

Сравнительные оценки скорости поперечного ветра из оптических и акустических измерений в приземном слое атмосферы

А.Л. Афанасьев, В.А. Банах, Д.А. Маракасов*

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

Поступила в редакцию 20.02.2017 г.

Реализован пассивный оптический метод измерения интегральной скорости поперечного ветра на атмосферной трассе. Оценки скорости производятся на основе корреляционной методики по измерениям флуктуаций энергетических центров тяжести выделенных участков изображений топографических объектов в условиях естественного дневного освещения. Представлены результаты испытаний макета измерителя, построенного на указанном принципе. Сопоставляются ветровые данные, полученные с помощью пассивных оптических измерений и акустической метеостанции. Проводится оценка оптимального периода накопления взаимной корреляционной функции для осуществления устойчивых измерений в реальном времени.

Ключевые слова: некогерентный источник, корреляция изображений, интегральная скорость ветра, пассивный оптический измеритель, акустический анемометр, турбулентность; non-coherent source, image correlation, path-averaged wind velocity, passive optical measurer, acoustic anemometer, turbulence.

Введение

Известные оптические методы оценки поперечного к заданному направлению вектора скорости ветра предполагают наличие источника просвечивающего оптического излучения, т.е. основаны на активных методах зондирования [1–6]. Однако широкого применения оптические измерения ветра на основе методов лазерного просвечивания не нашли. В первую очередь это объясняется физическими и техническими ограничениями, присущими существующим методам определения ветра по флуктуациям интенсивности просвечивающего излучения, например ограничениями на длину оптической трассы, в пределах которой должны реализовываться условия слабых оптических флуктуаций. Проведение трассовых измерений также требует размещения лазерного источника и оптического приемника на противоположных концах трассы и выполнения операций их взаимного наведения, что снижает оперативность измерений и применимость метода во многих практических приложениях.

Для дистанционного измерения ветра и параметров ветровой турбулентности широкое распространение получили когерентные доплеровские ветровые лидары [7–9]. Но они дороги и для оценивания вектора скорости ветра требуют специальным образом организованного сканирования зондирующим пучком.

Пассивные оптические методы измерения ветра [10–12] выгодно отличаются от активных отсутствием искусственно создаваемого зондирующего излучения, следствием чего становится упрощение и удешевление процедуры измерений. Пассивные оптические измерения позволяют оценивать интегральный поперечный к трассе (боковой) ветер, а также, как и лазерное просвечивание [13, 14], допускают возможность получения профиля поперечного ветра в направлении визирования. В [15–19] представлен пассивный метод зондирования, основанный на корреляционном анализе видеоизображений объектов, наблюдаемых при естественном освещении. Однако в литературе нет убедительных примеров экспериментальной демонстрации возможностей пассивных оптических методов для измерения поперечного ветра в атмосфере в реальном времени.

В данной статье представлены методика измерений и результаты испытаний макета пассивного оптического измерителя скорости поперечного ветра (ПОИСПВ), реализующего метод зондирования, основанный на корреляционном анализе флуктуаций энергетических центров тяжести выделенных участков видеоизображений топографических объектов, наблюдаемых в естественном свете. Проводится оценка оптимального времени накопления корреляционной функции рядов смещений изображений, достаточного для формирования устойчивого максимума корреляции и определения скорости ветра по его временной задержке на базе пространственного разноса источников либо приемных объективов. Сопоставляются временные ряды оценок скорости, по-

* Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru).

лученные с помощью макета пассивного оптического измерителя, с данными акустической метеостанции АМК-03, расположенной на оптической трассе.

