



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА

Отчет по практике

**Исследование распределения света по зрачку
HRS и его влияния на измерения лучевой
скорости**

Работу выполнили студенты:
Беспятый Илья Витальевич, ФКИ 301 группа
Санковский Дмитрий Евгеньевич, ГАИШ 201 группа

Руководители практики:
Шатский Николай Иванович,
Желтоухов Сергей Геннадьевич

Москва, 2025 г.

Содержание

1 Введение	2
2 Описание идеи	3
3 Реализация	3
3.1 Установка	3
3.2 Калибровка	3
3.3 Измерения зависимости от настраиваемых параметров	5
4 Заключение	8
5 Приложение	9
5.1 Калибровки	9
5.1.1 Измерение времени работы сервопривода	9
5.1.2 Измерение времени отклика камеры	10
5.1.3 Получение радиальных профилей	11
5.1.4 Оценка стабильности профиля	13
5.1.5 Оценка нерадиальной переменности	14
5.2 Расчёт доли излучения, регистрируемой камерой	17
Список литературы	19

1 Введение

Точность измерения лучевых скоростей напрямую влияет на ценность данных по кинематике звёздных систем, исследованию экзопланет и других небесных объектов, поскольку от неё зависит и точность определения параметров движения — орбит и предел выявляемости новых систем или подсистем по массе и периоду, от которых зависит амплитуда переменности лучевой скорости.

В ошибку измерения лучевой скорости входят случайные отклонения — фотонный шум, шумы приёмника, стохастические колебания звёздных фотосфер, шумы калибровочных данных. Также свой вклад вносят систематические ошибки, в частности смещения центроидов спектральных линий из-за aberrаций оптической системы и переменной разности контура засветки зрачка, в котором находится дифракционная решётка, при измерениях объекта и калибровки. Для волоконных аппаратов, коими являются все прецизионные эшелле-спектрографы, эти ошибки зависят от свойств конкретного световода, направляющего излучение объекта на спектрограф.

Есть два пути борьбы с систематическими ошибками: усложнение оптической системы, т. е. введение дополнительных элементов для запутывания света в световодах (т. н. double scrambler) и учёт ошибок апостериори. В случае, если в задаче не требуется очень высокая точность (достаточно 10-20 м/с погрешности измерения лучевой скорости), как, например, при исследованиях кратных звёздных систем, ведущихся в рамках уточнения теорий звездообразования, достаточно второго варианта и, более того, такая реализация учета систематических ошибок может помочь при расчете введения в систему дополнительных элементов.

В ходе данной практической работы мы сосредоточили внимание на апостериорной оценке систематических ошибок измерения лучевой скорости на спектрографе HRS.

2 Описание идеи

Для контроля приходящего на спектрограф пучка излучения из оптоволокна предлагается установить отклоняющее зеркало и камеру, регистрирующую излучение пучка. Контроль распределения излучения внутри пучка от внешних параметров (фокусного расстояния телескопа, давления воздуха и проч.) должен осуществляться таким образом чтобы незначительно искажать получаемую спектральную картину.

3 Реализация

3.1 Установка

Установка располагается на одном оптическом столе со спектрографом внутри термостабилизирующей камеры. Установка представляет собой кронштейн с закрепленным сервоприводом SG-90 с приклешенным на держатель небольшим зеркалом. Сервопривод обеспечивает ввод и вывод зеркала из пучка, входящего в спектрограф и, когда зеркало введено в пучок, пучок перенаправляется на матрицу камеры MV-CS050-10GM. Далее получаемые с камеры изображения сохраняются на компьютер. В рабочем режиме ввод-вывод зеркала в пучок осуществляется раз в минуту примерно на 1-2 секунды, точное измерение времени будет приведено далее в задаче. Электроника управляется платой на основе микроконтроллера ESP32, плата управляется с компьютера управляющими сигналами через Serial-порт USB.

3.2 Калибровка

Прежде чем приступить к выполнению целевой задачи, необходимо провести калибровку системы:

1. Снизить возможные потери в системе, связанные избыточным с оптическим путем перенаправляемого пучка и виньетированием самого пучка.
2. Проверить юстировку оптоволокна. При измерениях степень нерадиальной переменности принимаемого излучения должна быть незначительна.
3. Убедиться в том, что новая установка не оказывает сильного воздействия на работу спектрографа: нет физического контакта, время ввода-

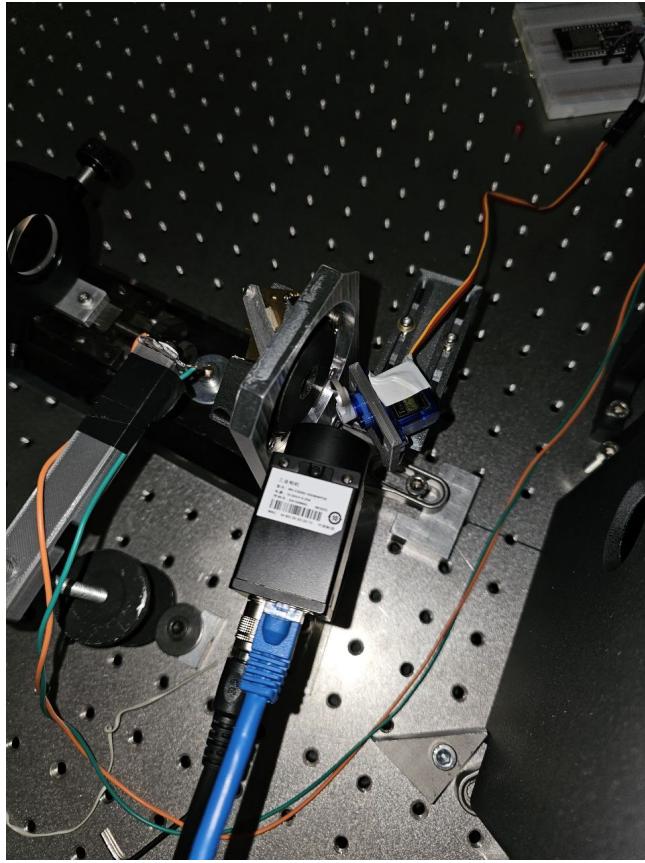


Рис. 1: Внешний вид установки внутри камеры

вывода зеркала и съемки мало в сравнении с периодом работы установки, а также возможные неоднородности регистрации, связанные с введенем зеркала в пучок, незначительны.

