

# ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА И ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПО ДРОЖАНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Афанасьев А.Л.<sup>1</sup>, Банах В.А.<sup>1</sup>, Маракасов Д.А.<sup>1</sup>

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

e-mail: [afanasiev@iao.ru](mailto:afanasiev@iao.ru), [banakh@iao.ru](mailto:banakh@iao.ru), [mda@iao.ru](mailto:mda@iao.ru)

Проведены одновременные измерения вектора горизонтальной скорости ветра и интенсивности турбулентности в атмосфере пассивным оптическим методом, основанным на регистрации оптических изображений удаленных объектов наблюдения. С использованием алгоритма разностной компенсации синхронной помехи удалось в значительной степени устранить негативное влияние паразитных механических микровибраций приемных объективов и улучшить ветровые оценки. Сравнение с данными акустических анемометров показало, что наряду с естественной разницей между локальными и интегральными измерениями, обусловленной пространственными вариациями, наблюдается высокая корреляция значений скорости ветра и структурной характеристики полученных из оптических и акустических измерений.

Технология пассивных (безизлучательных) видеоцифровых измерений скорости ветра и интенсивности турбулентности не требует использования каких-либо искусственных источников излучения, обладает дистанционностью, оперативностью, дешевизной и скрытностью использования и может найти применение в авиации для измерений бокового ветра на ВВП, в метеорологии, в системах мониторинга ветровой обстановки в районах природных и техногенных чрезвычайных ситуаций, при прогнозировании переноса загрязняющих примесей, в военных технологиях для формирования ветровой поправки к прицеливанию [1-4].

Специальный эксперимент по одновременному определению вектора скорости горизонтального ветра и интенсивности турбулентности, характеризуемой структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления  $C_n^2$ , проводился в сентябре 2022 года на полигоне БЭК ИОА. Измерения компонент скорости ветра осуществлялись с использованием двух независимых видеоцифровых измерителей (ВЦИ) [3], на двух взаимно пересекающихся под некоторым углом трассах. Схема эксперимента представлена на Рис. 1.

Трасса 1 (продольная): длина – 60 м; азимут 135°; мишень – черные метки на белом фоне, разнесенные горизонтально на 11 см; приемное устройство – телескоп MEADE LX65.6" ACF, видеокамера Basler acA720-520um. Трасса 2 (поперечная): длина – 60 м; азимут 45°; мишень – черные метки на белом фоне, разнесенные горизонтально на 9.5 см; приемное устройство – объектив МТО-100, видеокамера Basler acA720-520um.



Рисунок 1 — Схема измерений.

Независимый контроль скорости ветра осуществлялся двумя акустическими метеостанциями: Метео 1 (АМК-03) на крыше центрального КУНГа на высоте 5 м и Метео 2 примерно в центре измерительной площадки на высоте 1.5 м.

Оценка перпендикулярных к направлениям наблюдения компонент средней скорости ветра  $V_{\perp 1}$  и  $V_{\perp 2}$  из статистики случайных смещений оптического изображения осуществлялась с использованием монокулярной схемы измерений, когда в изображении каждого удаленного объекта наблюдения, сформированного одним приемным объективом на матрице цифровой видеокамеры, выделяются два сегмента, соответствующие двум разнесённым по горизонтали на расстояние  $\rho_s$  областям объекта, и вычисляется взаимная пространственно-временная корреляционная функция

$$B(\rho_s, \tau) = \langle \rho_{c1}(r, t) \rho_{c2}(r + \rho_s, t + \tau) \rangle \quad (1)$$

между временными рядами координат сегментов  $\rho_{c1}$  и  $\rho_{c2}$ .

Средняя скорость поперечного ветра рассчитывалась для каждого из двух направлений на выбранные объекты наблюдения по формуле

$$V_{\perp, i} = \frac{1}{2} \frac{\rho_s}{\tau_{\max, i}}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

где  $\tau_{\max, i}$  - задержка положения максимума корреляционной функции (1).

