Отношение сигнал/шум в астрофизических наблюдениях

Лекция 6

Фон неба и атмосферные эффекты. Sky background, seeing, экстинкция и их влияние на обнаружение сигнала

КазНУ имени аль-Фараби

Цель и план лекции

Цель

Изучение физических источников фона неба, влияния турбулентности и поглощения в атмосфере на качество изображений, а также методов оценки и вычитания фона и учёта экстинкции.

1. Введение
2. Фон неба
3. Атмосферная турбулентность
4. Сцинтилляции
5. Атмосферная экстинкция
6. Оценка и вычитание фона
7. Планирование наблюдений с учётом атмосферы
8. Модели фона и его изменчивость

1 Введение

- Наблюдения с поверхности Земли проводятся через атмосферу, которая ослабляет излучение, создаёт собственное свечение и искажает волновой фронт.

2 Фон неба

Излучение ночного неба состоит из нескольких компонентов.

Свечение атмосферы (airglow)

Излучение возбуждённых атомов и молекул в верхней атмосфере. В ближней инфракрасной области преобладают интенсивные линии гидроксила OH, а в оптике заметны линии атомарного кислорода, например 5577 Å.

Зодиакальный свет

Солнечное излучение, рассеянное межпланетной пылью.

Лунный свет

Вблизи полнолуния фон в синих фильтрах может возрасти на несколько звёздных величин.

Яркость фона выражается в зв. вел./кв. угл. сек. Тёмное небо в фильтре V имеет яркость около 21,7–22.

2 Фон неба (продолжение)

Интегральный свет звёзд и галактик

Неразрешённое излучение объектов Галактики и внегалактический фон.

Световое загрязнение

Искусственное освещение заметно увеличивает фон, особенно вблизи городов.

Тепловое излучение

На длинах волн более примерно 2,3 мкм основным становится излучение атмосферы и телескопа.

Яркость фона выражается в зв. вел./кв. угл. сек. Тёмное небо в фильтре V имеет яркость около 21,7–22.