4. Оценить характерные время изменения профиля, его стабильность на небольшом временном масштабе для оценки представительности квазиодновременных измерений.

По результатам калибровки была выбрана оптимальная с точки зрения суммарного оптического пути конструкция установки. Для стабильности юстировки оптоволокна было изготовлено крепление для кабеля при помощи 3D печати. Была проведена оценка нерадиальной переменности, она составляет в среднем не более 5 % (5.1.5).

Ввод-вывод зеркала осуществляется в одну сторону, расчетное значение неоднородности принимаемого камерой спектрографа пучка лежит в пределах не более 0.13% (5.1.1).

Время, требуемое на ввод-вывод зеркала из пучка измерялось при помощи

непрерывной съемки с максимально возможной для этого частотой (5.1.1, 5.1.2).

Была проведена оценка стабильности профиля: на масштабе времен порядка 10 минут профиль стабилен с точностью порядка 10% (5.1.4).

Дополнительно была проведена оценка потерь во всем оптическом тракте системы, используя данные съемки некоторой звезды (5.2).

3.3 Измерения зависимости от настраиваемых параметров

Для измерений использовались звезды: Арктур, HD332077 и HIP96258. Процедура измерения зависимости влияния фокусировки телескопа на радиальное распределение светового пучка на выходе из оптоволокна требует синхронизации фокусировки телескопа и съемки выходного пучка. Это необходимо, в процессе выполнения работы было отмечено, что при съемке во время изменения фокусного расстояния телескопа результат получается некорректный. Для синхронизации всех процессов использовались программные средства работы с камерой, телескопом и контроллером (GUI, SDK, Arduino IDE соответственно), процесс работы программы измерений был встроен в GUI, выполнение происходит параллельно основному процессу (захват изображение, контроль параметров, гидрирование и проч.).

Для измерение радиального профиля в качестве центра профиля был выбран центр масс изображения (5.1.3).

В результате были получены следующие графики зависимости интенсивности радиального профиля от фокусного расстояния:

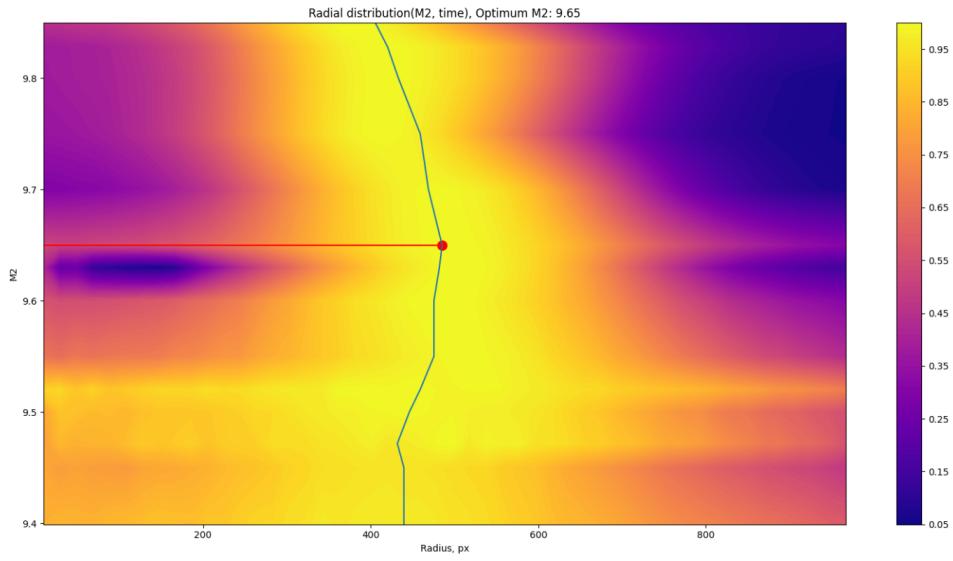


Рис. 2: HIP96258. Снятый без синхронизации

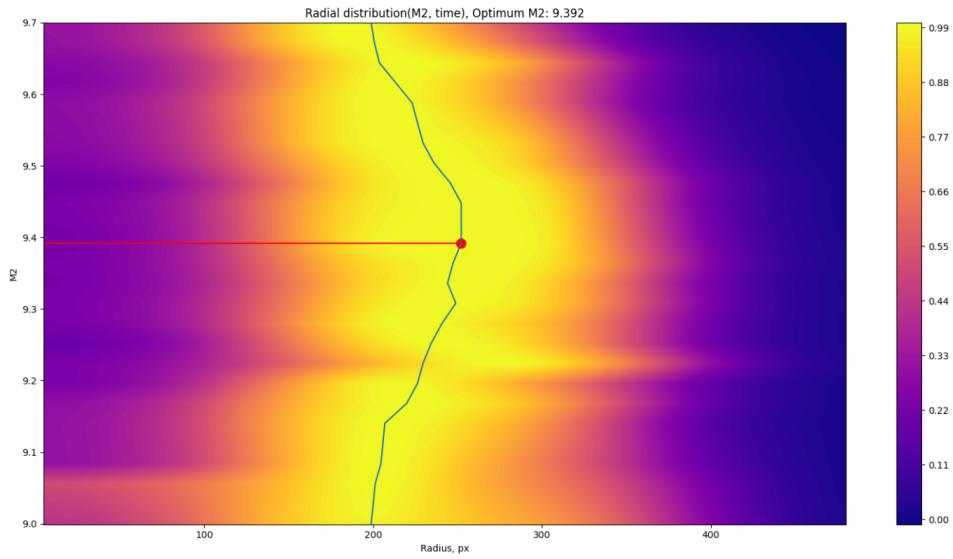


Рис. 3: Арктур. Снятый с синхронизацией

В полученных тепловых картах зависимости нормированных на единицу радиальных профилей от фокусного расстояния M_2 вписаны линии максимумов со скользящим средним по трем точкам. Отмечено положение максимума, что соответствует оптимальной фокусировке.

