

Имитация наблюдений точечного источника света с EMCCD детектором v. 1.2 (current)

Б. Сафонов, Д. Черясов, И. Горбунов

31 июля 2013 г.

1 Введение

Изучение свойств EMCCD детектора до его установки в камеру необходимо для определения оптимального режима его эксплуатации, создания и отладки управляющего программного обеспечения. При этом целесообразно постепенно приближать условия испытаний к реальным условиям, в которых детектор будет работать в составе камеры. На первой стадии испытаний мы исследовали свойства детектора при отсутствии освещения и при равномерном освещении [1]. На второй стадии испытаний на детекторе строилось изображение точечного источника, как в режиме, близком к дифракционному, так и с имитацией турбулентной атмосферы. Описанию второй стадии и посвящен этот документ.

Структура документа: Во втором разделе приведено описание испытательного стенда. В третьем разделе даны результаты исследований детектора без имитации турбулентности, в дифракционном режиме. В четвертом и пятом разделе мы исследовали свойства изображений одиночного и двойного источников, соответственно, полученных с имитатором турбулентности. В шестом разделе перечислены вопросы, нуждающиеся в дальнейшем исследовании, и планируемые эксперименты.

2 Стенд

Стенд был собран на достаточно массивном продолговатом куске алюминия (далее рельс), что обеспечило стабильность всей схемы, несмотря на то, что рельс лежал на довольно хлипком столе. Высота оптической оси над рельсом 80 мм. Стенд состоит из нескольких основных компонент: собственно детектор, линза, диафрагма, имитатор турбулентности, светофильтр (или светофильтры) и источник света. Положения этих компонент в установке показаны на принципиальной схеме — рис. 1. Фото установки приведено на рис. 2.

Детектор представляет собой ПЗС-матрицу с электронным усилением (EMCCD), модель DU-897E-CS0-#BV, серийный номер X-5947. В большинстве случаев для эксперимента нам требовалась высокая скорость считывания, поэтому для однородности мы использовали EM-усилитель для всех тестов, скорость считывания 10 MHz, режим полнокадрового переноса. Коэффициент преобразования был установлен равным $11.57 \text{ e}^-/\text{ADU}$ ($\text{preAmp}=2$), шум считывания при этом равняется 49.64 e^- — эти установки наилучшим образом подходят для регистрации слабых потоков [1, 2]. Скорость и напряжение вертикального переноса были установлены равными $0.5 \mu\text{s}$ и $+0$, соответственно. Согласно результатам отчета [1] эти установки обеспечивают минимальный СИС-шум при сохранении высокой эффективности вертикального переноса заряда. Коэффициент электронного усиления устанавливался различным — от 1 до 300, он будет указан отдельно для каждого эксперимента. Иногда мы также изменяли другие настройки детектора, это также отмечено отдельно.

Для редукции ПЗС-изображений мы получали 10 последовательных кадров смещения (BIAS) при том же режиме, который использовался для получения световых кадров. Затем мы вычисляли попиксельное среднее и таким образом получали смещение, которое затем применяли для редукции соответствующих световых кадров. Кадр плоского поля мы не получали, т.к. в нашем чисто методическом исследовании это не обязательно. Эксперименты [1] показали, что его флуктуации составляют менее 2-3%.

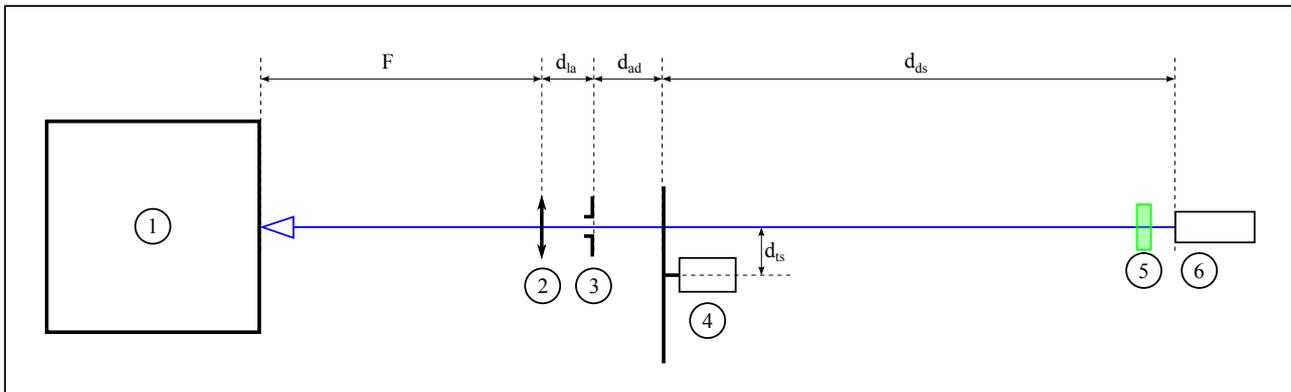


Рис. 1: Принципиальная схема стенда, расстояния указаны в таблице 1, масштаб не соблюден, вид сверху. Цифрами в кружках обозначены основные элементы. 1 — детектор (расстояние отсчитывается от передней поверхности ПЗС-матрицы), 2 — линза (расстояние отсчитывается от главной плоскости), 3 — диафрагма, 4 — имитатор турбулентности (также указано расстояние от оси вращения диска до оптической оси установки d_{ts}), 5 — светофильтр, 6 — источник света.

Линза формирует изображение источника света на детекторе. Мы использовали две линзы, им соответствуют разные геометрические параметры стенда. Линза 1 — это плосковыпуклая линза с наполовину стертым просветлением и фокусом ≈ 100 мм. Линза 2 представляет собой просветленный двухлинзовый ахромат с фокусом ≈ 40 мм. Тот факт, что обе линзы работают в неоптимальном для себя “режиме” (ни один из пучков не коллимирован), в некоторой степени компенсируется тем, что относительное отверстие в схеме довольно мало. Эффективные фокусы линз указаны в таблице 1, они были измерены путем наблюдения дифракции от двух апертур расположенных на известном расстоянии друг от друга.

Относительное отверстие системы определяется диафрагмой. Главным ограничением здесь является условие, что пространственная частота дискретизации $f_d = 1/\Delta_{pix}$ должна быть как минимум в два раза больше, чем частота среза системы $f_c = D/F\lambda$. Здесь Δ_{pix} — размер пиксела, D — диаметр диафрагмы (которая играет роль апертуры в данном случае), F — расстояние от главной плоскости линзы до детектора, λ — длина волны света. Диафрагмы мы делали в листовом алюминии с помощью сверла необходимого диаметра. Некоторые параметры стенда при использовании этих двух линз перечислены в таблице 1, соответствующие величины обозначены на рис. 1.

Таблица 1: Геометрические параметры стенда при использовании линз 1 и 2. F — расстояние от главной плоскости линзы до фокальной плоскости, d_{la} — расстояние от главной плоскости линзы до диафрагмы, d_{la} — расстояние от диафрагмы до имитатора турбулентности, d_{la} — расстояние от имитатора турбулентности до источника (см. рис. 1), D — диаметр диафрагмы, $2f_c/f_d$ — удвоенное отношение частоты среза к частоте дискретизации (при $\lambda = 532$ нм), параметр сэмпинга, он должен быть меньше единицы.