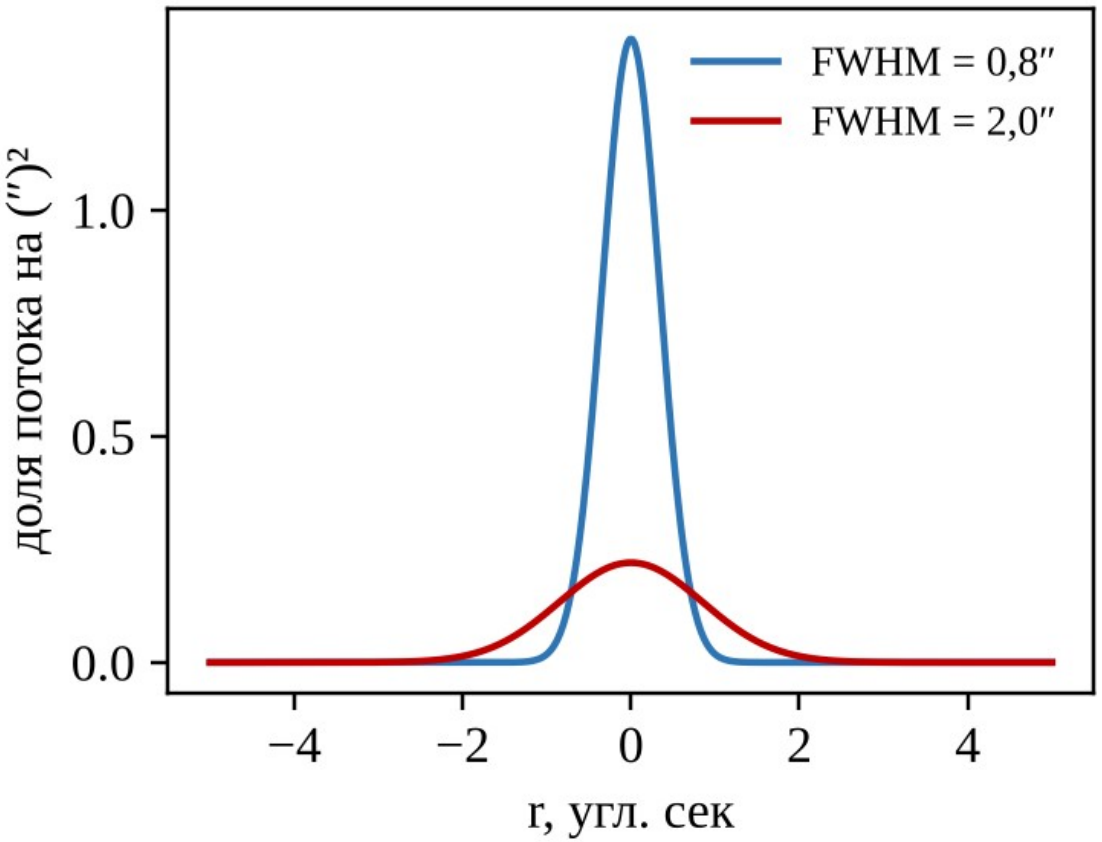
3 Атмосферная турбулентность

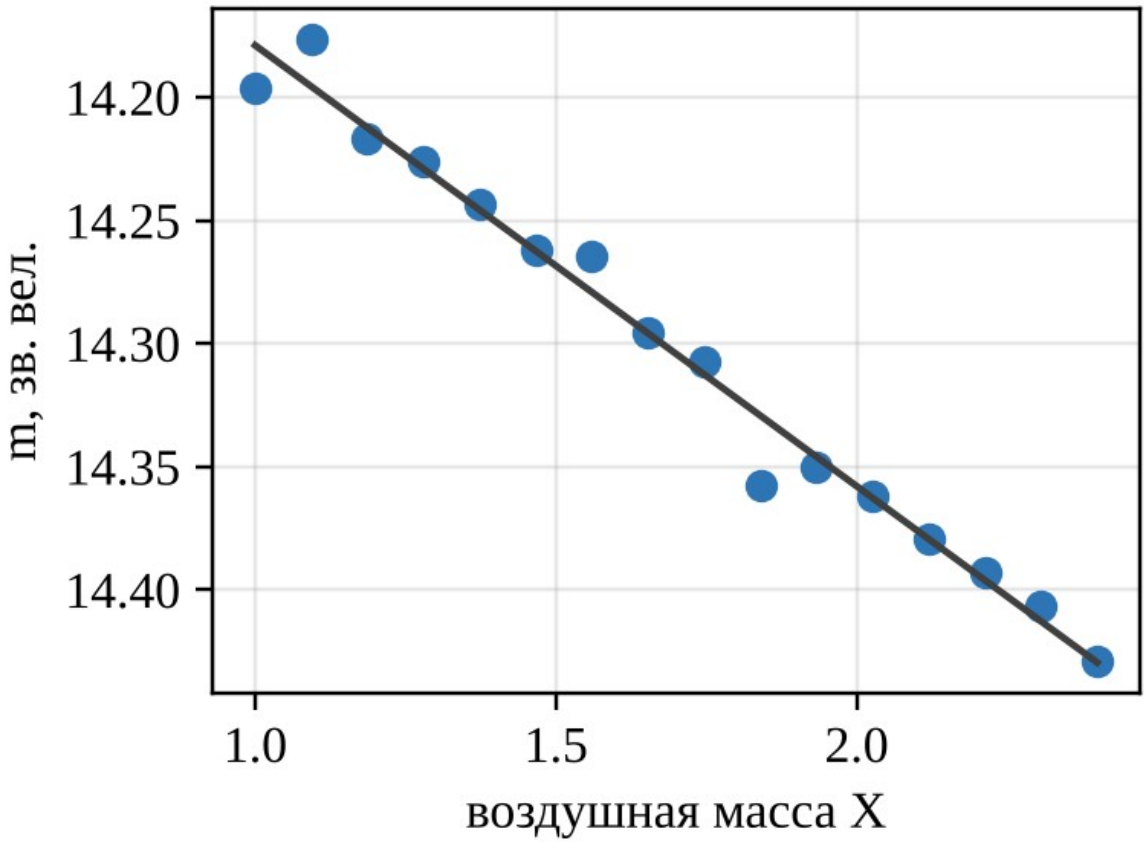
- Флуктуации температуры воздуха создают случайные изменения показателя преломления.

$$\theta \approx 0{,}98\,\lambda / r_0.$$

- Значение r_0 пропорционально $\lambda^{6/5}$, поэтому seeing слабо улучшается с ростом длины волны ($\theta \propto \lambda^{-1/5}$).
- Изображения часто описываются функцией Моффата, имеющей более протяжённые крылья, чем гауссова функция.

