

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.373, 520.1+535.31+551.5+551.55

Об измерении структурной характеристики показателя преломления атмосферы пассивными оптическими методами

П.А. Коняев, Н.Н. Ботыгина, Л.В. Антошкин, О.Н. Емалеев, В.П. Лукин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 15.04.2015 г.

Рассмотрен пассивный оптический метод оценки уровня атмосферной турбулентности (структурной характеристики показателя преломления C_n^2 атмосферы) по дрожанию изображения. Предлагается использовать высокоскоростную цифровую видеокамеру и эффективные двумерные параллельные алгоритмы обработки изображений для измерения C_n^2 в реальном времени. Сравниваются результаты, полученные активным и пассивным оптическими, а также акустическим методами.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, структурная постоянная, дрожание изображения, радиальная мира; atmospheric turbulence, structure constant, image jitter, radial mire.

Введение

Активная методика оптического просвечивания трассы, основанная на дифференциальном (разностном) измерении дрожания изображения лазерного источника [1], хорошо зарекомендовала себя как способ оценки структурной постоянной показателя преломления C_n^2 атмосферы [2]. В то же время представляют несомненный интерес пассивные оптические методы, в которых используется изображение подсвечиваемых естественным светом объектов. Известно, например, применение для этих целей радиальной мины [3, 4]. Настоящая статья посвящена развитию пассивного метода оценивания C_n^2 путем измерения дрожания изображений (в том числе радиальных мин) с использованием высокоскоростной цифровой видеокамеры и эффективных двумерных параллельных алгоритмов обработки в реальном времени.

Оптическая схема эксперимента

Оптическая трасса с источником 2 в виде естественного объекта и приемником 1, формирующим и регистрирующим изображение объекта, проходила на высоте 2,5 м над подстилающей поверхностью со стороны приемного устройства и на высоте 2 м со стороны объекта (рис. 1). Протяженность оптической трассы 2–1 равнялась 476 м. Оптическая трасса дифференциального измерителя турбулентности (ДИТ) 4–3 имела протяженность 100 м

и проходила на высоте 1,65 м над подстилающей поверхностью. Расстояние между приемными устройствами 1 и 3 двух измерительных схем составляло 18 м.

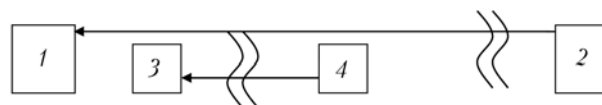


Рис. 1. Схема оптических трасс: 1 – приемное устройство, регистрирующее изображение объекта, подсвечиваемого естественным светом; 2 – объект, подсвечиваемый естественным светом; 3 – приемное устройство ДИТ; 4 – излучатель ДИТ

Излучатель и приемное устройство ДИТ выполнены в виде малогабаритных переносных конструкций. Чтобы исключить нагревание элементов конструкций прямым солнечным излучением и формирование дополнительных тепловых потоков на измерительных трассах, использовалось укрытие из светоотражающего материала. При измерении характеристик приземной атмосферной турбулентности, усредненных по оптической трассе протяженностью 476 м, вклад тепловых потоков от конструкций ДИТ пренебрежимо мал и не учитывался при вычислении C_n^2 .

Пассивный оптический метод. В качестве объектов, подсвечиваемых естественным светом, использовались радиальные мины диаметром 60 и 30 см с числом полос 48, 64, 96 (рис. 2) для измерений при различных уровнях турбулентности.

Для формирования изображения естественных объектов применялся телескоп с диаметром входной апертуры 15 см. Монохромные кадры размером 640 × 480 оцифровывались видеокамерой Allied GE-680 и по интерфейсу Gigabit Ethernet вводились

* Петр Алексеевич Коняев (peter@iao.ru); Нина Николаевна Ботыгина (bnn@iao.ru); Леонид Владимирович Антошкин (lant@iao.ru); Олег Назарович Емалеев (eon@iao.ru); Владимир Петрович Лукин (lukin@iao.ru).

