

Контроль качества оптики инструмента DIMM

В. Корнилов, Б. Сафонов

3 января 2010 г.

1 Введение

Количественная теория измерений оптической турбулентности (ОТ) с Монитором дифференциальных дрожаний (DIMM) опирается на несколько априорных предположений [1]. Одним из таких предусловий является предположение об идеальности оптической системы, строящей два изображения одной и той же звезды, дифференциальное смещение которых и измеряется. В работе [2] показано, что наличие в реальной применяемой оптической системе заметных aberrаций может привести к появлению систематических ошибок в измеряемой ОТ. Ситуация усугубляется тем, что обычно применяемые в качестве питающей оптики для DIMM телескопы любительского класса не стабильны в отношении своего оптического качества. Во многих случаях фокусировка приводит к появлению вторичной комы, проявляющейся в изображениях DIMM в виде астигматизма.

Другим фактором, влияющим на неидеальность измеряемых изображений, является способ регистрации с помощью ПЗС камеры с конечным временем экспозиции. Ветровые вибрации телескопа заметно растягивают изображение даже при экспозициях порядка 5 – 10 мс. Если же для регистрации используется ПЗС матрица с кадровым переносом, то каждое изображение отягощено еще и слабым вертикальным следом.

Все подобные эффекты приводят к тому, что реально получаемые изображения не всегда пригодны для точных измерений. Некоторые программы, обеспечивающие работу DIMM, содержат алгоритм контроля текущего качества изображений, характеризующего идеальность изображения. Не прошедшие такой контроль кадры игнорируются. Подобный подход в алгоритмах реального времени неизбежно приводит к селекции измерений и сильно искажает полученный результат.

В дальнейшем анализе использовались данные измерений с прибором MASS/DIMM в составе монитора оптической турбулентности, установленного в 2007 г на горе Шатджатмаз¹. Полный объем данных составляет 100 000 минутных измерений, полученных в период 2007 – 2009 гг. Настоящая работа была выполнена в рамках подготовки этих результатов к пере-обработке и публикации.

Проведение измерений в DIMM канале комбинированного прибора обеспечивается про-

¹<http://curl.sai.msu.ru/mass/download/doc/res2009rus.pdf>

граммой *dim*²³, которая кроме основных данных о дифференциальных дрожаниях, вычисляет дополнительные характеристики измеряемых изображений

2 Вычисление числа Штреля в программе *dim*

В работе [3] приводится формула для оценки числа Штреля реального изображения, основанная на теоретической зависимости интенсивности в центре дифракционного изображения от полного потока F_t . При этом предполагается, что центральная интенсивность определяется сигналом I_c в максимуме изображения:

$$I_c = F_t \frac{\pi D^2 \Delta^2}{4\lambda^2 f^2}, \quad (1)$$

где D — диаметр ДИММ апертуры, f — эквивалентное фокусное расстояние системы “телескоп+ДИММ” и Δ — размер пикселя матрицы.

Удобно заменить отношение Δ/f независимо определяемой величиной — масштабом изображения M на ПЗС детекторе в единицах секунды дуги на пиксель:

$$I_c = F_t \frac{\pi D^2}{4\lambda^2} \left(\frac{M}{206256} \right)^2 \quad (2)$$

Измеренное отношение максимального сигнала к полному, разделенное на отношение для дифракционного изображения (2) и даст значение числа Штреля.

При непосредственном использовании этой формулы возникает ряд проблем, приводящих к некорректности получаемых оценок. Первая проблема связана с тем, что формула (2) точна если $\Delta D \ll \lambda f$ или, что эквивалентно, $I_c \ll F_t$. В противном случае (размер пикселя сравним с размером ядра изображения) максимальный сигнал в изображении будет заметно ниже предполагаемого.

