

# ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ В ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Герасимова Л.О.<sup>1</sup>, Рейно В.В.<sup>1</sup>, Агафонцев М.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет, г. Томск, Россия

e-mail: [lilyan@iao.ru](mailto:lilyan@iao.ru), [reyno@iao.ru](mailto:reyno@iao.ru), [kim75mva@gmail.com](mailto:kim75mva@gmail.com)

В работе приведен алгоритм оценки атмосферной турбулентности с использованием специальной оптической миры в инфракрасном диапазоне длин волн. Приведено сравнение структурной функции показателя преломления по данным ультразвуковой метеостанции АМК-03 и данным, полученным в результате обработки изображений миры. Получено, что значения структурной функции показателя преломления, полученные по данным метеостанции АМК-03 и пассивным оптическим способом, по трассе отличаются на три порядка.

**Ключевые слова:** атмосферная турбулентность, конвективная турбулентность, радиальная мира, инфракрасная термография, обработка изображений.

## Введение.

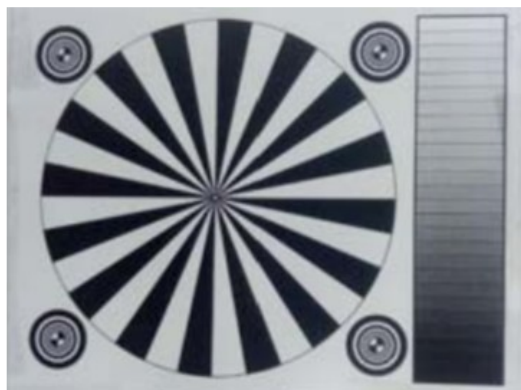
Атмосферная турбулентность значительно влияет на распространение звуковых, оптических и радио сигналов. Её интенсивность может меняться как из-за естественных факторов, таких как скорость ветра, температура, солнечная активность и др., так и в результате антропогенного воздействия (лесные пожары, работа авиации). Пилоты и авиадиспетчеры используют данные о турбулентности для корректировки маршрутов и высоты полета, что помогает избежать опасных ситуаций. Атмосферная турбулентность вносит значительные искажения при регистрации различных объектов на значительном удалении от наблюдателя. В связи с изменением климата и расширением деятельности человека в более холодные арктические широты точные прогнозы атмосферной турбулентности становятся все более актуальными. Таким образом возникает потребность в разработке методов и средств измерения атмосферной турбулентности. Способы определения структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$ , значения которого характеризуют уровень турбулентности в атмосфере, были известны давно. Для этих целей на протяжённых оптических трассах в видимом диапазоне длин волн используются радиальные миры, представляющие собой набор чёрных и белых секторов [1-3]. По размытию изображения центральной части миры из соотношения диаметров замутнённой области и собственно диаметра миры определяется значение величины контраста (частотно-контрастная характеристика). Применение для этих целей ИК-камер и специальной миры позволяет измерять значения турбулентности в ночное время (включая

полярную ночь), в условиях осадков и задымлённости атмосферы. Обработка изображений может вестись оператором визуально «на глаз» методом оценивания или с помощью оптических устройств, считывается и обрабатывается на компьютере, рассчитывается уровень турбулентности.

В данной работе рассмотрен вопрос применения оптического метода оценки атмосферной турбулентности с использованием радиальной миры в инфракрасном диапазоне один волн.

#### **Схема проведения эксперимента.**

Проведено экспериментальное исследование по оценке атмосферной турбулентности пассивным оптическим методом в ИК диапазоне длин волн. Измерения параметров турбулентности были проведены на Базовом экспериментальном комплексе (БЭК) ИОА СО РАН 20 сентября 2024 г. в период времени с 17:43 до 17:53. Длина оптической трассы составляла 100 м. В эксперименте, в качестве объекта наблюдения, применялась специальная радиальная мира, изготовленная для работы в диапазоне ИК длин волн  $7\div 14$  мкм (рисунок 1). Радиальная частотно-контрастная мира выполнена путём наклеивания на бумажную основу 16 секторов с чередованием, выполненных из алюминиевой фольги. Мира имела следующие геометрические размеры: круг, диаметром 1 м; всего 32 сектора (1 сектор =  $11^\circ 15$  минут), 16 из которых выполнены из алюминиевой фольги с коэффициентом излучения  $\varepsilon = 0.05$ , а другие 16 секторов с чередованием образуются из основы - подложки (тонкого картона) с коэффициентом излучения  $\varepsilon = 0.95$ . Особенностью такой миры является большая разница в коэффициентах излучения поверхности картона (0,95) и алюминиевой фольги (0,05), что и создаёт необходимый тепловой контраст для наблюдения. При измерениях в видимой области широкое распространение получили линейные полосовые миры с пошаговым изменением контраста от черного до белого цвета. Однако их создание для инфракрасного диапазона является сложной задачей. В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась ИК-камера FORTUNA 50L3 с рабочим диапазоном длин волн  $7\div 14$  мкм. Размер матрицы составлял  $340\times 280$  пикселей, а температурная чувствительность не превышала 50 мК. Так как дистанция наблюдения составляла 100 м, то при исследовании был использован узкоугольный объектив с входным диаметром 50 мм и с полем зрения  $7,4^\circ\times 5,6^\circ$ . При натуральных размерах миры  $1\times 1$  м, ее ширина в кадре составляет 37 мм, при общей ширине кадра 270 мм. Запись видеопотока с ИК-камеры проводилась с помощью видеорекордера с программным обеспечением «honestech VHS to DVD 3.0 se». Частота записи видеопотока составляла 25 кадров в секунду.