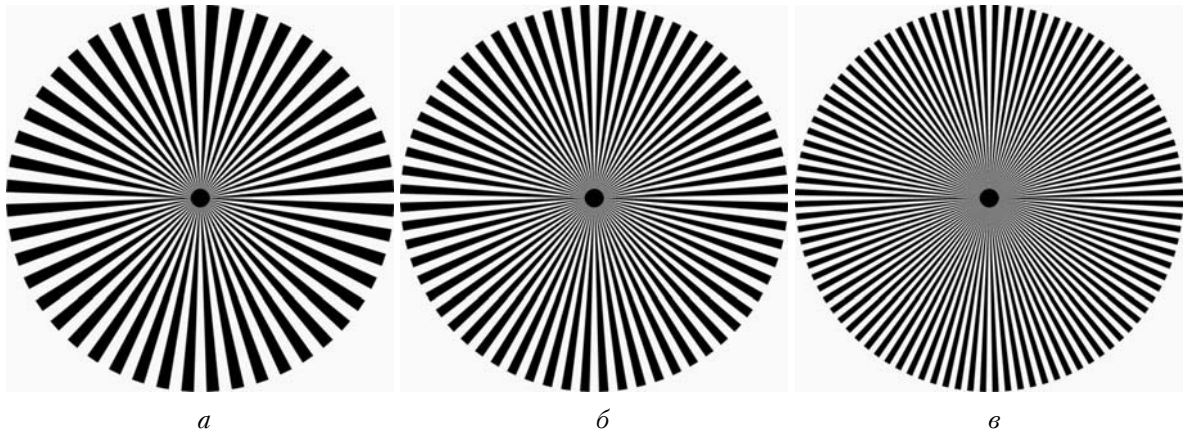


Рис. 2. Изображения радиальных мир с числом полос 48 (а), 64 (б), 96 (в)

в компьютер. Разрядность видеокамеры 12 бит, время экспозиции от 100 до 1000 мкс, частота кадров до 200 кадр/с. Измерение дисперсии флуктуаций углов прихода σ_γ^2 осуществлялось путем измерения смещений коротко-экспозиционного изображения фрагментов мира в реальном времени (рис. 3). В программном корреляционном датчике сдвига использовались быстродействующие двумерные параллельные алгоритмы из библиотек MKL и IPP Intel © Parallel Studio 2013.

Для оценки C_n^2 применялась формула [3]:

$$C_n^2 = \sigma_\gamma^2 D^{1/3} / (1,1L).$$

Здесь D – диаметр входной апертуры приемной оптической системы; L – длина оптической трассы. Одновременно вычислялся масштаб когерентности

r_0 (радиус Фрида) для длины волны $\lambda = 0,532$ мкм по формуле

$$r_0 = (0,423k^2 C_n^2 L)^{-3/5},$$

где $k = 2\pi/\lambda$.

Активный оптический метод. Для формирования сферической волны на выходе излучателя ДИТ (лазерный модуль с длиной волны излучения 0,532 мкм) была установлена диафрагма диаметром 0,31 мм. Изображения источника формировались двумя разнесенными вертикально на 164 мм суб-апертурами приемного устройства ДИТ диаметром 20 мм. Для оценки C_n^2 проводилось усреднение измерений по 60-секундной реализации. Изображения регистрировались с частотой 101–102 кадра/с при времени экспозиции кадра 30 мкс. Использование

