

# Спекл-интерферометрия

Студент: Малышев Денис Владимирович  
Руководитель: Сафонов Борис Сергеевич

# 1 Введение

Спекл - интерферометрия это один из методов пространственной интерферометрии, основанный на анализе зернистой структуры телескопического изображения космических объектов. Качество изображения зависит от дифракционного разрешения  $\theta = \frac{\lambda}{D}$  и атмосферного размытия, которые равны 0.07 и 1 arcsec соответственно, при регистрации на длине волны  $\lambda = 880$  нм. Атмосферное размытие взято как среднее за прошедшие года. Данный метод подразумевает получение множества кадров с короткой экспозицией порядка 10 мс. Снимки состоят из множества мелких пятнышек-спеклов, которые возникают благодаря интерференции лучей света, попадающих в фокальную плоскость телескопа от разных участков объектива. Если мы будем наблюдать двойные звезды, то, сделав большое число кадров, проведя обработку, мы можем получить средний спектр мощности, с помощью которого можно будет определить параметры системы: контраст, позиционный угол и разделение.

## 1.1 Прибор и телескоп

Измерения проводились на 2.5м телескопе КГО  $lat = 43^{\circ}44'10'' N$ ,  $lon = 42^{\circ}40'03'' E$ , altitude 2127m a.s.l. Для наблюдений использовался спекл-поляриметр CMOS-детектор Hamamatsu ORCA-Quest CC15550-20UP. Разберемся, из чего он состоит.

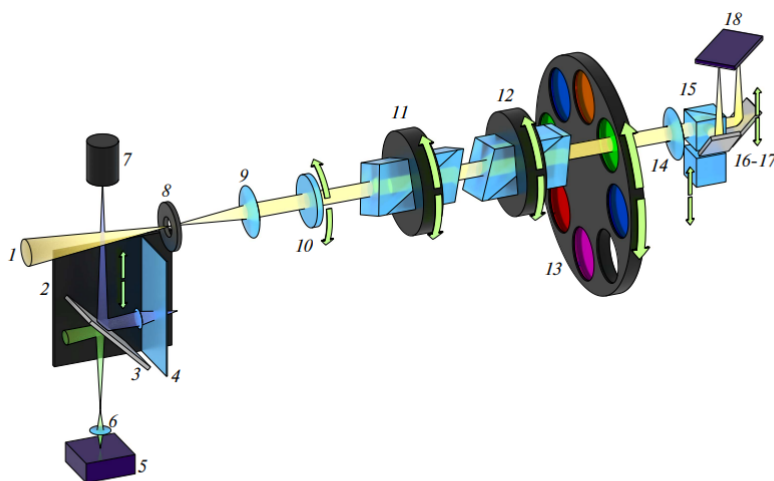


Рис. 2. Схема прибора: 1 — пучок от телескопа; предфокальный блок 2–8: подвижная каретка 2, зеркала 3, одно из которых перебрасывает свет от телескопа на вспомогательную камеру (5–6), другое — от калибровочного источника (7) в детектор, 4 — линейный поляризатор, 8 — диафрагма поля; блок параллельного пучка 9–14: 9 — коллиматор, 10 — вращающаяся полуволновая пластинка, 11, 12 — призмы компенсатора атмосферной дисперсии (углы при вершинах увеличены для наглядности), 13 — колесо фильтров, 14 — объектив; блок камеры 15–18: 15 — лучерасщепляющий элемент, 16, 17 — зеркала переброски, 18 — детектор. Зелеными стрелками отмечены моторизованные степени свободы.

Предфокальный узел выполняет ряд вспомогательных функций. Он содержит вспомогательную CCD-камеру, на которую перебрасывается свет от телескопа путем введения в пучок диагонального зеркала. Вспомогательная камера предназначена для точного наведения в тех случаях, когда ошибка наведения телескопа превосходит 15" и объект не попадает в поле зрения главного детектора. Кроме того, в состав предфокального блока входит калибровочный источник, который представлен матрицей из отверстий диаметром 70 мкм, с шагом 800 мкм, освещенной белым сверхъярким светодиодом через дополнительный рассеиватель. Предфокальный блок также содержит линейный поляризатор, который может быть введен в пучок для калибровки угла поворота полуволновой пластинки. Важным элементом предфокального узла явля-