1. Методика измерений

Первичной измеряемой величиной является временная задержка в максимуме взаимной корреляционной функции (ВКФ) смещений координат энергетических центров тяжести (ЭЦТ) бинокулярных видеоизображений. В работе [18] получено выражение для взаимной корреляционной функции

$$K(\rho_s, \rho_r, \tau) = 4,57F^2La^{-1/3} \times \int_0^1 d\xi C_n^2(\xi)\xi^{-1/3} M\left(\frac{1}{6}, 1; -\frac{|\mathbf{b}|^2}{2a^2\xi^2}\right), \quad (1)$$

связывающее турбулентные и ветровые характеристики атмосферной трассы и ВКФ смещений ЭЦТ изображений пары точечных источников, регистрируемых в плоскости резкого изображения двумя приемниками, разнесенными в поперечной к оптической оси плоскости. Здесь F – фокусное расстояние объектива; a – его эффективный радиус; L – длина трассы; ξ – нормированная на длину трассы координата вдоль оптической оси; C_n^2 – структурная характеристика атмосферной турбулентности; $\mathbf{b} = (1-\xi)\rho_s + \xi\rho_r + \mathbf{V}(\xi)\tau$, ρ_s – разнос источников, ρ_r – разнос приемников, τ – задержка, $\mathbf{V}(\xi)$ – вектор поперечной скорости ветра; $M(a, b; z)$ – гипергеометрическая функция Куммера [20]. Корреляционная функция (1), как функция задержки, имеет максимум, определяемый минимальным значением $|\mathbf{b}|$.

Для измерения интегрального поперечного ветра необходимо разнести приемники вдоль направления искомого ветра, тогда вклады в интеграл в (1) будут собираться со всей трассы. При нулевом разнесе источников, когда оба приемных объектива сфокусированы на один и тот же объект, смещение максимума корреляционной функции можно оценить как $\tau_m = \rho_r/2V$. Если источники и приемники разнесены вдоль направления измеряемого ветра на одинаковое расстояние $\rho_s = \rho_r$, то смещение максимума (1) составит $\tau_m = \rho_r/V$.

Структурная схема измерителя представлена на рис. 1, а, на рис. 1, б – макет измерителя. Распределение интенсивности в плоскости резкого изображения объективов 1, 2 регистрируется видеокамерами 3, 4 в совпадающие моменты времени. Синхронизация работы видеокамер обеспечивается генератором 5. Последовательность бинокулярных изображений обрабатывает компьютер 6.

При подготовке измерений необходимо выбрать участки изображения удаленного объекта и произвести настройку макета. Поскольку оценка смещения участка изображения на основе корреляционной методики требует значительных затрат времени уже при небольших его размерах, в качестве основной характеристики участка изображения, по которой опреде-

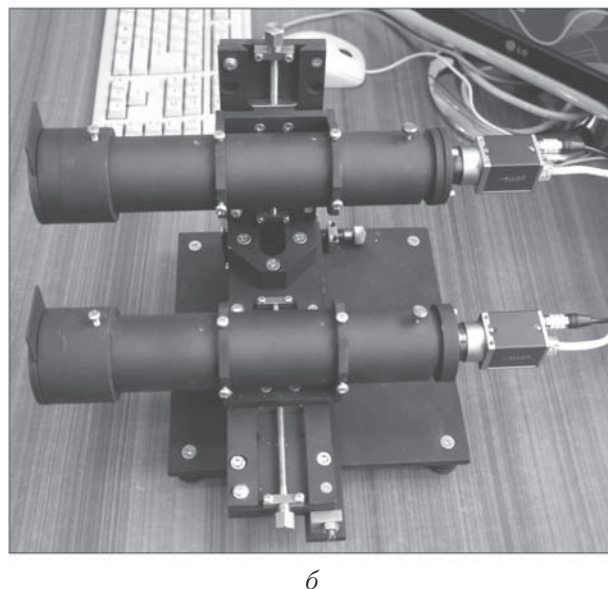
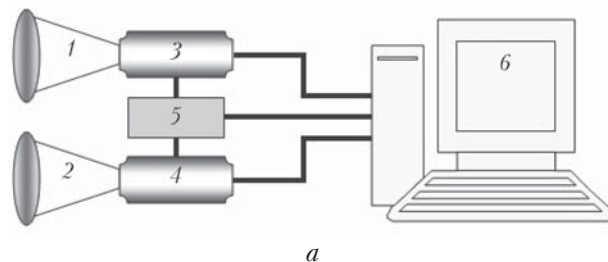


Рис. 1. Структурная схема измерителя (а); 1, 2 – приемные объективы; 3, 4 – скоростные видеокамеры; 5 – синхронизатор; 6 – компьютер. Макет ПОИСПВ (б)

