

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.3; 535.8

Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 3. Экспериментальная апробация

А.Л. Афанасьев¹, В.В. Дудоров¹, Ю.Т. Михайлов², А.С. Насонова¹,
А.П. Ростов¹, С.О. Шестаков^{1*}

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

² ОАО «Пеленг»
220114, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Макаенка, 25

Поступила в редакцию 7.05.2020 г.

Выполнена апробация разработанного ранее пассивного метода определения поперечной скорости ветра по видеоряду некогерентных изображений. Метод основан на визуализации турбулентных неоднородностей воздуха, переносимых ветром и вызывающих искажения в регистрируемых оптических изображениях. Представлено сравнение результатов восстановления скорости ветра предложенным методом с измерениями анемометров на трассах протяженностью до 1 км.

Ключевые слова: скорость ветра, турбулентная атмосфера, некогерентное изображение; wind velocity, turbulent atmosphere, incoherent image.

Введение

Идея использования вызванных турбулентной атмосферой искажений оптических изображений для дистанционного измерения скорости ветра встречается во множестве работ. При этом в случае анализа изображений объектов, подсвеченных естественным излучением, возникает возможность разработки скрытных (пассивных) методов измерения поперечной скорости ветра [1–12]. Большинство алгоритмов основано на корреляционном анализе временных флуктуаций некоторых характеристик, регистрируемых приемными оптическими системами [1, 3, 4, 6, 9, 12–15]. Такой подход отличается необходимостью накопления рядов наблюдений, длительность которых обычно составляет от 3 до 10 с. Очевидно, что в таком случае измеряется не мгновенная, а усредненная за этот интервал времени скорость ветра.

Предложенный нами подход основан на корреляционном анализе динамики анизопланарных турбулентных искажений в регистрируемых изображениях [5, 7, 8, 11, 12, 16–18]. В этом случае смещение искажений в изображении объекта, связанное со смещением переносимых ветром турбулентных неоднородностей, может быть определено на основе

анализа двух соседних кадров видеоряда. При необходимой для работы метода высокой частоте съемки (более 100 Гц) это позволяет измерять практически мгновенное значение скорости ветра, поскольку характерное время ее флуктуаций обычно составляет десятые доли секунды. Основная проблема такого подхода состоит в необходимости обработки изображений с целью устранения структуры наблюдаемого объекта и визуализации турбулентных неоднородностей воздуха, расположенных на трассе наблюдения [16]. Очевидно, что для наблюдаемых сцен со сложной структурой, состоящей из множества разнородных объектов, точность восстановления скорости ветра будет зависеть от множества факторов.

В настоящей работе выполнена апробация разработанного ранее метода восстановления скорости ветра на основе сравнения с контактными измерениями на трассах до 1 км [11, 12], что позволило модифицировать метод: уменьшить количество вычислительных операций и повысить точность измерений.

1. Модификация алгоритма восстановления скорости ветра

В предложенном ранее алгоритме определения поперечной скорости ветра на различных расстояниях от наблюдателя [12] после установления числа слоев турбулентных неоднородностей N_z , для которых будет определяться скорость ветрового сноса, влияние неоднородностей разных масштабов отфильтровывалось. При этом сначала на основе

* Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Вадим Витальевич Дудоров (dvv@iao.ru); Юрий Тимофеевич Михайлов (mut_b5@mail.ru); Анна Сергеевна Насонова (an.s.ereimina@gmail.com); Андрей Петрович Ростов (rostov@iao.ru); Степан Олегович Шестаков (styopashestakov@yandex.ru).

полученной карты крупномасштабных неоднородностей (карты качества изображения при широком ядре сглаживания) определялась скорость сноса неоднородностей, расположенных вблизи наблюдателя, далее из карты неоднородностей всех масштабов вычиталась карта крупномасштабных неоднородностей и анализировался оставшийся участок атмосферы.