ется диафрагма поля, представляющая собой отверстие диаметром 3.5 мм, что соответствует 35" на небесной сфере. Ключевыми элементами в оптической схеме являются коллиматор, формирующий параллельный пучок, и объектив, который этот пучок фокусирует на детекторе. Фокусные расстояния коллиматора и объектива равны 38.1 и 88.9 мм соответственно. Схема обеспечивает итоговое увеличение  $2.33\times$ , что при размере пикселя главного детектора 4.6 мкм соответствует масштабу 20.33 мсд/пкс. За полуволновой пластинкой расположен компенсатор атмосферной дисперсии, представляющий собой две призмы прямого зрения, установленные в независимо вращающихся приводах. После призм компенсатора атмосферной дисперсии в пучке установлено колесо фильтров на 12 позиций: V,  $R_c$ ,  $I_c$ , среднеполосные фильтры, центрированные на длины волн 550, 625, 880 нм, с полуширинами 50, 50 и 80 нм соответственно. Детектор Hamamatsu ORCA-Quest может работать в двух режимах: standard и ultra-quiet, отличающихся скоростью считывания и шумом считывания. В CMOS-детекторах, как и в CCD, к сигналу добавляется некоторое постоянное число, которое называется смещением (bias). Величина bias довольно постоянна, однако имеется небольшая зависимость от положения на детекторе и от времени.

## 1.2 Задачи

Нашей задачей является отнаблюдать 6 двойных звезд с помощью 2.5м телескопа: 3 научных и 3 калибровочных. Параметры, которые мы хотим получить: контраст  $q$ , и угловое расстояние между звездами-компонентами  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$ . Параметры калибровочных уже известны из различных каталогов, а для научных мы определяем, являются ли они двойными, и если да, то определяем их параметры. Для наблюдений были выбраны TIC137843225, TIC456367532, TIC341444900 и WDS14515+4456, WDS18208+7120, WDS15013+4057 соответственно. Звезды TIC интересны тем, что у них либо обнаружена, либо подозревается рядом экзопланета. И находящаяся рядом гравитационно-связанная звезда может повлиять на измерение диаметра планеты при затмениях, если расстояние меньше 1" между компонентами. Наблюдения записаны в fits файлы и обрабатывались с помощью Python.

## 2 Наблюдения

Табл.1 Данные с телескопа

Name	Date	Filter, nm	Exposure, ms	Number of frames
WDS14515+4456	2023-07-13T19:52:38	880	9.2	9766
WDS15013+4057	2023-07-13T19:33:47	880	23	3917
WDS18208+7120	2023-07-13T19:41:56	880	5	18012
TIC456367532	2023-07-13T20:03:53	822	23	5222
TIC137843225	2023-07-13T20:09:33	822	23	5222
TIC341444900	2023-07-13T19:57:20	625	19	6292

## 3 Обработка результатов

Для анализа звезды нам требуется два файла: файл с bias и с кадрами самой звезды.

Первым делом высчитывается master bias - попиксельная медиана из соответствующего файла. Затем он вычитается из сырого кадра наблюдений.