Для минимизации этой погрешности, в программе *dim* вычисляется поправка к значению максимального сигнала на основе определенных перед этим положения центра изображения относительно пикселей матрицы и оценки радиуса изображения. Используется формула аппроксимации ядра изображения гауссовым профилем. В нашем, далеко не худшем, случае величина поправки достигает 10%.

Вторая проблема связана с квадратичной зависимостью от длины волны излучения λ при том, что в реально работающих приборах используется вся полоса чувствительности ПЗС приемника. Вычисления с кривой реакции ПЗС детектора ICX424AL (для используемой нами индустриальной камеры EC650 фирмы Prosilica) показывают, что для звезд спектральных классов от B0V до K5III эффективная длина волны меняется от 470 нм до 600 нм, что эквивалентно изменению оценки числа Штреля в 1.6 раз.

Эффективная длина волны λ_{eff} вычисляется по распределению энергии $E(\lambda)$ и кривой реакции $Q(\lambda)$ следующим образом:

$$\frac{1}{\lambda_{eff}^2} = \frac{\int E(\lambda)Q(\lambda) \frac{1}{\lambda^2} d\lambda}{\int E(\lambda)Q(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

²http://dragon/mass/download/doc/dimm_soft_description.pdf

³<http://curl.sai.msu.ru/mass/download/doc/infrasoft.pdf>

3 Локализация ошибок программы `dim`

При настройке процесса измерений с прибором DIMM были допущены три небольших погрешности. Первая погрешность связана с тем, что в файлах данных измерений, выполненных до 17 февраля 2008 г. приводилась заниженная в $\sqrt{2}$ раз оценка радиуса изображения.

Вторая, более существенная погрешность возникла вследствие установки длительности экспозиции камеры равной 4 мс. Предполагалось, что меньшая экспозиция будет приводить к потере точности определения центров тяжести изображений. Однако, при этой экспозиции для самых ярких звезд (α Aur, α Lir, α Boo) центр изображения оказался в насыщении, что привело к занижению оценки числа Штреля по формуле (2) для таких звезд на 20 – 40%. С другой стороны оказалось, что малый шум считывания, присущий камере EC650, приводит к малым координатным ошибкам, также вычисляемым в процессе измерений, даже для слабейших программных звезд. Начиная с 6 декабря 2009 г экспозиция была уменьшена до 3 мс, а с 9 декабря — до 2.5 мс. Особыми случаями являются измерения 29 мая, 2 июня и 12 октября, когда для экспериментов с расцветными измерениями ОТ устанавливалась экспозиция 2 мс.

Эффект насыщения корректировался по среднему сигналу, определяемому как $\bar{I} = F_t/(\pi r_*^2)$, где r_* — среднеквадратичный радиус изображения, слабо чувствительный к насыщению. Эмпирически была определена зависимость максимального сигнала в изображении от \bar{I} , которая оказалась несколько разной для левого и правого изображений:

$$I_R = -240.86 + 1.6174\bar{I} \quad I_L = -304.61 + 1.7604\bar{I} \quad (4)$$

При вычислении числа Штреля, максимальные сигналы превышающие 4100 ADU, пересчитывались по этим формулам.

Третья погрешность связана с тем, что до 17 марта 2008 полный сигнал измерялся не от уровня фона, а от устанавливаемого для определения центров тяжести порога. В период с 17 марта 2008 по 4 декабря 2009 г максимальный сигнал вычислялся с ошибкой на величину порога, что составляет 35 – 40 ADU. Это также корректировалось.

4 Анализ данных с использованием числа Штреля

После коррекции входных данных были построены кумулятивные распределения оценок числа Штреля по 1 мин времени накопления. Эти кривые показаны на Рис. 1 слева. Видно, что распределения для левого и правого изображений близки друг к другу, отличаясь только в области плохих изображений ($S \approx 0.2$). Там же приведено распределение средних значений $S_m = (S_L + S_R)/2$.

Медианное значение S_m по всему периоду измерений составляет 0.41. В 13% случаев среднее число Штреля меньше 0.3. Причем правое изображение систематически хуже левого.

