Отношение сигнал/шум в астрофизических наблюдениях

Лекция 3

Источники шума в астрофизических наблюдениях. Фотонный, детекторный, фоновый и систематический шумы

КазНУ имени аль-Фараби

Цель и план лекции

Цель

Изучение физической природы основных источников шума, способов их количественного описания и умения определять преобладающий источник шума в конкретных условиях наблюдений.

1. Введение
2. Общая классификация
3. Шум фотонов источника и фона
4. Шумы детектора
5. Формула суммарного шума
6. Систематические шумы
7. Шумы в других диапазонах
8. Составление бюджета шума прибора

1 Введение

- Погрешность измерения определяется совокупностью множества процессов, начиная от прихода фотонов и заканчивая алгоритмами обработки.
- Основное правило состоит в том, что дисперсии независимых источников шума складываются.

2 Общая классификация

Фундаментальные шумы

Обусловлены квантовой природой излучения и вещества: шум фотонов источника и фона.

Шумы детектора

Шум считывания, темновой ток, неоднородность отклика пикселей, шум квантования.

Атмосферные и внешние шумы

Фон неба, сцинтилляции, изменение прозрачности, турбулентность.

Систематические шумы

Гнутие и термические изменения приборов, неточности калибровки, остаточные следы предыдущих экспозиций, ошибки алгоритмов.

Шумы источника

Истинная переменность звёзд (грануляция, активность) может выступать помехой при поиске экзопланет.

3 Шум фотонов источника и фона

- Количество зарегистрированных электронов подчиняется закону Пуассона, поэтому дисперсия шума равна среднему числу регистрируемых фотоэлектронов.

4 Шумы детектора

Шум считывания

Значение RN добавляется при каждом считывании каждого пикселя и не зависит от экспозиции.

Темновой ток

Термическая генерация электронов зависит от температуры экспоненциально. Вклад равен $n_{pix} R_d t$ и уменьшается охлаждением приборов.

Шум квантования

Возникает при преобразовании заряда в цифровой код и обычно мал при правильном выборе коэффициента усиления.

Неоднородность пикселей

Различие чувствительности пикселей создаёт мультипликативный шум, пропорциональный сигналу.

Импульсные помехи

Космические лучи, «горячие» пиксели и остаточные сигналы вызывают отдельные выбросы.

5 Формула суммарного шума

- Для фотометрии в апертуре суммарная дисперсия записывается как:

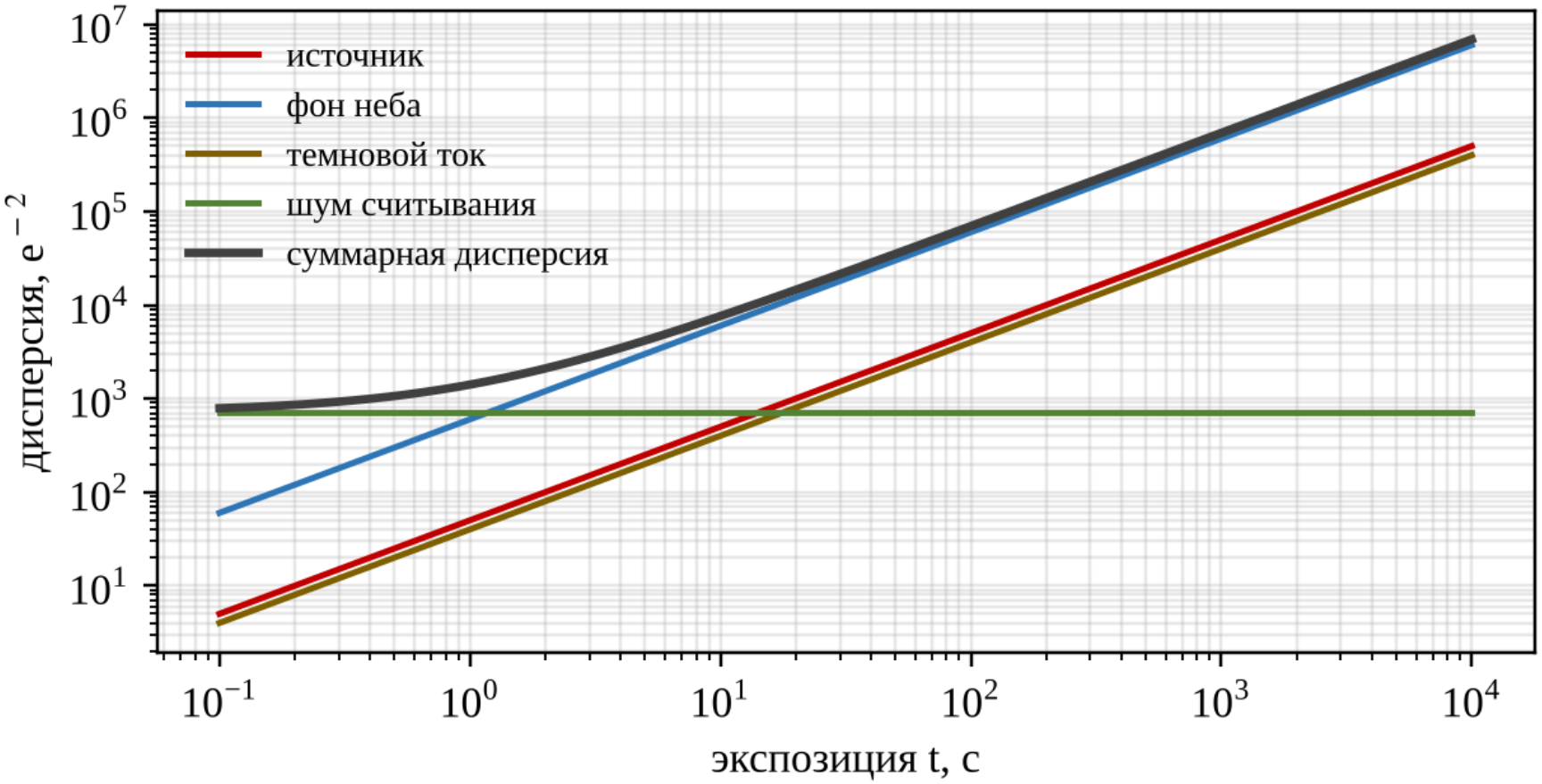
$$\sigma^2 = R_* t + n_{pix}(R_{sky} t + R_d t + RN^2).$$

- Соответствующее значение S/N, называемое уравнением ПЗС, равно:

$$S/N = R_* t \,/\, \sqrt{(\, R_* t + n_{pix}(R_{sky} t + R_d t + RN^2)\,)}.$$

- Поэтому при малых экспозициях преобладает шум считывания, а при длинных – фон неба либо сам источник.

5 Формула суммарного шума (продолжение)



Вклады различных источников шума в суммарную дисперсию в зависимости от времени экспозиции

5 Формула суммарного шума (продолжение)

- Определение режима является важнейшим результатом расчёта:
- если преобладает шум источника, $S/N \propto \sqrt{t}$, и достигается предел фотонного шума;
- если преобладает фон, $S/N \propto \sqrt{t}$, но также зависит от размера апертуры и фона;
- если преобладает шум считывания, $S/N \propto t$, поэтому выгодны длинные экспозиции.

5 Бюджет шума фотометрического наблюдения

Листинг 3.1.

```
import numpy as np

def budget(R, t, n, Rsky, Rd, RN):
    terms = {"источник": R * t, "фон": n * Rsky * t,
             "темновой ток": n * Rd * t, "считывание": n * RN**2}
    total = sum(terms.values())
    print(f"t = {t:6.0f} c, S/N = {R * t / np.sqrt(total):8.1f}")
    for k, v in terms.items():
        print(f"   {k:13} {100 * v / total:6.1f} %")

budget(R=50, t=1, n=20, Rsky=30, Rd=2, RN=6)
budget(R=50, t=100, n=20, Rsky=30, Rd=2, RN=6)
budget(R=5000, t=100, n=20, Rsky=30, Rd=2, RN=6)
```

5 Результат: Бюджет шума фотометрического наблюдения

```
t =      1 с, S/N =      1.3
   источник          3.5 %
   фон              42.6 %
   темновой ток      2.8 %
   считывание       51.1 %
t =    100 с, S/N =     18.9
   источник          7.2 %
   фон              86.1 %
   темновой ток      5.7 %
   считывание        1.0 %
t =    100 с, S/N =    665.4
   источник         88.5 %
   фон              10.6 %
   темновой ток      0.7 %
   считывание        0.1 %
```

6 Систематические шумы

В отличие от статистических источников, систематические эффекты зачастую зависят от времени и условий и не описываются простым законом.