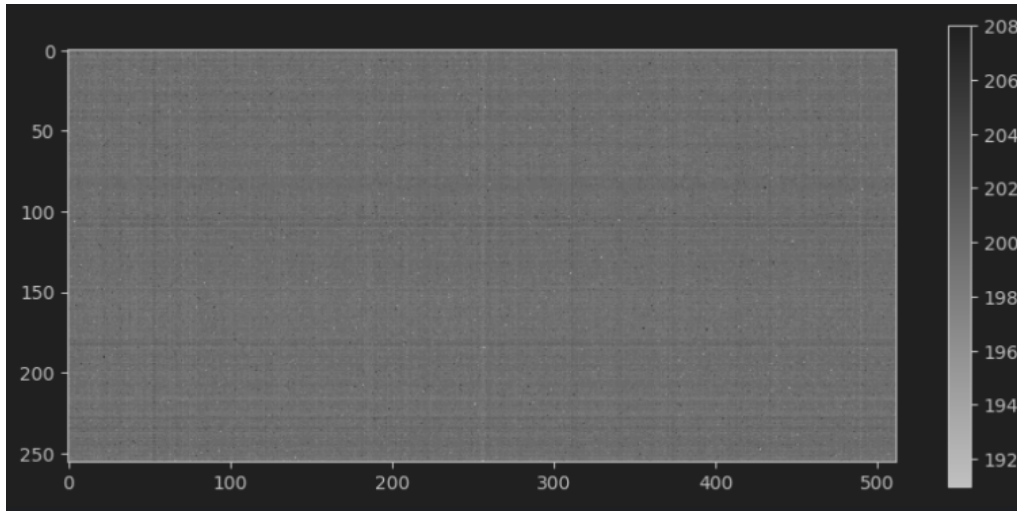


Рис. 1: master bias по 1000 кадрам за 3 дня во время наблюдений

Далее по областям кадра вне окна с исследуемым объектом оценивается средняя величина фона и вычитается из всего кадра. Изображение объекта центрируется в окне. Для оценки необходимого смещения к изображению применяется гауссов фильтр с целью сокращения влияния шума.

Для каждого кадра используется преобразование Фурье для получения спектра.

$$\tilde{I} = \tilde{O} \cdot \tilde{T}$$

Где  $\tilde{I}$  спектр изображения,  $\tilde{O}$  функция видности и  $\tilde{T}$  оптическая передаточная функция.

После преобразования, высчитывается среднее от квадрата модуля из всех преобразованных кадров.

$$\langle |\tilde{I}|^2 \rangle = |\tilde{O}|^2 \cdot \langle |\tilde{T}|^2 \rangle$$

После вышеописанных процедур, получаем:

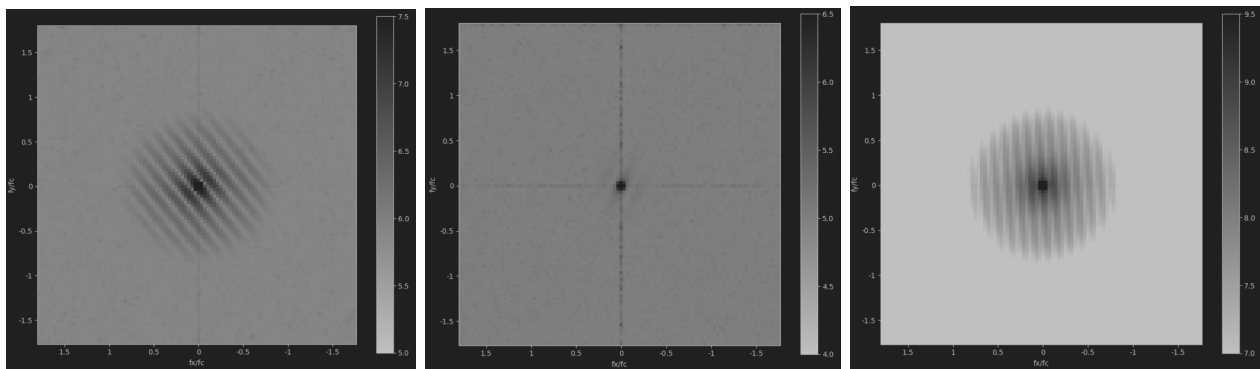


Рис. 2: Усред. квадрат спектра для WDS14515+4456, WDS15013+4057 и WDS18208+7120

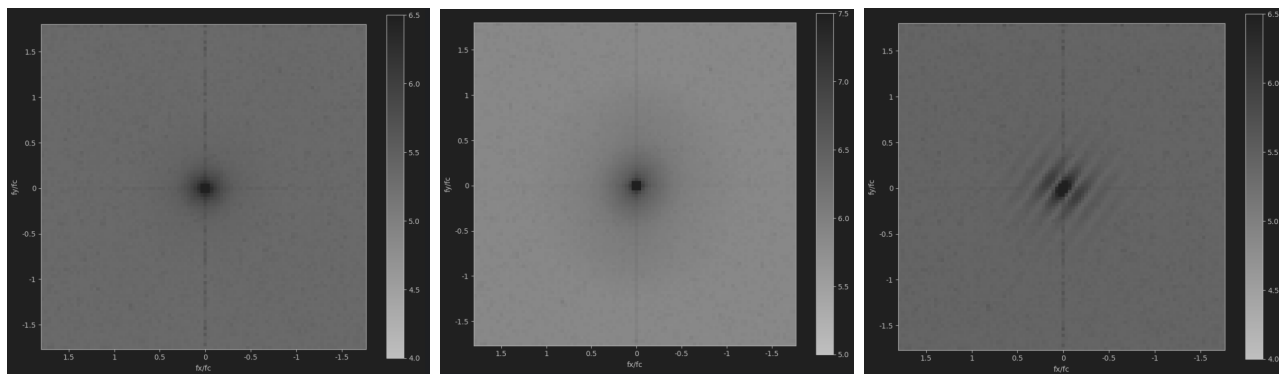


Рис. 3: Усред. квадрат спектра для TIC137843225, TIC341444900 и TIC456367532

Заметим, что у первых двух научных звезд нет полос. Можем сделать вывод, что нельзя опознать, являются ли эти звезды двойными, с помощью спекл-интерферометрии. Для остальных такая картина наблюдается, мы можем обрабатывать дальше.

Следующим этапом мы вычитаем фотонную подложку за частотой среза  $\frac{D}{\lambda}$  из квадрата спектра.

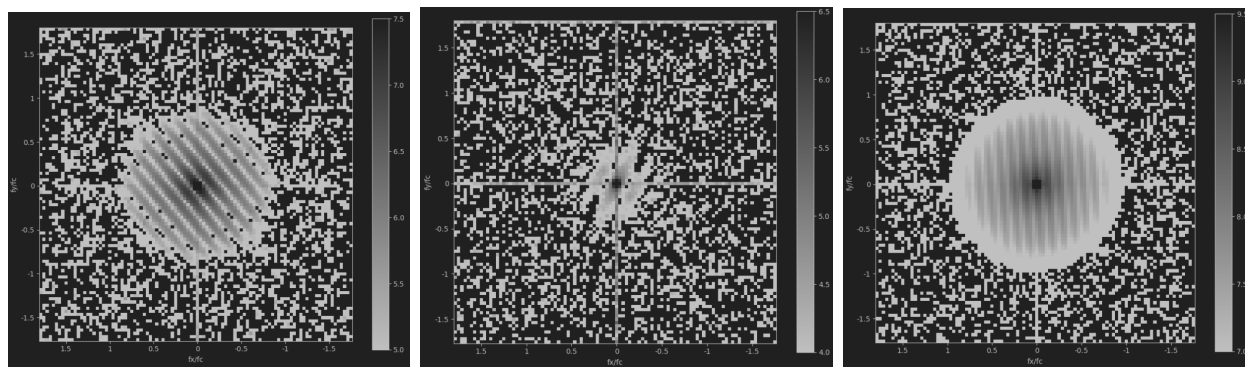


Рис. 4: После вычета фот. подложки WDS14515+4456, WDS15013+4057 и WDS18208+7120

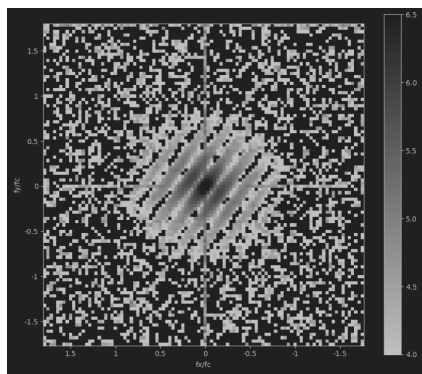


Рис. 5: После вычета фот. подложки TIC456367532

Оценим квадрат модуля видности объекта  $\tilde{O}$ :

$$|\tilde{O}|^2 = \frac{\langle |\tilde{I}|^2 \rangle}{\langle |\tilde{I}|_{azim}^2 \rangle}$$

Где  $\langle |\tilde{I}|_{azim}^2 \rangle$  среднее азимутальное квадрата спектра. Поворачивая картинку на несколько градусов много раз и складывая друг с другом, мы получим его.