Форма кривой максимумов симметрична, имеет один максимум. Для обоснования такой формы используется следующая модель:

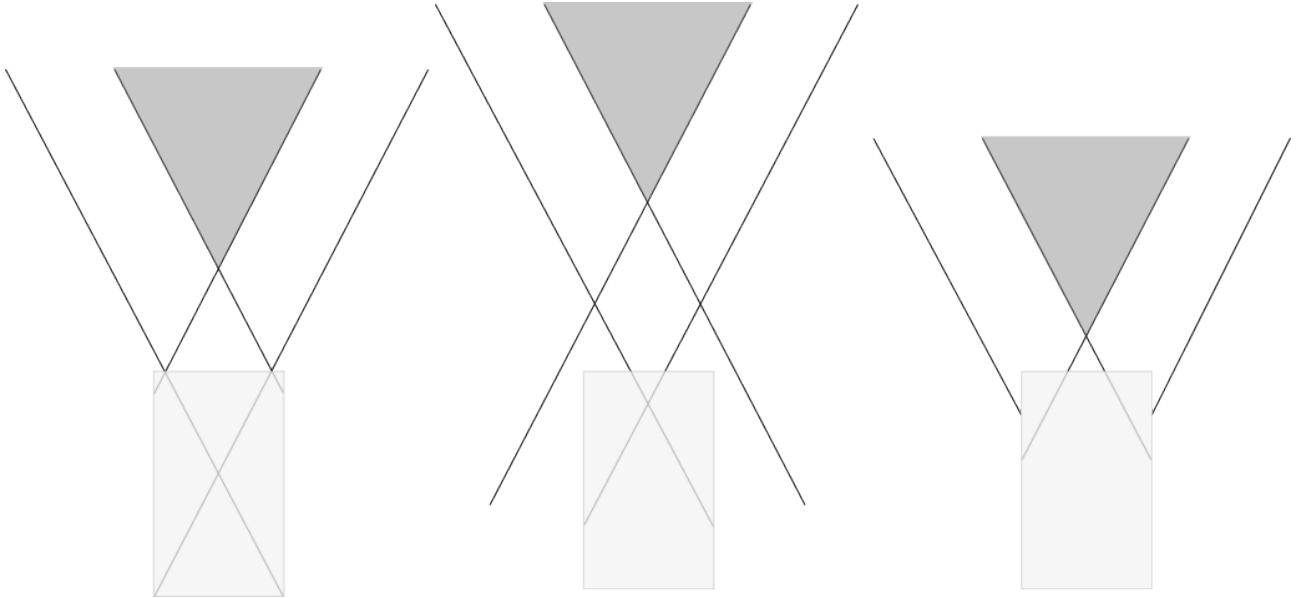


Рис. 4: Схематично сфокусированное (левое), и расфокусированные положения (среднее и правое). Серой областью обозначена тень от вторичного зеркала, полуупрозрачный прямоугольник — срез волновода

Оптоволокно при оптимальной фокусировке располагается в наиболее узком месте пучка. При смещении изображение тускнеет, поскольку вовнутрь световода попадает меньшая доля излучения, а положение максимума смещается ближе к центру поскольку большая концентрация излучения начинает приходиться на центральные области, где сходятся два наклонных пучка.

В качестве полезного приложения, по этим графикам можно проводить оценку оптимального для наблюдений фокусного расстояния, как точку с наиболее удаленным и наиболее высоким значением яркости (линия максимумов и положение оптимума фокусного расстояния отмечены на 2 и 3).

4 Заключение

В результате проделанной практической работы была собрана и откалибрована экспериментальная установка для учета ошибок определения лучевой скорости на спектрографе HRS, ее работа была синхронизована с работой ПО телескопа.

На звездах Арктур и HIP96258 была исследована зависимость смещения радиальных профилей от фокусировки телескопа, было предложено теоретическое обоснование полученной зависимости.

Предложен способ фокусировки с учётом получаемых на установке графиков.

5 Приложение

5.1 Калибровки

5.1.1 Измерение времени работы сервопривода

Время подъёма сервопривода измерялось по наблюдениям на калибровочном источнике: измерялись несколько периодов зависимости суммарного потока, регистрируемого камерой, от времени с момента начала съемки камеры, затем периоды накладывались друг на друга для последующего визуального анализа.

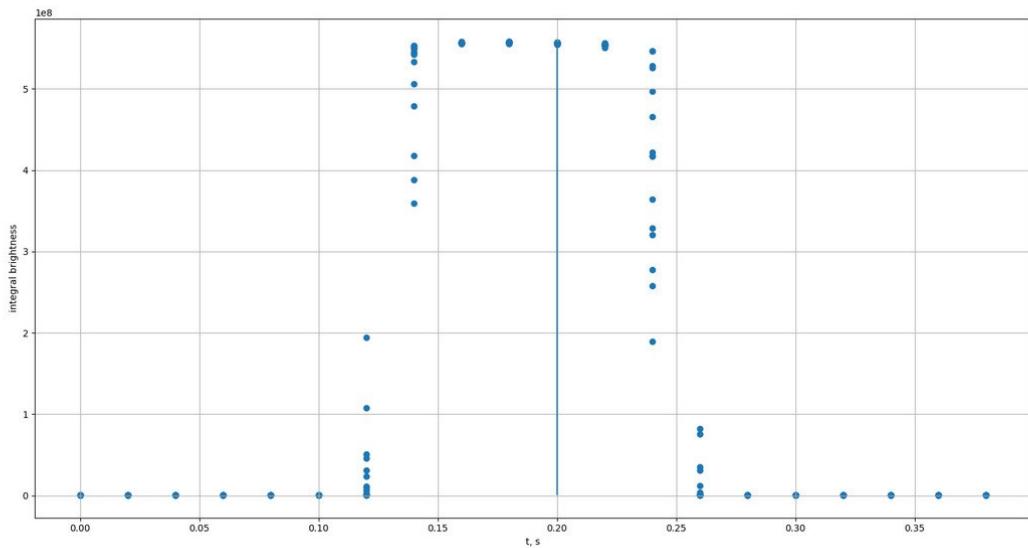


Рис. 5: Зависимость потока, регистрируемого камерой, от времени с начала записи камера

Согласно полученному графику 5, время подъёма сервопривода с момента записи камера составляет не более 0.16 с. Время прохождения зеркала от момента первого до второго касания составляет не более $\tau = 0.04$ с.