параметр	система с линзой 1	система с линзой 2
F , мм	118	57.7
D , мм	1.7	0.7
D/F	1/69	1/71
d_{la} , мм	18	7.8
d_{ad} , мм	25	1.0
d_{ds} , мм	590	242
$2f_c/f_d$	0.85	0.82

Имитатор турбулентности (ИТ) играет роль возмущающей среды, вносящей чисто фазовые искажения в волновой фронт, падающий на апертуру. ИТ был сделан путем распыления прозрачного акрилового лака на тонкий стеклянный диск. Изменение искажений во времени обеспечивается враще-

нием диска вокруг оси с помощью двигателя постоянного тока с редуктором, период вращения можно варьировать от 12 с до 290 с путем изменения напряжения питания.

В экспериментах мы использовали три источника света. В первом источнике, который мы будем условно обозначать VK1, параллельный пучок от лазерной указки ($\lambda = 633$ нм) пропускается через сильную рассеивающую линзу. Лазерная указка запитывалась от блока питания, т.ч. ее яркостью можно было управлять в широких пределах. Однако для этого источника довольно трудно оценить размеры и обеспечить его симметричность (более того, было обнаружено, что он существенно не симметричен). Поэтому мы также использовали другой источник — IG1, в котором излучение от лазерной указки ($\lambda = 532$ нм) пропускается через одномодовое оптоволокно. В этом случае по виду пучка мы оценили его размер на выходе из волокна — 10 мкм, также он довольно симметричен (что впрочем уже не важно при таких размерах). Ожидаемое падение видности на базе 1.7 мм для такого источника на расстоянии 590 мм составляет около 0.4%.

Для имитации двойной звезды мы сделали еще один, третий источник, обозначим его DB1. В обычной тонкой алюминиевой фольге мы сделали с помощью обычной швейной иглы два отверстия диаметром <0.1 мм на расстоянии примерно 1.5 мм. Отверстия были подсвечены двумя SMD-светодиодами, расположенными вплотную к ним. Средняя длина волны полосы излучения фотодиодов $\lambda = 660$ нм, ширина полосы неизвестна. Питание фотодиодов осуществлялось от лабораторного источника питания.

Для управления яркостью источника света мы также использовали светофильтры: HC-9, HC-11, KC-18 и фотометрический фильтр V. Фильтр KC-18 использовался только при работе с источником VK1. Также при работе с источником IG1 мы всегда использовали фильтр V, чтобы отсеять первую гармонику ($\lambda = 1064$ нм) и излучение диода накачки ($\lambda = 800$ нм).



Рис. 2: Общий вид установки при работе с источником VK1, линзой 1.

3 Точечный источник, дифракционный режим

Фокусировка и число Штреля оптической схемы Для первичного анализа точечного изображения и фокусировки системы был использован источник света IG1, светофильтры HC-11, V. Коэф-

фициент электронного усиления детектора был установлен равным единице.

Пример изображения, полученного с линзой 1 приведен на рис. 3, левый верхний. Там же, в центре сверху приведена смоделированная функция рассеяния точки (ФРТ), в предположении отсутствия aberrаций. Справа сверху даны разрезы этих функций. Во всех случаях изображения нормированы на полный поток. Как видно, ни наблюдаемая, ни теоретическая ФРТ не демонстрируют дифракционных колец. Это объясняется тем, что частота дискретизации в нашем случае недостаточна для этого.

Благодаря тому, что описанная в предыдущем разделе схема обеспечивает $f_d > 2f_c$, возможно рассчитать оптическую передаточную функцию (ОПФ) системы, как преобразование Фурье от изображения. Результат приведен на рис. 3, левый нижний. В центре внизу дана ОПФ системы в предположении отсутствия aberrаций. Разрезы обеих ОПФ представлены справа внизу. Количественно качество оптической схемы мы будем характеризовать числом Штреля S , которое равно интегралу по ОПФ. Изображение, приведенное на рис. 3, слева сверху было получено после фокусировки и имеет $S = 0.70$. При фокусировке сенда мы также ориентировались на максимизацию числа Штреля. Отклонение от положения фокуса на 2 мм дает уменьшение числа Штреля на $\approx 5\%$. Довольно большая дифракционная глубина резкости объясняется малым относительным отверстием.

Для дополнительной проверки качества оптической системы мы получили изображение точечного объекта, расфокусированное так, чтобы в центре появилось темное пятно (дефокусировка 15 мм). Дефокусировка производилась “на глаз”, т.е. мы искали такое положение объектива, при котором темное пятно в центре ФРТ имеет наименьшую яркость. Результат и аналогичное изображение, смоделированное в предположении отсутствия aberrаций, приведены на рис. 4.

Аналогичным образом было найдено положение фокуса для линзы 2. В этом случае число Штреля оказалось равно 0.52.

Нелинейность при наблюдении точечного источника Ранее мы исследовали нелинейность при равномерном освещении детектора [1]. Было обнаружено, что вместимость пикселей рабочей области детектора (далее глубина ямы) составляет около $200000 e^-$, что несколько превосходит глубину ямы, указанную в спецификации — $164000 e^-$. Однако при наблюдении точечного источника ситуация, скорее всего, будет существенно отличаться [3]. В этом случае насыщение сначала будет достигаться в единственном пикселе (далее максимальный пиксел), приводя к уменьшению глубины ямы потенциальной энергии. В то же время пиксели соседние с максимальным будут еще далеки от насыщения, поэтому фотоэлектроны, рождающиеся в максимальном пикселе, будут переходить в них. Это может привести к тому, что насыщение для одного пикселя, освещенного значительно сильнее, чем соседние пиксели, будет наступать раньше, чем при $200000 e^-$. К тому же большая неоднородность распределения заряда может нарушать процесс вертикального тактирования заряда, что также будет проявляться в виде нелинейности.

Чтобы проверить это мы построили изображение точечного источника на детекторе с помощью линзы 1, при этом не использовался имитатор турбулентности. Был установлен коэффициент преобразования $61 e^-/ADU$, при этом шум считывания $93.33 e^-$ [2, 1], что позволило лучше использовать диапазон оцифровки при работе с ярким источником. Источник света VK1, параметры питания лазера $U=1.98$ В и $I=4$ мА (показания силы тока колебались от 4 до 5 мА на временах ≈ 20 с), светофильтры КС-18 и НС-9 одновременно. Изображения точечного источника были получены сериями по 10 штук с экспозициями 50, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 240, 280, 320, 360, 420 мс. Серия для каждой экспозиции была усреднена.

На рис. 5 представлены разрезы изображения при некоторых экспозициях, в разных направлениях. Из рисунка видно, что рост отсчета в максимальном пикселе замедляется при отсчете $\approx 100000 e^-$. Утечка заряда происходит в основном в направлении считывания. Интересно, что при больших экспозициях в пикселях, соседних с максимальным, отсчет оказывается дальше больше, чем в нем самом.

Зависимость отсчета в максимальном пикселе от экспозиции приведена на рис. 6, левый верхний. Также на рис. 6, левый нижний дано относительное отклонение этой зависимости от линейной. Как видно, нелинейность менее 1% обеспечивается при заряде, накопленном в пикселе, менее $94000 e^-$. При превышении этой величины заряд начинает перетекать в соседние пиксели, что неприемлемо при спекл-интерферометрии, где важна структура изображения. Интересно, что эта глубина существенно меньше, чем указанная в спецификации $164000 e^-$.

