

ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ КАК КАНАЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В АДАПТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 538.566.551.511.6

М.С. Сарацин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСЛОВИЙ НАБЛЮДЕНИЯ В АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЯХ

Качество видения и сцинтилляции регистрировались одновременно идентичными приборами в течение нескольких ночей на двух астрономических обсерваториях в Чили: Лас Кампанас и Ла Сялла, расположенных вдоль направления преобладающих ветров в нескольких десятках километров друг от друга. Высокая корреляция сигналов показала, что турбулентность в атмосфере сохраняет свою структуру на больших расстояниях.

На основе этого свойства турбулентности может быть составлен краткосрочный (на несколько часов) прогноз условий наблюдения в наземных обсерваториях. Подобные прогнозы целесообразно учитывать в расписании работы современного наземного телескопа при проведении наблюдений по гибкой схеме.

Данная проблема изучается в Южно-Европейской обсерватории (ЮЕО) в качестве составной части программы развития Станции астрономической погоды (САП) для «Очень большого телескопа» (ОБН).

1. Станция астрономической погоды для «Очень большого телескопа»

СТАНЦИЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

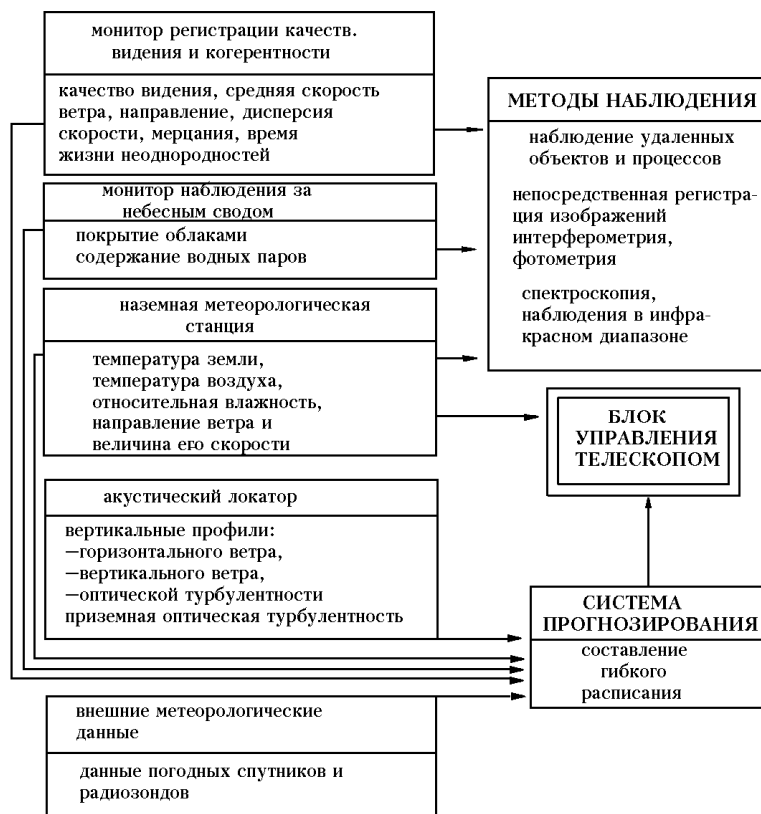


Рис. 1

Создаваемая станция астрономической погоды (рис. 1) — это будущий интерфейс между наблюдателем и наземным окружением обсерватории «Очень большого телескопа» (ОБТ). Задачей станции является улучшение качества наблюдений и гарантирование эффективного использования времени работы телескопа. Она должна снабжать удаленного от станции наблюдателя данными об окружающей среде и заменять его, конечно, не полностью, в процессе принятия решений. Станция выполняет

три основные функции, подробно описанные ниже, а именно: определение качества видения, моделирование, выработка рекомендаций.

а. Блок определения качества видения включает все местные метеорологические и атмосферные приборы наблюдения, связанные через интерфейс с компьютером. Линия связи с внешним миром также позволяет собирать данные от удаленных сенсоров, например, данные от спутников, радиозондов, профессиональные синоптические бюллетени и т.д.