Анализ указанной задачи на основе моделирования и обработки видеоизображений в реальной атмосфере показал, что на первой половине трассы для восстановления скорости сноса определенного слоя нет необходимости отфильтровывать (вычитать) неоднородности крупных масштабов. Достаточно проанализировать карту качества изображения при использовании ширины сглаживающей функции, соответствующей конкретному слою.

Также можно отметить, что при восстановлении профиля поперечного ветра для определения скорости смещения слоев воздуха на второй половине трассы необходимо отфильтровывать (вычитать) неоднородности с масштабом несколько меньше, чем тот, который использовался для определения скорости смещения предыдущего слоя.

В таком случае отличие алгоритма от предложенного ранее [12] будет в следующем. Для определения скорости смещения i -го слоя воздуха на первой половине трассы анализируется функция взаимной корреляции карт качества изображений в моменты времени t_1 и t_2 :

$$Q(\mathbf{r}, a_k, t) = |\nabla_r I(\mathbf{r}, t)|^2 \otimes K(\mathbf{r}, a_k), \quad (1)$$

где $\nabla_r = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y}$ – вектор-градиент; $|\nabla_r I(\mathbf{r}, t)|^2$ – функционал резкости изображения; $a_k = cz_{\text{obj}}/z_t$ – коэффициент сглаживания; z_{obj} – длина трассы; z_t – расстояние до анализируемого слоя атмосферы; c – некоторая постоянная, которая определяется характеристиками приемного телескопа и фотоприемной матрицы; $\mathbf{r} = \{x, y\}$ – вектор в плоскости, перпендикулярной направлению наблюдения; \otimes – операция свертки; $K(\mathbf{r}, a_k)$ – сглаживающая функция, которая в нашем случае задается в виде

$$K(\mathbf{r}, a_k) = \frac{1}{\pi a_k^2} \exp(-r^2/a_k^2), \quad (2)$$

а для второй половины трассы в моменты времени t_1 и t_2 анализируется функция взаимной корреляции разности

$$\Delta Q^{(i)}(\mathbf{r}, t) = Q(\mathbf{r}, a_k^{(i)}, t) - Q(\mathbf{r}, h a_k^{(i-1)}, t), \quad (3)$$

где i – номер слоя; h принимает значение от 0,5 до 1 в зависимости от размера приемной апертуры.

Важно отметить, что в случае смещения или случайных флуктуаций угла наклона оптической оси приемника необходимо стабилизировать изображение, что несложно осуществить численно на основе корреляционного анализа и алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

На рис. 1 приведены изображения реальных сцен и их карты качества, рассчитанные по формуле (1) с дополнительной фильтрацией структуры объекта [16] для различных значений коэффициента сглаживания a_k .