На этом же рисунке справа изображены кумулятивные распределения измерений качества изображения β для разных выборок по числу Штреля. Обращает на себя сильная зависимость вида распределений от критерия выборки. Так, для выборки $S_m > 0.41$ медиана β составляет $0.84''$ вместо $0.96''$ для всей совокупности. Выборка $S_m < 0.41$ имеет медианное значение $1.11''$. Даже отбрасывание маргинальных измерений с $S_m < 0.3$ приводит к заметному сдвигу в медиане, которая становится $0.92''$.

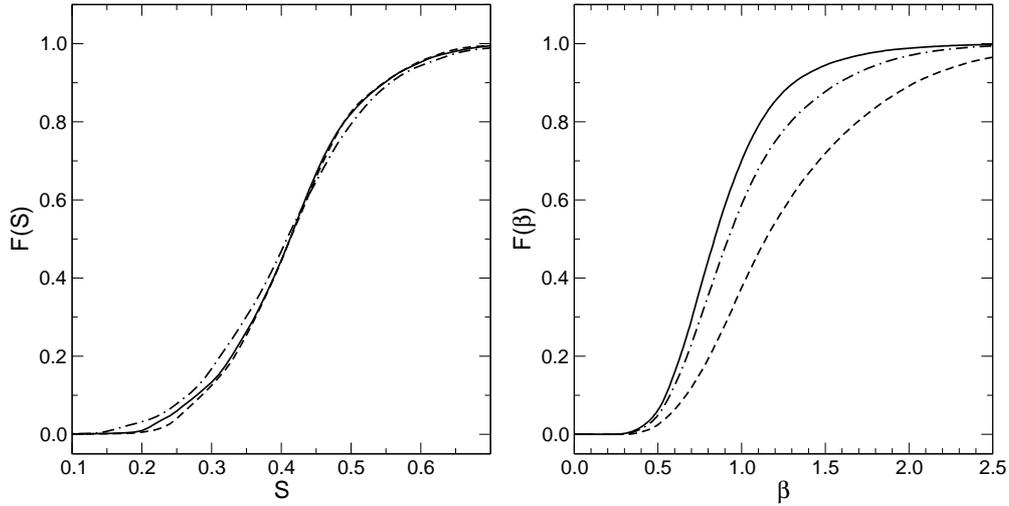


Рис. 1: Слева: распределение оценок числа Штреля для левого (штриховая линия) и правого изображений (штрих-пунктир). Сплошная линия — распределение среднего числа S_m . Справа: кумулятивные распределения качества изображений для трех выборок из всего набора данных измерений. Сплошная линия — выборка $S_m > 0.4125$, штриховая — $S_m < 0.4125$, штрих-пунктирная линия представляет распределение для $S_m > 0.3$

Причина такой ситуации лежит не в том, что плохое изображение приводит к завышенной оценке ОТ, а наоборот, сильная турбулентность вызывает деградацию изображения звезды даже при апертуре 10 см, типичной для прибора DIMM. Этот эффект был подробно рассмотрен в работе [4] при специально выполненном сравнении двух однотипных DIMM, предназначенных для исследования ОТ в рамках программы ТМТ.

5 Влияние ОТ на характеристики изображения в DIMM

Приближенную формулу для оценки вклада оптической турбулентности (ОТ) в формирование изображений в инструменте DIMM можно получить, предположив что изображения коротко-экспозиционные и наклоны волнового фронта на них не влияют. Мы предполагаем, также как и в работе [4], что флуктуации фазы волнового фронта, вызванные аберрациями телескопа и атмосферой, некоррелированы и малы. Следовательно, полную дисперсию флуктуаций можно записать как сумму дисперсий флуктуаций, вызванных атмосферой σ_a^2 и аберрациями оптики телескопа и прибора σ_o^2 :

$$\sigma^2 = \sigma_o^2 + \sigma_a^2, \quad (5)$$

что эквивалентно представлению числа Штреля S изображения в фокальной плоскости прибора как произведения чисел Штреля оптической системы S_o и турбулентной атмосферы S_a :

$$S = S_o S_a \quad (6)$$

Таким образом, чтобы выделить инструментальную составляющую изображений DIMM, достаточно разделить полученную из измерений потоков оценку числа Штреля на величину

вклада атмосферы S_a при данной мощности ОТ.

