

Оценивание интегральной скорости ветра и турбулентности в атмосфере по искажениям видеоизображений естественно освещенных объектов

А.Л. Афанасьев, В.А. Банах, А.П. Ростов*

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

Поступила в редакцию 8.02.2016 г.

Представлены одновременные оценки среднего поперечного ветра и интенсивности атмосферной турбулентности классическим методом лазерного просвечивания и пассивным оптическим методом из анализа излучения, рассеянного на природных или искусственных топографических объектах в условиях естественно-дневного освещения. Метод пассивного зондирования не требует искусственного светового источника и заключается в формировании некогерентных изображений топографических объектов, наблюдаемых при солнечном освещении, и анализе искажений, наведенных турбулентностью между объектом и плоскостью наблюдения. В атмосферном эксперименте на одной и той же измерительной трассе выполнено сравнение оценок интегральных значений среднего поперечного ветра и структурной характеристики показателя преломления воздуха обоими методами. Проведено сопоставление с лидарными данными. Оптические измерения интегральных характеристик сопровождались независимыми локальными акустическими измерениями с использованием ультразвукового термоанемометра.

Ключевые слова: скорость ветра, турбулентность, видеоизображение, пространственно-временная корреляция; wind velocity, turbulence, optical imaging, spatio-temporal correlation.

Введение

В настоящее время для дистанционного измерения ветра и исследования ветровой и оптической турбулентности широко используются когерентные доплеровские ветровые лидары. В частности, все большее применение в исследованиях пограничного слоя атмосферы находят световодные микроимпульсные когерентные лидары с низкой энергией зондирующего импульса [1–8].

Другим широко применяемым радиофизическим методом диагностики природных и искусственных сред является трассовый метод зондирования, заключающийся в просвечивании среды эталонными сигналами и анализе их искажений, вызванных неоднородностями среды распространения. Метод позволяет дистанционно проводить оперативные оценки параметров движения среды, не внося при этом возмущения в исследуемый поток.

В оптическом диапазоне волн к таким методам относится метод лазерного просвечивания [9–22]. Для условий прозрачной атмосферы определяющим фактором возникновения флуктуаций оптического сигнала становится рассеяние на турбулентных неоднородностях показателя преломления. В отличие

от доплеровских лидарных методов, здесь источником информации о ветре служат флуктуации интенсивности, обусловленные пространственно-временными флуктуациями показателя преломления воздуха. Эти флуктуационные методы, как правило, позволяют определять поперечный к трассе вектор интегральной (усредненной вдоль направления визирования) скорости без использования сканирования, их реализация не требует громоздких конструкций, как в случае радаров и содаров.

Физическую основу этих методов составляет теория распространения оптических волн в средах со случайными неоднородностями [23–25]. Световое излучение, прошедшее слой турбулентной атмосферы, испытывает случайные искажения уровня и фазы оптической волны. Основной причиной сцинтилляций являются температурные неоднородности атмосферы, приводящие к изменению плотности и флуктуациям показателя преломления воздуха.

Развитие искажений начинается с фазовых возмущений, затем явления дифракции и интерференции приводят к появлению флуктуаций интенсивности («мерцаний»).

Одно из основных положений, на которых базируется анализ картины мерцаний, заключается в предположении замороженности дифракционной картины, означающем, что временные флуктуации интенсивности являются результатом движения пространственных неоднородностей среды со скоростью потока

* Алексей Леонидович Афанасьев (afanasiev@iao.ru); Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Андрей Петрович Ростов (rostov@iao.ru).

относительно фиксированного луча зрения. При этом пространственная картина модуляций интенсивности наблюдается в точке приема в виде временных флуктуаций интенсивности.

Данные искажения содержат информацию об интенсивности и характерных пространственно-временных масштабах турбулентных неоднородностей показателя преломления воздуха, а также о скорости их переноса поперек луча. На этом принципе основаны сцинтилляционные методы оценки усредненной вдоль трассы распространения оптической волны скорости поперечного ветра [9–14], а также методы ветрового профилирования [15–18]. Оценки параметров среды в этом случае можно получить из анализа относительных фазовых, частотных и амплитудных флуктуаций излучения, возникающих на трассах распространения под воздействием турбулентности.

Сцинтилляционный метод диагностики сред может применяться для изучения турбулентных потоков как в естественных условиях (атмосферных и океанических течений, газовых и плазменных потоков), так и в искусственно созданных струях, пограничных слоях, плазменных образованиях. Важнейшей областью применения методов просвечивания являются исследования ветровой и температурной турбулентности атмосферы. Наряду с доплеровскими эти методы являются наиболее подходящими для получения данных о структуре и параметрах мелко-масштабной турбулентности, усредненных на различных пространственных и временных масштабах. Во многих практических приложениях значительный интерес представляет определение именно усредненных вдоль луча характеристик среды. Интегральные измерения являются репрезентативными даже при относительно коротких временах осреднения. Дополнительная стабилизация данных за счет пространственного усреднения определяемой характеристики вдоль трассы распространения в некоторых случаях имеет принципиальное значение, например, для прогнозирования влияния турбулентности на технические характеристики лазерных систем, функционирующих в атмосфере и т.п.

В большинстве методов просвечивания объектом анализа служат турбулентные флуктуации интенсивности лазерного излучения и их пространственно-временная структура. Оценки скорости ветра производятся корреляционным методом, использующим временную задержку в максимуме взаимной корреляционной функции флуктуаций параметров излучения в двух точках, пространственно разнесенных по направлению скорости ветра в плоскости, перпендикулярной трассе.

