Отношение сигнал/шум в астрофизических наблюдениях

Лекция 5

Шум в детекторах CCD/CMOS и параметры наблюдений. Шум считывания, темновой ток, bias, коэффициент преобразования

КазНУ имени аль-Фараби

Цель и план лекции

Цель

Изучение устройства и шумовых характеристик детекторов CCD и CMOS, методов калибровки кадров и определения коэффициента преобразования и шума считывания, а также их влияния на S/N.

1. Введение
2. Принцип действия детекторов
3. Калибровочные кадры
4. Коэффициент преобразования и кривая переноса фотонов
5. Выбор параметров и уравнение Мерлайна–Хауэлла
6. Эксплуатационные эффекты
7. Контроль характеристик детектора и влияние обработки

1 Введение

- ПЗС- и КМОП-матрицы являются основными приёмниками изображения в оптической астрономии.

2 Принцип действия детекторов

Фотоэффект

Поглощённый фотон создаёт в кремнии электронно-дырочную пару. Доля зарегистрированных фотонов определяется квантовой эффективностью, зависящей от длины волны.

Накопление заряда

Заряд хранится в потенциальных ямах пикселей. Объём ограничивается ёмкостью ямы (full well), составляющей обычно 50–200 тысяч электронов.

Считывание

В ПЗС заряд последовательно переносится к одному или нескольким выходным усилителям, а в КМОП усилитель расположен в каждом пикселе.

Детекторы CCD обеспечивают однородность отклика. Детекторы CMOS обеспечивают высокую скорость считывания и малый шум считывания, однако различие усилителей пикселей приводит к неоднородности.

2 Принцип действия детекторов (продолжение)

Аналого-цифровое преобразование

Напряжение преобразуется в код. Величина ADU связана с электронами коэффициентом преобразования g (e^-/ADU).

Детекторы CCD обеспечивают однородность отклика. Детекторы CMOS обеспечивают высокую скорость считывания и малый шум считывания, однако различие усилителей пикселей приводит к неоднородности.

3 Калибровочные кадры

Смещение (bias)

Кадр нулевой длительности показывает постоянный уровень электроники. Вычитание его среднего по множеству кадров устраняет постоянный сдвиг. Многие CCD имеют область предсканирования или посткадра (overscan), измеряющую текущий уровень.

Темновой кадр (dark)

Кадр с закрытым затвором даёт темновой ток и горячие пиксели.

Плоское поле (flat)

Кадр равномерно освещённого поля показывает чувствительность пикселей и виньетирование.

Калибровка изображения

Выполняется по формуле:

$$I_{cal} = (I_{raw} - B - Dt) \,/\, (F \,/\, \langle F \rangle).$$

Основное правило: при калибровке нельзя вносить шумов больше, чем содержится в данных.

4 Коэффициент преобразования и кривая переноса фотонов

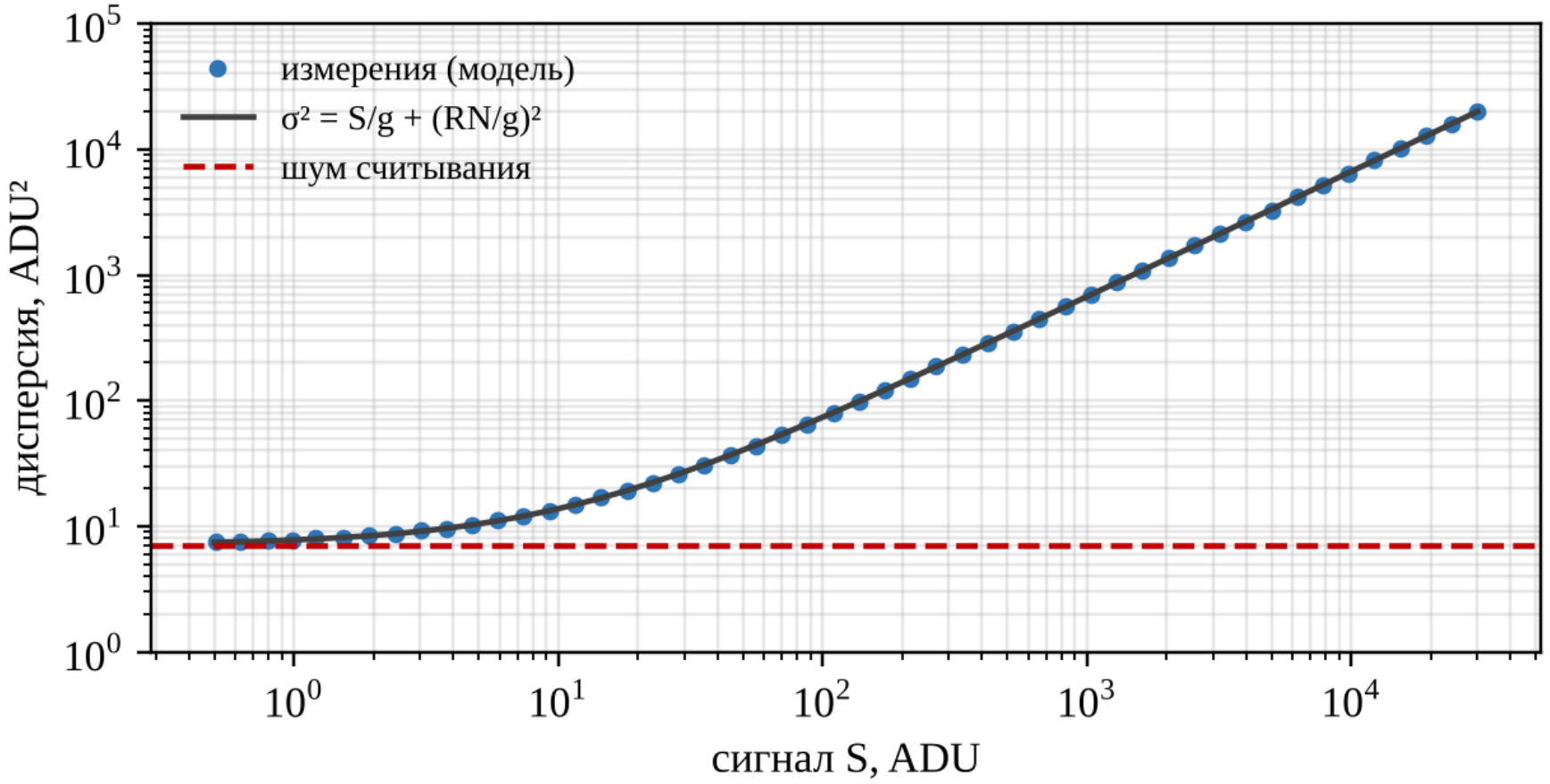
- Определение g основано на свойствах статистики Пуассона. Пусть S – средний сигнал в ADU, тогда при пуассоновском характере дисперсии:

$$\sigma_S^2 = S / g + \sigma_R^2,$$

- где σ_R – шум считывания в ADU. Значит, построив зависимость дисперсии от среднего, можно определить g как обратную величину наклона прямой.

4

Коэффициент преобразования и кривая переноса фотонов (продолжение)



Кривая переноса фотонов: зависимость дисперсии от среднего уровня сигнала

4 Коэффициент преобразования и кривая переноса фотонов (продолжение)

- Шум считывания определяется по разности двух кадров смещения:

$$RN = g \cdot \sigma(B_1 - B_2) / \sqrt{2}.$$

4 Определение коэффициента преобразования и шума считывания

Листинг 5.1.

```
import numpy as np

rng = np.random.default_rng(5)
g_true, rn_true = 1.5, 4.0          # e-/ADU, e-
shape = (500, 500)
pix = 1 + 0.02 * rng.normal(size=shape)   # неоднородность

def frame(level):
    e = rng.poisson(np.clip(level * pix, 0, None), shape)
    return (e + rng.normal(0, rn_true, shape)) / g_true

b1, b2 = frame(0), frame(0)
sig_rn = (b1 - b2).std() / np.sqrt(2)
```

4 Определение коэффициента преобразования и шума считывания (продолжение)

Листинг 5.1.

```
levels = np.geomspace(500, 40000, 12)
S, V = [], []
for L in levels:
    a, b = frame(L), frame(L)
    S.append(0.5 * (a.mean() + b.mean()))
    V.append((a - b).var() / 2 - sig_rn**2)
S, V = np.array(S), np.array(V)
slope = (S * V).sum() / (S * S).sum()
g = 1 / slope
print(f"Коэффициент g = {g:.3f} e-/ADU (задано {g_true})")
print(f"Шум считывания = {g * sig_rn:.2f} e- (задано {rn_true})")
```

4 Результат: Определение коэффициента преобразования и шума считывания

```
Коэффициент g = 1.502 e-/ADU (задано 1.5)
Шум считывания = 4.00 e- (задано 4.0)
```

5 Выбор параметров и уравнение Мерлайна–Хауэлла

- Выбор коэффициента усиления связан с компромиссом. Шум квантования должен быть малым по сравнению с шумом считывания (обычно g порядка RN/2 или немного меньше), но при этом должен охватываться весь динамический диапазон.

- Полная формула Мерлайна и Хауэлла учитывает ошибку определения фона:

$$S/N = N_* / \sqrt{(N_* + n_{pix}(1 + n_{pix}/n_B)(N_S + N_D + N_R^2 + G^2\sigma_f^2))},$$

- где n_B – число пикселей, по которым определён фон, а $\sigma_f \approx 0{,}289$ ADU – стандартное отклонение ошибки квантования.