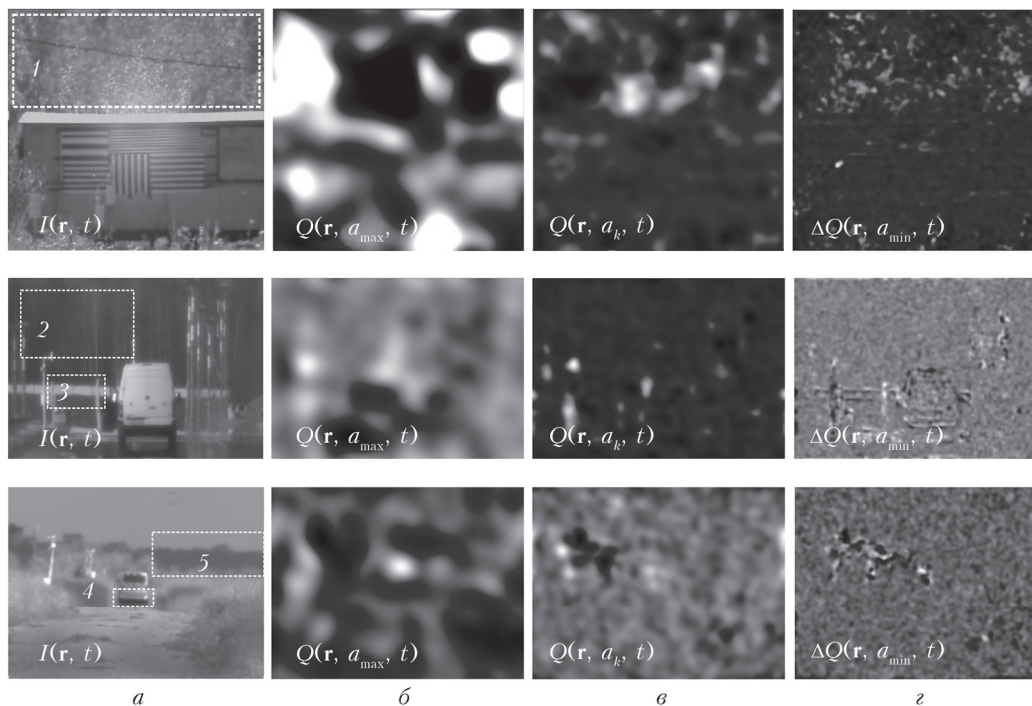


Рис. 1. Изображение объекта (а) и его карта качества (б–г). Верхний ряд: размерность изображения $N_{\text{pix}} = 512 \times 512$, угловой размер наблюдаемой области $FOV = 10$ мрад, размер приемной апертуры $d = 10$ см, расстояние до объекта $z_{\text{obj}} = 500$ м (выделенный участок леса 1); средний ряд: $N_{\text{pix}} = 640 \times 480$, $FOV = 13$ мрад, $d = 10$ см, $z_{\text{obj}} = 473$ м (автомобиль), $z_{\text{obj}} \approx 2300$ м (участок леса 2 и бетонная стена 3); нижний ряд: $N_{\text{pix}} = 640 \times 480$, $FOV = 13$ мрад, $d = 10$ см, $z_{\text{obj}} = 920$ м (автомобиль 4) $z_{\text{obj}} \approx 3000$ м (участок леса 5); $a_{\text{min}} < a_k < a_{\text{max}}$, где $a_{\text{min}} \ll a_{\text{max}}$

Видно, что за счет изменения a_k можно управлять характерным размером искажений при анализе их динамики в видеоряде изображений наблюдаемого объекта с целью выделения участков атмосферы, располагающихся на различном расстоянии от регистрирующей аппаратуры.

При наблюдении этой картины в динамике мы видим смещение искажений в обработанных изображениях объекта, которое, очевидно, вызвано ветровым смещением турбулентных неоднородностей воздуха на трассе наблюдения. Следовательно, на основе корреляционного анализа динамики искажений в видеоряде изображений можно определить поперечную составляющую скорости ветра (скорости смещения турбулентных неоднородностей воздуха).

2. Сравнение результатов обработки видеоряда с контактными измерениями скорости ветра

Первая серия видеоизображений для апробации разработанного метода восстановления скорости ветра была зарегистрирована на горизонтальной трассе длиной 500 м для сцены, состоящей из тестового объекта с горизонтальными и вертикальными полосами, а также участка лиственного леса (см. верхний ряд на рис. 1). Видеосъемка велась с частотой от 50 до 500 Гц. Контактные измерения скорости ветра проводились с помощью 10 акустических анемометров, расположенных на равной дистанции друг от друга. Для снижения случайной ошибки измерений вся трасса разбивалась на три участка одинаковой длины. Анемометры с первого по третий располагались на первом участке (ближ-

нем к наблюдателю), с четвертого по седьмой — на втором, с восьмого по десятый — на третьем, расположенном ближе к объекту наблюдения. Скорость ветра на заданном участке определялась как среднее значение показаний анемометров, расположенных на нем.