Также мы оценили влияние нелинейности при оценке полного потока в изображении источника.

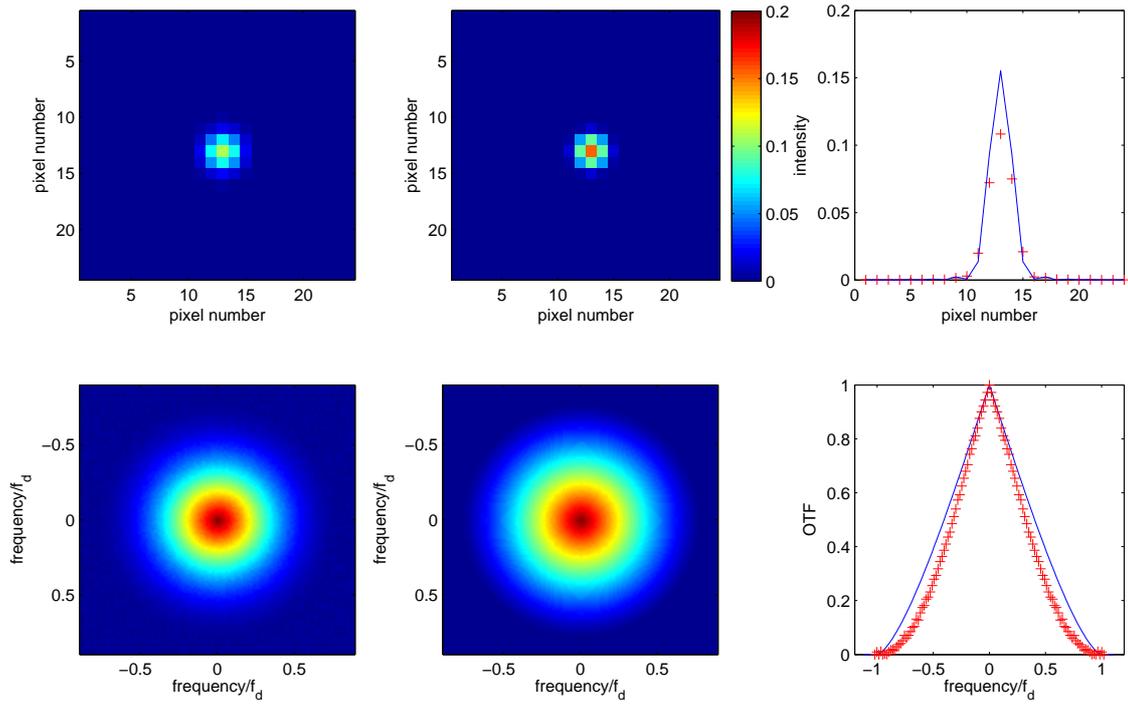


Рис. 3: Слева сверху: изображение точечного источника, полученное в эксперименте. В центре сверху: ожидаемое изображение для идеальной оптической системы. Справа сверху: разрезы наблюдаемого (красные кресты) и идеального (синяя линия) изображений. Изображения нормированы на полный поток. Слева внизу: действительная часть преобразования Фурье изображения точечного источника, представленного слева сверху (наблюдаемая ОПФ). В центре внизу: ОПФ оптической системы, лишенной aberrаций. Справа внизу: разрезы наблюдаемой (красные кресты) и идеальной (синяя линия) ОПФ. По осям — пространственная частота, нормированная на частоту среза D/λ .

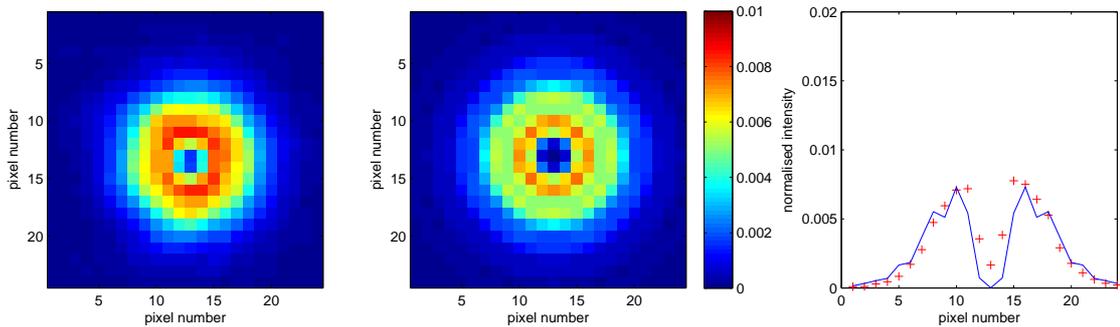


Рис. 4: Слева: изображение точечного источника при дефокусировке, соответствующей появлению первого темного пятна в центре ФРТ. В центре: аналогичное изображение, но смоделированное в предположении отсутствия aberrаций. Справа: Разрезы этих изображений, красные кресты — наблюдаемого, синие линии — идеального. Все изображения нормированы на полный поток.

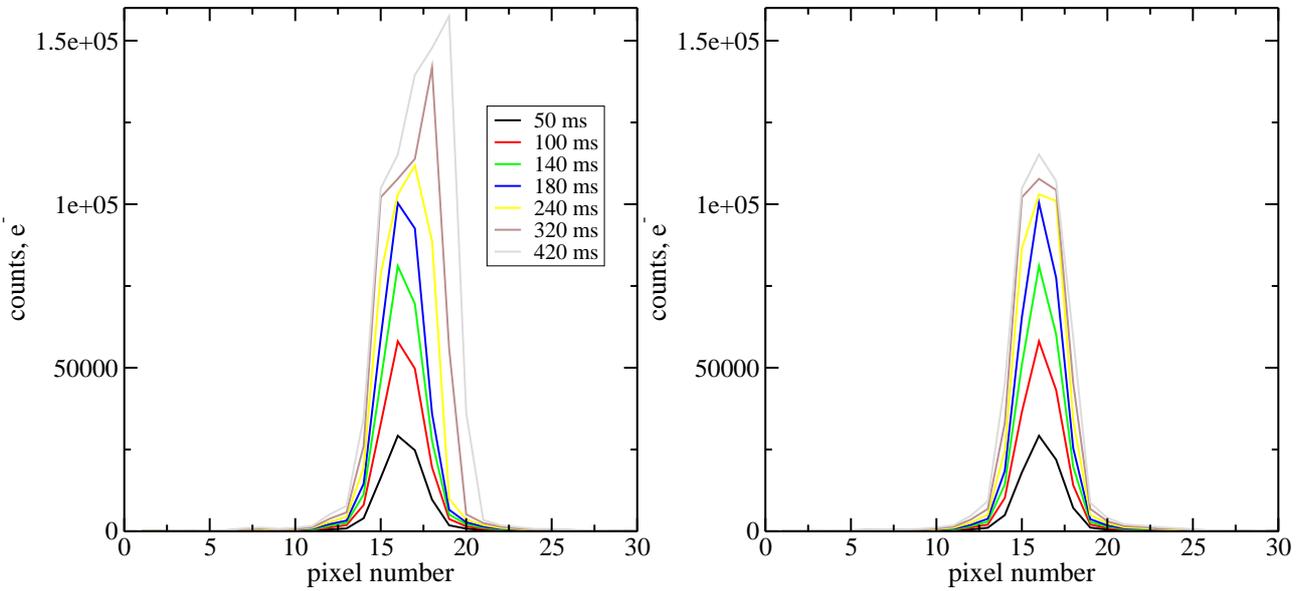


Рис. 5: Сечения изображений точечного источника, полученные при различных экспозициях (см. легенду). Обстоятельства см. в тексте. Справа — сечение в направлении считывания, слева — в перпендикулярном направлении.

