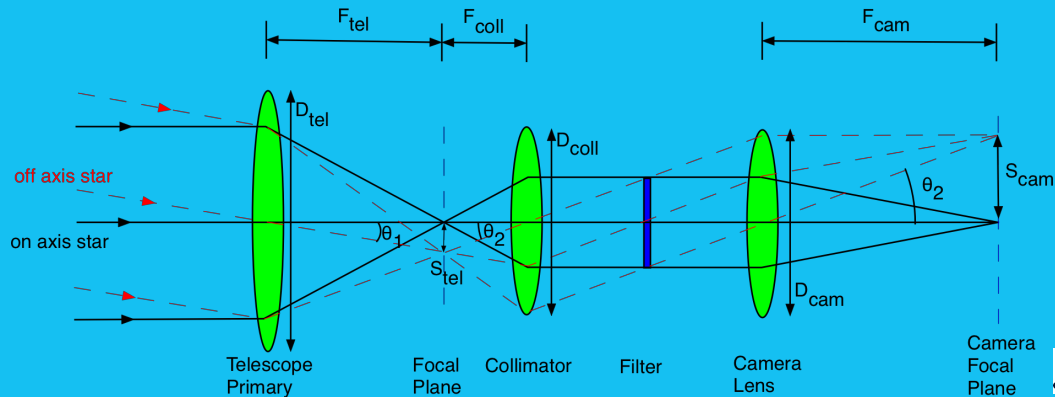
Степень детализации изображения зависит от условий наблюдения, оптики телескопа и прибора, размера пикселя.

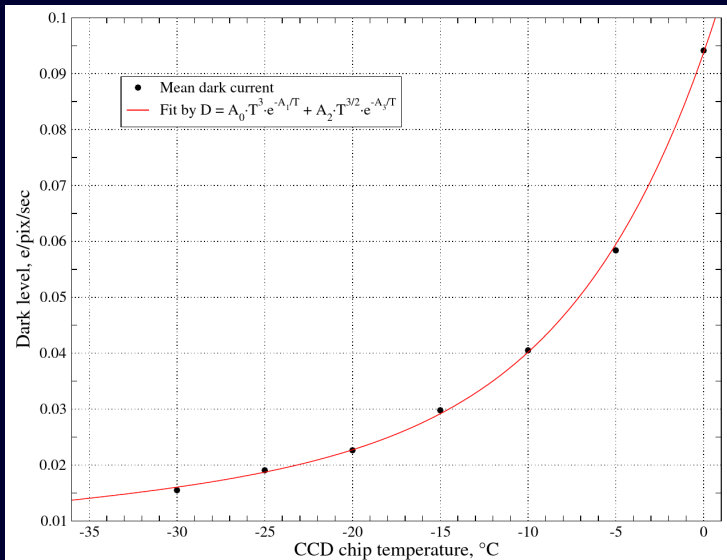


Выбор светоприемника под масштаб

$$5a \geq \Delta x \geq 2a, S_{tel} = \frac{F_{tel}}{206265} \quad . \text{ БТА: } 1/S = 8.6''/\text{мм}, \Delta x_{1''} = 116.36 \text{ мкм}$$

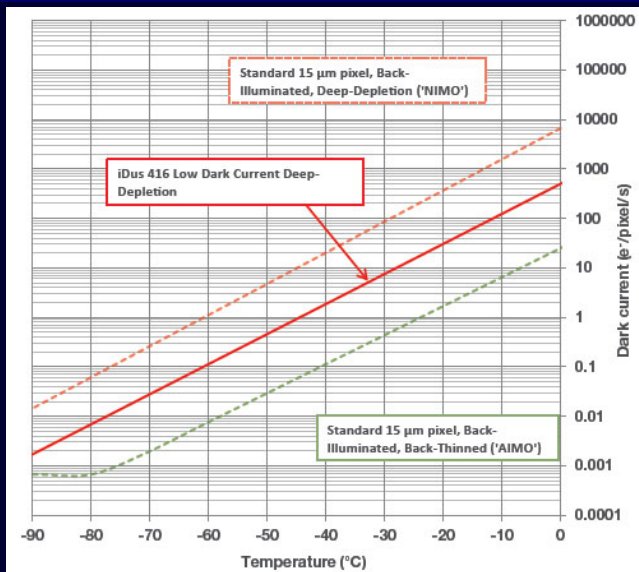
$$a_{opt} = 23.3 \text{ мкм. Нужен редуктор } \sim 2.5 \text{ раза! } m = \frac{S_{cam}}{S_{tel}} = \frac{F_{cam}}{F_{coll}} < 1$$





Выходной сигнал всегда отличается от входного: пуассонова статистика фотонов, фон неба, тепловой (темновой) шум, космические частицы, шум считывания и т.п. Темновой шум сильно зависит от температуры.





