

ТРАССОВЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СТРУКТУРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Маракасов Д.А.¹, Афанасьев А.Л.¹

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

e-mail: mda@iao.ru, afanasiev@iao.ru

Разработан экспериментальный образец видеоцифрового измерительного комплекса для оценки интенсивности турбулентности. Создано программное обеспечение, позволяющее существенно уменьшить влияние вибрационных помех при оптических измерениях на протяженных трассах. В состав измерительного комплекса интегрирована ультразвуковая метеостанция АМК-03. Проведены совместные измерения структурной характеристики турбулентных флуктуаций показателя преломления видеоцифровым и акустическим методом. Зафиксирована высокая корреляция интегральных по трассе оптических и локальных акустических оценок интенсивности турбулентности. Результаты исследования подтверждают достоверность оценок, полученных видеоцифровым методом и перспективность использования подобных измерителей во многих практических приложениях.

Влияние вибраций приемного устройства, в особенности при наличии регулярных внешних воздействий, например, в случае его расположения вблизи автомобильных трасс, железнодорожных путей, взлетно-посадочной полосы аэродрома, может, как показал анализ результатов измерений в аэропорту Толмачево [1], значительно завышать оценку структурной характеристики показателя преломления видеоцифрового измерителя (ВЦИ). Для компенсации вибрационной помехи был разработан алгоритм оценки структурной характеристики и скорости поперечного ветра из разности смещений изображений пары удаленных объектов, аналогичный предложенному в [2], но не использующий отнесённый на другой конец трассы лазерный источник. Изображения (не обязательно схожей формы) должны представлять собой ограниченную область, контрастную к фону. Область фона должна покрывать внешние границы обрабатываемого участка изображения. Алгоритм обработки изображений для оценивания структурной характеристики состоит в следующем:

- регистрируется пакет из N последовательных кадров;
- в каждом кадре вырезаются 2 блока в наперед заданной позиции, соответствующей положению изображений объектов в кадре, осредненном по пакету;
- в каждом блоке определяется положение изображения объекта как координата экстремума усредненной строки/столбца, в результате формируются две временных последовательности смещений $\mathbf{R}_j^{1,2}, j = 1 \dots N$;

- вычисляются дисперсии $\sigma_{\parallel}^2, \sigma_{\perp}^2$ продольной $X_j^1 - X_j^2$ и поперечной $Y_j^1 - Y_j^2$ к направлению разноса изображений компонент разности координат изображений объектов;
- вычисляется оценка структурной характеристики по пакету по формуле $C_n^2 = \alpha_{\parallel} \sigma_{\parallel}^2 + \alpha_{\perp} \sigma_{\perp}^2$, где $\alpha_{\parallel}, \alpha_{\perp}$ – коэффициенты, зависящие от геометрии измерений (радиус объектива, угловой разнос объектов наблюдения) и показателя степенной модели турбулентности, который оценивается по акустических измерителей;
- полученная оценка усредняется по наперед заданному временному интервалу (5 - 20 мин).

Преимущества предложенного алгоритма следующие:

- значительное снижение чувствительности к вибрациям.

Сдвиги изображения как целого уже не влияют на разностную компоненту. Зависимость остается только от поворотов приемного устройства вокруг оптической оси, но такие возмущения, обычно, значительно слабее. Влияние синхронной помехи будет возникать лишь при выходе контрастного участка изображения за пределы обрабатываемого блока;

- отсутствие рассинхронизации каналов;
- возможность использования объектов разного размера и формы;
- возможность существенного (до ~ 1 кГц) повышения частоты съемки, поскольку обработка изображений происходит после регистрации пакета;

Отметим также, что при использовании данного алгоритма значительно снижается влияние крупномасштабных неоднородностей, поскольку их основной вклад в смещение изображений соответствует синхронной помехе. Размеры неоднородностей, вносящих основной вклад в разностную компоненту смещений ограничены сверху разнесом объектов наблюдения и снизу размерами объектов и приемной апертурой. При измерениях на небольших высотах это позволяет снизить влияние анизотропных неоднородностей больших масштабов и пользоваться для оценки результатов изотропной степенной моделью турбулентности.

В ходе долговременных натурных экспериментов проведены тестовые испытания созданного видеоцифрового измерительного комплекса. Проведены измерения структурной постоянной флуктуаций показателя преломления C_n^2 , характеризующей интенсивность турбулентности на трассах различной длины. На Рис. 2 представлены результаты оценки C_n^2 на дистанции 500 м в течение 8-и суток. Кривой 3 обозначены оценки, производимые стандартным ПО метеостанции АМК-03 на основе Колмогоровской модели структурной функции флуктуаций температуры в точке минимального разноса. Оценки, полученные с

использованием расчета структурных функций и спектров временных рядов акустических данных в инерционном интервале и их степенной аппроксимации, представлены кривой 1. Они используют скорректированные показатели степени турбулентной модели в соответствии с реальными данными измерений. Кривой 2 обозначены оптические оценки C_n^2 по измерениям ВЦИ.