Если период съемки пучка составляет $T = 1$ мин, то степень неоднородности, вследствие одностороннего ввода-вывода зеркала, регистрируемого на спектрографе пучка составляет не более:

$$\varepsilon \leq \frac{2\tau}{T} = 0.13\%$$

Вертикальная линия означает начало съемки после посылки сигнала на плату на опускание зеркала. Важно отметить то, что на графике представлено не точное время работы сервопривода, но его время после начала съемки, необходимо также учитывать время отклика камеры.

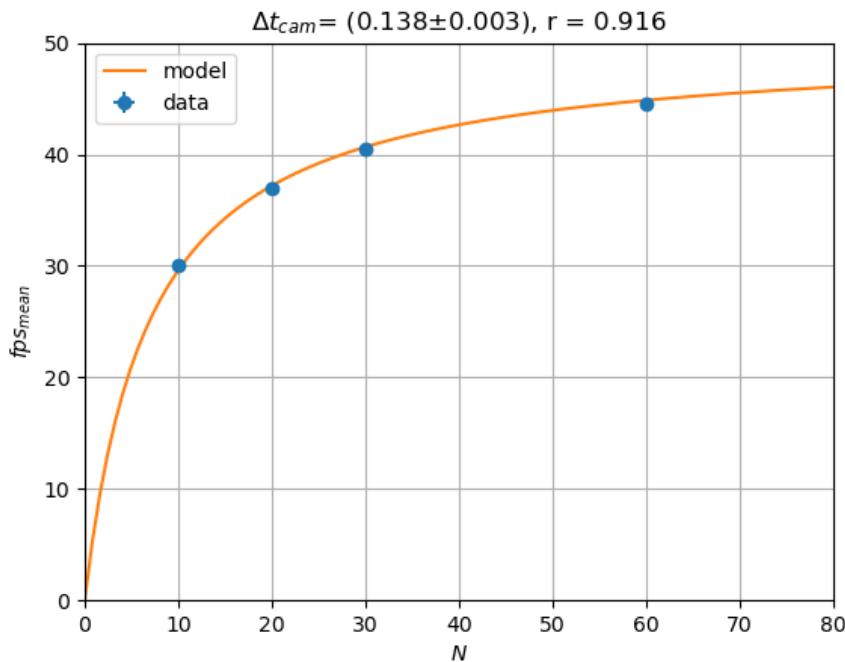
5.1.2 Измерение времени отклика камеры

В процессе получения изображений было обнаружено, что средняя и программная частота съемки кадров различаются и, чем больше снятых за раз кадров, тем ближе средний к действительному. Предполагается, что различие между средней fps_{mean} и программной fps_{prog} частотой съемки заключается в том, что прежде чем начать съемку камера бездействует некоторое время (время отклика) Δt_{cam} , после чего снимает кадры с заданной частотой fps_{prog} .

Была снята зависимость $\text{fps}_{\text{mean}}(N)$, где N — число подряд снимаемых кадров. Она, в соответствии с нашим предположением должна соответствовать зависимости вида:

$$\text{fps}_{\text{mean}} = \frac{N}{N/\text{fps}_{\text{prog}} + \Delta t_{\text{cam}}}$$

Результат регрессии методом наименьших квадратов:



5.1.3 Получение радиальных профилей

Для измерения радиального распределения интенсивности (радиального профиля) необходимо достаточно точно определить геометрический центр пучка на изображении. Процедура следующая:

1. Вычесть фон из анализируемого изображения.
2. Применить сглаживающий фильтр (например, Гаусса, медианный и т.д.) для удаления оставшегося шума.
3. Бинаризовать полученное изображение (метод Оцу).
4. Определить центр масс бинаризованного изображения.

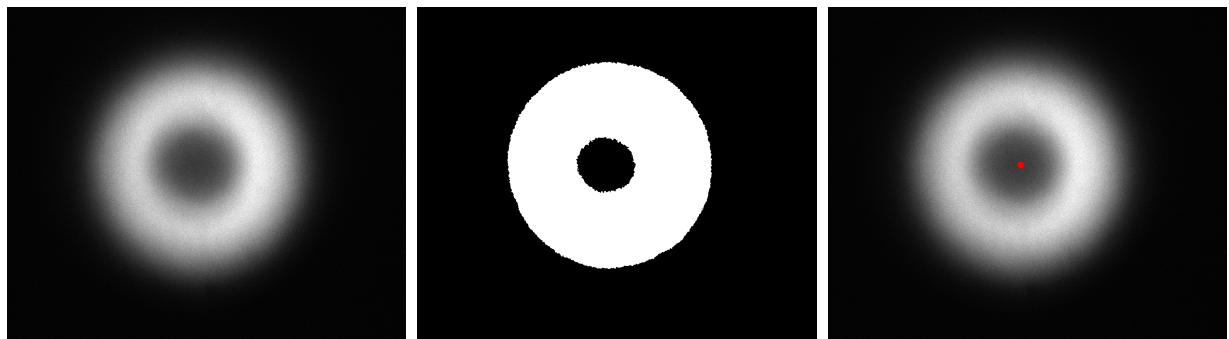


Рис. 6: Исходное, бинаризованное изображение и изображение с отмеченным центром

Точность определения центра масс таким способом точнее, чем непосредственное определение центра масс на исходном изображении, поскольку хоть и незначительная, но присутствующая нерадиальная переменность (об этом раздел ?? ниже) приводит к систематическому смещению центра масс от геометрического центра.

Расчет профиля проводится по равномерной сетке радиусов с заданным шагом, от нулевого до максимально возможного, определяемого геометрией кадра — рассчитывается средняя интенсивность пикселов, попадающих в пределы колец и полученное значение алгоритм относит к интенсивности на среднем радиусе данного кольца.

