

**КОНФЕРЕНЦИЯ В**

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ  
В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ**

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ВЕТРА ПО ФЛУКТУАЦИЯМ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОДСВЕЧЕННОЙ ДИФFUЗНОЙ МИШЕНИ

Маракасов Д.А., Афанасьев А.Л., Банах В.А. Ростов А.П., Кусков В.В.

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

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

В докладе рассматривается возможность определения средней интегральной вдоль оптической трассы поперечной компоненты скорости ветра из флуктуаций изображения подсвеченной лазерным пучком диффузной мишени. Предложен алгоритм обработки видеоизображений, основанный на построении пространственно-временной корреляционной функции флуктуаций интенсивности излучения рассеянного на мишени. Представлены результаты экспериментальной проверки предложенной методики.

### Введение

Пассивные оптические системы позволяют достаточно точно оценивать поперечную к линии визирования компоненту скорости ветра. В их основе лежит измерение характеристик дрожания изображения [1,2] (пар изображений [3,4]) удаленного контрастного объекта. Необходимым условием реализации этого подхода является достаточная освещенность наблюдаемого объекта, либо сам объект должен быть источником некогерентного излучения. Такая ситуация реализуется далеко не всегда, например, в темное время суток освещенность мала. Отсутствие резких и контрастных границ в изображении также существенно затрудняет применение методов, основанных на статистике дрожания изображений. Поэтому представляет интерес разработка способов оценивания бокового ветра по рассеянному лазерному излучению.

В работах [5,6] было показано, что рассеянное назад излучение содержит достаточно информации для оценки скорости ветра. Корреляционно-спектральный анализ флуктуаций интенсивности в изображении подсвеченного диффузного объекта, проведенный в [7,8] продемонстрировал принципиальную возможность фильтрации вкладов в пространственно-временной спектр интенсивности. Однако в экспериментах с помощью данной методики удается выделять воздушные потоки, параметры которых (скорость ветра, структурная характеристика показателя преломления) достаточно сильно отличающиеся от средних на трассе [9]. Возможность оценки интегральной вдоль трассы скорости поперечного ветра по рассеянному мишенью лазерному излучению требует дополнительного исследования.

В докладе предложен алгоритм обработки видеоизображений, основанный на построении пространственно-временной корреляционной функции интенсивности засветки в изображении однородной диффузной мишени. Алгоритм позволяет в режиме реального времени давать оценку интегральной скорости ветра. Представлены результаты экспериментальной проверки предложенной методики, проведенной летом 2019 г. на полигоне БЭК ИОА СО РАН. Оценки

интегрального ветра сопоставляются с данными независимых измерений расположенной вдоль трассы линейки анемометров.

### 1. Алгоритм оценивания интегральной скорости ветра

Как было показано в [7,8] в пространственно-временной корреляционной функции интенсивности излучения, рассеянного назад диффузной мишенью, содержатся 2 компоненты, связанные с ветровым переносом турбулентных неоднородностей атмосферы. Первая соответствует флуктуациям интенсивности подсвечивающего пучка, вторая определяется неоднородностями на пути от мишени к приемному устройству. Составляющие, связанные с корреляцией неоднородностей на прямом и обратном участках оптической трассы, быстро падают уже при небольшом (1-5 м) поперечном разnose источника подсветки и приемного устройства, поэтому будем ими пренебрегать в дальнейшем.

Степень выраженности двух вышеупомянутых компонент определяется плоскостью регистрации изображения. При регистрации в плоскости резкого изображения флуктуационная составляющая, приобретаемая за счет атмосферной турбулентности на трассе от источника до мишени, значительно превосходит ту, что связана с возмущениями на обратном участке [10]. Именно такую конфигурацию приемного устройства будем использовать далее.

Итак, в плоскости резкого изображения фотоприемной матрицей с частотой следования кадров  $f$  регистрируется временной ряд изображений  $I_{jk}(t_n)$  подсвеченного диффузного объекта. Алгоритм обработки изображений для оценки, например, горизонтальной компоненты скорости ветра состоит в следующем:

1) Изображение усредняется по направлению, перпендикулярному оцениваемой компоненте скорости ветра, по нескольким строкам ( $K=10-20$ ). Это несколько подавляет флуктуационную составляющую интенсивности, но позволяет избежать выноса неоднородностей из поля зрения за счет вертикальной компоненты ветра

$$P_j(t_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K I_{jk}(t_n). \quad (1)$$

2) Для каждого индекса  $j$  по  $N$  кадрам строится временная корреляционная функция

$$B_j(m/f, s) = \frac{1}{N-m} \sum_{n=1}^{N-m} [P_j(t_n) - \langle P_j \rangle] [P_{j+s}(t_{n+m}) - \langle P_{j+s} \rangle], \quad \langle P_j \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N P_j(t_n), \quad (2)$$

которая затем усредняется по всей строке

$$B(m/f, s) = \frac{1}{J-s} \sum_{j=1}^{J-s} B_j(m/f, s). \quad (3)$$

Горизонтальный разнос  $s$  пикселей изображения выбирается так, чтобы время переноса неоднородностей через  $s$  столбцов изображения как минимум в несколько раз превосходило

межкадровый интервал  $1/f$ . Использование усреднения по плоскости изображения позволяет значительно (в 10-20 раз) сократить время, необходимое для формирования корреляционной функции по сравнению с аналогичной процедурой, используемой при оценке ветра из дрожания изображений [11].