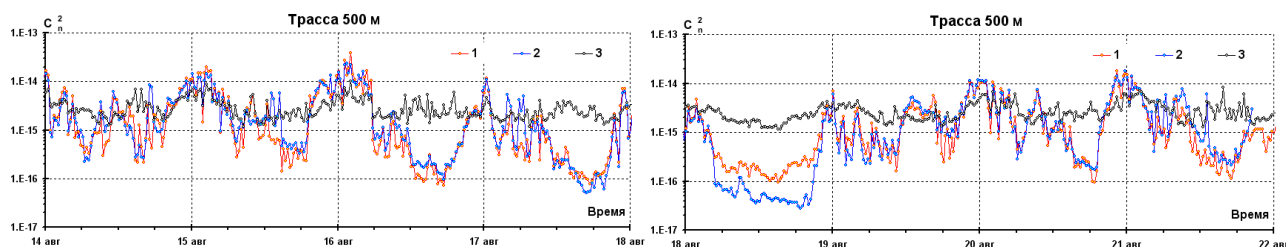


Рис. 1. Сопоставление результатов измерений структурной характеристики показателя преломления на трассе 500 м. 1 – скорректированные оценки по степенной аппроксимации структурной функции флуктуаций температуры, измеряемых АМК, 2 - оптические оценки из измерений ВЦИ, 3 - оценки по алгоритму АМК без коррекции.

Видно, что несмотря на естественные различия между интегральными по трассе и локальными измерениями, оценки ВЦИ (кривая 2) хорошо согласуются с акустическими, использующими реальные показатели степени турбулентной модели (кривая 1). Коэффициент корреляции $b = 0.91$. В то же время оценки, производимые стандартным ПО метеостанции на основе Колмогоровской модели (кривая 3) существенно отличаются от видеоцифровых.

На Рис. 3 представлены результаты оценки C_n^2 на дистанции 1100 м.

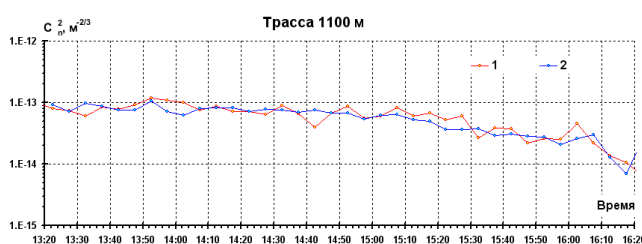


Рис. 2. Сопоставление результатов измерений структурной характеристики показателя преломления на трассе 1100 м. 1 – оценки по структурной функции флуктуаций температуры, измеряемых АМК, 2 - оптические оценки из измерений ВЦИ.

Здесь также наблюдается хорошее соответствие оптических и скорректированных акустических оценок. На протяжении нескольких часов измерений данные полученные акустическим и оптическим методом удовлетворительно согласуются между собой. Коэффициент корреляции $b = 0.88$.

Заключение.

Разработан экспериментальный образец видеоцифрового измерительного комплекса для оценки интенсивности турбулентности на протяженных трассах, включающий в себя оптический детектор дрожаний изображений удаленных объектов и акустический метеокomплекс, предназначенный для оценки показателя турбулентного спектра температуры воздуха.

Для осуществления возможности верификации видеоцифровых измерений предложена модификация методов оценки параметров атмосферной турбулентности. Использован подход с использованием степенной модели с показателем, рассчитываемым в процессе обработки временных рядов пульсаций метеопараметров [3]. При сравнении результатов оптических и акустических измерений проводились корректировки оценок с учетом реальных турбулентных спектров неколмогоровского вида. Показано, что при использовании предложенной методики удастся провести корректное сопоставление оптических и акустических измерений.

Испытания видеоцифрового измерительного комплекса проведены на протяженных атмосферных трассах. В ходе экспериментов получено хорошее соответствие получаемых оптических и акустических оценок C_n^2 , как по динамике изменений, так и по абсолютной величине. Несмотря на естественную разницу между локальными и интегральными измерениями, обусловленную пространственными вариациями интенсивности турбулентности, наблюдается заметная корреляция полученных оценок структурной характеристики. Стабильная непрерывная работа созданного пассивного оптического измерителя в течение нескольких суток при различных погодных условиях подтверждает надежность используемого дистанционного оптического метода оценки турбулентного состояния атмосферы и достоверность получаемых данных.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А. Мониторинг ветровой обстановки и индикация спутных следов в районе взлетно-посадочной полосы аэропорта пассивным оптическим методом. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 05. С. 365–370. DOI: 10.15372/AOO20190504

2. Антошкин Л.В., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Лавринова Л.Н., Лукин В.П. Дифференциальный оптический измеритель параметров атмосферной турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 11. С. 1219-1223.

3. Маракасов Д.А., Афанасьев А.Л., Гордеев Е.В. Оценка параметров инерционного интервала турбулентного спектра температуры из временных рядов данных акустических метеостанций // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 03. С. 254–261. DOI: 10.15372/AOO20240309.