Анализ результатов обработки изображений показал, что указанный метод визуализации турбулентных неоднородностей позволяет достаточно точно восстанавливать скорость ветра не только при использовании тестового объекта, но и при анализе естественных сцен наблюдения (фрагмент 1 на рис. 1). На рис. 2 представлены результаты восстановления скорости ветра предложенным методом в сравнении с показаниями анемометров для ближайшего к наблюдателю и среднего участков трассы. Для определения скорости ветра на ближнем участке трассы анализировалась карта крупномасштабных искажений $Q(\mathbf{r}, a_{\max}, t)$, на среднем участке — карта искажений средних масштабов $Q(\mathbf{r}, a_k, t)$, где $a_k < a_{\max}$. Видно, что восстановленная скорость смещения турбулентных неоднородностей при использовании максимального и некоторого среднего значений параметра сглаживания хорошо совпадает с контактными измерениями скорости ветра на ближнем и среднем участках трассы. Отметим, что для такого типа объекта и таких характеристик приемной оптической системы не удалось оценить скорость смещения турбулентных неоднородностей вблизи наблюдаемого объекта.

Анализ влияния частоты съемки на точность восстановления скорости ветра показал, что оптимальный диапазон — от 100 до 200 Гц. Среднеквадратическая ошибка (СКО) восстановления скорости ветра лежит в диапазоне 0,3–0,4 м/с для частоты

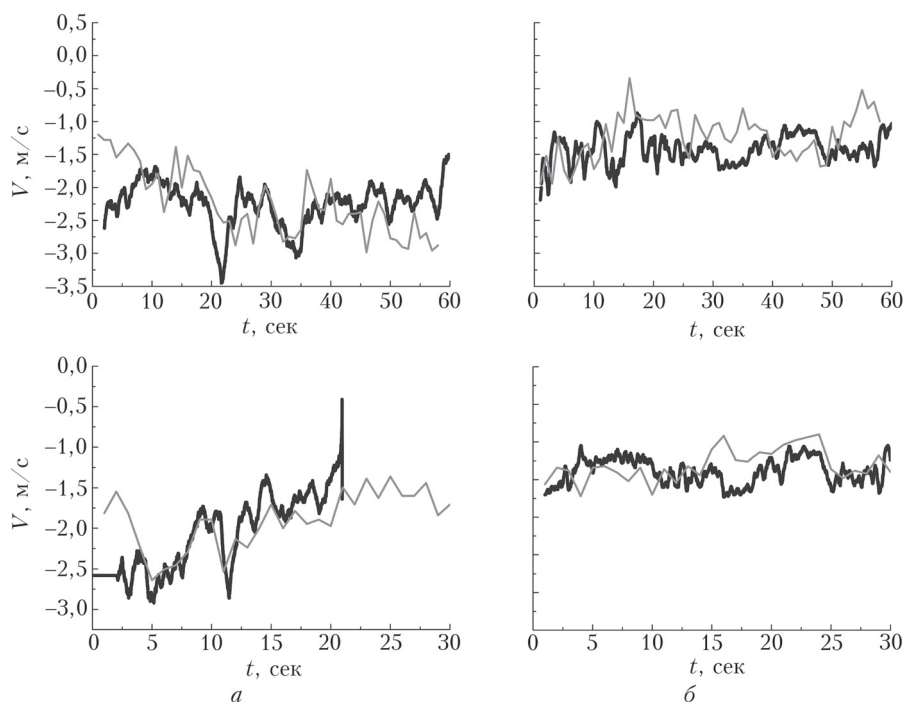


Рис. 2. Динамика восстановленной скорости ветра (черная линия) вблизи наблюдателя (а) и на среднем участке трассы (б), соответствующая одному и тому же интервалу времени, в сравнении с контактными измерениями (серая линия); частота следования кадров 100 Гц (вверху) и 200 Гц (внизу)