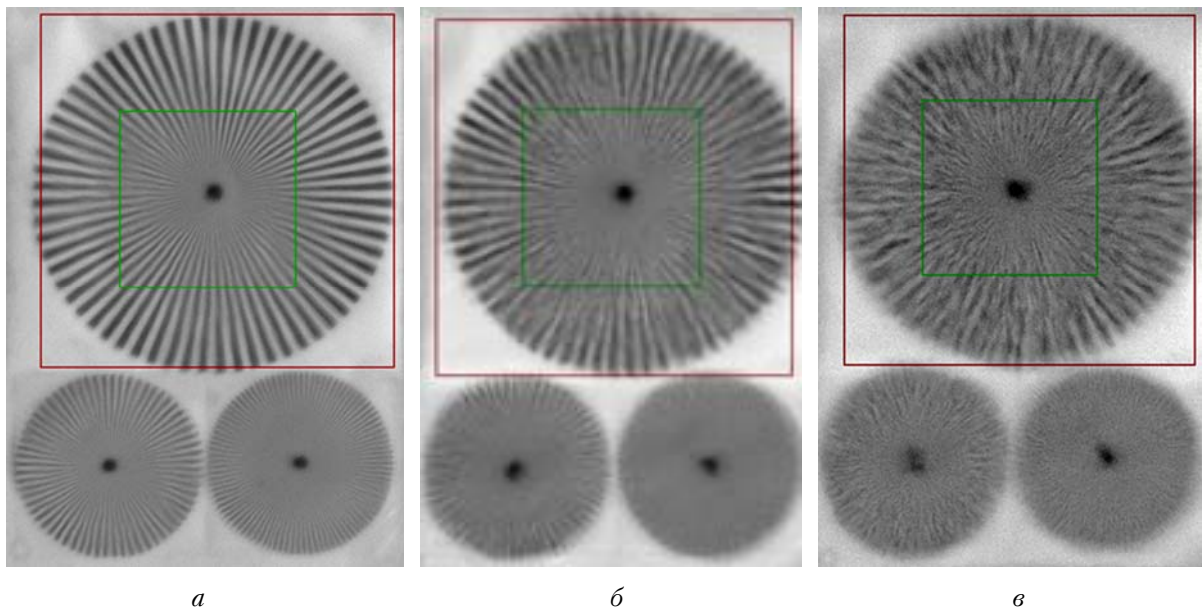


Рис. 3. Коротко-экспозиционные (250 мкс) изображения радиальной мира с числом полос 64 при различных уровнях турбулентности: $C_n^2 = 7,5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$, $r_0 = 1$ см, $D/r_0 = 15$ (а); $C_n^2 = 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, $r_0 = 0,79$ см, $D/r_0 = 19$ (б); $C_n^2 = 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$, $r_0 = 0,57$ см, $D/r_0 = 26$ (в). Квадратными рамками показаны области слежения корреляционного датчика сдвига в опорном (внешняя) и текущем (внутренняя) кадрах

алгоритма скользящего интервала усреднения позволяло измерять значения C_n^2 с шагом в 1 с на заданной продолжительности цикла измерений (как правило 10 мин).

Акустический метод. Для метеосопровождения экспериментов использовалась акустическая метеостанция «Метео-2», которая располагалась на высоте 1,84 м на расстоянии 26 м от оси оптической трассы ДИТ по горизонтали и на 24 м от излучателя ДИТ в направлении распространения оптического излучения. Для качественного сравнения с оптическими измерениями проводилась оценка C_n^2 из метеоизмерений. Методика и аппаратура были аналогичны тем, которые описаны в наших работах [2, 5]. Значения C_n^2 оценивались по 60-секундной реализации и выдавались с интервалом 60 с.

Результаты измерений

На рис. 4 приведен график одновременных измерений структурной постоянной показателя преломления воздуха C_n^2 двумя оптическими и акустическим методами. Данные измерений, полученные с помощью прибора ДИТ (активный оптический метод), следует рассматривать как наиболее достоверные. Шумовая ошибка измерения C_n^2 дифференциальным измерителем турбулентности на трассе 100 м не превышает $3,3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$. Прибор прошел всестороннюю проверку на многолетних испытаниях [1, 2, 5] и имеет большой динамический диапазон, равный $6,8 \cdot 10^{-16} - 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-2/3}$. Измерения возможны на трассах длиной до 200 м.

Данные измерений, полученные пассивным оптическим методом, следует рассматривать как менее

достоверные. Динамический диапазон измерений дрожания цифрового изображения ограничен снизу точностью измерения координат корреляционным датчиком сдвига и сверху – возможным сбоем работы коррелятора при большом расхождении изображений опорного и текущего кадров из-за сильной турбулентности. Шумовая ошибка измерения угла прихода в эксперименте составляла $4,86 \cdot 10^{-6}$ рад, что соответствует ошибке измерения C_n^2 на трассе 476 м, равной $2,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Измерения пассивным методом возможны на трассах длиной до 1000 м и более.

Из-за ограничений динамического диапазона пассивный метод в сравнении с активным дает заниженные результаты для максимальных значений C_n^2 и завышенные – для минимальных. Анализ данных измерений (см. рис. 4) показывает, что в половине случаев значения C_n^2 , измеренные активным и пассивным оптическими методами, отличаются между собой не более чем на 20%, за исключением областей с максимальными и минимальными значениями. Пассивный метод подвержен влиянию посторонних вибраций, вызванных, в частности, проездом автомобилей, что можно заметить на двух участках (см. рис. 4, 15:40 и 16:24), где измерения расходятся существенно.

Данные акустических измерений использовались нами для метеосопровождения. Измерения оптическими методами дают интегральное значение C_n^2 вдоль оптической трассы, в то время как акустический метод дает локальные оценки структурной постоянной температуры C_T^2 в точке стояния прибора, что может приводить к заниженным значениям C_n^2 (подробнее об этом в [2, 5]).