б. Блок моделирования фильтрует поток входной информации и составляет достоверную картину текущего состояния окружающей среды. Этот блок выдает также кратковременные прогнозы в тех случаях, когда имеются модели их составления [1].

в. Интерфейс пользователя — это экспертная система с несколькими уровнями возможностей, которые в порядке, возрастания сложности располагаются в следующей последовательности:

— Передача информации о текущих условиях и данных из архивов обсерваторий, центра дистанционного управления в Гархине (Garching — город в Германии недалеко от Мюнхена, место расположения штаб-квартиры Южно-Европейской обсерватории) и архивов астрономических институтов государств-участников проекта.

— Выбор оптимальной для астрономических наблюдений инструментальной схемы с учетом ограничений, накладываемых окружающей средой на работу телескопа (ветровая нагрузка, местные условия видения и т.д.) и на оборудование (оптимальное время экспозиции при регистрации изображения и т.д.).

— Определение оптимального расписания наблюдений, т. е. получение возможности проводить наблюдения при оптимальных атмосферных условиях.

— Прямое управление некоторыми функциями телескопа — это тепловой контроль подкупольного пространства и каналов световых потоков на основе прогнозов температуры воздуха на следующую ночь (или час) [2].

2. Локальная пространственная корреляция качества видения и мерцаний

а. Предмет исследований. В рамках программы выбора места для ОБТ представляло интерес сравнение условий в возможных точках размещения телескопа и условий наблюдения в одной из уже функционирующих обсерваторий в Северном Чили (Ла Силла) [3]. Для этого была выбрана обсерватория Лас Кампанас, где подобный анализ проводился Институтом Карнеги для оценки возможности создания инструмента из класса восьмиметровых телескопов.

Благодаря доброй воле и помощи местных органов управления у нас была возможность проводить измерения в обеих точках одновременно на протяжении 14 ночей, с 27 ноября по 10 декабря 1989 года.

б. Описание пунктов наблюдения. Комплекс обсерватории в Лас Кампанас — это несколько вершин, расположенных вдоль высокого гребня, вытянутого приблизительно перпендикулярно к направлению преобладающих в этой местности северных ветров. Вершины значительно выше окружающего ландшафта. Точка, где мы проводили измерения, находилась в западной части комплекса, неподалеку от телескопа Дюпона, расположенного на высоте 2280 м.

Второй пункт был помещен на Серро Визкачас, в 7 км от восточной оконечности гребня Ла Силла. Гребень Визкачас — Ла Силла возвышается на 2400 м над уровнем моря. Тридцать километров весьма неровной поверхности, с горными гребнями почти такой же, как Визкачас — Ла Силла, высоты и каньонами глубиной до 1 км отделяют его от Лас Кампанас.

в. Описание оборудования. Кампания продолжалась 14 ночей, в течение которых измерения проводились в обеих точках одновременно с использованием различного оборудования.

Визкачас — Ла Силла. Дифференциальный измеритель дрожания изображения (ДИДИ 2), описанный в [4], был установлен на платформе высотой 5 м, расположенной на подветренном склоне. С помощью измерителя оценивалось качество видения приблизительно каждые две минуты, одновременно записывалась скорость ветра.

Акустический локатор (СОДАР) находился у основания смотровой башни, в десяти метрах ниже уровня расположения ДИДИ 2.

Лас Кампанас. Передвижной дифференциальный измеритель дрожания изображения (ДИДИ 3) работал на платформе высотой 2 м, размещенной на северном склоне вершины. В процессе измерений записывались скорость ветра и его направление на уровне подстилающей поверхности.

Каждый из приборов ДИДИ был снабжен измерителем индекса мерцаний, имеющим апертуру 3 см и полосу пропускания 1 кГц. Измерители наводились на одну и ту же звезду.