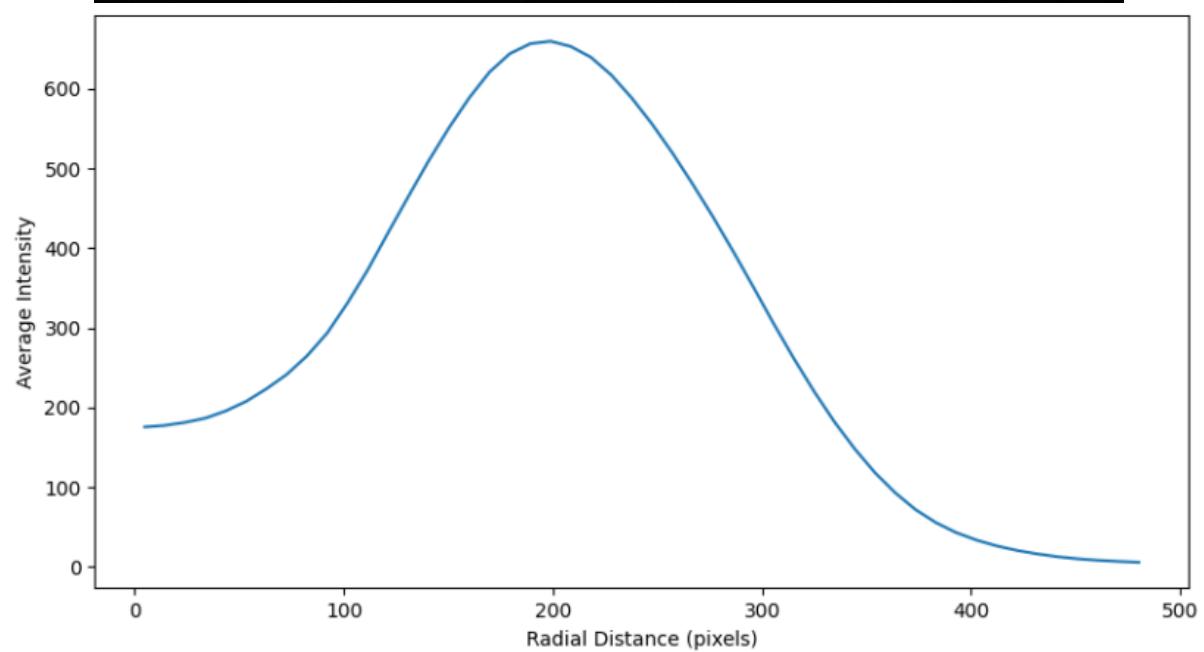
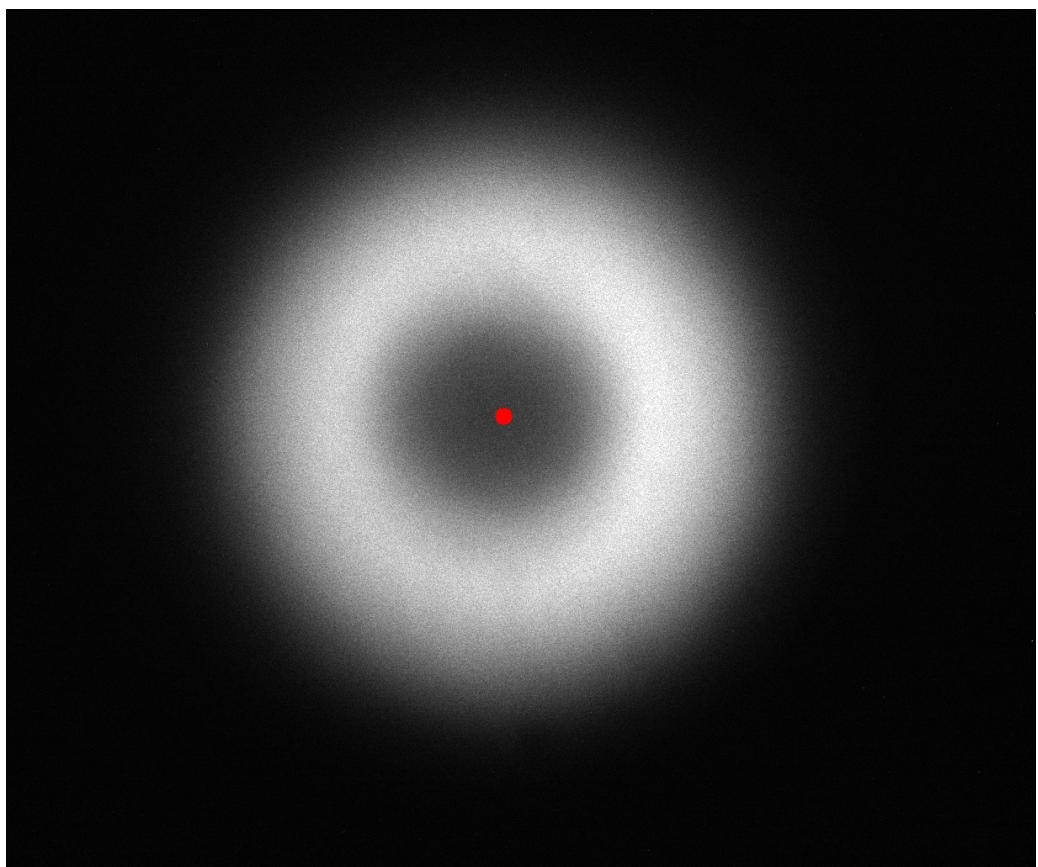


Рис. 7: Пример изображения пучка от Арктура с отмеченным центром и его радиальный профиль

5.1.4 Оценка стабильности профиля

Для того, чтобы понять насколько представительны квазиодновременные (на протяжении порядка 10 минут) измерения были получены радиальные профили объекта HIP96258 на протяжении 25 минут в условиях среднего качества атмосферы ($\text{seeing} \sim 2''$). Относительная разница между профилями составляет не более 10 процентов:

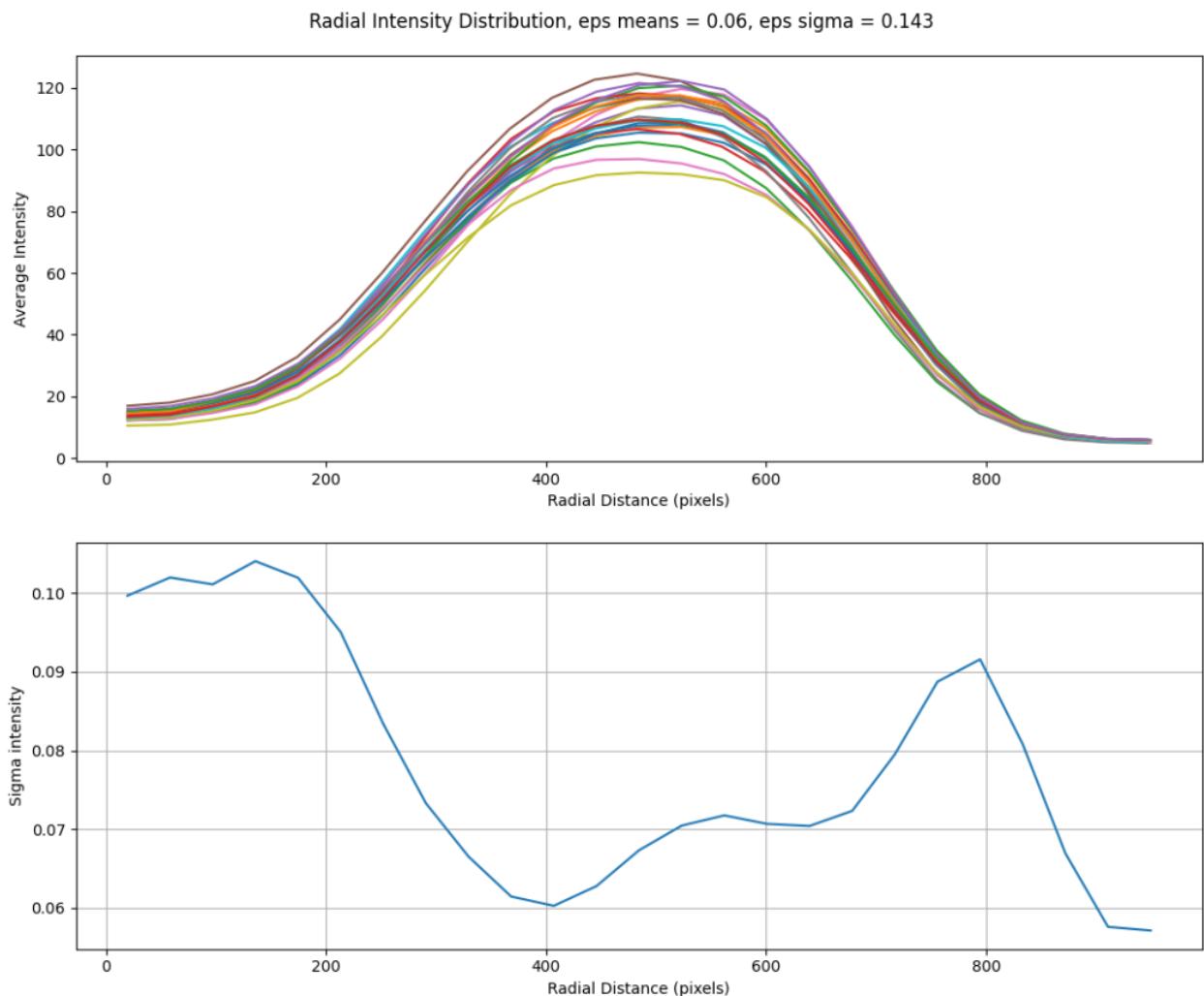


Рис. 8: Динамика радиальных профилей HIP96258

5.1.5 Оценка нерадиальной переменности

Нерадиальная (угловая, азимутальная) переменность может быть связана с дефектами камеры, нестабильностью подъёма зеркала сервоприводом, пылью на зеркале. Профиль относительно среднего стабилен по времени, изменяется лишь само среднее, то есть суммарная яркость пучка. Наибольшее отклонение разброса профилей друг относительно друга по отношению к среднему не превышает и процента (см. рис. 11).