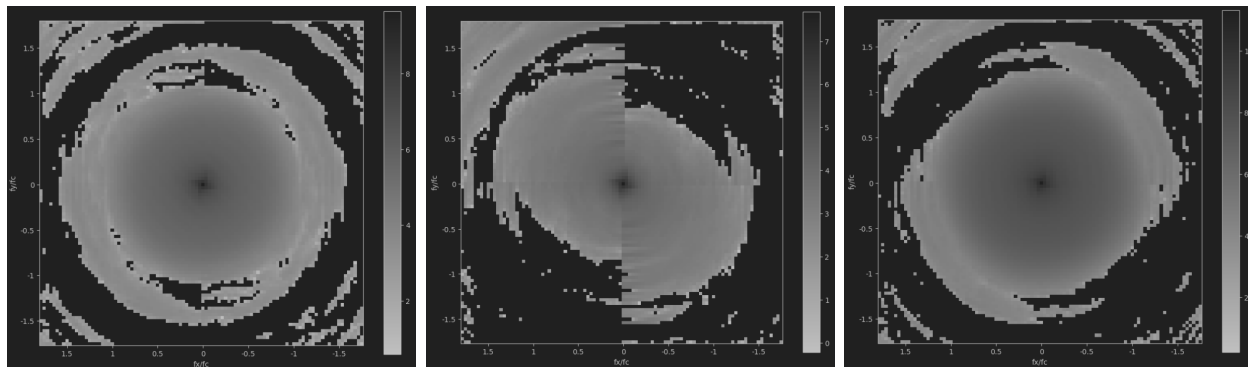


Рис. 6: Среднее азимутальное WDS14515+4456, WDS15013+4057 и WDS18208+7120

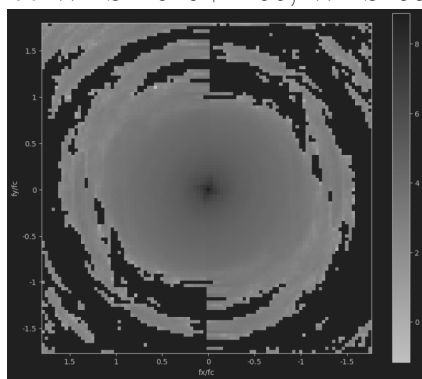


Рис. 7: Среднее азимутальное TIC456367532

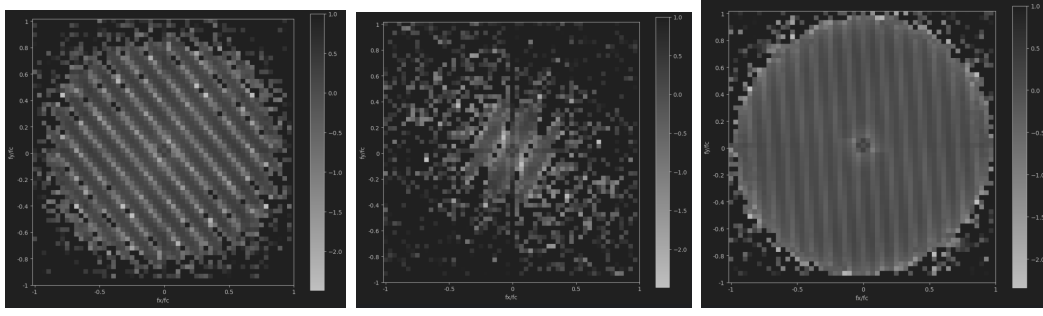


Рис. 8: Оценка кв. модуля видности WDS14515+4456, WDS15013+4057 и WDS18208+7120

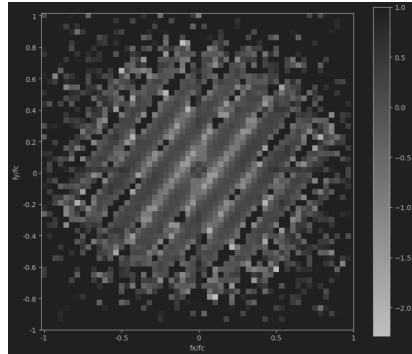


Рис. 9: Оценка кв. модуля видности TIC456367532

Поделив квадрат спектра на среднее азимутальное, получили квадрат модуля видности.

Теперь остается ввести аппроксимирующую функцию для полученных данных, взяв модуль и возведя в квадрат от:

$$\tilde{O} = 1 - q + q \exp^{-j2\pi(\Delta_x f_x + \Delta_y f_y)}$$

Неизвестные компоненты будем подбирать нелинейным методом наименьших квадратов. В этом нам поможет функция `least_squares` из библиотеки Python `scipy.optimize`. После подбора, изобразим получившуюся картину для квадрата модуля аппроксимирующей функции и сравним с полученной из наблюдений.