100 Гц и 0,2–0,3 м/с для 200 Гц. При частоте съемки менее 100 Гц существенно снижается корреляция распределений турбулентных неоднородностей, вызывающих искажения на соседних кадрах видеоряда, что приводит к невозможности детектирования скорости ветра предложенным методом. Это связано с тем, что эволюция турбулентных неоднородностей воздуха происходит достаточно быстро: характерное время «замороженности» атмосферной турбулентности обычно составляет менее 0,01 с. Увеличение частоты съемки более 200 Гц не имеет особого смысла, поскольку при этом увеличивается шумовая составляющая сигнала и, следовательно, случайная ошибка измерения. Также важно отметить, что при разработке прибора, измеряющего скорость ветра в режиме реального времени, важно учитывать, что необходимо успевать выполнять определенный объем вычислений за время регистрации очередного кадра. В связи с чем предпочтительна минимальная частота съемки, при которой еще сохраняется корреляция искажения на соседних кадрах видеоряда.

Относительно выбора калибровочных параметров c и h можно отметить, что c определяется размерностью фотоприемной матрицы и углом поля зрения камеры. Выражение для его определения нам пока не удалось получить из-за ограниченного набора характеристик используемых видеокамер. Однако, определив значение параметра c на основе тестовых измерений, мы можем зафиксировать его для дальнейших измерений с помощью этой же видеокамеры. Оптимальное значение параметра, на основе которого были получены представленные выше результаты, соответствовало оптимальной ширине сглаживающей функции a_k , в нашем случае равной размеру трех пикселей фотоприемной матрицы, необходимой для восстановления скорости ветра на среднем участке трассы. Параметр h определяется дистанцией наблюдения и количеством участков трассы, на которых мы хотим восстановить скорость ветра. На основе результатов моделирования и тестовых измерений было получено, что для трасс до 1 км, разбитых на 3–5 участков, оптимальное значение $h = 0,5$.

Следующая серия видеоизображений была сделана для объектов наблюдения другого типа. Анализировалась эффективность восстановления ветра на основе изображений слабоконтрастного леса и бетонной стены, удаленных на расстояние более 2 км (фрагменты 2 и 3 в среднем ряду на рис. 1). Анемометры располагались на расстоянии 473 и 930 м от наблюдателя. На рис. 3 приведены измеренная анемометрами и восстановленная скорости ветра на ближнем (от наблюдателя, до 700 м) и среднем (от 700 до 1100 м) участках дистанции. Видно, что при усреднении восстановленных значений скорости ветра за интервал времени, соответствующий времени усреднения анемометрами, характер временного хода восстановленной скорости ветра соответствует характеру контактных измерений. Некоторое отличие в измеренных данных можно объяснить тем, что анемометры измеряют скорость ветра

в заданной точке, а метод анализа видеоизображений восстанавливает скорость смещения достаточно протяженного слоя атмосферы.