лялось его смещение, было выбрано смещение его энергетического центра тяжести. Координаты ЭЦТ вычисляются следующим образом:

$$\mathbf{R}(t) = \frac{\sum_{i,j} I(\mathbf{r}_{ij}, t)\mathbf{r}_{ij}}{\sum_{i,j} I(\mathbf{r}_{ij}, t)}, \quad (2)$$

где \mathbf{r}_{ij} – вектор координат центров пикселей; I – интенсивность засветки в соответствующем пикселе в момент времени t . Суммирование производится по всем пикселям соответствующего участка изображения, формируемого на приемной матрице видеокамеры. Смещение участка изображения и смещение его ЭЦТ будут совпадать, если изображение представляет собой контрастный объект на равномерном фоне (например, точечный источник), полностью находящийся в пределах анализируемого участка.

Процедура подготовки измерений состоит в следующем.

Выполняется настройка резкости изображения и экспозиции, а также синхронизация видеокамер. Частота съемки f должна позволять зарегистрировать не менее 10 изображений за время пролета неоднородностей через объектив $f \geq 10V_{\max}/D$, где V_{\max} – максимальная скорость поперечного ветра; D – диаметр диафрагмы приемного объектива.

Производится выбор участков изображений для корреляционного анализа. Для оценки средней скорости ветра обе видеокамеры наводятся на один и тот же участок объекта наблюдения. Разнос объективов осуществляется вдоль направления измеряемой поперечной скорости ветра. При проведении измерений производится регистрация видеоизображений удаленного объекта в моменты времени $t_j = t_0 + j/f, j = 0 \dots N_t$. Для анализа выбираются участки, содержащие контрастные элементы изображений с характерными масштабами не меньше $1/10$ размера участка, и определяются координаты их ЭЦТ. В память компьютера записываются временные ряды горизонтальных координат ЭЦТ для каждого участка.

По рядам смещений ЭЦТ выделенных участков изображения рассчитывается ВКФ:

$$K(s, N) = \sum_{j=1}^N (X_1(t_j) - \langle X_1 \rangle)(X_2(t_{j+s}) - \langle X_2 \rangle), \quad (3)$$

где N — число отсчетов в интервале усреднения; индексы 1, 2 соответствуют номеру видеокамеры. Определяется координата s_m положения максимума корреляционной функции в единицах интервала дискретизации.

Для оценки интегральной поперечной скорости ветра используется соотношение

$$V = \frac{\rho_r f}{2s_m} \quad (4)$$

(ρ_r — горизонтальный разнос объективов).

2. Постановка эксперимента

Чтобы оценить возможности дистанционного определения скорости интегрального бокового ветра пассивным оптическим методом, основанным на корреляционном анализе бинокулярных видеоизображений, в летний период 2016 г. на территории Базового экспериментального комплекса ИОА СО РАН (г. Томск) были проведены испытания макета ПОИСПВ. Испытания проходили на открытой местности при температуре воздуха от $+4$ до $+30$ °С и атмосферном давлении от 740 до 760 мм рт. ст.

Скорость ветра измерялась независимо макетом ПОИСПВ (интегральная вдоль трассы) и метеостанцией АМК-03 (рис. 2), расположенной на оптической трассе (длиной ~ 500 м) на расстоянии 150 м от макета ПОИСПВ. Высота оптической трассы над поверхностью изменялась в пределах 0,8–3,2 м. Рельеф местности на трассе измерений показан на рис. 3.



Рис. 2. Метеостанция АМК-03



Рис. 3. Рельеф местности на трассе измерений

Метеостанция измеряла три компоненты скорости ветра с частотой 80 Гц и записывала их значения на жесткий диск ноутбука.

Макет ПОИСПВ обеспечивал:

в режиме настройки – формирование бинокулярных изображений и их отображение на мониторе в режиме реального времени, возможность управления параметрами видеосъемки;

в режиме измерения – определение координат ЭЦТ изображений с частотой 50–300 Гц, запись рядов смещений ЭЦТ, корреляционную обработку рядов смещений, оценку поперечной к трассе компоненты скорости ветра в режиме реального времени, запись рядов оценок скорости ветра.