3) Абсцисса  $\tau_0$  максимума корреляционной функции (3) смещена относительно нулевой задержки ( $m = 0$ ) на величину, обратно пропорциональную горизонтальной компоненте скорости ветра  $V_h$ . Для ее оценки используем соотношение

$$V = \frac{GsL\Delta\theta}{\tau}, \quad (4)$$

где  $L$  – длина трассы,  $\Delta\theta$  – угол, соответствующий одному пикселю изображения,  $G$  – геометрический фактор, который определяется изменением радиуса подсвечивающего пучка на трассе. Для широкого коллимированного пучка  $G = 1$ .

## 2. Экспериментальная проверка алгоритма

Экспериментальная проверка изложенного выше алгоритма была проведена на полигоне БЭК ИОА СО РАН в августе 2019 г. Измерения проводились на приземной трассе (высота над поверхностью 1-4 м) длиной  $L = 184$  м. Диффузный рассеиватель (стена здания) подсвечивался лазерным пучком. Источником служил непрерывный лазер GLM-10 с длиной волны  $\lambda = 0.532$  мкм.

Радиусы пучка в начале трассы и на мишени практически совпадали ( $r = 5$  см), так что геометрический фактор  $G = 1$ . Регистрация видеоизображений проводилась с частотой  $f = 300$  Гц видеокамерой Basler acA720-520um с интерфейсом USB3.0, матрица которой была расположена в плоскости резкого изображения объектива МТО-100 (фокусное расстояние 0.1 м). Независимое метеосопровождение осуществлялось с помощью линейки из 6 акустических анемометров [12], развернутой вдоль трассы с шагом 25 м.

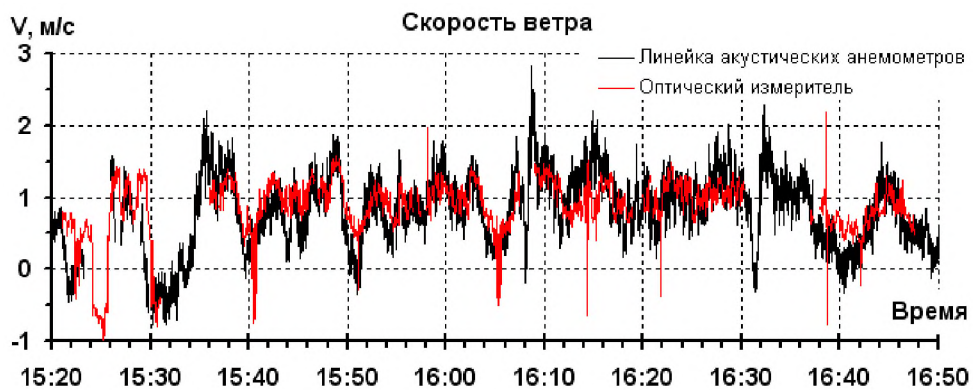


Рисунок 1 – Оценка интегрального ветра оптическим измерителем (время накопления 2 с, красная кривая) и средний ветер по всем анемометрам (черная кривая).

На Рис. 1 приведено сравнение оценки интегральной скорости ветра оптическим методом с интервалом усреднения 2 с и показаний акустических анемометров, усредненных по всей линейке. Прослеживается хорошее совпадение, как по среднему значению, так и динамики флуктуаций с временными масштабами от 10 с.

### Заключение

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет оценивать интегральное вдоль трассы значение поперечной компоненты скорости ветра при достаточно коротком интервале усреднения в 1-2 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-42-700005 p\_a.

1. *Porat O., Shapira J.* Crosswind sensing from optical-turbulence-induced fluctuations measured by a video camera. // *Applied Optics*. 2010. V.49. №28. P. 5236-5244.

2. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Оценка интегральной скорости ветра и турбулентности в атмосфере по искажениям видеоизображений естественно освещенных объектов // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29. № 4. С. 285-293.

3. *Belenkii M.* «Passive crosswind profiler» United States Patent No. US 8,279,287 B2

4. *Маракасов Д.А.* Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений некогерентных источников в турбулентной атмосфере // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29. № 4. С. 294-299.

5. *Clifford S.F., Ochs G.R., Wang Ting-I.* Optical wind sensing by observing the scintillations of a random scene // *Applied Optics*. 1975. V. 14. №.12. P.2844-2850.

6. *Walters D. L.* Passive remote crosswind sensor // *Applied Optics*. 1977. V. 16. №10. P. 2625-2626.

7. *Banakh V.A., Vorontsov M.A., Marakasov D.A.* Cross-wind profiling based on the scattered wave scintillations in a telescope focus // *Applied Optics*. 2007, V. 46. № 33. P. 8104-8117.

8. *Банах В.А., Маракасов Д.А.* Восстановление профиля скорости ветра по флуктуациям интенсивности рассеянной волны в приемном телескопе // *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38. №9. С. 889-894.

9. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Маракасов Д.А., Ростов А.П.* Восстановление профиля поперечной компоненты скорости ветра по флуктуациям расходящегося лазерного пучка на атмосферной трассе // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2010. Т. 53. №9/3. С. 101-103.

10. *Маракасов Д.А.* Восстановление профиля ветра из флуктуаций интенсивности сферической волны, отраженной в турбулентной атмосфере // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2009. Т. 52. № 12. С. 20-27.

11. *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 атмосферы и океана*. 2017. Т.30. №8. С. 657-663.

12. *Ростов А.П.* Массив одномерных акустических анемометров – термометров // *Восьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: Мат-лы рос. конф. / Под ред. М.В. Кабанова. – Томск: аграф-Пресс, 2009. С. 368-370.*