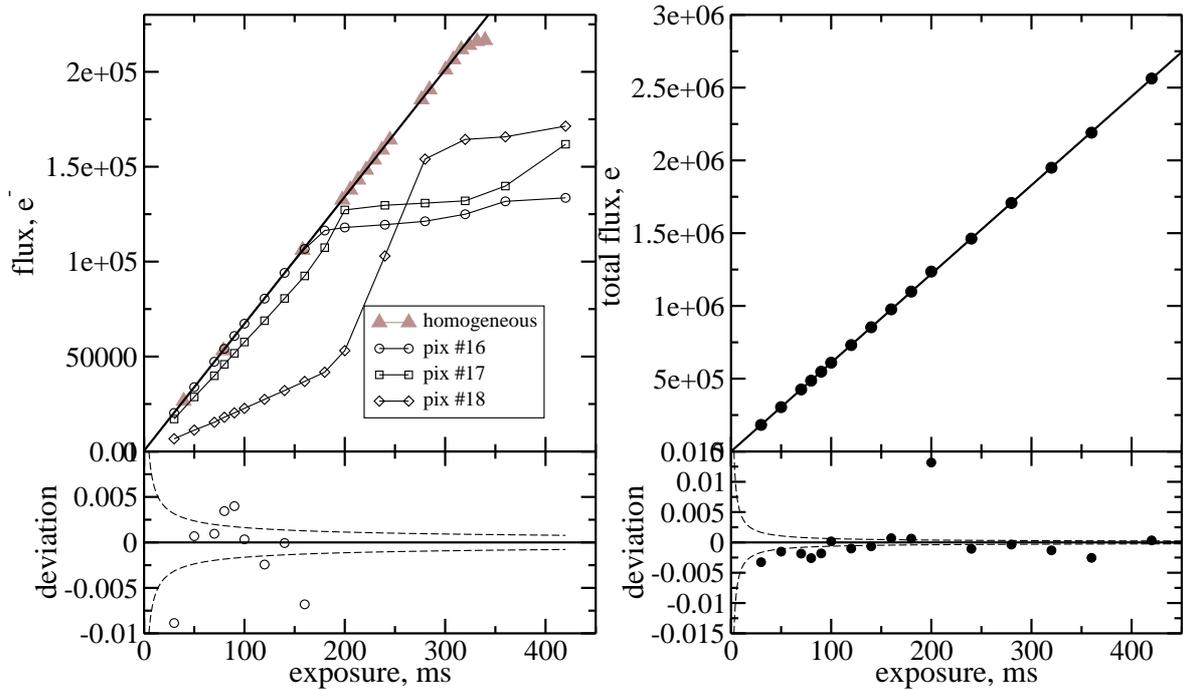


Рис. 6: *Слева сверху*: зависимость отсчета в максимальном пикселе от экспозиции. Черная сплошная линия — аппроксимация начальной части. Также приведены аналогичные зависимости для двух соседних пикселей (номера пикселей с рис. 5, левый). Сплошные треугольники — отсчет в пикселе при равномерном освещении детектора [1]. *Слева внизу*: относительное отклонение зависимости отсчета в максимальном пикселе от линейной. Прерывистые линии — среднеквадратическое отклонение при учете фотонного шума и шума считывания. *Справа сверху*: зависимость полного потока от экспозиции. Поток оценен в квадратной диафрагме размером 8×8 пикселей. Сплошная линия — линейная аппроксимация. *Справа внизу*: относительное отклонение зависимости полного потока от линейной. Прерывистые линии — среднеквадратическое отклонение при учете фотонного шума и шума считывания.

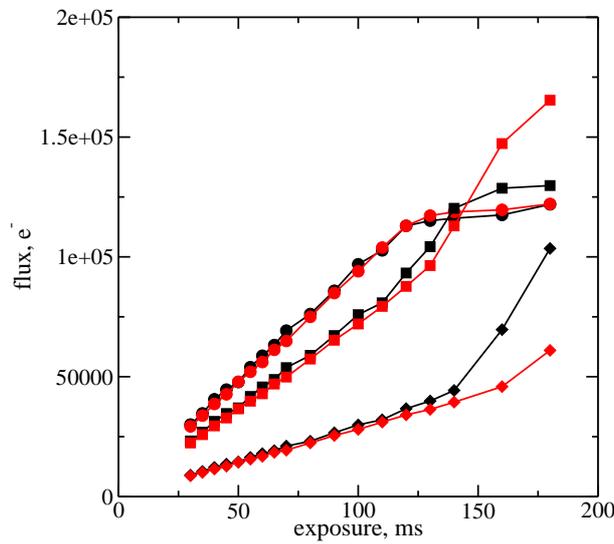


Рис. 7: Зависимость отсчета от экспозиции, линза 2, источник IG1. Круги — отсчет в максимальном пикселе, квадраты и ромбы в двух соседних пикселах в направлении считывания. Черные линии получены при напряжении тактирования +0, красные +3.

Поток мы измеряли как сумму отсчетов в квадрате размерами 8×8 пикселей (фотометрия методом “windowing”), центрированном на максимальном пикселе (пример изображения см. на рис. 3, верхний левый)¹. Результаты измерений приведены на рис. 6, правый верхний. На правом нижнем рисунке также приведено относительное отклонение зависимости от линейной. При оценке полного потока в изображении линейность лучше 0.2% обеспечивается во всем изученном нами диапазоне, т.е. до отчета в максимальном пикселе 280000 e^- . Таким образом, заряд, хоть и переходит в соседние пиксели, но его полное количество сохраняется.

Мы также повторили этот эксперимент с линзой 2 и источником IG1 спустя 3 месяца. Оказалось, что этот источник обладает значительно худшей стабильностью интенсивности излучения во времени, чем VK1 — флуктуации достигают 3-4%. По-видимому, это вызвано высокой чувствительностью узла заведения света в оптоволонко к вибрациям (хотя в процессе эксперимента в комнате никого не было). Тем не менее, как можно видеть из рис. 7, эффект “перетекания” заряда в соседние пиксели также наблюдается. Кроме того, мы выполнили этот эксперимент для двух разных напряжений вертикального переноса: сплошные линии — +0, прерывистые — +3. Картина перераспределения заряда в этих случаях существенно отличается, что подтверждает предположение, сделанное в начале этого подраздела, о том, что большая неоднородность в распределении заряда влияет на процесс вертикального переноса.