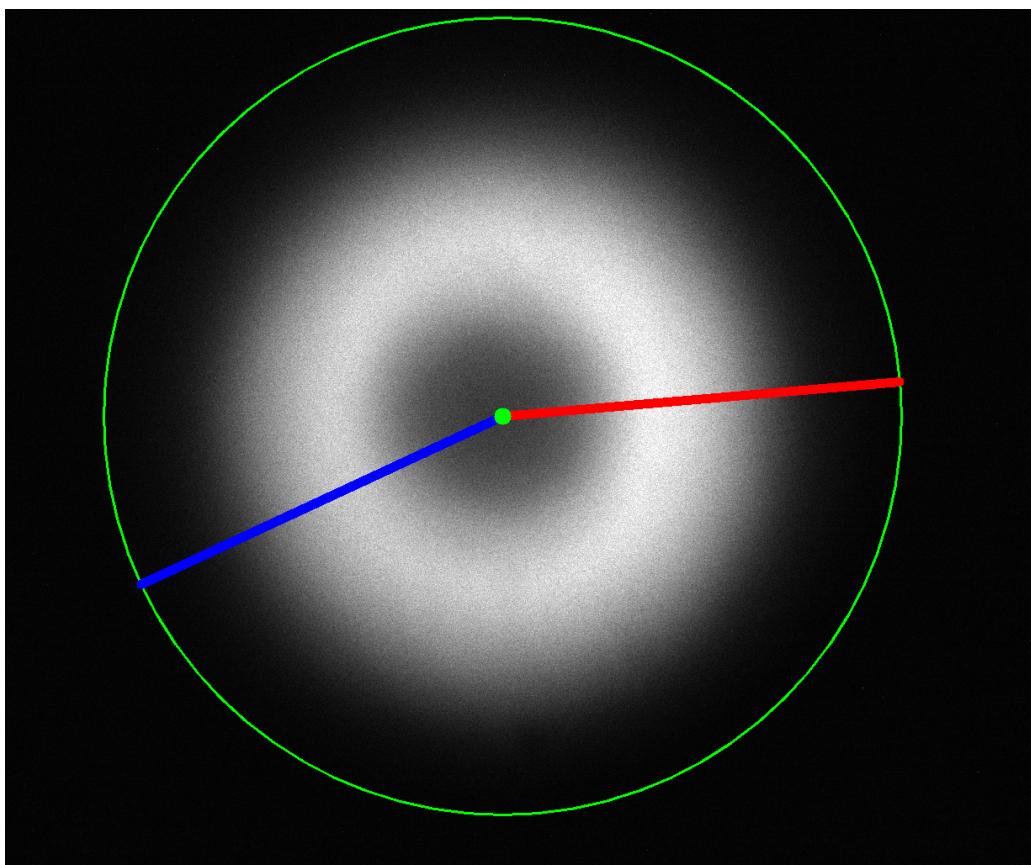


Рис. 9: Направления наименьшей (синим) и наибольшей (красным) угловой интенсивности. Зеленым кругом отмечен круг наибольшего радиуса с центром в центре пучка

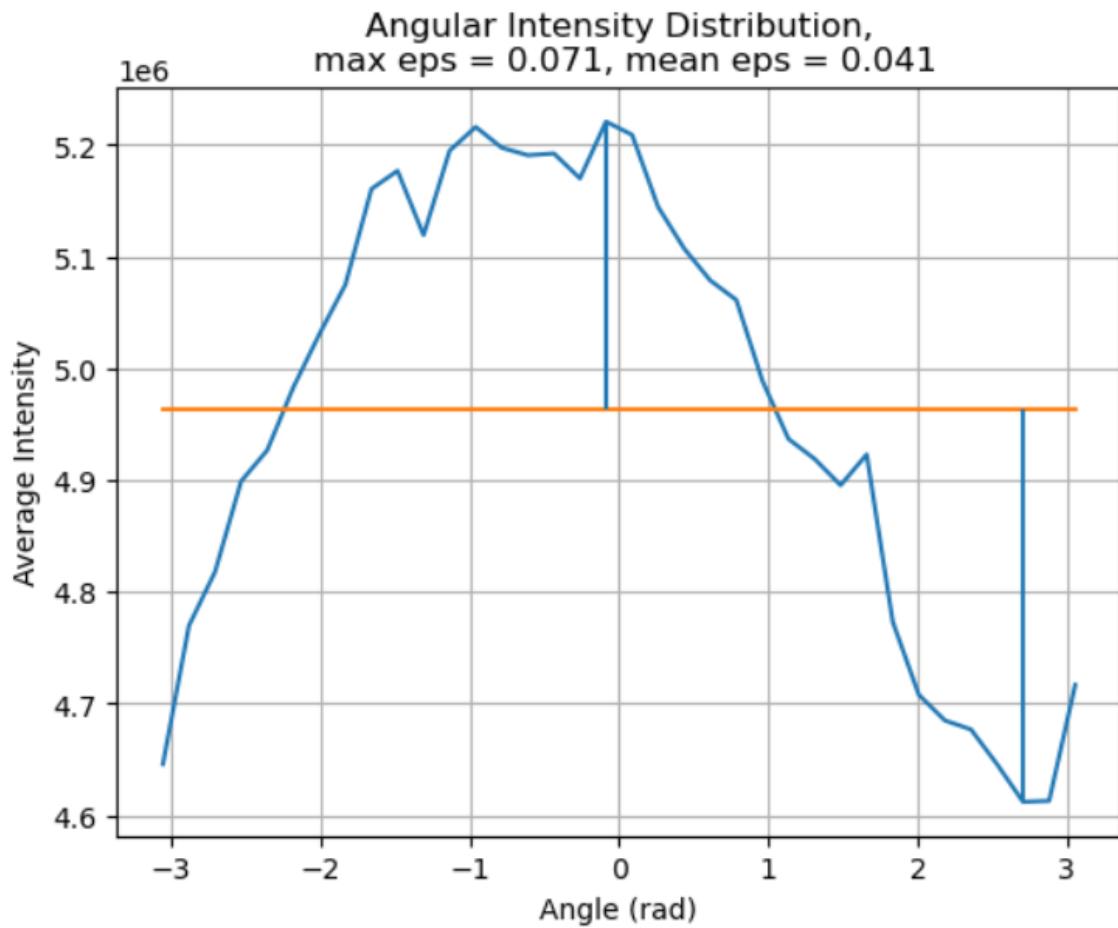


Рис. 10: Угловой профиль. Оранжевая линия — среднее значение

Из профиля на рис.10 видно, что неравномерность мала по сравнению со средней засветкой — в среднем не превышает 5%.