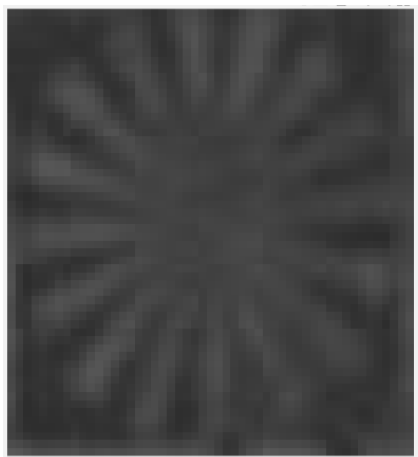
а



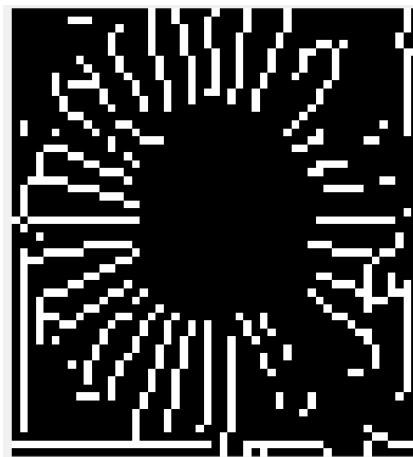
б

Рисунок 1 – Радиальная мира для видимого диапазона (а), для инфракрасного диапазона (б).

Видеофайлы имели формат Windows Media Video «.wmv». Обработка видеофайлов осуществлялась в несколько этапов, с применением пакета прикладных программ MatLab. Этапы обработки видеофайлов были следующими: чтение видеофайла; выделение на каждом кадре области, соответствующей мире; покадровое сохранение выделенной области в формате изображения «.jpg». Далее производилось усреднение изображений по набору из 100 изображений (рисунок 2а). Затем усредненные изображения переводились в бинарный формат и производилась оценка геометрических размеров центральной «размытой» области кадра (рисунок 2б).



а



б

Рисунок 2 – Усредненное по 100 кадрам изображение мира (а) и бинарный вид того же кадра (б).

Путем последовательной обработки кадров (рисунок 2б) была произведена оценка геометрических размеров центрального пятна. Зная физический размер одного пикселя было получено, что радиус пятна имел приблизительный размер от 9 до 11 пикселей, это соответствует 180 мм и 220 мм соответственно. Далее, используя формулу [3, 4]

$$C_n^2 = (r_0^{-5/3}) / (0.423 k^2 L)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число, рассчитанное для длины волны  $\lambda = 10$  мкм,  $L$  – длина оптической трассы, м;  $r_0$  – масштаб когерентности (радиус Фрида), м; были получены оценки величины структурной функции показателя преломления оптическим методом с использованием миры. В результате расчетов оценка величины структурной функции показателя преломления для диаметра 180 мм составила  $1.63 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  и  $1.44 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  для диаметра 220 мм. Оценка показателя преломления, полученная при использовании ультразвуковой метеостанции на разных высотах, составила: высота 3 м –  $1.74 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ ; высота 10 м –  $4.35 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ . Различие получившихся значений составляет около трех порядков.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что использование радиальной миры для исследования атмосферной турбулентности в инфракрасном диапазоне длин волн имеет место быть, однако такой подход требует дополнительного уточнения в методиках как обработки исходных изображений, так и в теории, на основе которой строятся расчетные формулы.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН). Исследования проведены с применением оборудования ЦКП «Атмосфера».

### Список литературы

1. Развитие стенда адаптивной оптической системы для стабилизации и коррекции турбулентных искажений лазерного излучения / А. А. Селин, Л. В. Антошкин, В. В. Лавринов, Л. Н. Лавринова // Pulsed lasers and laser applications : Materials of the 16th International Conference AMPL-2023, Tomsk, 10–15 сентября 2023 года. – Tomsk: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2023. – С. 62-65.
2. Коняев, П. А. Обработка цифровых изображений для коррекции атмосферных турбулентных искажений в реальном времени // Оптика атмосферы и океана. – 2021. – Т. 34, № 7(390). – С. 564-568. – DOI 10.15372/AOO20210712.

3. Коняев П.А., Ботыгина Н.Н., Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П. Об измерении структурной характеристики показателя преломления атмосферы пассивными оптическими методами // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 8. – С. 738-741. – DOI 10.15372/AOO20150810.

4. 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.