

МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЯ ИНТЕНСИВНОСТИ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

¹Макенова Н.А., ²Грекова Ю.Г., ¹Канев Ф.Ю.

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

г. Томск, Россия

makenova@iao.ru, grekova.yuliya11@mail.ru, mna@iao.ru

Представлена модель измерителя параметров атмосферной турбулентности. В численном эксперименте проведено сравнение точности дифференциальной и одноканальной методик регистрации структурной постоянной. Определена зависимость регистрируемых в модели параметров от характеристик атмосферных искажений. Показано, что структурная постоянная турбулентности также как и интегральные параметры пучка не определяют полностью условия распространения излучения.

В настоящей статье помещены результаты численных экспериментов, выполненных с использованием модели измерителя параметров турбулентности [1, 2, 3]. Исследования были проведены для одноканальной и двухканальной схем регистрации смещений энергетического центра пучка. При моделировании двухканальная оптическая схема прибора (рис. 1) строилась на основе данных статьи [1]. В модели после прохода слоя турбулентной атмосферы лазерный пучок попадал на непрозрачный экран с двумя субапертурами (на входную апертуру прибора). Субапертуры вырезали участки волнового фронта, которые собирающими линзами фокусировались в плоскость регистрации, где определялись смещения изображений. Основные параметры прибора: размеры линз – D , расстояние между их центрами – d , фокусное расстояние линз – l . В результате обработки полученных данных вычислялась дисперсия разности смещений σ_l^2 , позволяющая вычислить радиус Фрида пучка следующим образом [1]:

$$r_0 = \left[\frac{\sigma_l^2}{2\lambda^2 (0,157D^{-1/3} - 0,097d^{-1/3})} \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

и структурную постоянную турбулентности:

$$C_n^2 = \frac{\sigma_l^2}{1,411\pi^2 L (0,157D^{-1/3} - 0,097d^{-1/3})}. \quad (2)$$

В приведенных формулах λ – длина волны излучения, L – расстояние от источника до входной апертуры прибора, остальные параметры были введены выше.

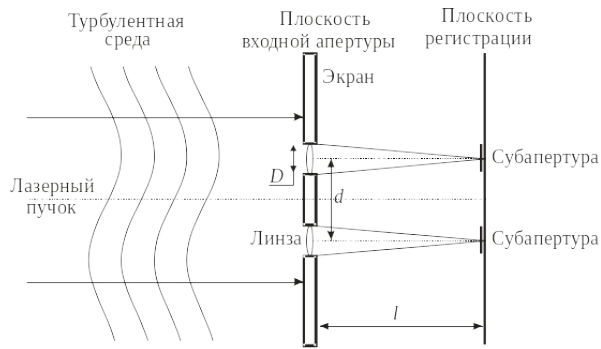


Рисунок 1 – Оптическая схема дифференциального измерителя интенсивности турбулентности

Авторы [1] предлагают также одноканальную модификацию оптической схемы. В этом случае в плоскости входной апертуры находится только одно отверстие, в котором располагается фокусирующая линза. Формула (2) при этом изменяется и принимает вид:

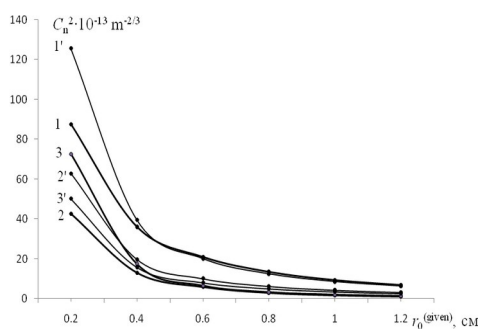
$$C_n^2 = \frac{\sigma_x^2}{1,094LD^{-1/3}}. \quad (3)$$

Здесь σ_x^2 – дисперсия смещения центра сфокусированного пучка вдоль одной из осей координатной системы. При заданной длине трассы и длине волны излучения через структурную постоянную можно вычислить радиус Фрида для пучка [4]:

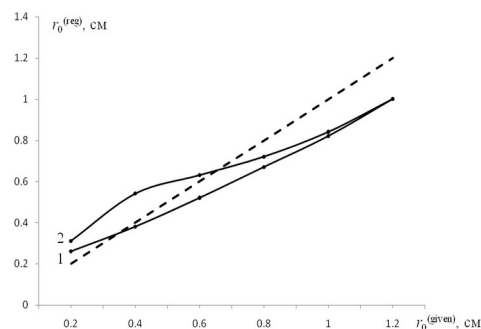
$$r_0 = 1,69(0,423k^2C_n^2L)^{-3/5}, \quad (4)$$

k – волновое число.

Численный эксперимент позволил не только варьировать параметры задачи в широком диапазоне, но и получать данные, недоступные в натурных исследованиях, в частности, в плоскости апертуры прибора вычислялись такие интегральные характеристики излучения, как критерий фокусировки, пропорциональны мощности, попадающей в пределы апертуры заданных размеров, смещение центра пучка и некоторые другие параметры. Кроме этого, возможным является проведение различных проверок точности. Структурная постоянная может быть вычислена не только в результате регистрации смещения пучка по формулам (2) или (3), но и определена из уравнения (4) при известном радиусе Фрида, который в построенном программном приложении является входным параметром. Данные полученные при моделировании двухканальной системы и вычисленные согласно (4) приводятся на рис. 2 (а), где C_n представлена как функция заданного радиуса Фрида $r_0^{(\text{given})}$ (входной параметр модели). На рис. 2 (б) аналогичная зависимость показана для $r_0^{(\text{reg})}$ (региструемый параметр), определенного в двухканальной и одноканальной схемах.