Сопоставление оценок поперечной скорости ветра проводилось следующим образом. Осуществлялось осреднение ветровых рядов ПОИСПВ и метеостанции. Затем вычислялись среднеквадратическое отклонение (СКО) и коэффициент корреляции осредненных рядов. Значения этих величин являлись мерой совпадения независимых оптических и акустических данных и оценкой качества измерения поперечной скорости ветра макетом ПОИСПВ. Временной интервал осреднения варьировался от минимального значения, равного времени накопления ВКФ смещений ЭЦТ, до максимального – 12 мин.

3. Результаты эксперимента

При дневном освещении изображения контрастных объектов, находящихся на расстоянии 500 м

от измерителя, формируются с разрешением ~3 см. Для уверенного определения координат ЭЦТ изображения размеры контрастного элемента должны превосходить 10 см. Примеры изображений контрастных объектов приведены на рис. 4.

Время накопления ВКФ смещений ЭЦТ изображений во время испытаний составляло 16 с. При этом в отсутствие внешних воздействий корреляционная функция смещений ЭЦТ имеет выраженный максимум, смещенный относительно начала координат.

Уменьшение интервала накопления ведет к ослаблению корреляции, потере устойчивости оценки положения максимума и появлению сбоев при оценке ветра. Обработка рядов ЭЦТ при различных временах усреднения показала, что критическое значение времени накопления лежит в интервале 4–8 с. Оценка оптимального времени накопления сделана исходя из зависимости СКО смещения максимума корреляционной функции от времени осреднения. Характерный вид этой зависимости показан на рис. 5. Переход от быстрого спада СКО по мере увеличения интервала накопления ВКФ и выход на насыщение, величина которого обусловлена временными вариациями интегрального ветра на оптической трассе, определяют оптимальную величину времени накопления.

Сопоставление значений поперечного ветра, полученных с помощью акустической метеостанции АМК-03 и макета ПОИСПВ, показывает их качественное согласие (рис. 6).



Рис. 4. Изображения контрастных объектов в плоскости резкого изображения объектива макета

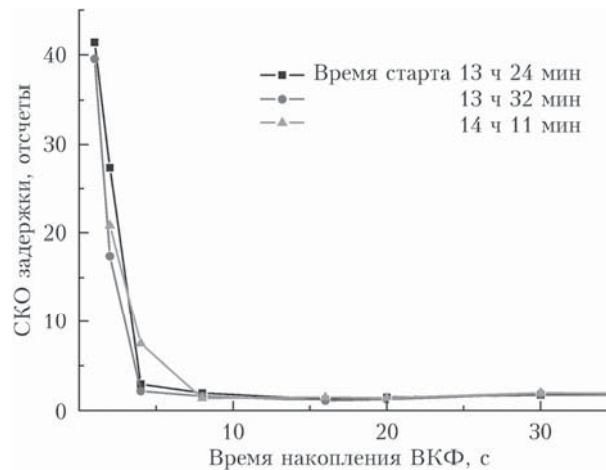


Рис. 5. Примеры зависимостей СКО координаты максимума ВКФ от величины интервала накопления