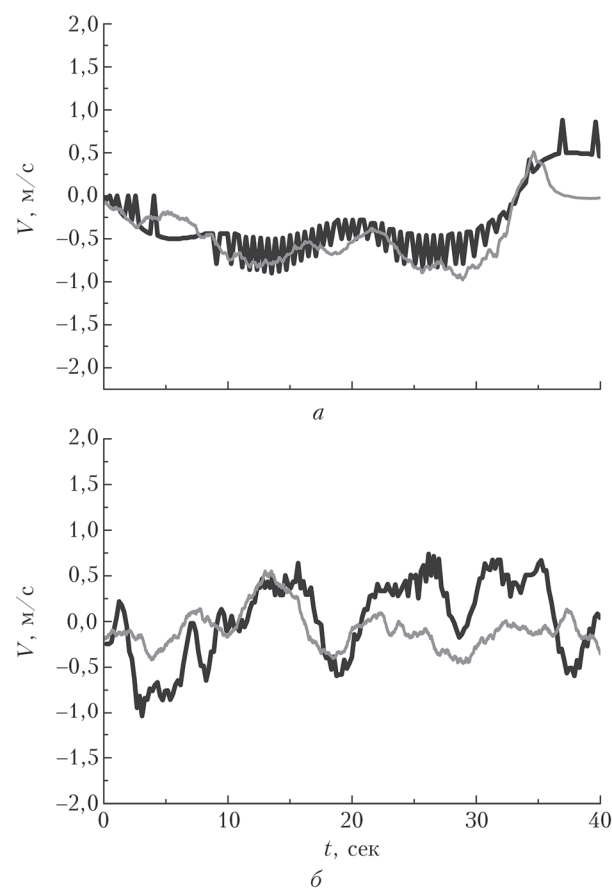


Рис. 3. Динамика восстановленной (черная кривая) скорости ветра вблизи наблюдателя (а) и на среднем участке трассы (б) в сравнении с контактными измерениями (серая кривая); изображение соответствует среднему ряду на рис. 1; СКО = 0,21 (фрагмент 3) и 0,33 м/с (фрагмент 2)

В третьей серии видеоизображений анализировалась эффективность обработки изображения интересующего наблюдателя объекта и некоторого фонового участка (фрагменты 4 и 5 в нижнем ряду на рис. 1). Бампер автомобиля является наиболее подходящим для восстановления горизонтального ветра, поскольку имеет выраженную горизонтальную структуру. Подобные фрагменты изображений могут быть выделены на большинстве искусственных целей. Однако здесь также есть свои ограничения. Для достоверной оценки ветра необходимо, чтобы протяженность таких горизонтально ориентированных фрагментов изображения составляла не менее нескольких десятков пикселей матрицы. В случае сильно удаленных целей и/или камер с недостаточным пространственным разрешением в качестве горизонтально ориентированных фрагментов изображения можно использовать границы раздела некоторых однородных объектов, например, естественные границы между верхней кромкой леса и небом, нижней кромкой леса и полем (верхняя и нижняя часть фрагмента 5 на рис. 1).

В случае горизонтально ориентированных фрагментов изображения искажения, вызванные горизонтально переносимыми турбулентными неоднородностями воздуха, смещаются вдоль фрагментов. В таком случае их смещение с наименьшей ошибкой регистрируется методами корреляционного анализа. Подчеркнем, что в указанном методе восстановления скорости поперечного ветра на участке атмосферы между регистрирующей аппаратурой и наблюдаемой целью нет необходимости наблюдать именно за целью либо за объектом, располагающимся на аналогичном расстоянии. Можно наблюдать за удаленным участком леса, расстояние до которого может быть в несколько раз больше расстояния до цели. При этом участок атмосферы, на котором восстанавливается скорость ветра, определяется шириной сглаживающей функции.

На рис. 4, а показаны результаты расчета скорости ветра для слоя атмосферы толщиной 322 м. В этом случае скорость ветра, восстановленная на основе обработки видеоряда изображений, зарегистрированных видеокамерой, хорошо совпадает с контактными измерениями ветра анемометром, расположенным посередине указанного слоя. При этом СКО восстановленной скорости ветра при анализе изображения бампера существенно ниже, чем при анализе соседних фрагментов изображения. Некоторое различие во временной зависимости можно объяснить как смещенным (относительно линии визирования) расположением анемометра, так и тем, что в отличие от оптического метода, интегрирующего ветер вдоль трассы наблюдения, анемометр измеряет скорость ветра в точке его расположения.

На рис. 4, б приведены результаты расчета скорости ветра при увеличении дистанции до 920 м. Видно ухудшение совпадения измерений анемометром и результата работы метода. Помимо перечисленных выше возможных факторов, отличие может быть обусловлено уменьшением анализируемой области изображения (угловой размер бампера автомобиля) в связи с увеличением дистанции, а также низким разрешением приемной оптической системы, не позволяющим зафиксировать мелкомасштабные искажения, вызванные удаленным от наблюдателя слоем турбулентных неоднородностей воздуха.

Дальнейшее увеличение дистанции до цели делает проблематичным использование горизонтально ориентированных фрагментов изображения цели (бампера) из-за его малого углового размера и, следовательно, невозможности точно отследить на нем горизонтальное смещение турбулентных искажений.