Атмосферное число Штреля можно оценить, используя соотношение для коротко-экспозиционного изображения из работы Фрида [5]:

$$\sigma_a^2 = \sigma_3^2 = 0.134 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (7)$$

однако это формула точна только в области $D \gg r_0$, и поэтому авторам [4], использующим это приближение, пришлось ввести дополнительный, определяемый из измерений и компьютерного моделирования, коэффициент.

Существует более строгий способ вычислить атмосферное число Штреля, опирающийся на его определение в терминах частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) оптической системы:

$$S_a = \int_0^{f_c} T_a(f) df / \int_0^{f_c} T_0(f) df \quad (8)$$

где T_0 — дифракционная ЧКХ оптической системы, T_a — ЧКХ оптической системы при наблюдении через атмосферу, а интегрирование ведется вплоть до частоты среза $f_c = D/\lambda$.

Известно, что дифракционная ЧКХ представляет собой АКФ входной апертуры или Фурье образ функции Эйри:

$$T_0(z) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos z - z\sqrt{1-z^2} \right] \quad (9)$$

где $z = f/f_c$ — безразмерная пространственная частота. Интеграл этой функции по всей области частот:

$$\int_0^1 T_0(z) dz = \frac{4}{3\pi} \quad (10)$$

В предположении колмогоровской турбулентности выражения для ЧКХ T_a получены в работе [6]. Причем, в случае длинной экспозиции (то есть с учетом вклада наклонов волнового фронта):

$$T_a^{LE}(z) = T_0(z) \exp \left(-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} z^{5/3} \right), \quad (11)$$

и, соответственно, в случае короткой экспозиции, актуальной в случае DIMM:

$$T_a^{SE}(z) = T_0(z) \exp \left(-3.44 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} z^{5/3} [1 - (z)^{1/3}] \right) \quad (12)$$

Видно, что интегралы во всей области частот этих функций зависят от единственного параметра $s = (D/r_0)^{5/3}$. Вычисленные по формуле (8) числа Штреля S_a для случаев (11) и (12) показаны на Рис. 2 как функция этого параметра.

Для описания поведения атмосферного числа Штреля в области $r_0 > 0.25D$ существует очень точная аппроксимация по s в виде

$$S_a = e^{-0.12125 s + 0.00287 s^2}. \quad (13)$$

Понятно, что эта аппроксимация не зависит ни от D ни от λ и поэтому она применима для любого конкретного прибора DIMM. Величина s линейно зависит от мощности ОТ и связана с измеряемыми DIMM величинами следующей формулой

$$s = \left(\frac{D}{r_0} \right)^{5/3} = \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{\sigma_{l,t}^2}{K_{l,t}}, \quad (14)$$