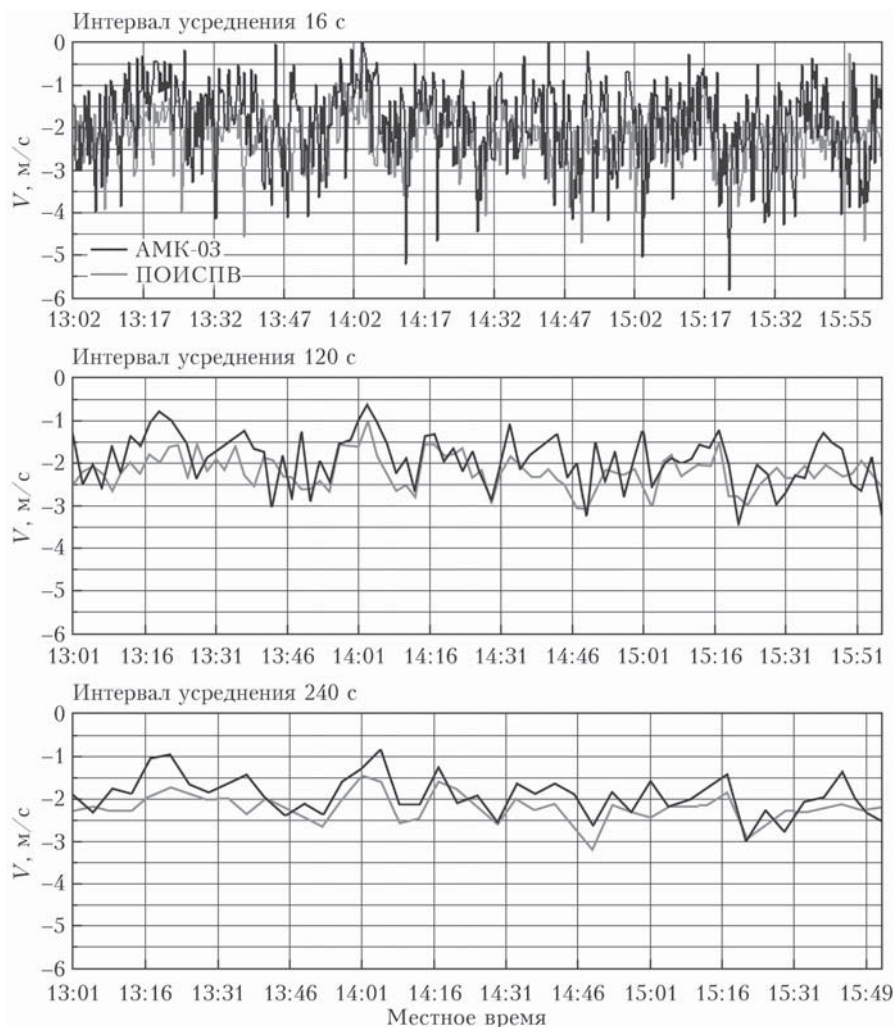


Рис. 6. Сравнение оценок скорости поперечного ветра при различных интервалах усреднения рядов значений скорости ветра за 23.08.2016 г.

Количественные расхождения связаны, прежде всего, с тем, что оценка скорости ветра ПОИСПВ – интегральная по всей трассе, а акустические данные являются пространственно локальными и относятся к точке расположения метеостанции на трассе. Поэтому увеличение времени осреднения рядов значений скорости подавляет влияние локальных и кратковременных порывов ветра, ведет к заметному улучшению согласия оценок скорости поперечного ветра, выражающемуся в увеличении коэффициента корреляции и уменьшении среднеквадратического отклонения (таблица).

Статистические характеристики оценок бокового ветра по измерениям 23.08.2016 г.

| Время осреднения, с | Коэффициент корреляции | СКО, м/с |
|---------------------|------------------------|----------|
| 16 | 0,18 | 1,04 |
| 30 | 0,23 | 0,89 |
| 60 | 0,39 | 0,68 |
| 120 | 0,51 | 0,52 |
| 240 | 0,72 | 0,33 |
| 300 | 0,72 | 0,31 |

Отметим, что при осреднении порывов ветра по интервалам 4 мин и более коэффициент корреляции оценок скорости ветра метеостанцией и ПОИСПВ стабилизируется на уровне ~0,7.

Заключение

В результате проведенных натурных испытаний макета ПОИСПВ, обработки полученных данных и сравнительного тестирования можно сделать следующие выводы.

1. Макет ПОИСПВ позволяет формировать бинокулярные синхронизированные изображения контрастных объектов размером не менее 10×10 см на расстоянии 500 м от макета при естественном солнечном освещении.
2. Макет позволяет формировать ряды смещений ЭЦТ изображений контрастных объектов с временным шагом не менее $1/300$ с.
3. Макет ПОИСПВ позволяет в режиме реального времени получать оценку поперечной к трассе скорости ветра с частотой до 300 Гц. Время накопления ВКФ должно быть не менее 8 с.

4. Оценки поперечного ветра с помощью макета ПОИСПВ в целом согласуются с данными акустической метеостанции. Расхождения связаны с локальными кратковременными порывами ветра. При увеличении времени осреднения ветровых рядов (оценки метеостанции и ПОИСПВ) до 4 мин коэффициент корреляции насыщается на уровне ~0,7.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-04210).