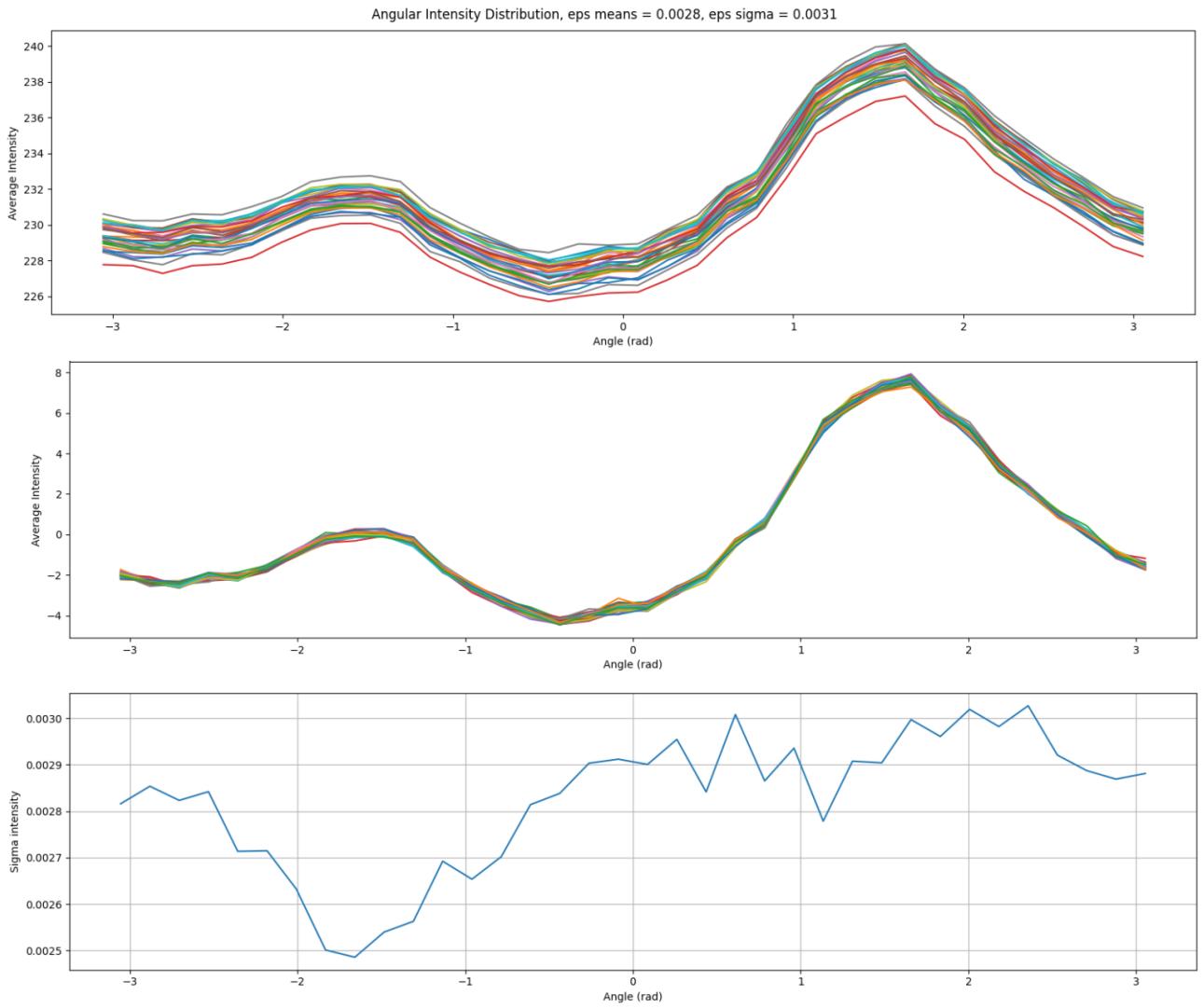


Рис. 11: Угловой профиль от HD332077 с невычтеным, вычтенным средним и относительный разброс профилей друг относительно друга

5.2 Расчёт доли излучения, регистрируемой камерой

Для оценки потерь в тракте приема излучения был измерен поток от звезды-стандарта со звездной величиной около 6^m . Далее, сравнивая фактический сигнал от камеры и расчетное ожидаемое значение этого потока была получена доля принимаемого излучения.

Факторы, влияющие на потери последовательно приведены в списке ниже:

1. Атмосферной экстинкция в атмосфере, на момент наблюдений видимая высота звезды составляла $h = 55^\circ$:

$$k_{1i} = 10^{-\frac{m_i}{2.5 \sin h}},$$

где m_{zi} — коэффициенты экстинкции в зените для полос B, V, R:

$$m_B = 0.25^m, m_V = 0.2^m, m_R = 0.1^m$$

2. Виньетирования света от звезды на входе в оптоволокно: $k_5 \approx 0.95$
3. Неполное отражение первичного и вторичного зеркал телескопа. Полный коэффициент отражения: $k_2 = 0.8^2$
4. Потерь света при переходе через линзовую систему (8 поверхностей) на входе и выходе оптоволокна: $k_3 = 0.99^8$

5. Потерь света в оптоволокне для полос B, V, R:

$$k_{4B} = 0.7, k_{4V} = 0.8, k_{4R} = 0.9$$

6. Потерь света на рассекателе: $k_6 = 0.75$

7. Неполное отражение зеркала в установке: $k_7 = 0.94$

8. Кривая пропускания камеры, в среднем кватновая эффективность составляет: $k_8 = 0.6$

9. Коэффициент усиления камеры: $g = 0.3 \text{ e/ADU}$, $k_9 = g^{-1}$. Измерение коэффициента проводилось в соответствии [Корнилов, 2022]

10. Примерный коэффициент перевода из суммарного потока в спектральных полосах B, V, R поток, регистрируемый камерой: $k_{10} \simeq 1.5$

Расчет ожидаемого потока проводился в сравнении с табличными данными регистрируемого потока от Веги ($A0V$, $\sim 0^m$), ниже приведены потоки в полосах $B V R$ в единицах [фотон/($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{\AA}$)]

$$F_B = 1392.6 \quad F_V = 995.5 \quad F_R = 702.0$$

Ширины спектральных полос в \AA :

$$\Delta\lambda_B = 900 \quad \Delta\lambda_V = 850 \quad \Delta\lambda_R = 1500$$

Эффективная площадь первичного зеркала телескопа: $A = 40000 \text{ см}^2$, выдержка: $t = 1 \text{ с}$.

Зарегистрированный камерой суммарный поток: $J_{\text{camera}} = 1.665 \cdot 10^8 \text{ ADU}$
Ожидаемый расчетный поток от звезды-стандарта:

$$J_{\text{expected}} = (F_B \cdot k_{1B} \cdot k_{4B} + F_V \cdot k_{1V} \cdot k_{4V} + F_R \cdot k_{1R} \cdot k_{4R}) \cdot \prod_{i \neq 1,4} k_i \cdot A \cdot t \cdot 10^{-m/2.5}$$

$$J_{\text{expected}} \simeq 3.87 \cdot 10^8 \text{ ADU}$$

Таким образом, доля принимаемого камерой излучения от звезды

$$\eta = \frac{J_{\text{camera}}}{J_{\text{expected}}} \simeq 0.43$$

Потери составляют ок. 57%

Список литературы

Корнилов. Задача астрофизического практикума. Исследование матричного ПЗС приемника. 2022.