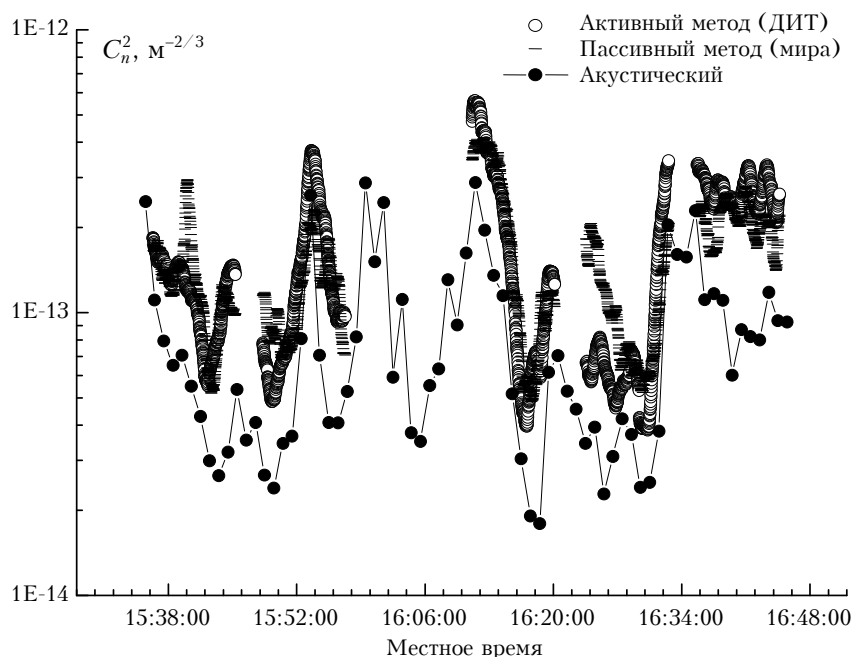


Рис. 4. Одновременные измерения структурной постоянной показателя преломления атмосферы двумя оптическими и акустическим методами

Заключение

Разработанный нами ранее активный оптический метод, основанный на разностном измерении дрожания изображения лазерного источника [1], прошел всесторонние испытания и зарекомендовал себя как надежный способ оценки структурной постоянной показателя преломления C_n^2 атмосферы [1, 2, 5]. Проведенные нами измерения пассивным оптическим методом (по дрожанию изображений подсвечиваемых естественным светом объектов) дают близкие значения C_n^2 и обладают при этом такими достоинствами, как оперативность, простота, дешевизна.

Предполагается в дальнейшем модифицировать пассивный метод по аналогии с дифференциальным (разностным) методом для устранения влияния посторонних вибраций, а также развивать его с целью применения на приземных трассах с естественными неподвижными объектами — здания, конструкции, деревья и т.д.

Авторы выражают признательность С.Л. Одинцову и В.А. Гладких за предоставленные материалы по метеосопровождению эксперимента.

1. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Лукин В.П. Трассовый дифференциальный измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109, № 4. С. 683–689.
2. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Антошкин Л.В., Коняев П.А., Гладких В.А., Мамышев В.П., Одинцов С.Л. Одновременные измерения структурной характеристики показателя преломления атмосферы оптическим и акустическим методами // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 852–857.
3. Андреев Г.А., Кузнецов В.М., Цейтлин В.Э. Размытие изображений в приземном слое атмосферы из-за флуктуаций угла прихода // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1971. Т. 7, № 9. С. 987–990.
4. Гурвич А.С., Старобинец И.А., Черемухин А.М. К методике определения структурной характеристики показателя преломления в атмосфере по изображениям радиальной миры // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1974. Т. 10, № 4. С. 413–416.
5. Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Гладких В.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Одинцов С.Л., Торгаев А.В. Сравнительные измерения уровня турбулентности атмосферы с помощью оптических и акустических измерителей // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 163–166.

P.A. Konyaev, N.N. Botygina, L.V. Antoshkin, O.N. Emaleev, V.P. Lukin. About measurement of the structure characteristic of atmospheric refractive index by passive optical methods.

Development of a passive optical method for estimating the atmospheric turbulence strength (refractive index structure constant C_n^2 of atmosphere) from image jitter is discussed. It is proposed that high rate digital camera and fast parallel 2-D image processing algorithms are used for real-time C_n^2 measurements. A comparison is made of the results obtained by passive and active optical and acoustic methods.