Усредненный спектр мощности В последующих разделах мы будем исследовать свойства усредненного спектра мощности изображения, искаженного имитатором турбулентности. Однако некоторые свойства спектра мощности могут быть проанализированы и с дифракционным изображением, в частности, влияние на него шума считывания и пуассоновского шума.

В качестве исходного материала мы получили 100 кадров точечного источника IG1 с линзой 2. Экспозиция составила 9 мс, детектор работал в режиме отключенного полнокадрового переноса. Затем мы вычислили спектр мощности для каждого кадра в окне размерами 250×250 пикселей, центрированном на источнике. Полученные спектры мощности были усреднены, при этом нормировка на поток не производилась. Результат приведен на рис. 8, *a* и *b* с различными диапазонами величин спектра мощности.

Как видно из рис 8, *a* и *b*, спектр мощности разделяется на две компоненты: спектр мощности источника (частоты $|f| < f_c$) и подложка (частоты $|f| > f_c$). Для идеального изображения, сформированного конечным числом квантов, величина подложки не зависит от частоты и равна обратному полному числу квантов в изображении [4]. В тоже время в нашем случае явно просматривается вер-

¹Мы также попробовали применить метод “thresholding”, учитывались пиксели, в которых отсчет превышал утроенное среднеквадратическое отклонение шума считывания. Он дал результаты похуже в смысле линейности

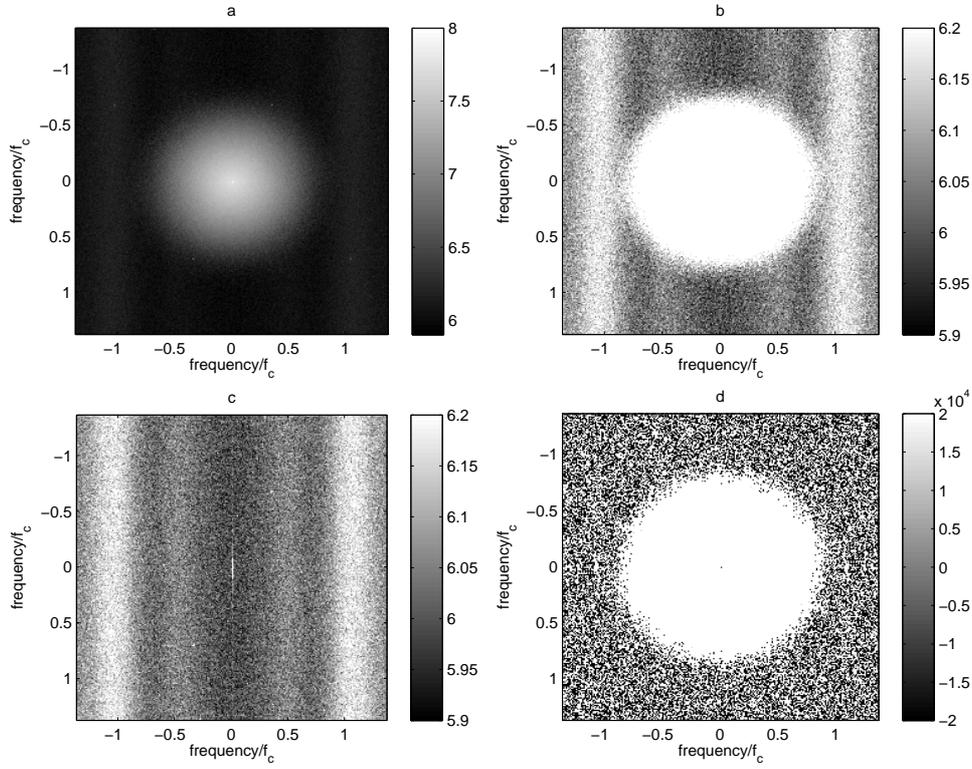


Рис. 8: *a* и *b*: десятичный логарифм усредненного спектра мощности изображения точечного источника без имитации атмосферной турбулентности, в различных диапазонах величин. *c*: аналогичная величина для участка детектора, не содержащего источника. *d*: разность усредненных спектров мощности изображений с источником и без.

тикальная структура подложки. Эта структура может быть объяснена неидеальностью детектора, в частности, узором в смещении (BIAS). Обозначим смещение $B(\mathbf{x})$, его спектр $\tilde{B}(\mathbf{f})$, аналогично для изображения $S(\mathbf{x})$ и $\tilde{S}(\mathbf{f})$. В этом случае усредненный спектр мощности будет равен:

$$\tilde{P}(\mathbf{f}) = \langle [\tilde{B}(\mathbf{f}) + \tilde{S}(\mathbf{f})] [\tilde{B}^*(\mathbf{f}) + \tilde{S}^*(\mathbf{f})] \rangle. \quad (1)$$

Преобразуем это, раскрыв скобки:

$$\tilde{P}(\mathbf{f}) = \langle \tilde{B}(\mathbf{f})\tilde{B}^*(\mathbf{f}) \rangle + \langle \tilde{B}(\mathbf{f})\tilde{S}^*(\mathbf{f}) \rangle + \langle \tilde{B}^*(\mathbf{f})\tilde{S}(\mathbf{f}) \rangle + \langle \tilde{S}(\mathbf{f})\tilde{S}^*(\mathbf{f}) \rangle. \quad (2)$$

При условии того, что $\tilde{B}(\mathbf{f})$ являются случайными гауссовскими переменными (это так, поскольку само смещение $\tilde{B}(\mathbf{f})$ обладает этим свойством), перекрестные члены в этом выражении будут стремиться к нулю при усреднении большого количества спектров мощности:

$$\tilde{P}(\mathbf{f}) \approx \langle \tilde{B}(\mathbf{f})\tilde{B}^*(\mathbf{f}) \rangle + \langle \tilde{S}(\mathbf{f})\tilde{S}^*(\mathbf{f}) \rangle. \quad (3)$$

Таким образом, спектр мощности регистрируемых нами кадров является суммой спектров мощности смещения и изображения. Чтобы проверить это, мы рассчитали усредненный спектр участка изображения, не содержащего источника, он приведен на рис 8, *c*. Также на рис. 8, *d* дано его отклонение от усредненного спектра мощности участка изображения с источником.

Как видно, в отклонении зависимость от частоты полностью исчезает в высокочастотной области, поэтому в дальнейшем мы будем считать, что неоднородность подложки описывается моделью (3). Эта модель позволит нам впоследствии устранять структуру подложки, усредняя ее по области $f_y > f_c$ в каждом столбце и вычитая результат из каждой строки спектра мощности.

По видимому, сложная форма спектра мощности смещения является следствием вертикального узора смещения малой амплитуды, фаза которого меняется от кадра к кадру. Поскольку амплитуда узора мала, на одиночном кадре его не видно. В тоже время при усреднении множества кадров узор исчезает, т.к. на каждом кадре он смещен на случайную величину по горизонтали. Тем не менее, на усредненном спектре мощности прекрасно видны признаки его наличия.

4 Точечный источник, имитация атмосферной турбулентности

В этом разделе описаны результаты эксперимента по имитации спекл-интерферометрических наблюдений точечного источника. Эксперимент был выполнен с имитатором турбулентности (ИТ) и линзой 2.