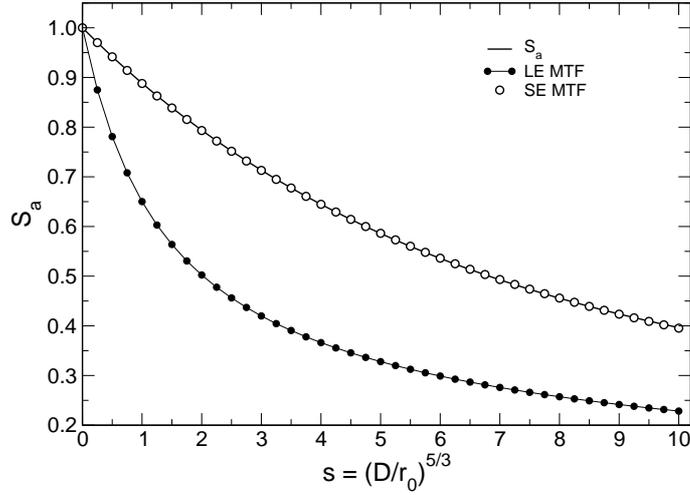


Рис. 2: Зависимости числа Штреля S_a от ОТ. Черные точки — для длинно-экспозиционного изображения, вычисленная в соответствии с формулой (11). Пустые кружки — зависимость для коротко-экспозиционного изображения, полученная по формуле (12). Сплошная толстая кривая — аппроксимация (12) формулой (13)

где $\sigma_{l,t}^2$ — дифференциальное продольное и поперечное дрожание в радианах в квадрате, а $K_{l,t}$ — соответствующий коэффициент в формуле, связывающей $\sigma_{l,t}^2$ с интенсивностью ОТ на луче зрения. В качестве λ должна применяться эффективная длина волны конкретного ПЗС приемника и используемой звезды, вычисленная ранее для правильной оценки измеряемого числа Штреля по формуле (3).

6 Анализ состояния оптической системы DIMM

Приведенная на Рис. 2 зависимость показывает, что деградация изображений, вызванная атмосферной турбулентностью, в типичной ситуации (качество изображения $\beta = 1''$, $D/r_0 \approx 1$) не велика, около 10%. В худших условиях это влияние заметно растет, достигая 30% при $\beta = 2''$. Тем не менее, вклад ОТ оказался достаточным, чтобы существенно изменить результаты, представленные в разделе 4.

На Рис. 3, слева, представлены кумулятивные распределения оценок числа Штреля после коррекции за вклад ОТ атмосферы. Медианное значение S_m увеличилось до 0.47, а медианы для левого и правого изображений стали равны 0.46 и 0.48 соответственно. Также как и ранее, различия в качестве левого и правого изображений особенно заметны в области низких значений числа Штреля. Доля маргинальных значений $S < 0.3$ уменьшилась до 3% и 7% для левого и правого изображений.

Этот участок распределения связан со значительной разъюстировкой телескопа в период с марта по июль 2009 г из-за наклона коррекционной пластины со вторичным зеркалом, что подтверждается кривой, изображенной на Рис. 4. В этот период наблюдалось прогрессирующее расхождение оптических осей искателя и прибора вдоль горизонтальной линии,