Заключение

Используя коммерчески доступное оптическое оборудование с углом поля зрения порядка 10 мрад и матрицей с разрешением порядка 500×500 пикселей на основе предложенного метода визуализации турбулентных неоднородностей воздуха, переносимых ветром и вызывающих искажения в регистрируемых оптических изображениях, можно детектировать поперечный ветер на дистанциях до 1 км. Сравнение результатов измерений предложенным пассивным методом с контактными измерениями анемометрами показало, что СКО восстановления скорости ветра составляет порядка 0,2–1,0 м/с для трасс до 500 м и 1,0 м/с для трасс

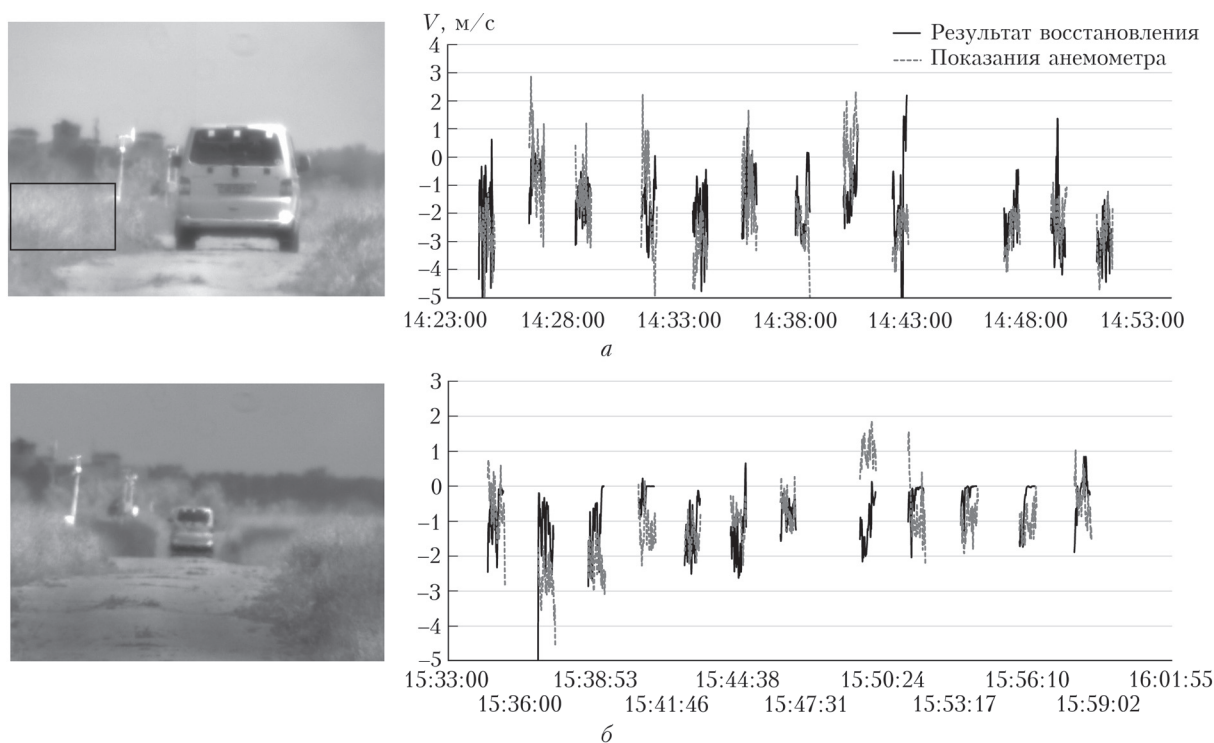


Рис. 4. Кадр изображения и результаты восстановления ветра на участке трассы длиной 322 (а) и 920 м (б); для трассы 322 м СКО = 0,92 (бампер) и 1,48 м/с (фрагмент изображения поля); для трассы 920 м СКО = 0,91 м/с (фрагмент 5 на рис. 1)

до 1 км. При этом для снижения погрешности измерений необходимо анализировать горизонтально ориентированные фрагменты изображений либо изображения, характеризующиеся пространственным спектром с выраженной высокой частотой (например, листва деревьев). Для повышения дальности измерения скорости ветра нужно уменьшать угол поля зрения оптической системы либо повышать разрешение фотоприемной матрицы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-79-00179).