При работе были выявлены два существенных недостатка ИТ. 1) При пропускании пучка через некоторые площадки ИТ искажения становятся настолько сильны, что значительная доля света не попадает на детектор. 2) С другой стороны, при пропускании света через другие площадки формируется спекл, который всегда находится в одном положении — на оси установки. Обе эти ситуации не являются типичными для звездной спекл-интерферометрии, поэтому мы не использовали соответствующие области диска ИТ. После некоторого количества пробных экспериментов с разным расстоянием от оси установки до оси диска d_{ts} , мы выяснили, что наилучшие результаты получаются при $d_{ts} = 29$ мм.

Период вращения диска составлял 40 секунд, что соответствует “скорости ветра” 4.6 мм/с на входной диафрагме. Для 2.5 м телескопа скорость ветра в аналогичной ситуации составила бы 16.3 м/с (если учесть, что размер диафрагмы в установке 0.7 мм).

Был использован источник света IG1, светофильтр V. Коэффициент электронного усиления был установлен равным единице. Мы получили серию длиной 1300 кадров в режиме полнокадрового переноса, экспозиция составляла 30 мс (период между кадрами такой же).

Усредненное изображение Усредненное изображение (seeing-limited) приведено на рис. 9, на рис. 10 также приведены его разрез и усреднение по углу. Полуширина изображения составила 59 пкс, что соответствует 0.94 мм в фокальной плоскости. По формуле $\beta = 0.98\lambda/r_0$ можно оценить радиус Фрида ИТ, который оказывается равен 27 мкм.

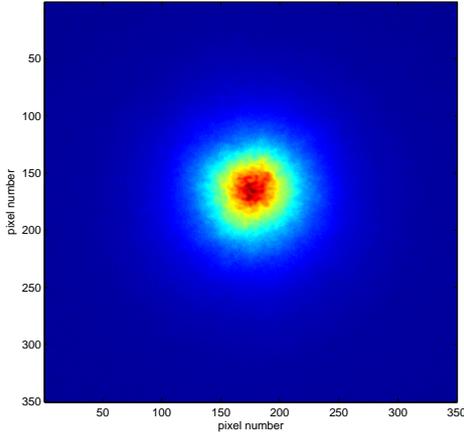


Рис. 9: Усредненное изображение, полученное с имитатором турбулентности.

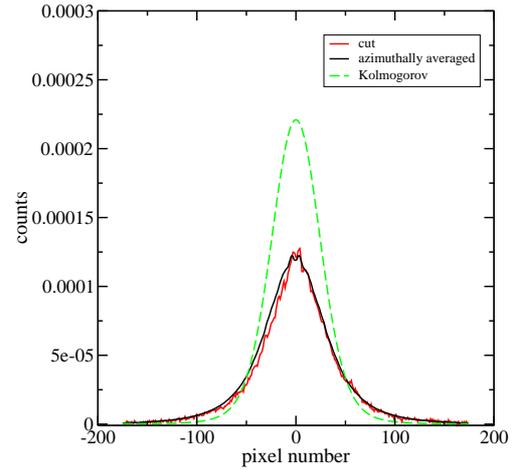


Рис. 10: Разрез (красная сплошная линия) усредненного изображения на рис. 9, а также это же изображение, усредненное по углу (черная сплошная линия). Прерывистая зеленая линия — теоретически ожидаемая ФРТ для Колмогоровской модели турбулентности с такой же полушириной и полным потоком, как у измеренного изображения.

Форма усредненного изображения определяется структурной функцией фазы $D_\phi(x)$:

$$\tilde{T}(f) = \exp\left[-\frac{D_\phi(\lambda f)}{2}\right], \quad (4)$$

где \tilde{T} — преобразование Фурье изображения, в данном случае ОПФ, f — модуль пространственной частоты. Отметим, что это уравнение выполняется только при условии нормальности распределения флуктуаций фазы. Обращая его, можно по изображению восстановить вид структурной функции фазы, что мы и сделали. Результат представлен на рис. 11. Как видно, структурная функция приблизительно

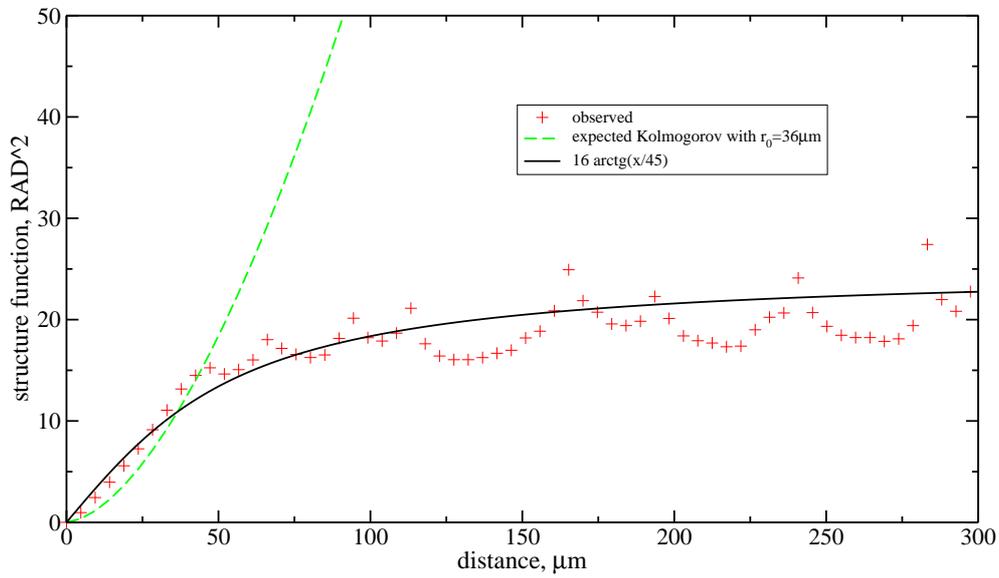


Рис. 11: Структурная функция фазы ИТ, оцененная по изображению на рис. 9 — красные крестики. Сплошная черная линия — аппроксимация измерений функцией $16\arctg(x/45)$. Прерывистая зеленая линия — Колмогоровская структурная функция при $r_0 = 27$ мкм.

описывается законом Колмогорова $D(x) = 6.88(x/r_0)^{5/3}$ только на начальном участке, до $2 \div 3r_0$. Дальше она остается на примерно постоянном уровне, в то время как Колмогоровская структурная функция продолжает расти. Наблюдаемая структурная функция хорошо аппроксимируется арктангенсом, см. рис. 11.

Пользуясь уравнением (4) можно также рассчитать вид ФРТ, ожидаемый из теории для Колмогоровской структурной функции с таким же радиусом Фрида, как у полученного нами изображения. Результат также приведен на рис. 10. Как видно, Колмогоровское изображение имеет более выраженный пик и меньшие крылья, чем изображение полученное с нашим ИТ.

Усредненный спектр мощности Мы нормировали каждое изображение на полный поток, рассчитали его спектр мощности, а затем усреднили его по всем изображениям. Затем мы вычли подложку, пользуясь процедурой, описанной в предыдущем разделе. Поскольку источник, использованный нами, заведомо точечный, полученный таким образом усредненный спектр мощности представляет собой спекловую оптическую передаточную функцию (СОПФ). Ее вид и усреднение по углу даны на рис. 12, справа и слева, соответственно.