Шумы

Если пуассонов шум фотонов плоского поля превышает шум считывания, гистограмма имеет почти гауссову форму.

$$\sigma_{\text{ADU}} = \frac{\sqrt{\bar{F} \cdot G}}{G}$$

σ_{ADU} – полуширина гистограммы плоского поля, \bar{F} – средний уровень плоского, G – gain (коэффициент преобразования фотоэлектронов в ADU).

Два кадра bias (B) и плоского (F):

$$G = \frac{(\bar{F}_1 + \bar{F}_2) - (\bar{B}_1 + \bar{B}_2)}{\sigma_{F_1 - F_2}^2 - \sigma_{B_1 - B_2}^2}$$

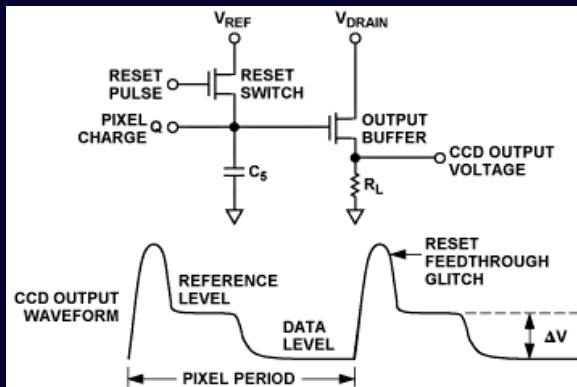
Шум считывания:

$$RN = \frac{G \cdot \sigma_{B_1 - B_2}}{\sqrt{2}}$$



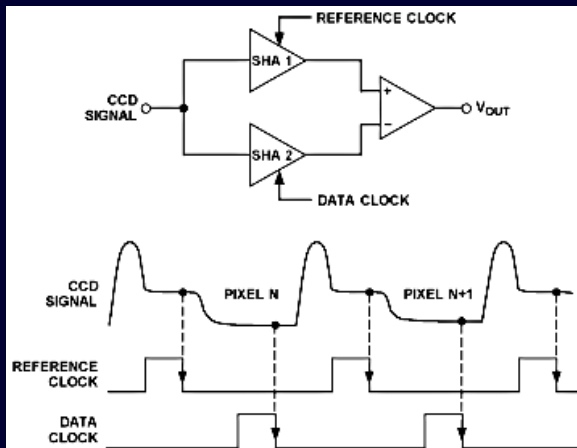
Коррелированная двойная выборка

Накопленный каждым пикселем заряд по линии зарядовой связи перемещается в выходной тракт, где преобразуется в напряжение. Перед считыванием очередного заряда тракт сбрасывается, что увеличивает шум считывания.



Коррелированная двойная выборка

ДКВ вычисляет уровень полезного сигнала относительно смещения. Первая выборка снимается сразу после сброса выходного тракта ПЗС. Вторая — по окончании переноса очередного заряда. Реализуется при помощи усилителей «выборка-удержание», sample-and-hold amplifier. Значительно снижает уровень коррелированных шумов.



Вкратце о ПЗС

- Для повышения эффективности толщина рабочего слоя ПЗС должна быть не больше подложки n-типа, back-illuminated. Усложнение техпроцесса, удорожание.
- Глубокое охлаждение чипа: при -80°C с ростом температуры на $\sim 7^{\circ}\text{C}$ темновой шум увеличивается в два раза.
- Кремниевая подложка имеет красную границу на ~ 1.1 мкм, в ИК светоприемники с кремниевыми подложками не будут работать.
- Утончение чипа приводит к росту прозрачности для больших длин волн и появлению фрингов.
- Большой проблемой является растекание заряда с переэкспонированных пикселей.
- ПЗС невозможно оснастить «электронным» затвором, их затвор механический.
- Дефекты подложки приводят к появлению «горячих» и «плохих» пикселей.
- Постоянное воздействие космических частиц вызывает необратимую деградацию.



Первичная обработка снимков

Квантовая эффективность: $QE = N_e/N_\gamma$. **Выходной сигнал:** S (ADU). Коэффициент усиления (**gain**): $gain = N_e/S$. Уровень смещения (**bias**) — инжектируемый заряд для вывода кривой чувствительности на линейный участок $\Rightarrow N_e = N_{ebias} + N_{eobject}$, $S = S_{bias} + S_{object}$. Т.е. $N_\gamma = gain \cdot S_{object}/QE$.

Шум считывания складывается из шумов переноса заряда и шума усилителя.

Кадр смещения, **bias**, получается для коррекции сигнала на инжектируемый нулевой заряд, позволяет определить шум считывания. Для снижения шумов рекомендуется получать медиану как можно большего количества кадров.