5 Сравнение детекторов при наблюдениях слабого объекта

Листинг 5.2.

```
def snr(Nstar, npix, Nsky, Nd, RN, nB=500):
    return Nstar / np.sqrt(Nstar + npix * (1 + npix / nB)
                           * (Nsky + Nd + RN**2))

t = 30.0
R, Rsky = 15.0, 5.0
npix = 30
print("Детектор               RN    dark   S/N")
for name, RN, d, QE in [("ПЗС охлаждаемая", 4.0, 0.002, 0.9),
                        ("КМОП астрономическая", 1.5, 0.05, 0.8),
                        ("ПЗС с высоким RN", 12.0, 0.002, 0.9)]:
    print(f"{name:21} {RN:5.1f} {d:6.3f} "
          f"{snr(R * QE * t, npix, Rsky * QE * t, d * t, RN):6.1f}")
```

```
Детектор               RN    dark   S/N
ПЗС охлаждаемая         4.0  0.002    5.6
КМОП астрономическая    1.5  0.050    5.5
ПЗС с высоким RN       12.0  0.002    4.2
```

6 Эксплуатационные эффекты

Эффективность переноса заряда

В CCD заряд проходит тысячи переносов, поэтому даже небольшая потеря приводит к искажению.

Интерференционные полосы (fringing)

В тонких матрицах при длинных волнах отражения внутри кремния создают интерференционную картину.

Эффект «brighter-fatter»

Яркие звёзды имеют несколько более широкую PSF из-за взаимного отталкивания зарядов, что важно для слабого гравитационного линзирования.

Нелинейность и насыщение

Отклонения при заполнении ямы выше примерно 80 % требуют корректировки.

Перед началом программы необходимо провести измерения: определить кривую PTC, линейность, темновой ток при рабочей температуре, плоское поле в каждом фильтре.

6 Эксплуатационные эффекты (продолжение)

Остаточное изображение

После яркого объекта сохраняется след; это особенно заметно в ИК-матрицах.

Космические частицы

Требуют применения нескольких экспозиций или алгоритмов типа L.A.Cosmic.

Перед началом программы необходимо провести измерения: определить кривую PTC, линейность, темновой ток при рабочей температуре, плоское поле в каждом фильтре.

7 Контроль характеристик детектора и влияние обработки

- Для уверенной эксплуатации детектора требуется регулярный контроль. Рекомендуется вести журнал уровня смещения, темнового тока, шума считывания и коэффициента преобразования.
- Шум при вычитании калибровочных кадров можно рассчитать явно. Если объединено M кадров смещения с шумом RN, то суммарная дисперсия увеличивается до $RN^2(1 + 1/M)$.
- Для коротких экспозиций важным может быть затворный эффект: время открытия затвора зависит от положения пикселя на детекторе, что создаёт ошибку времени, сравнимую с длительностью экспозиции при очень малых выдержках.
- При анализе изображений CMOS важно учитывать неоднородность шума считывания.

7 Контроль характеристик детектора и влияние обработки (продолжение)

- Для докторантов полезно выполнить следующую работу: измерить PTC реальной камеры обсерватории, определить её коэффициент преобразования и сравнить с паспортным значением.

8 Разбор примера

1. Предположим, что разность двух кадров смещения имеет $\sigma = 5$ ADU, а $g = 1{,}6\ e^-/\text{ADU}$. Тогда σ одного кадра равно $5/\sqrt{2} \approx 3{,}54$ ADU, а шум считывания составляет $3{,}54 \cdot 1{,}6 \approx 5{,}7\ e^-$.

2. Шум квантования равен $g/\sqrt{12} = 1{,}6/3{,}46 \approx 0{,}46\ e^-$, что значительно меньше шума считывания.

3. Темновой ток уменьшается примерно вдвое при охлаждении на 6–7 К (для типичных ПЗС).

4. При понижении температуры на 20 К темновой ток уменьшится приблизительно в 8–10 раз.

5. Если при −20 °C темновой ток равен $0{,}1\ e^-/\text{с}$, то при −40 °C он составит порядка $0{,}01\ e^-/\text{с}$.

9 Вопросы для обсуждения на занятии

Выбор детектора

Какой детектор и почему вы выбрали бы для высокоскоростной фотометрии и для спектроскопии слабых объектов?

Калибровка

Сколько кадров смещения и плоского поля необходимо для вашей программы?

Биннинг

В каких условиях биннинг увеличивает S/N?

Контрольные вопросы

1. Опишите этапы преобразования фотона в цифровое значение пикселя.
2. Чем различаются CCD и CMOS с точки зрения шумов?
3. Какие калибровочные кадры применяются и для чего?
4. Опишите метод кривой переноса фотонов.
5. Как определить шум считывания?
6. Запишите формулу Мерлайна–Хауэлла и объясните множитель $1 + n_{pix}/n_B$.
7. Как выбирается коэффициент усиления?
8. Какие эксплуатационные эффекты влияют на качество данных?

Список литературы

1. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
2. Janesick J.R. Photon Transfer. – Bellingham: SPIE Press, 2007.
3. Janesick J.R. Scientific Charge-Coupled Devices. – Bellingham: SPIE Press, 2001.
4. Merline W.J., Howell S.B. A realistic model for point-sources imaged on array detectors: The model and initial results // Experimental Astronomy. – 1995. – Vol. 6. – P. 163–210.