Ожидаемую СОПФ можно оценить по формулам 6.5, 6.6, 6.10 из книги [5] для произвольной структурной функции фазы, однако при условии, что фаза распределена нормально. Мы рассчитали ожидаемую СОПФ для Колмогоровской структурной функции с $r_0 = 36$ мкм и для наблюдаемой структурной функции, результат также приведен на рис. 12, правый. Как видно, в высокочастотной области эти СОПФ отличаются лишь коэффициентом. В тоже время наблюдаемая СОПФ с одной стороны, проходит значительно ниже, а с другой — имеет другую форму.

Это отличие может быть вызвано следующими факторами: конечностью ширины спектральной полосы, конечностью экспозиции и свойствами возмущающей среды. Первый из этих факторов вряд ли играет роль в нашем случае, т.к. мы используем лазерное излучение, шириной полосы которого заведомо можно пренебречь.

Второй фактор для нас более существенен, действительно, за время экспозиции — 30 мс — диск проходит расстояние, равное $0.27D$, т.о. можно ожидать значительное смазывание изображения. Чтобы проверить это мы увеличили период вращения диска до 152 с, и сделали серию из 1300 кадров с экспозицией 30 мс при отключенном режиме полнокадрового переноса (non frame transfer), период между кадрами составил 120 мс. Мы рассчитали усредненный спектр мощности и вычли подложку, результаты также приведены на рис. 12, правый. Как видно, СОПФ значительно возросла, особенно это заметно на высоких частотах, где рост составил почти 2 раза. Однако на тех же высоких частотах

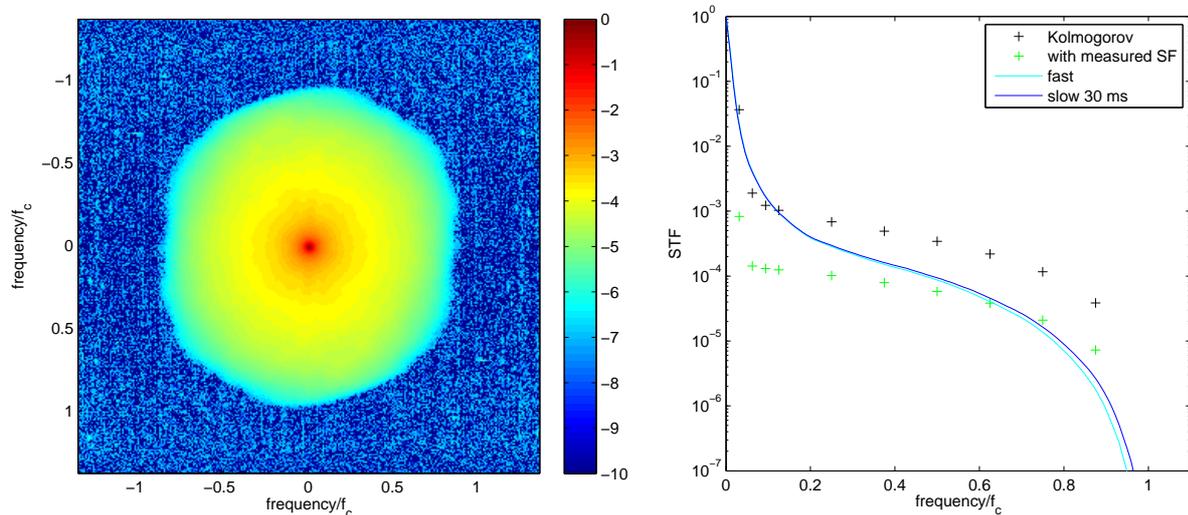


Рис. 12: Слева: десятичный логарифм усредненного спектра мощности 600 мгновенных изображений (постоянная подложка вычтена). Справа: Тот же спектр мощности, но усредненный по углу — красная линия. Черные крестики — теоретически ожидаемая СОПФ при $r_0 = 40.9$ мкм. Зеленые крестики — то же, но со структурной функцией, приведенной на рис. 11. Голубая и синяя линии — усредненные спектры мощности полученные при медленном вращении диска и при экспозициях 30 и 10 мс, соответственно (подробнее см. текст).

она все равно примерно в 5-6 раз меньше, чем ожидается из теории.

Этот остаточный дисбаланс остается объяснять свойствами среды. Действительно, искажения, вносимые слоем лака, могут быть не чисто фазовыми. Возможно присутствует также некоторая доля рассеяния. Для того, чтобы проверить это, требуется поставить эксперимент с возмущающей средой, вносящей чисто фазовые искажения, например, турбулентным потоком воздуха.

5 Двойной источник, имитация атмосферной турбулентности

Следующим этапом мы имитировали спекл-интерферометрические наблюдения двойного источника, при этом использовался источник света DV1. Для получения изображений мы использовали электронное усиление 50. Сначала было получено дифракционное изображение, затем спекл, затем снова дифракционное, чтобы проверить стабильность параметров источника. На рис. 13 представлено изображение двойного источника полученного без ИТ. Параметры изображений, полученных в дифракционном режиме приведены в табл. 2. Положение фотоцентров было определено в квадратных окнах размерами 10×10 пкс. Погрешности оценены с учетом шума считывания и фотонного шума, увеличенного двукратно в процессе электронного усиления.

Таблица 2: Параметры источника измеренные без ИТ, затем с ИТ, затем снова без ИТ.

условия	поток А		поток Б		отношение потоков	разделение по горизонтали [пиксели]	разделение по вертикали [пиксели]
	[фотоэлектроны]	[фотоэлектроны]	[фотоэлектроны]	[фотоэлектроны]			
без ИТ #1 (дифр.)	7610	2610	2.92	7.74 ± 0.02	27.34 ± 0.02		
с ИТ (спекл)			3.23	8.34 ± 0.01	26.71 ± 0.01		
без ИТ #2 (дифр.)	6929	2193	3.16	7.67 ± 0.03	27.32 ± 0.03		

При получении спекл-серий с ИТ период вращения ИТ был увеличен до 290 с, экспозиция — до 220 мс, длина серии 1300 кадров. Это было сделано чтобы увеличить сигнал, накапливаемый за экспозицию. За экспозицию ИТ смещался на $0.2D$.

На рисунке 14, верхний левый представлен усредненный спектр мощности, скорректированный за

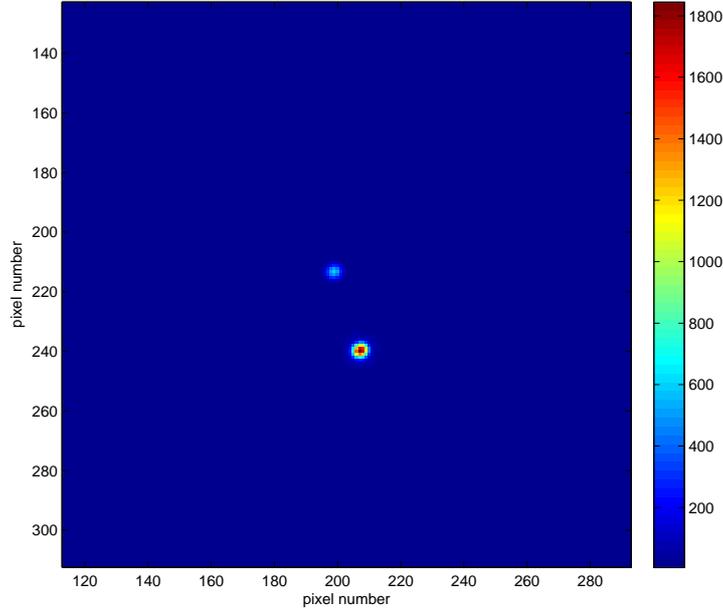


Рис. 13: Изображение двойного источника, полученное без ИТ.