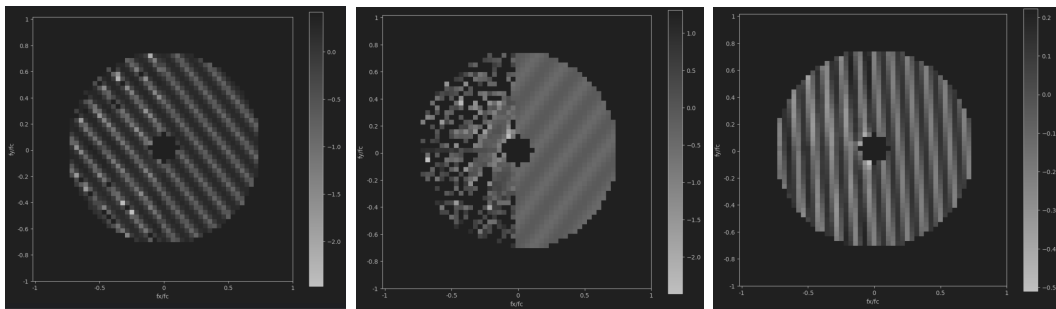


Рис. 10: Аппроксимация WDS14515+4456, WDS15013+4057 и WDS18208+7120

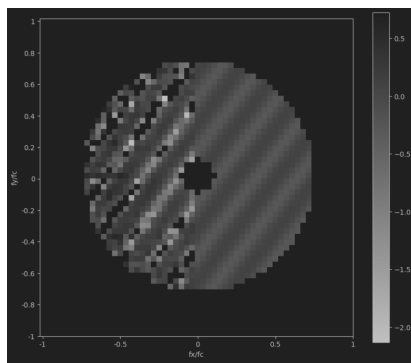


Рис. 11: Аппроксимация TIC456367532

Можем сделать вывод, что аппроксимация прошла хорошо. Позиционные углы были переведены из инструментальной системы отсчета в экваториальную по формуле:

$$\theta = -ang + parallacticAngle - altitude + 180 + angle\_corr$$

Где  $ang$  это поз. угол в инструментальной системе,  $angle\_corr=132^\circ$ . Параллактический угол и высоту высчитывал с помощью библиотек `astropy` и `astroplan`.

Табл.2,3 Полученные результаты

Name	q	$\Delta_x$ , arcsec	$\Delta_y$ , arcsec	$q_{cat}$	$\Delta_{xcat}$ , arcsec	$\Delta_{y_{cat}}$ , arcsec
WDS14515+4456	$0.653 \pm 0.046$	$0.3651 \pm 0.0012$	$-0.2991 \pm 0.0012$	0.81	0.5	0.6
WDS15013+4057	$0.17 \pm 0.24$	$0.273 \pm 0.082$	$0.197 \pm 0.082$	0.25	0.3	0.4
WDS18208+7120	$0.2301 \pm 0.008$	$0.5541 \pm 0.0013$	$-0.0495 \pm 0.0013$	0.26	0.6	0.5
TIC456367532	$0.23 \pm 0.11$	$0.24 \pm 0.09$	$0.2 \pm 0.09$	-	-	-

Name	positional angle, grad	separation, arcsec	$pos.angle_{cat}$ , grad	$separation_{cat}$ , arcsec
WDS14515+4456	$-24.8 \pm 0.0012$	$0.4719 \pm 0.0017$	0	0.781
WDS15013+4057	$-72.635 \pm 0.125$	$0.336 \pm 0.115$	127.1	0.5
WDS18208+7120	$78.493 \pm 0.0013$	$0.5562 \pm 0.0018$	64.4	0.781
TIC456367532	$182.55 \pm 0.15$	$0.312 \pm 0.126$	-	-

## 4 Итоги

Выбранные звезды были отнаблюдены, обработаны, получены хорошие картины и параметры. Подтвердили, что каталожные звезды действительно можно считать двойными, а их параметры близки к действительным. Различия можно объяснить тем, что звезды движатся, их траектория в картинной плоскости не является окружностью.

Из научных звезд определена как двойная только TIC456367532 с разделением меньше  $1''$ . Поэтому, для определения диаметра экзопланет нужно учитывать свет от вторичной компоненты.