3. Анализ временной корреляции

а. Качество видения. Мера качества видения определяется как полная ширина изображения на половине максимума (*Full Width at Half Maximum*), полученного в фокусе телескопа при регистрации с длительной экспозицией. В условиях ограничений, вносимых атмосферой, разрешение (в радианах) записывается как:

$$FWHM = 0,976 \frac{\lambda}{r_0} = 5,345\lambda^{-1/5} [(\cos \gamma)^{-1} \int C_n^2(z) dz]^{3/5}, \quad (1)$$

C_n^2 — структурная функция атмосферы; r_0 — радиус Фрида; λ — длина волны. При $\lambda = 0,5$ мкм, в угловых секундах,

$$FWHM = 2,0 \cdot 10^7 \int C_n^2(z) dz]^{3/5}. \quad (2)$$

В теории атмосферной турбулентности часто используется предположение о том, что турбулентность движется по ветру без изменения своих статистических свойств (замороженная турбулентность). Поэтому определение среднего значения и дисперсии скоростей турбулентных слоев представляет интерес для оптимизации техники интерферометрических исследований [5].

Поскольку пункты, где нами были проведены измерения, располагались на расстоянии 27 км к северу один от другого, то полученные данные использовались для иллюстрации того, что турбулентность, регистрируемая в Лас Кампанас, перемещалась до Визкачас без особых изменений.

Из рис. 2 можно видеть, что взаимная нормированная временная корреляция в двух сериях регистрации видения имеет хорошо выраженный пик, соответствующий 50-минутной задержке измерений в Визкачас по отношению к Лас Кампанас. На этом же графике функции автокорреляции видения в точках проведения замеров показывают постоянную времени для атмосферы. Уширение пика взаимной корреляции соответствует дисперсии скорости ветра около среднего значения в 9 м/с. Величина пика взаимных корреляций соответствует 40% от произведения среднеквадратических значений качества видения в точках регистрации.

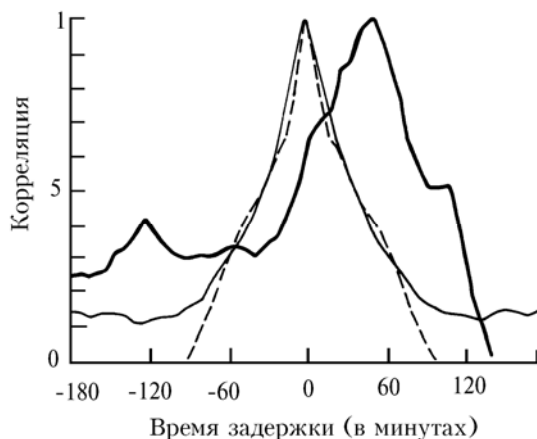


Рис. 2. Временная корреляция (интервал 500 с измерений качества видения: штриховая кривая — Визкачас, автокорреляция; бледная кривая — Кампанас, автокорреляция; жирная — взаимная корреляция

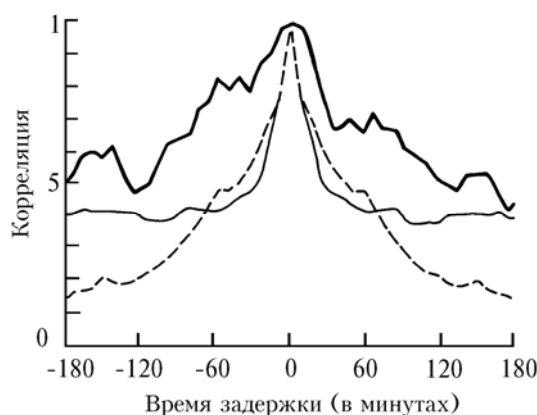


Рис. 3. Временная корреляция (интервал 500 с) измерений качества видения: штриховая кривая — Визкачас, автокорреляция; бледная кривая — Кампанас, автокорреляция; жирная — взаимная корреляция

б. Мерцания. Индекс мерцаний определяется как

$$\sigma_I^2 = 19,12\lambda^{-7/6} (\cos \gamma)^{-11/6} \int C_n^2(z) z^{5/6} dz, \quad (3)$$

где γ — зенитный угол. Измерения σ_I^2 осуществлялись через апертуру диаметром 3 см следующим образом:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle (I(t) - \langle I(t) \rangle)^2 \rangle}{\langle I(t) \rangle^2}. \quad (4)$$

Рассуждения, подобные приведенным выше, справедливы также по отношению к индексу мерцаний, связанному с высотными слоями. В географических широтах, на которых располагались наши обсерватории, высотные ветры обычно дуют с Запада на Восток, что также подтверждается кривыми корреляций на рис. 3, пики взаимных корреляций на которых находятся в точке ноль. То есть оба пункта измерений одновременно регистрируют одни и те же флуктуации. С другой стороны, это соответствует коэффициенту корреляций в 58% и означает, что мерцания связаны с локальной турбулентностью. Такая связь демонстрируется в следующем п. «в».

