

Метод дистанционного измерения скорости ветра в режиме реального времени

В.В. Дудоров

Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН
Томск, Россия
dvv@iao.ru

С.О. Шестаков

Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН
Томск, Россия
sso@iao.ru

Аннотация—Мы предлагаем метод дистанционного измерения поперечной составляющей скорости ветра в режиме реального времени на основе обработки искажённых атмосферой изображений. Метод реализован в программном обеспечении и работает с использованием высокочастотной видеокамеры высокого разрешения. Представлены результаты лабораторного эксперимента с использованием разработанной программы.

Ключевые слова— обработка изображений, анализ изображений, режим реального времени, измерение скорости ветра.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что степень искажения оптических полей в атмосфере определяется силой турбулентности [1-3]. На основании этой закономерности разрабатываются методы дистанционного зондирования таких характеристик атмосферы как структурная характеристика флуктуаций показателя преломления, масштабы турбулентности, скорость ветра и другие [4-12]. В задачах измерения скорости ветра при анализе турбулентных искажений оптических полей можно определять компоненту вектора скорости ветра, перпендикулярную направлению распространения излучения [8, 9], в отличие от доплеровских лидаров, зондирующих продольную скорость ветра на основе рассеянного аэрозолем излучения [11].

Существующие пассивные методы измерения поперечного ветра основываются на определении сдвига функции корреляции дрожания изображений некоторого контрастного элемента объекта, сформированных двумя рядом расположенными приемными телескопами, либо корреляции дрожания изображений двух однотипных элементов объекта, сформированных единственным телескопом [9]. Кроме этого, также анализируется корреляция флуктуаций интенсивности излучения в плоскости изображения [10]. Общей особенностью данных подходов является необходимость накопления статистики флуктуаций анализируемых величин, что соответствует измерению скорости ветра, усредненной за некоторый интервал времени, который обычно составляет не менее нескольких секунд [12]. Это является недостатком использования данного подхода в задачах, когда необходимо знать мгновенное значение скорости ветра, как, например, при корректировке линии прицеливания или определении благоприятных условий взлета и посадки летательных аппаратов.

Предлагаемый нами метод позволяет измерять мгновенную скорость поперечного ветра на трассе между объектом и приёмной системой. Это является главным преимуществом метода перед аналогами, которые проводят измерения с усреднением по некоторому временному промежутку. Кроме того, при правильной

реализации этого метода и использовании подходящей аппаратной части возможно удовлетворение требований к скорости регистрации кадров и скорости их обработки, возникающих из-за изменчивости атмосферных неоднородностей и необходимости работы в режиме реального времени.

Фактически задача заключается в детектировании атмосферных неоднородностей на трассе наблюдения и отслеживании их перемещения с течением времени. Скорость перемещения неоднородностей на трассе является искомой скоростью ветра. То есть для измерения скорости ветра необходимо вначале выделить атмосферные аберрации из снятых кадров и затем проследить за скоростью их перемещения.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Предлагаемый алгоритм начинается с выделения атмосферных неоднородностей в кадрах видеопотока. Это выделение производится с помощью характеристики изображения, которая называется картой качества:

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

где $I(\mathbf{r}, t)$ – изображение, $\mathbf{r} = \{x, y\}$ – вектор в плоскости, перпендикулярной оси наблюдения OZ, $\nabla_r = \mathbf{i} \partial / \partial x + \mathbf{j} \partial / \partial y$ – вектор-градиент, $|\nabla_r I(\mathbf{r}, t)|^2$ – функционал резкости изображения, $\otimes$ – операция свёртки, a_k – коэффициент сглаживания, $K(\mathbf{r}, a_k)$ – функция сглаживания в виде гауссоиды.

Используя карты качества соседних кадров (зарегистрированных в моменты времени t и $t - \Delta t$) рассчитывается функция взаимной корреляции (2) с целью детектирования смещения выделенных аберраций на трассе. Аргумент максимального значения функции взаимной корреляции (3) будет указывать на величину смещения неоднородностей.

$$R(\mathbf{r}, a_k, t) = \int d\mathbf{r}' Q(\mathbf{r}', a_k, t - \Delta t) Q(\mathbf{r} + \mathbf{r}', a_k, t), \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{r}(t) = \arg \max [R(\mathbf{r}, a_k, t)]. \quad (3)$$

Далее скорость ветра рассчитывается с использованием следующего выражения:

$$\mathbf{v}(t) = \Delta \mathbf{r}(t) / \Delta t \cdot z_{is} / z_{im}, \quad (4)$$

где z_{is} – расстояние до анализируемого слоя атмосферы, z_{im} – расстояние от плоскости апертуры до плоскости изображения.

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

На основе вышеизложенного метода было разработано программное обеспечение, позволяющее

рассчитывать поперечную составляющую скорости ветра на горизонтальной трассе в режиме реального времени. Программа использует высокоскоростную цифровую видеокамеру Мако U-130B с интерфейсом подключения USB 3.0 и разрешением 1280×1024 точек. Как было сказано выше, скорость регистрации и обработки кадров имеют решающее значение при использовании предлагаемого метода. Используемая нами камера при своем максимальном разрешении позволяет регистрировать около 160-ти кадров в секунду, что является достаточным для метода. Разработанная программа обрабатывает 100-160 кадров в секунду в зависимости от размеров областей интереса в кадре. Все вычисления происходят на центральном процессоре ПК. Такая скорость работы была достигнута на 4-х ядерном процессоре с 8-ю потоками и базовой тактовой частотой работы 4.00 ГГц. Таким образом, выполняются требования скорости съемки и обработки кадров для успешного применения метода.

4. ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

С использованием разработанного программного обеспечения были проведены лабораторные эксперименты. Целью экспериментов являлись проверка и демонстрация работы метода на практике в контролируемых условиях. Таким образом можно более точно проследить за реакцией метода на запланированные возникновения и затухания ветра, в отличие от экспериментов в натуральных уличных условиях, когда ветер ведёт себя неконтролируемо и из-за этого проблематично определить распределение ветра на всей трассе.

Имитацию ветра в эксперименте выполнял комнатный вентилятор с нагревателем. В качестве тестовой трассы выступал коридор в главном корпусе ИОА СО РАН. Длина трассы от видеокамеры до тестового объекта составляла 75 метров. Результат расчетов метода показан на рис. 1.

На графике можно увидеть динамику изменений скорости смещения неоднородностей в течение 30-ти секунд продолжительности эксперимента. График колеблется около нуля в периоды, когда вентилятор был выключен, и явные смещения неоднородностей отсутствовали. А в периоды, когда вентилятор был включен вначале наблюдается равномерный быстрый рост кривой, затем колебания в пределах смещения 40-50 пикселей, что соответствует скорости примерно 1 м/с, и в конце такое же равномерное быстрое падение кривой графика.

Таким образом, в эксперименте было показано, что предлагаемый метод измерения поперечной скорости

ветра на трассе работоспособен и адекватно детектирует динамику изменения скорости смещения атмосферных неоднородностей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлен метод дистанционного измерения поперечной составляющей скорости ветра, а также его экспериментальная апробация в режиме «реального времени». Показана работоспособность метода в контролируемых лабораторных условиях. Дальнейшее исследование будет направлено на апробацию предложенного метода в реальных атмосферных условиях на трассах различной протяженности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-32-90214).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лукин, В.П. Адаптивное формирование пучков и изображений в атмосфере / В.П. Лукин, Б.В. Фортес. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 1999. – 214 с.
- [2] Воронцов, М.А. Принципы адаптивной оптики / М.А. Воронцов, В.И. Шмальгаузен. – Москва: Наука, 1985. – 336 с.
- [3] Roggemann, M.C. Imaging Through Turbulence / M.C. Roggemann, B.M. Welsh, B.R. Hunt. – CRC Press, 1996. – 320 p.
- [4] Гурвич, А.С. К методике определения структурной характеристики показателя преломления в атмосфере по изображениям радиальной миры / А.С. Гурвич, И.А. Старобинец, А.М. Черемухин // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. – 1974. – Т. 10, № 4. – Р. 413-416.
- [5] Ochs, G.R. Refractive-turbulence profiles measured by one-dimensional spatial filtering of scintillations // Appl. Opt. – 1976. – Vol. 15(10). – P. 2504.
- [6] Fisher, M.J. The crossed-beam correlation technique / M.J. Fisher, F.R. Krause // J. Fluid Mech. – 1967. – Vol. 28(4). – P. 705.
- [7] Wang, T. Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations / T. Wang, G.R. Ochs, R.S. Lawrence // Appl. Opt. – 1981. – Vol. 20(23). – P. 4073.
- [8] Holmes, R.B. Passive optical wind profilometer / R.B. Holmes // US patent N 5.469.250 US005469250A USA. – 1995.
- [9] Belenkii, M. Passive crosswind profiler / M. Belenkii // US patent N 2010/0128136 A1. – 2010.
- [10] Porat, O. Crosswind sensing from optical-turbulence-induced fluctuations measured by a video camera / O. Porat, J. Shapira // Appl. Opt. – 2010. – Vol. 49(28). – P. 5236.
- [11] Hall, F.F. Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar / F.F. Hall, R.M. Huffaker, R.M. Hardesty // Appl. Opt. – 1984. – Vol. 23(15). – P. 2503-2506.
- [12] Маракасов, Д.А. Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений некогерентных источников в турбулентной атмосфере / Д.А. Маракасов // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 04. – С. 294-299.

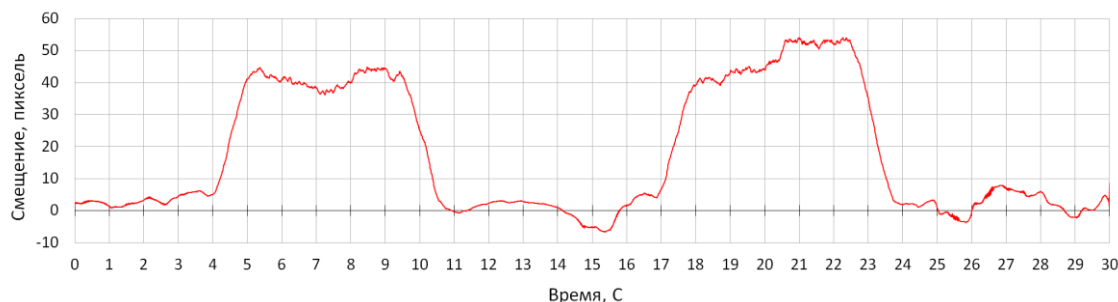


Рис. 1. График скорости смещения атмосферных неоднородностей на трассе в ходе выполнения лабораторного эксперимента