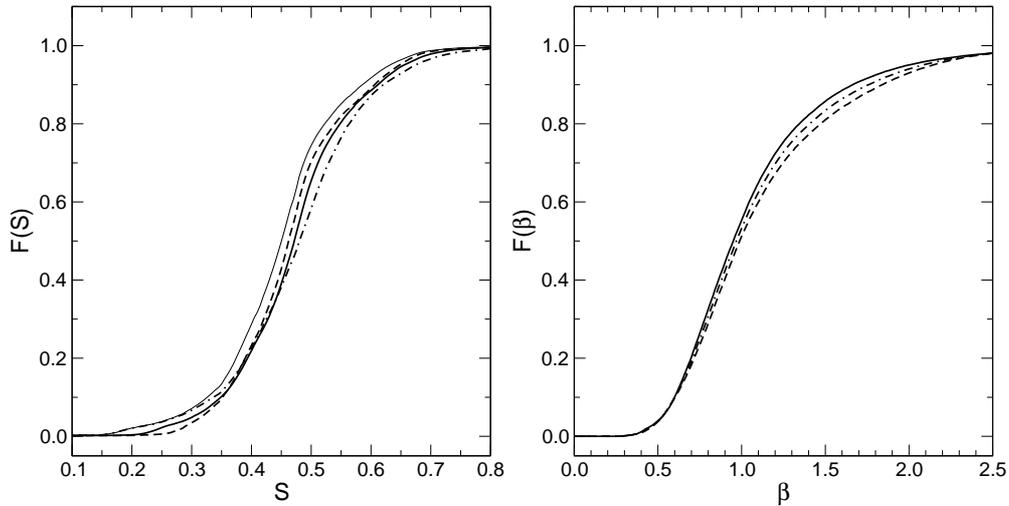


Рис. 3: Слева: распределение оценок числа Штреля для левого (штриховая линия) и правого изображений (штрих-пунктир) после учета вклада ОТ атмосферы. Сплошная линия — распределение среднего числа S_m , тонкая сплошная — распределение $\min(S_L, S_R)$. Справа: кумулятивные распределения качества изображений для трех выборок из всего набора данных измерений. Сплошная линия — выборка $S_{min} > 0.45$, штриховая — $S_{min} < 0.45$, штрих-пунктирная линия представляет общее распределение

соединяющей апертуры DIMM, достигшее к моменту юстировки $7 - 8'$. Для объяснения такого ухода требуется допустить наклон вторичного зеркала вокруг вертикальной оси на величину $12 - 15'$ или $0.2 - 0.25^\circ$.

После учета атмосферного вклада S_a эффекты селекции для атмосферного качества изображений практически перестали наблюдаться. На Рис. 3, справа, представлены кумулятивные распределения величины β , построенные для разных выборок. Видно, что выборки $S_{min} > 0.45$ (лучше медианного для минимального из двух числа Штреля) и $S_{min} < 0.45$ очень близки, несколько различаясь для ситуаций с повышенной ОТ. Их медианы соответственно равны $0.95''$ и $0.99''$ при генеральном медианном значении в $0.97''$.

В Табл. 1 приведена более подробная информация о характерных точках распределений качества изображений β при различных порогах селекции достоверных измерений. Видно, что максимальное различие (для последнего квартиля) составляет $0.05''$, что в этой области распределения совсем несущественно. В случае слабой ОТ (первый квартиль) максимальное различие из-за разных критериев селекции гораздо меньше и $\sim 0.01''$.

Конечно, столь малые различия есть следствие того, что подавляющий объем измерений получен при хорошем состоянии оптической системы телескопа и прибора. Монотонное уменьшение процентных точек с увеличением порога показывает, что теоретическое описание (6 и 12) не полностью компенсирует первоначальную зависимость полного числа Штреля от мощности ОТ. Однако остаточная зависимость может быть и следствием эффекта выборки, так что ведение дополнительного корректирующего фактора нам кажется излишним.

То, что для отбраковки измерений целесообразно использовать критерий $S_{min} > 0.3$