в. Акустический локатор как устройство диагностики и прогнозирования. Если турбулентность в пограничном слое имеет достаточно малую константу времени, акустический локатор можно использовать для предсказания параметров турбулентности в момент времени $t+20$ мин по результатам измерений, выполняемых во время t при условии, что известна трехмерная структура скорости ветра (см.рис. 4).

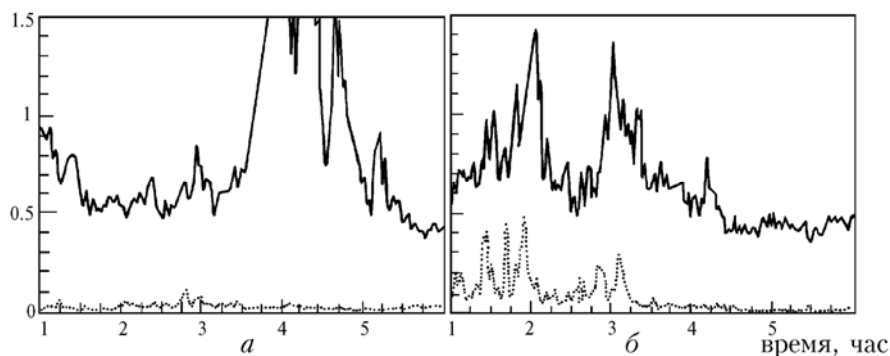


Рис. 4. Качество видения (сплошная кривая) и сцинтилляции (точки), регистрируемые в Визкачас (а) и в Лас Кампанас (б)

Акустический локатор, расположенный в Визкачас (обсерватория Ла Силла), использовался для проверки предположения о сохранении структуры турбулентности при ее переносе на большие расстояния. Однажды мы наблюдали значительное увеличение качества видения, которое можно было связать с локальными явлениями в турбулентности приземного слоя. Проверка соответствующих результатов, снимаемых с локатора, показала, что в 200 м над Визкачас появился очень плотный слой. Он постепенно опускался, затем исчез полностью. С этим высоким уровнем турбулентности могли быть связаны два последовательных резких пика разрешения, отмеченные в Лас Кампанас двумя часами ранее. В этом случае турбулентность должна была значительно усилиться над холмами при распространении от Лас Кампанас. Именно в таких исключительных условиях возможно получение большого объема информации при тщательном изучении мерцаний в точках проведения измерений (рис. 4, а и 4, б). Можно видеть, что над Лас Кампанас увеличение качества видения обусловлено сильным мерцанием. Это показывает, что турбулентность располагалась высоко над пунктом наблюдения (предположительно, высота составляла 1000 или 2000 м). Напротив, по показаниям локатора турбулентный слой, достигший Визкачас, располагался на небольшой высоте и поэтому не вызывал мерцаний.

Здесь мне хочется сказать несколько слов благодарности. Приводимые выше данные были собраны наблюдателями группы выбора размещения ОБТ: Р. Кастилло, Ж. Наваретто, А. Санчесом. Мы также в глубоком долгу перед персоналом обсерватории Лас Кампанас за их теплое гостеприимство. Особенно многим мы обязаны Е. Серда, оператору Карнеги-монитора.

4. Мерцания и ветер в верхних слоях атмосферы

а. Данные радиозондов. Несмотря на тот факт, что на уровне земли не существует прямой связи между скоростью ветра и термической турбулентностью, полагается, что пересечение высотного ветра и реактивного потока (скорость в котором может превосходить 60 м/с) увеличивает вероятность ее возникновения. Необходимую информацию для проверки предположения дает статистический анализ средней скорости ветра в диапазоне высот от 11 до 12 км.