Погрешность плоского поля

Относительная погрешность ε создаёт шум, равный εN. Поэтому суммарный вклад равен $\varepsilon^2 N^2$, и при больших потоках S/N стремится к 1/ε.

Изменения условий

Температура, положение объекта на детекторе, ошибки гидирования.

Загрязнение

Вклад соседних объектов в апертуру или неполное вычитание фона.

Рассеянный свет и гало

Паразитные отражения внутри прибора.

С систематическими эффектами борются с помощью дифференциальной фотометрии, сканирования, дизеринга и моделирования вспомогательными параметрами.

6 Систематические шумы (продолжение)

Нелинейность

Отклонение отклика детектора от линейного закона при больших уровнях заполнения.

С систематическими эффектами борются с помощью дифференциальной фотометрии, сканирования, дизеринга и моделирования вспомогательными параметрами.

7 Шумы в других диапазонах

- Радиоастрономические наблюдения характеризуются температурой системы T_{sys}, складывающейся из шума приёмника, фонового излучения атмосферы и неба.

8 Составление бюджета шума прибора

- Для реального прибора бюджет шума строится на основе измеренных параметров.
- Следующий этап – проверка шкалы. Если значения приведены в ADU, а не в электронах, то шум источника будет определён ошибочно: дисперсия в ADU равна S/g, а не S. Ошибочное значение g непосредственно приводит к ошибке S/N. Эта ошибка является распространённой при использовании готовых пакетов, где коэффициент преобразования задаётся параметром, а по умолчанию равен единице.
- Особое внимание следует уделять шумам, которые изменяются при обработке. Деление на плоское поле масштабирует шум; ресэмплинг вводит корреляцию; вычитание фона добавляет ошибку фона.
- Для инфракрасных матриц характерны дополнительные особенности: считывание не обязательно выполняется однократно, применяется многократное считывание (Fowler sampling) или подгонка наклона накопления заряда (up-the-ramp), что снижает эффективный шум считывания.

8 Составление бюджета шума прибора (продолжение)

- Практическое упражнение: определите для своего прибора, при какой звёздной величине фон становится равен потоку источника в апертуре.

9 Разбор примера

1. Рассчитаем S/N при $R_* = 50\ e^-/c$, $t = 100$ с, $n_{pix} = 20$, $R_{sky} = 30\ e^-/(c \cdot пкс)$, $R_d = 2\ e^-/(c \cdot пкс)$, $RN = 6\ e^-$.

2. Сигнал равен $5000\ e^-$.

3. Дисперсия источника – 5000, фона – $20 \cdot 30 \cdot 100 = 60000$, темнового тока – $20 \cdot 2 \cdot 100 = 4000$, считывания – $20 \cdot 36 = 720$.

4. Суммарная дисперсия равна 69720, а её квадратный корень ≈ 264.

5. Следовательно, S/N ≈ 18,9.

6. Основным источником шума является фон неба.

7. Уменьшение числа пикселей апертуры вдвое при сохранении потока уменьшило бы дисперсию фона также вдвое и увеличило S/N примерно на 37 %.

10 Вопросы для обсуждения на занятии

Преобладающий шум

Какой источник шума будет преобладать при наблюдениях яркой звезды и слабой галактики?

Ограничения

Что произойдёт с S/N при бесконечно большом накоплении, если плоское поле известно с точностью 0,5 %?

Космос

Какие источники шума уменьшаются при переходе к космическому телескопу?

Контрольные вопросы

1. Назовите основные группы источников шума.
2. Как определяется дисперсия шума для источника и фона?
3. Какие виды шума создаёт детектор?
4. Запишите уравнение ПЗС и объясните каждый член.
5. Как зависит S/N от времени при различных преобладающих шумах?
6. Почему ошибка плоского поля ограничивает максимальное значение S/N?
7. Какие методы применяются для уменьшения систематических шумов?
8. Как описывается шум в радиоастрономии?

Список литературы

1. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
2. 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.
3. Janesick J.R. Scientific Charge-Coupled Devices. – Bellingham: SPIE Press, 2001.
4. Thompson A.R., Moran J.M., Swenson G.W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. – 3rd ed. – Cham: Springer, 2017.
5. Data, Noise and Signal (for Astronomers): lecture notes. – Caltech, c. 2016. [источник указан в силлабусе]