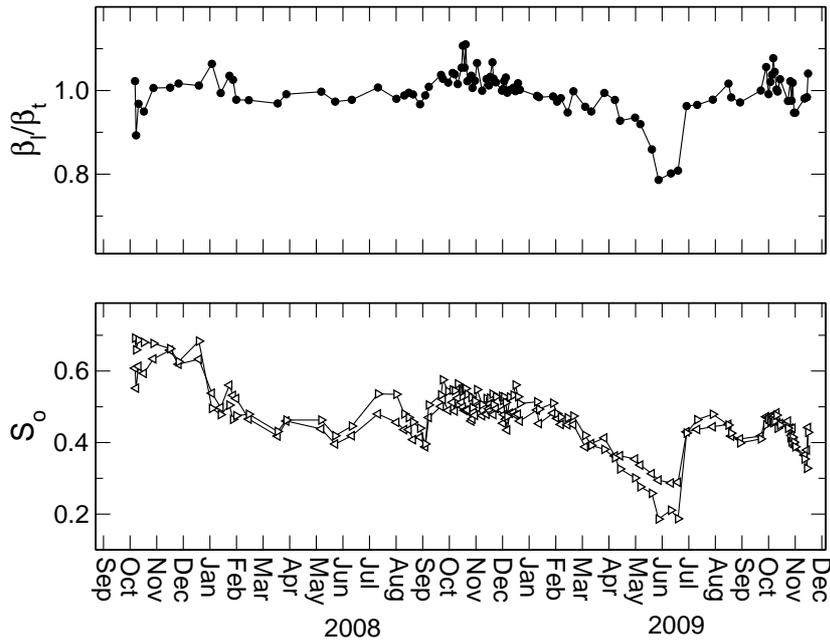


Рис. 4: Вверху: поведение медианы отношения продольного и поперечного дрожания в течение периода измерений. Внизу: поведение инструментального числа Штреля для левого (треугольник влево) и правого (треугольник вправо) изображений DIMM в течение периода измерений

подтверждается зависимостью отношения β_l/β_t , приведенным на Рис. 4 вверху. Видно, что в период измерений с сильно разъюстированным телескопом, это отношение заметно отличается от 1, что скорее всего объясняется влиянием aberrаций на получаемый в измерениях результат.

7 Влияние вибраций телескопа

Ветровые вибрации телескопа возбуждаются на частотах, близких к его собственным частотам в интервале 5 – 10 Гц. Амплитуда (половина размаха) вибраций Y поперек базы DIMM (по высоте) примерно вдвое больше чем по азимуту X. Для оценки величины вибраций используется среднеквадратичная величина флуктуаций общего центра двух изображений внутри 1 – 2 с измерения. Даже в отсутствие ветра эта величина не равна 0, поскольку туда же входят дрожания, вызванные атмосферной турбулентностью, и смещения из-за часового ведения и гидирования. Реально, ветровые вибрации начинаются когда скорость ветра в среднем превышает 3 м/с (Рис. 5 слева). Зависимость для суммарной величины вибрации $R = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ проходит несколько выше кривой для вибраций по Y.

Нужно заметить, что доля наблюдений, выполненных при значительных вибрациях $R > 3''$ всего лишь 15%, а $R > 6.4''$ наблюдалось только в 3% случаях. Это следствие того, что медианное значение скорости ветра составляет только 2.3 м/с и наблюдения прекращались

Таблица 1: Процентные точки распределений качества изображений β в период 2007 – 2009 гг при разных критериях селекции.

Критерий	25%	50%	75%
Без селекции	0.751	0.969	1.292
$S_{min} > 0.30$	0.747	0.965	1.296
$S_{min} > 0.35$	0.746	0.961	1.280
$S_{min} > 0.40$	0.746	0.959	1.265
$S_{min} > 0.45$	0.739	0.950	1.243
$S_{min} < 0.45$	0.765	0.989	1.347