Результаты наблюдений в верхних слоях были куплены нами у национального центра климатических данных (*National Climatic Data Center, Asheville, North Carolina, USA*). Эти данные сравнивались с результатами запусков метеорологических зондов, осуществляемых дважды в день в гг. Лима (Перу), Антофагаста и Квинтеро (Сантьяго), в период с 1958 до 1984 гг.

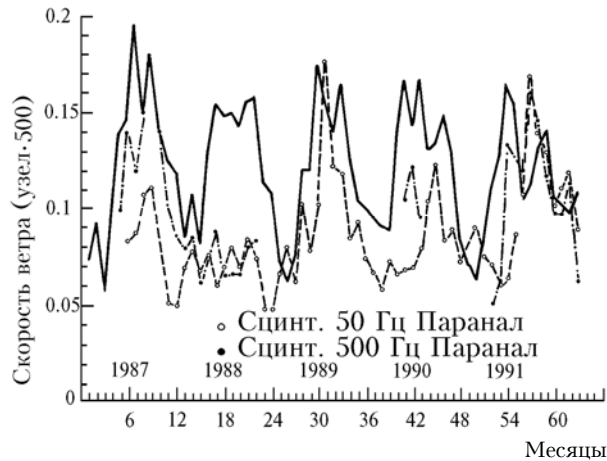


Рис. 5. Сопоставление средней за месяц скорости ветра в тропосфере над Антофагастой (сплошная кривая) и индекса мерцания в Серро Паранал (штриховая). Измерения проводились с января 1987 г.

б. Мерцания. Индекс мерцания низкочастотных (менее 50 Гц) сцинтилляции регистрировался ДИДИ в сериях из 200 экспозиций, каждая по 10 мс. Общий индекс мерцаний измерялся по той же звезде на частоте 500 Гц фотоумножителем, располагавшимся за апертурой диаметром 3 см, связанным с этой апертурой линзой Фабри. Полагалось, что сезонные вариации индекса мерцания могут быть показателем частоты возникновения турбулентности в верхних слоях атмосферы. В соответствии с попытками найти связь между скоростью ветра и структурой показателя преломления, осуществляемыми в настоящее время [6], на рис. 5 приведено соотношение между средней за месяц скоростью ветра (данные радиозондов, станция Чилийская Антофагаста) и индексом мерцания, измеренным в 120 км к югу (Паранал) в период 1987–1992 гг.

1. De Baas A.F., Sarazin M. The Temperature Structure Function for Complex Terrain; night Symposium on Turbulent Shear Flows, Munich, September 9–11, 1991.
2. Murtagh F., Sarazin M., Adorf H.M. Statistical Prediction of Astronomical Seeing and of Telescope Thermal Environment; Proc. ESO conf. on: Progress in Telescope and Instrumentation Technologies, Garching, April, 27–30, 1992. Ed. M.H. Ulrich.
3. VLT Site Selection Working Group; Final Report; November 14, 1990. VLT Report № 62.
4. Sarazin M., Roddier F. The E.S.O. Differential Image Motion Monitor; Astron. Astrophys. 227, 294–300 (1990).
5. Lopez B., Sarazin M. Optimum exposure times for interferometry; Proc. ECO- Conf. on High Resolution Imaging by Interferometry II; Garching, October 14–18, 1991.
6. Coulman C.E., Vernin J., Coqueugniot Y., Caccia J.L. //Appl. Opt. 1988. V. 27. № 1.

Южно-Европейская обсерватория (ЮЕО)
Германия, Мюнхен

Поступила в редакцию
29 сентября 1992 г.

M. S. Sarazin. Use of a Large Scale Spatial Coherence of Turbulent Patterns for Forecasting the Observing Conditions at Astronomical Observatories.

The quality of seeing and scintillations have been simultaneously recorded by identical instrumentation during several nights at two astronomic observatories in Chile (Las Campanas and La Silla) located along a prevailing wind some tens kilometers apart. High correlation between the signals observed has shown that the atmospheric turbulence keeps its structure at a long distance.

Based on the studied property of the atmospheric turbulence it is possible to make a short-term (of several hours) forecast of the observing conditions at ground based observatories. Such a forecast can be very useful when making a schedule for observations with a modern ground based telescope.

This problem is now being studied at the South European Observatory as a part of the program of development of the Astronomical Weather Station for the Very Large Telescope.