Регистрация оптических изображений двух объектов наблюдения, с азимутами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , позволяет оценивать по формуле (2) перпендикулярные к линиям визирования компоненты средней скорости ветра  $V_{\perp,1}$ , и  $V_{\perp,2}$  и рассчитывать по ним направление

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{V_{\perp,2} \cos \varphi_1 - V_{\perp,1} \cos \varphi_2}{V_{\perp,1} \sin \varphi_2 - V_{\perp,2} \sin \varphi_1} \right), \text{ где} \quad (3)$$

$$\varphi_i = \alpha_i + \pi / 2, \quad \text{при } V_{\perp,i} \geq 0$$

$$\varphi_i = \alpha_i + 3\pi / 2, \quad \text{при } V_{\perp,i} < 0$$

и среднюю скорость горизонтального ветра

$$V = V_{\perp,1} / \cos(\varphi - \varphi_1) = V_{\perp,2} / \cos(\varphi_2 - \varphi) \quad (4)$$

Для одновременной оценки интенсивности турбулентности, характеризуемой структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления  $C_n^2$  и устранения при этом негативного вклада относительных смещений объекта наблюдения и приемной системы в погрешность определения параметров турбулентности, для каждого из направлений наблюдения вычисляется разность  $\delta_\rho = \rho_{c1} - \rho_{c2}$  и ее дисперсия  $\sigma_\delta^2$ . Структурная характеристика для каждого из направлений рассчитывается с использованием  $\sigma_\delta^2$  по формуле

$$C_n^2 = A \frac{R^{1/3}}{F^2 L} \sigma_\delta^2, \quad (5)$$

где  $R$  - радиус,  $F$  - фокусное расстояние объектива,  $L$  - расстояние до объекта наблюдения,  $A$  - коэффициент, зависящий от отношения  $\rho_s/R$ .

На Рис. 2 показан пример сопоставления оценок а) скорости, б) направления горизонтального ветра и в) интенсивности турбулентности, полученных в эксперименте из одновременных оптических и акустических измерений. Полученные оценки близки и по значениям и по динамике изменений. Несмотря на естественную разницу между локальными акустическими и пространственно осредненными по трассе оптическими данными, обусловленную пространственными вариациями измеряемых величин, наблюдается заметная корреляция полученных значений скорости ветра и структурной характеристики  $C_n^2$  с данными независимых измерений. Коэффициент корреляции составляет 0,6 - 0,8. Такие значения для коэффициентов корреляции являются типичными для проведенных сравнительных измерений, что подтверждает хорошее совпадение полученных оценок.