3 Атмосферная турбулентность (продолжение)





Профиль изображения при разном seeing и определение коэффициента экстинкции

3 Атмосферная турбулентность (продолжение)

- Для точечного объекта при фоновом ограничении эффективное число пикселей пропорционально квадрату FWHM, поэтому:

$$S/N \propto 1 / FWHM.$$

- Следовательно, чтобы компенсировать увеличение FWHM в 2 раза, необходимо увеличить время экспозиции в 4 раза.

4 Сцинтилляции

- Дрожание и мерцание звезды обусловлены изменением интенсивности в апертуре телескопа.

$$\sigma = 0{,}09\, D^{-2/3}\, X^{1{,}75}\, \exp(-h/h_0) \,/\, \sqrt{(2t)},$$

- где D – диаметр телескопа в сантиметрах, h – высота обсерватории, $h_0 \approx 8000$ м, t – время экспозиции в секундах.

5 Атмосферная экстинкция

- Атмосфера поглощает и рассеивает излучение, что описывается законом Бугера:

$$m(X) = m_0 + k\,X,$$

- где k – коэффициент экстинкции в зв. вел. на единичную воздушную массу, а X – воздушная масса, равная приблизительно sec z.
- Экстинкция влияет на S/N из-за уменьшения сигнала: при X = 2 и k = 0,2 поток снижается на $0{,}2^{m}$ по сравнению с зенитом, а вследствие большей толщи ухудшается также seeing.

6 Оценка и вычитание фона

Точность определения фона особенно важна для слабых источников. Распространённые методы:

Кольцевая апертура

Значение определяется по пикселям кольца вокруг источника; сигнал другой звезды исключается отбрасыванием выбросов.

Сигма-обрезание

Итеративное удаление значений, отклоняющихся от медианы более чем на $k\sigma$.

Оценка моды

Приближённая формула mode ≈ 2,5·median − 1,5·mean (SExtractor) учитывает присутствие ярких объектов в распределении.

Двумерная карта фона

Изображение разбивается на ячейки, в каждой определяется значение фона, затем строится гладкая функция и вычитается из кадра.

Систематические ошибки фона особенно опасны: ошибка на один пиксель δb приводит к ошибке потока $n_{pix}\delta b$, не уменьшающейся при накоплении.

6 Сравнение оценок фона при наличии источников

Листинг 6.1.

```
import numpy as np

rng = np.random.default_rng(6)
sky_true, rn = 100.0, 5.0
x = rng.poisson(sky_true, 20000) + rng.normal(0, rn, 20000)
n_src = 1500
x[:n_src] += rng.exponential(200, n_src)     # вклад слабых звёзд

def clip(a, k=3, n=10):
    for _ in range(n):
        m, s = np.median(a), a.std()
        a = a[np.abs(a - m) < k * s]
    return a

c = clip(x)
print(f"Истинное значение:    {sky_true:7.2f}")
print(f"Среднее:              {x.mean():7.2f}")
print(f"Медиана:              {np.median(x):7.2f}")
print(f"Сигма-обрезание:      {c.mean():7.2f}")
print(f"Мода (2.5med-1.5mean): {2.5 * np.median(c) - 1.5 * c.mean():7.2f}")
```

6 Результат: Сравнение оценок фона при наличии источников

```
Истинное значение:     100.00
Среднее:               114.95
Медиана:               100.78
Сигма-обрезание:       100.04
Мода (2.5med-1.5mean):   99.50
```

6 Определение коэффициента экстинкции

Листинг 6.2.

```
X = np.array([1.05, 1.2, 1.4, 1.6, 1.9, 2.2, 2.4])
m_true, k_true = 14.0, 0.18
m = m_true + k_true * X + rng.normal(0, 0.008, X.size)

A = np.vstack([np.ones(X.size), X]).T
cov = np.linalg.inv(A.T @ A) * 0.008**2
beta = cov @ A.T @ m / 0.008**2
print(f"k = {beta[1]:.3f} +- {cov[1, 1]**0.5:.3f} зв.вел./возд. масса")
print(f"m0 = {beta[0]:.3f} +- {cov[0, 0]**0.5:.3f}")
```

```
k = 0.171 +- 0.006 зв.вел./возд. масса
m0 = 14.011 +- 0.011
```

7 Планирование наблюдений с учётом атмосферы

- При подготовке наблюдений учитываются фаза Луны, время наблюдения объекта, высота над горизонтом и прогноз состояния атмосферы.