1. Wang T.-I. Optical flow sensor using a fast correlation algorithm. Patent No. US 6,611,319 B2. Aug. 26, 2003.
2. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. Определение скорости ветра в атмосфере по турбулентным искажениям видеоизображений лазерного пучка // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 723–729; Afanasiev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P. Estimate of wind velocity in the atmosphere based on an analysis of turbulent distortions of laser beam images registered by video camera // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 1. P. 88–94.
3. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. Вейвлет профилирование скорости ветра по флуктуациям интенсивности лазерного пучка, распространяющегося в атмосфере // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105, № 4. С. 698–705.
4. Roopashree M.B., Akondi Vyas, Raghavendra Prasad B. A review of Atmospheric wind speed measurement techniques with shack hartmann wavefront imaging sensor in adaptive optics // J. Indian Inst. Sci. 2013. V. 93. P. 67–84.
5. BLS2000 Large Aperture Scintillometer for Very Long Paths. 2012. URL: www.scintec.com.
6. Lawrence R.S., Ochs G.R., Clifford S.F. Use of scintillations to measure average wind across a light beam // Appl. Opt. 1972. V. 11, N 2. P. 239–243.
7. Банах В.А., Смалихо И.Н. Когерентные доплеровские ветровые лидары в турбулентной атмосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2013. 304 с.
8. Banakh V.A., Smalikho I.N. Coherent Doppler wind lidars in a turbulent atmosphere. Boston; London: Artech House, 2013. 248 p.
9. Smalikho I.N., Banakh V.A. Estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured with 1.5 μm coherent Doppler lidar // Opt. Lett. 2015. V. 40, N 14. P. 3408–3411.
10. Clifford S.F., Ochs G.R., Wang T.-I. Optical wind sensing by observing the scintillations of a random scene // Appl. Opt. 1975. V. 14, N 12. P. 2844–2850.
11. Walters D.L. Passive remote crosswind sensor // Appl. Opt. 1977. V. 16, N 10. P. 2625–2626.
12. Porat O., Shapira J. Passive cross-wind remote sensing using optical turbulence-induced fluctuations // Proc. SPIE. 2010. V. 7828. P. 78280A-1–78280A-6.
13. Banakh V.A., Marakosov D.A., Vorontsov M.A. Cross-wind profiling based on the scattered wave scintillations in a telescope focus // Appl. Opt. 2007. V. 46, N 33. P. 8104–8117.
14. Banakh V.A., Marakosov D.A. Wind profile recovery from intensity fluctuations of a laser beam reflected in a turbulent atmosphere // Quantum Electron. 2008. V. 38. P. 404–408.
15. Belenkii M. Passive crosswind profiler. Patent No. US 8,279,287 B2. Oct. 2, 2012.
16. Marakosov D.A. The correlation of the displacements of the images of point sources in the turbulent atmosphere // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. CID: 9680 1U.
17. Маракосов Д.А., Афанасьев А.Л. Корреляция смещенных элементов изображения объектов сложной формы в турбулентной атмосфере // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 8/3. С. 204–206.
18. Маракосов Д.А. Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений некогерентных источников в турбулентной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 294–299.
19. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. Оценка ветра и турбулентности в приземной атмосфере по искажениям видеоизображений оптических источников и освещенных объектов // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 285–293; Afanasiev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P. Estimate of the integral wind velocity and turbulence in the atmosphere from distortions of optical images of naturally illuminated objects // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 422–430.
20. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовиц, И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.

A.L. Afanasiev, V.A. Banakh, D.A. Marakosov. Comparative estimates of the transversal wind velocity component from optical and acoustic measurements in the surface air layer.

A passive optical method for measurement of the crosswind velocity averaged over an atmospheric path is developed. The crosswind velocity estimation is based on the correlation algorithm operating with the shifts of energy centroids of images of topographic objects under natural daylight. Testing results of a measurer prototype based on this algorithm are described. The wind velocity estimates recorded by passive optical measurer and acoustic weather station are compared. The optimal duration for averaging the mutual correlation function providing the stability of real-time wind measurements is estimated.