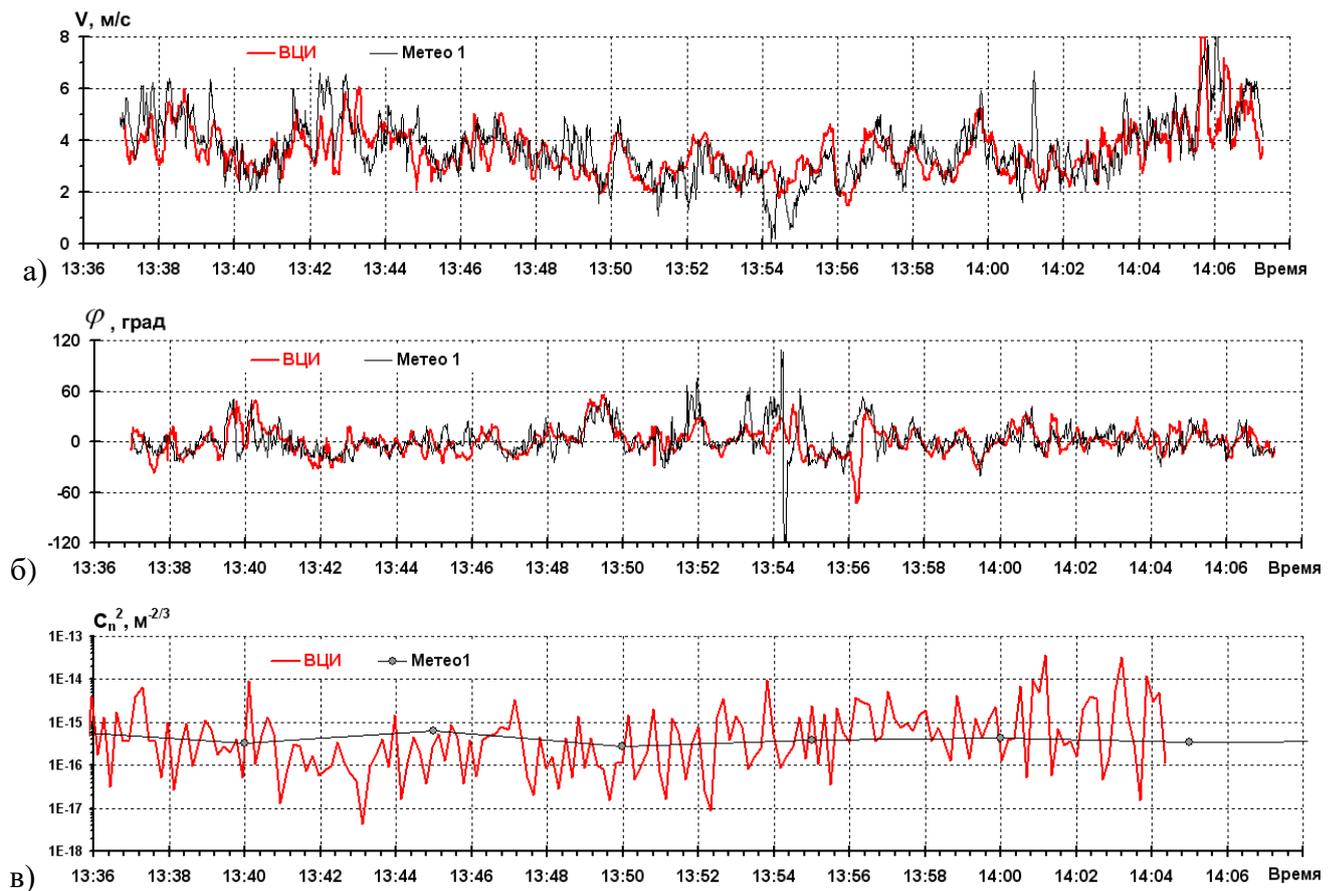


Рисунок 2 — Пример сопоставления оценок а) скорости, б) направления горизонтального ветра и в) интенсивности турбулентности из оптических и акустических измерений.

Полученные результаты в целом подтверждают достоверность оценок, полученных методом пассивных оптических измерений и перспективность использования подобных измерителей во многих практических приложениях.

Работа выполнена по госзаданию ИОА СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

1. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Гордеев Е.В., Маракасов Д.А., Разенков И.А., Ростов А.П. Пассивный оптический измеритель бокового ветра // Актуальные проблемы радиофизики: VII Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 18-22 сентября 2017 г. Сборник трудов. – Томск: STT, 2017- 214с. ISBN 978-5-93629-606-2. С. 123-126.

2. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А., Аксенов В.А., Шишкин Е.В., Пазий Ю.В. Формирование поправок к прицеливанию с помощью пассивного оптического измерителя скорости поперечного ветра. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 05. С. 355–363. DOI: 10.15372/AOO20180504.

3. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А. Две модификации видеодигитального измерителя скорости ветра // Аэрозоли Сибири. XXVI Рабочая группа: Тезисы докладов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2019. С.107.

4. Банах В.А., Маракасов Д.А., Афанасьев А.Л. Дистанционный способ измерения средней скорости ветра // Патент на изобретение № 2823690 от 29 июля 2024 г.