8 Модели фона и его изменчивость

- Фон неба меняется и в пространстве, и во времени. Яркость свечения зависит от солнечной активности, времени ночи и географического положения.
- Вблизи ярких объектов и в плотных полях значения фона определяются менее надёжно.

- Адаптивная оптика изменяет форму PSF: возникает узкое ядро и широкое гало. Показателем качества служит число Штреля – отношение центральной интенсивности к значению для идеального изображения.
- Атмосферная дисперсия смещает изображения в зависимости от длины волны, особенно при большой воздушной массе, а также приводит к щелевым потерям в спектроскопии.

8 Модели фона и его изменчивость (продолжение)

- В практических расчётах полезно определить «стоимость» плохих условий. При увеличении фона на 1^m и FWHM с 0,8″ до 1,2″ требуемое время экспозиции при фоновом ограничении вырастает в $2{,}5 \cdot (1{,}5)^2 \approx 5{,}6$ раза, что существенно влияет на расписание наблюдений.

9 Разбор примера

1. Пусть $k_V = 0{,}15$ и объект наблюдается при $X = 1{,}5$.

2. Ослабление составляет $0{,}225^{m}$ относительно внеатмосферного значения.

3. В потоке это равно $10^{-0{,}4 \cdot 0{,}225} = 0{,}81$, то есть теряется 19 % потока.

4. На высоте 30° ($X = 2{,}0$) ослабление составляет $0{,}30^{m}$, потери – 24 %.

5. Рассчитаем сцинтилляции для $D = 100$ см, $X = 1{,}3$, $h = 2000$ м, $t = 60$ с.

6. Имеем $D^{-2/3} = 0{,}0464$, $X^{1{,}75} = 1{,}582$, $\exp(-0{,}25) = 0{,}779$, $\sqrt{120} = 10{,}95$.

7. Тогда $\sigma = 0{,}09 \cdot 0{,}0464 \cdot 1{,}582 \cdot 0{,}779 / 10{,}95 \approx 4{,}7 \cdot 10^{-4}$, то есть около 0,5 ммаг. Если фотонный шум яркой звезды меньше этого значения, дальнейшее увеличение числа фотонов не приведёт к улучшению.

10 Вопросы для обсуждения на занятии

Выбор условий

В какие ночи лучше наблюдать слабую галактику и яркую переменную звезду?

Фон

Как ошибка вычитания фона скажется на звёздной величине слабого объекта?

Эффективность

Как сопоставить выигрыш от улучшения seeing и выигрыш от увеличения диаметра телескопа?

Контрольные вопросы

1. Какие компоненты образуют фон ночного неба?
2. Как параметр Фрида связан с качеством изображения?
3. Как seeing влияет на S/N при фоновом ограничении?
4. Запишите приближённую формулу для сцинтилляций и обсудите её зависимости.
5. Запишите закон Бугера и объясните смысл коэффициента экстинкции.
6. Какие методы используются для оценки фона?
7. Почему ошибка определения фона не уменьшается при накоплении сигнала?
8. Как учитываются атмосферные условия при планировании наблюдений?

Список литературы

1. Patat F. UBVRI night sky brightness during sunspot maximum at ESO-Paranal // Astronomy & Astrophysics. – 2003. – Vol. 400. – P. 1183–1198.
2. Fried D.L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures // Journal of the Optical Society of America. – 1966. – Vol. 56, No. 10. – P. 1372–1379.
3. Young A.T. Photometric error analysis. VI. Confirmation of Reiger's theory of scintillation // The Astronomical Journal. – 1967. – Vol. 72. – P. 747–753.
4. Bertin E., Arnouts S. SExtractor: Software for source extraction // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. – 1996. – Vol. 117. – P. 393–404.
5. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.