фотонную подложку как это было описано в предыдущем подразделе. Спектр прослеживается до частот $\approx 0.85f_c$, четко видны полосы, характерные для двойного источника. Подобно тому, как это было сделано в [6] мы усреднили спектр мощности по углу, получив тем самым оценку СОПФ и разделили на нее спектр мощности.

Полученную зависимость мы аппроксимировали функцией видности двойного источника [7]:

$$V(p, q, B, \mathbf{d}; \mathbf{f}) = A \left(1 + B [\cos(2\pi(\mathbf{f} \cdot \mathbf{d})) - 1] \right), \quad (5)$$

где A — свободный параметр, появление которого связано с методикой учета СОПФ (он порядка 1.5), \mathbf{d} — вектор, соединяющий компоненты источника, B — величина, связанная с отношением яркости источников β следующим образом:

$$B = \frac{2\beta}{1 + \beta^2}. \quad (6)$$

Для аппроксимации мы использовали встроенный в матлаб метод `nlmfit`, реализующий минимизацию среднеквадратического отклонения модели от измерений методом Левенберга-Марквардта. Нами была рассмотрена область частот $0.1f_c < |f| < 0.85f_c$.

Параметры источника, полученные в результате аппроксимации приведены в таблице 2. Отклонение полученной модели от измерений дано на рис. 14, внизу слева. Также внизу справа приведен разрез измерений и модели. Видно, что модель двойного источника хорошо описывает измерения.

Оценка разделения источников без ИТ и с ИТ приблизительно согласуются. Согласованность оценок отношения потоков определить труднее, т.к. этот параметр источника нестабилен, см. табл. 2.

6 Планируемые эксперименты

Вопросы, нуждающиеся в дальнейшем изучении:

1. Несовпадение теоретически ожидаемой и измеренной СОПФ.
2. Несовпадение оценок разделения компонент двойного источника, полученных без ИТ и с ИТ.

Следующий этап:

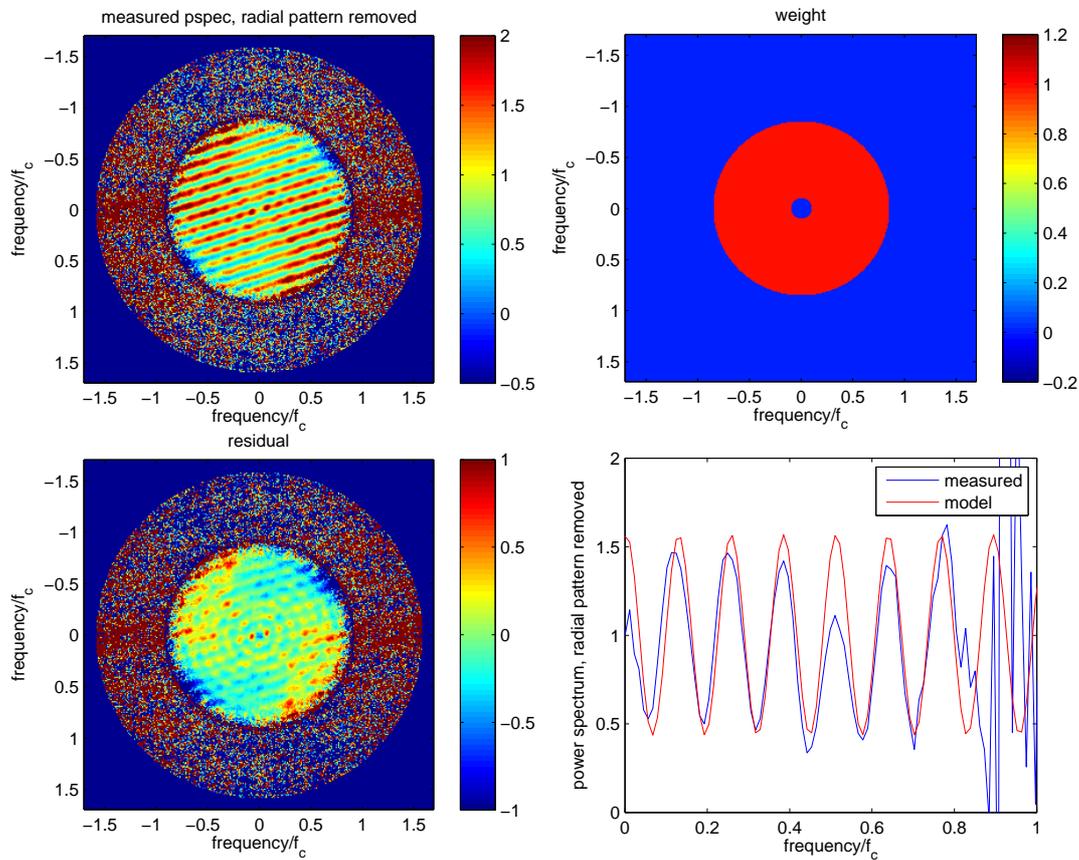


Рис. 14: Слева направо, сверху вниз: 1) усредненный спектр мощности двойного источника; 2) вес, использованный при аппроксимации моделью; 3) разница между измерениями и моделью; 4) наблюдаемый усредненный спектр мощности и модель в разрезе по одной из координат.

1. На телескопе АЗТ-2: получение спекл-серий, изучение свойств усредненного спектра мощности.
2. На телескопе АЗТ-2: измерение масштаба, ориентации камеры.
3. На телескопе АЗТ-2: оценка достижимого контраста спекл-интерферометрии и селекции изображений.
4. Работоспособность при температурах ниже нуля.
5. Отслеживание дрейфа смещения по закадровой области.

Список литературы

- [1] Сафонов, Б., “Исследование EMCCD детектора URL:http://dragon.sai.msu.ru/~safonov/CCD_report.pdf,” (Oct. 2012).
- [2] Andor, “Andor iXon+897 X-5947 Performance sheet,”
- [3] Howell, S. B., [*Handbook of CCD Astronomy*] (Apr. 2000).
- [4] Goodman, J. W., [*Statistical Optics*] (1985).
- [5] Tokovinin, A. A., [*Zvezdnye interferometry (Stellar interferometers).*] (1988).
- [6] Tokovinin, A., Cantarutti, R., Tighe, R., Schurter, P., van der Bliek, N., Martinez, M., and Mondaca, E., “High-Resolution Imaging at the SOAR Telescope,” *Publications of the ASP* **122**, 1483–1494 (Dec. 2010).

- [7] Kuzmenkov, S. G., “Potential accuracy of speckle-interferometric measurements Angular diameters of stars,” *Astronomicheskii Zhurnal* **62**, 1201–1210 (Dec. 1985).