Темновой кадр, **dark**, (с закрытой диафрагмой) содержит информацию о темновых шумах.

Плоское поле, **flat**, необходимо для коррекции виньетирования и неоднородностей оптических систем. Отражает попиксельную неоднородность чувствительности.

Биннинг. Сложение происходит до АЦП, поэтому увеличивается полезный сигнал в N раз при том же уровне шума, т.е. влияние шума считывания снижается. Увеличение скорости считывания и уровня сигнала (но уменьшение разрешения).

Overscan — служебная (не засвечиваемая) область ПЗС, позволяет грубо оценивать **bias** без получения отдельного кадра.

Сигнал-шум

В общем случае

$$\text{SNR} = N_* \cdot \left[N_* + n_{pix} \left(1 + \frac{n_{pix}}{n_B} \right) (N_S + N_D + N_R^2 + G^2 \sigma_f^2) \right]^{-1/2},$$

N_* – количество фотонов от объекта; n_{pix} – количество пикселей для вычисления SNR; n_B – количество пикселей для оценки фона; N_S – количество фоновых фотонов на пиксель; N_D – количество темновых фотонов на пиксель; N_R^2 – количество электронов на пиксель вследствие шума считывания; G – gain; $\sigma_f \approx 0.289$ – ошибка квантования, вносимая АЦП. Если G невелик, n_B велико, часть членов можно опустить. По времени экспозиции:

$$\text{SNR} = Nt \cdot [Nt + n_{pix}(N_S t + N_D t + N_R^2)]^{-1/2},$$

т.е. $\text{SNR} \propto \sqrt{t}$. Для ярких источников $\text{SNR} \propto \sqrt{Nt}$.



Первичная редукция

Итак, чтобы в нулевом приближении избавиться от влияния на сигнал оптической системы и ПЗС, необходимо выполнить следующее:

$$S_0 = \frac{S - D}{(F - D)_{norm}},$$

где S – object, D – dark, F – flat, $norm$ – нормировка на единицу. В случае очень больших экспозиций object (час и выше), невозможно получить хотя бы пару десятков кадров dark в тех же условиях и до следующей ночи наблюдений. В этом случае используют т.н. superdark, SD – экстраполяцию линейаризованной МНК зависимости $\{D(t) - B\}$, где B – bias:

$$S_0 = \frac{S - B - SD \cdot t_S}{(F - D_F)_{norm}},$$

здесь, т.к. flat обычно имеет небольшую экспозицию, несложно накопить для них «честные» темновые.



Первичная редукция

Для каждой ночи наблюдений при коротких экспозициях «научных кадров» необходимо:

- 1 30 ÷ 100 dark frames;
- 2 30 ÷ 100 flatfields.

В случае слишком длинных экспозиций, необходимо:

- 1 10 ÷ 20 bias frames;
- 2 не меньше 10 dark frames на каждую из минимум 10 экспозиций;
- 3 около 30 dark frames с экспозицией flatfield;
- 4 30 ÷ 100 flatfields.



Получение характеристик ПЗС

Обозначим gain как G . $N_{\bar{e}} = G \cdot S$. Выраженную в электронах, дисперсию полного шума «плоского поля», полученного в лаборатории на условно идеальном источнике освещения можно записать как

$$\sigma^2 = \sigma_{\gamma}^2 + R^2 + \sigma_{CCD}^2,$$

где σ_{γ} – фотонный шум, R – шум считывания, σ_{CCD} – прочие шумы ПЗС (неоднородность чувствительности пикселей и т.п.). Избавиться от последнего члена мы можем, используя разность двух изображений с одинаковыми экспозициями, но в этом случае полученную дисперсию следует разделить на два. Данная операция поможет также избавиться от аддитивной добавки к S , вызванной bias и темновым током.

Т.к. фотонный шум пропорционален корню из сигнала, в ADU получим: $\sigma^2 = S/G + R_{ADU}^2$. Выделим область в несколько десятков тысяч квадратных пикселей на изображении в зоне, где уровень освещенности можно аппроксимировать горизонтальной плоскостью с высокой точностью.



Получение характеристик ПЗС

Получим:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (S_1(x, y) - S_x(x, y))^2}{2(N - 1)},$$

где N – количество пикселей. Средний уровень обозначим как $S = (S_1 + S_2)/2$.
Определение σ^2 и $\langle S \rangle$ необходимо провести для как можно большего значения разных времен экспозиции. Далее можно построить зависимость

$$\sigma^2 = S/G + R_{ADU}^2,$$

линейно ее аппроксимировать к виду $\sigma^2 = a \cdot S + b$ и получить значения $G = 1/a$, $R = G \cdot \sqrt{b}$.



Спасибо за внимание!

mailto

eddy@sao.ru

edward.emelianoff@gmail.com