(а)

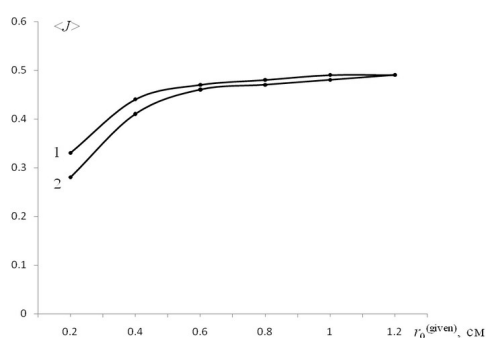


(б)

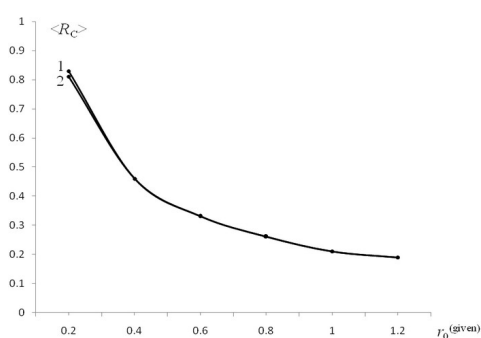
Рисунок 2 – Иллюстрация точности вычислений при регистрации структурной постоянной (а) и радиуса Фрида (б). На рис. 2 (а) кривые, отмеченные номерами со штрихами, получены по формуле (4), номерами без штрихов – являются результатом численного эксперимента. Длины трасс: 100 м (кривые 1 и 1'), 200 м (2 и 2') и 250 м (3 и 3'). На рис. 2 (б) кривая 1 получена для модели с одной апертурой, 2 – с двумя апертурами. Штриховая кривая показывает прямо пропорциональную зависимость. Длина трассы 200 м. Внутренний масштаб при получении обоих графиков $l_0 = 0.19$ мм.

Рис. 2 показывает, что даже в численном эксперименте невозможно добиться абсолютной точности регистрации характеристик турбулентности. Тем не менее, все тенденции, задаваемые изменением параметров задачи, на представленных графиках прослеживаются достаточно хорошо.

Рассмотрим, как при варьировании параметров турбулентности изменяются характеристики излучения. Средние значения критерия фокусировки и смещения центра тяжести пучка, представленные как функции интенсивности искажений, приводятся на рис. 3. При получении кривых также варьировался внутренний масштаб турбулентности.



(а)



(б)

Рисунок 3 – Зависимость от интенсивности турбулентности средних значений критерия фокусировки $\langle J \rangle$ и смещения энергетического центра пучка $\langle R_c \rangle$. Внутренний масштаб $l_0 = 0,19$ (кривая 1) и $l_0 = 9,52$ (кривая 2).

В целом полученные функции имеют ожидаемое поведение – при увеличении радиуса Фрида критерий увеличивается, а радиус пучка уменьшается, т.е. влияние искажающего воздействия среды снижается. Графики также показывают, что на интегральные характеристики практически не оказывает влияние внутренний масштаб, вариации смещения $\langle R_c \rangle$ совпадает полностью (рис. 3 (б)), а кривые, характеризующие критерий проходят очень близко (рис. 3 (а)). В тоже время, амплитудные распределения интенсивности излучения для различных внутренних масштабов отличаются значительно, особенно при высокой интенсивности турбулентности (рис. 4).

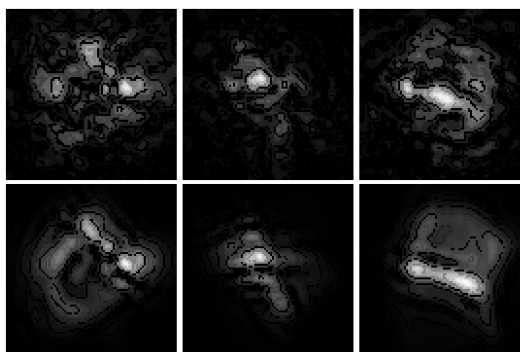


Рисунок 4 – Амплитудные распределение лазерного пучка, зафиксированные в различные моменты времени. Верхний ряд рисунков: $l_0 = 0,19$, нижний – $l_0 = 9,52$.

В целом можно заключить, что структурная постоянная, регистрируемая исследуемой оптической системой, также как и интегральные параметры пучка не характеризуют полностью условия распространения излучения. Для более полного представления о турбулентных искажениях необходимым является получение дополнительных данных.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ИОА СО РАН.

1. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Дифференциальный измеритель параметров оптической турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 11. С. 1219 – 1222.
2. Борзилов А.Г., Коняев П.А., Лукин В.П., Соин Е.Л. Измерения параметров атмосферы на протяженной трассе. II. Оптические измерения уровня турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 07. С. 557–562. DOI: 10.15372/AOO20230704.
3. Коняев П.А., Лукин В.П., Носов В.В., Носов Е.В., Соин Е.Л., Торгаев А.В. Сравнительные измерения параметров атмосферной турбулентности оптическими методами // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 11. С. 906–915. DOI: 10.15372/AOO20211111.
4. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 335 с.
5. Канев Ф.Ю., Лукин В.П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Издательство Института оптики атмосферы, 2005. 250 с.