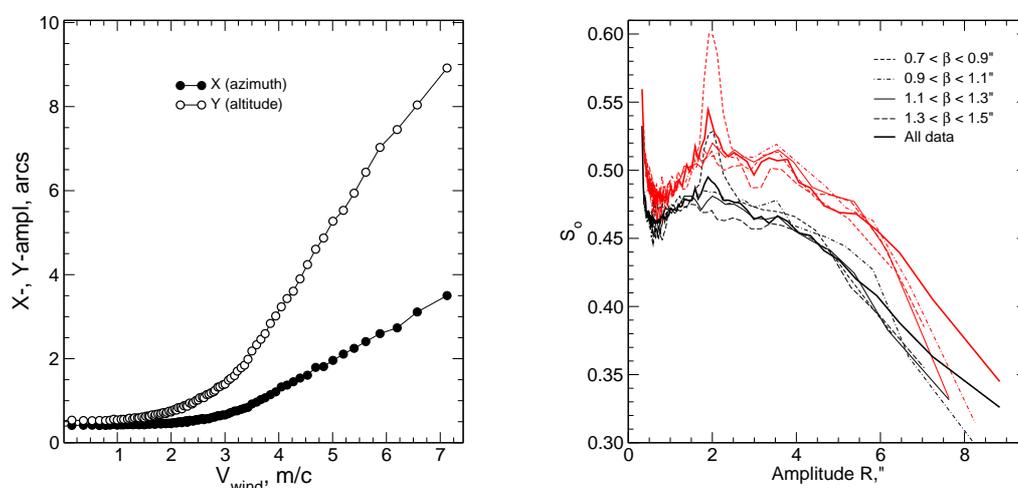


Рис. 5: Слева: зависимость среднеквадратичной величины вибраций телескопа по азимуту (черные точки) и высоте (пустые кружки) от скорости приземного ветра. Справа: зависимости медианных значений числа Штреля (черные линии для левого изображения, светлые — для правого) от амплитуды вибраций для разных выборок по мощности ОТ

при скорости больше 9 м/с.

Предполагая близкий к гармоническому характер ветровых вибраций и зная частоты этих колебаний можно оценить, что при амплитуде $R \approx 5''$ за время экспозиции 4 мс изображение дополнительно растянется в направлении вибраций на $\approx 1''$, что приведет к уменьшению максимального сигнала и уменьшению числа Штреля.

И действительно, такой эффект наблюдается. На Рис. 5 справа показаны зависимости медианы числа Штреля от уровня вибраций. Чтобы избежать эффекта нескомпенсированного влияния мощности ОТ, эти зависимости были построены для 4 достаточно узких диапазонов значений β — все они демонстрируют похожее поведение. Поведение зависимостей в области $R < 3''$ не связано с ветровыми вибрациями и определяется другими факторами. Можно заключить, что рассматриваемый эффект уменьшает число Штреля примерно до 0.35 при амплитуде $R \approx 8''$, однако, в силу малочисленности таких измерений они не

вливают на общую картину.

Однако, вследствие интерференции с эффектом мерцаний, достаточно независимых в одной и другой апертуре DIMM, следует ожидать увеличения мощности дифференциальных дрожаний вдоль направления вибраций — в нашем случае их трансверсальной компоненты.

Для получения независимой информации о собственно механических вибрациях инструмента вполне пригоден интеральный микроакселерометр типа ADXL203 фирмы Analog Device имеющий чувствительность лучше 1 мГл ($\sim 1 \text{ см/с}^2$). В типичных условиях применения прибора DIMM, такому ускорению соответствуют вибрации с амплитудой около $1 - 2''$.

8 Заключение

Полученные результаты анализа данных измерений с прибором MASS/DIMM на горе Шатджатмаз в период с октября 2007 по ноябрь 2009 г, подтверждают, что отбор измерений по критерию величины числа Штреля должен применяться с большой осторожностью, поскольку приводит к эффекту селекции, статистически занижающему значение атмосферной оптической турбулентности.

Однако, контроль состояния оптической системы необходим. Такой контроль с использованием оценок числа Штреля вполне возможен после учета влияния ОТ, но, конечно, не для отдельных кадров, поскольку на этот момент информации о текущей мощности ОТ принципиально не существует. Отбраковку мало-достоверных измерений можно производить после получения полной картины имеющейся ситуации. В любом случае, контроль не должен приводить к утере данных измерений.

Список литературы

- [1] Sarazin M., Roddier F., *Astron. Astrophys.* 227, 294, 1990
- [2] Tokovinin A., Kornilov V., *MNRAS*, **381**, 1179, 2007.
- [3] Tokovinin A., *PASP*, V.114, 1156, 2002
- [4] Wang L., Schöck M., Chanan G., Skidmore W., Blum R., Bustos E., Els S., Riddle R., Seguel J., Travouillon T., Vasquez J., Walker D., Gillett P., *Applied Optics*, V. 46, No. 25, p.6460, 2007
- [5] Fried D.L., *JOSA*, v.55, no.11, pp. 1427-1435, 1965
- [6] Fried D.L., *JOSA*, v.56, no.10, pp. 1372-1379, 1966