1. *Zavorotny V.U.* Remote probing of a distant turbulent layer using various spatial filtering methods // *Appl. Opt.* 1992. V. 31, N 36. P. 7660.
2. *Holmes R.B.* Passive optical wind profilometer. US patent N 5.469.250 USO05469250A. 1995.
3. *Belenkii M.* Passive crosswind profiler. US patent N 2010/0128136 A1. 2010.
4. *Porat O., Shapira J.* Crosswind sensing from optical-turbulence-induced fluctuations measured by a video camera // *Appl. Opt.* 2010. V. 49, N 28. P. 5236.
5. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Determination of atmospheric turbulent inhomogeneity wind drift from sequence of incoherent images // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 92921F.
6. *Engel A., Porat O., Shapira J., Englander A.* Experimental evaluation of optical crosswind measurement systems // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9242. P. 92421K.
7. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Filtration of optical image distortions for retrieving the drift velocity of atmospheric turbulence inhomogeneities // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. P. 96802E.
8. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Possibilities of crosswind profiling based on incoherent imaging // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 100351Q.
9. *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A., Rostov A.P.* Method of estimation of the cross-wind velocity from statistics of energy centroids coordinates of binocular images of topographic objects // *Proc. SPIE.* 2016. V. 10035. P. 1003512.
10. *Маракасов 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.
11. *Дудоров В.В., Еремина А.С.* Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 1. Смещение тонкого слоя турбулентных неоднородностей // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 4. С. 274–280;
12. *Дудоров В.В., Еремина А.С.* Определение поперечной составляющей скорости ветра на основе анализа видеоряда изображений удаленных объектов. Часть 2. Смещение объема турбулентной среды // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 682–690; *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images: Part 2 – Drift of turbulent volume // *Atmos. Ocean.* 2017. V. 30, N 6. P. 596–603.
13. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А.* Сравнительные оценки скорости поперечного ветра из оптических и акустических измерений в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 651–657; *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Marakasov D.A.* Comparative assessments of the crosswind speed from optical and acoustic measurements in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 43–48.
14. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Гордеев Е.В., Маракасов Д.А., Сухарев А.А., Фалиц А.В.* Верификация корреляционного пассивного оптического измерителя поперечной скорости ветра в экспериментах с доплеровским ветровым лидаром // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 8. С. 657–663; *Afanasiev A.L., Banakh V.A., Gordeev E.V., Marakasov D.A., Sukharev A.A., Falits A.V.* Verification of a passive correlation optical crosswind velocity meter in experiments with a Doppler wind lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 574–580.
15. *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 атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 5. С. 355–363.
16. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* Visualization of the wind drift of turbulent inhomogeneities // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10787. P. 1078708.
17. *Dudorov V.V., Eremina A.S., Mikhailov Yu.T.* Estimation of the crosswind along surface paths from a video sequence of distant objects: comparison with contact measurements // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. P. 108332T.
18. *Dudorov V.V., Eremina A.S.* The influence of receiving optical system parameters on the accuracy of determining the wind speed by the correlation method // *Proc. SPIE.* 2019. V. 11208. P. 112082D. DOI: 10.1117/12.2540775.

A.L. Afanasiev, V.V. Dudorov, A.S. Nasonova, A.P. Rostov, Yu.T. Mikhailov, S.O. Shestakov.
Retrieval of crosswind velocity based on the analysis of remote object images. Part 3. Experimental test.

The passive technique for crosswind velocity retrieval from a video series of incoherent images, developed in previous works, has been tested. The technique is based on the visualization of air-drifted turbulent air inhomogeneities which distort optical images recorded. The results of retrieval of the crosswind velocity by the technique suggested are compared with anemometer measurements at paths of up to 1 km in length.