Известные методы, основанные на анализе пространственно-временной статистики флуктуаций интенсивности лазерного излучения, имеют ряд недостатков. Вследствие эффекта насыщения флуктуаций интенсивности [23–25] имеются ограничения на длину оптической трассы, так как для длинных трасс, когда реализуются условия сильных флуктуаций, разработать кросс-корреляционные алгоритмы восстановления скорости ветра не удастся из-за нелинейности обратной задачи. Работоспособность мето-

дов в атмосфере ограничена условиями слабых флуктуаций и трассами порядка нескольких сотен метров.

Кроме того, для обеспечения значимой корреляции между измеряемыми сигналами разнос приемников должен находиться в пределах радиуса корреляции флуктуаций интенсивности. Для плоской волны он имеет размер порядка первой зоны Френеля, т.е. для видимого света и трасс 100–1000 м составляет всего 6–20 мм. Очевидно, что размер самих приемников при таком разноте должен быть на порядок меньше. Ограничения на размер приемников обусловлены также эффектом усредняющего действия апертур приемных оптических систем на флуктуации потока интенсивности [23]. В соответствии с этим для обеспечения максимальной чувствительности приемные диафрагмы должны быть «точечными». «Точечные» размеры приемников обуславливают низкую светочувствительность методов, ограничивая их применимость связными трассами или схемами с зеркальным отражением.

Этого недостатка лишены методы, основанные на измерении фазовых флуктуаций. Когда внешний масштаб турбулентности превышает размер измерительной базы, фазовые флуктуации не испытывают насыщения с увеличением дистанции. Методы, базирующиеся на анализе турбулентных дрожаний изображений лазерных источников, обусловленных локальными случайными фазовыми искажениями волнового фронта, являются более перспективными с точки зрения увеличения дальности зондирования. Обзор методов оценивания ветра, основанных на регистрации углов наклона волнового фронта принимаемого лазерного излучения датчиками Гартмана, приведен в [14], однако эти методы сложны в реализации.

Более простой способ преодоления ограничения на дальность измерения заключается в использовании для просвечивания некогерентных источников света, для которых режим сильных флуктуаций реализуется на трассах значительно большей протяженности, чем в случае когерентного лазерного излучения [25]. Возможность реализации такого подхода продемонстрирована в [13] для измерителя интенсивности оптической турбулентности, где в качестве излучателя используются две пространственно-разнесенных светодиодных матрицы, представляющие собой некогерентный оптический источник излучения. Это позволяет увеличить дальность измерений до нескольких километров, однако остаются проблемы, связанные с процедурами организации трассовых измерений. Операции размещения источника и приемника и их взаимное наведение существенно снижают оперативность измерений и мобильность метода для многих практических приложений.

1. Концепция пассивного оптического ветрового мониторинга

В качестве альтернативных оптических методов, свободных от отмеченных недостатков, могут быть использованы пассивные методы оценки скорости

ветра. Данный класс методов основывается на кросс-корреляционном анализе пространственно-временной структуры турбулентных искажений цифровых видеоизображений топографических объектов, наблюдаемых при естественном (солнечном) освещении.

По сравнению с активным зондированием данный подход имеет несколько принципиальных преимуществ. Он полностью исключает необходимость организации оптической трассы, взаимного наведения приемника и передатчика, использования лазера и его энергетического питания, что значительно уменьшает сложность устройства, а также его размеры, вес и энергопотребление, повышает мобильность и оперативность измерений. Предлагаемый подход может существенно удешевить и упростить методику дистанционных оптических измерений скорости ветра. Пассивный метод основан на анализе корреляционных задержек дрожания выделенных элементов некогерентных изображений, т.е. на фазовых явлениях. Поскольку пространственные флуктуации наклонов волнового фронта не зависят от длины волны излучения, при реализации метода могут использоваться регистраторы изображений различных спектральных диапазонов, что является дополнительным преимуществом.

Идея использования некогерентных видеоизображений при ветровом зондировании достаточно привлекательна и попытки ее реализации предпринимались давно. Исторически пассивные оптические методы определения поперечного ветра начали развиваться параллельно с активными оптическими методами, основанными на анализе флуктуаций интенсивности просвечивающего атмосферный слой оптического излучения. Однако до настоящего времени возможности применения пассивных оптических методов для измерения интегральной скорости ветра и ее профиля в атмосфере в значительной степени не изучены. Исследования в этом направлении носят спорадический экспериментальный характер, и публикаций на эту тему немного [19–22]. Создание пассивных измерителей ветра представляет собой сложную научно-техническую задачу, и надежных практических разработок, реализующих пассивный метод измерений ветра, до настоящего времени не появилось.

В данной статье дается описание метода оценки поперечной к линии визирования компоненты интегральной скорости ветра, основанного на корреляционном анализе цифровых видеоизображений топографических объектов, наблюдаемых при естественном освещении. Метод базируется на анализе искажений, вносимых в некогерентные изображения окружающих объектов турбулентными флуктуациями показателя преломления воздуха. Он является пассивным, не требует наличия лазерного источника излучения и рассеивающих частиц на трассе, в отличие от доплеровских лидарных методов [1–8].

Представлены результаты экспериментальной проверки данного метода с использованием для записи случайных реализаций распределений интенсивности высокоскоростной цифровой видеокамеры. При реализации метода регистрируются временные

флуктуации локальных наклонов волнового фронта, оцениваемые по смещениям энергетических центров тяжести (ЭЦТ) выделенных участков изображений, и делаются оценки их пространственных перемещений под воздействием ветрового переноса.

Приводятся оценки скорости ветра и интенсивности атмосферной турбулентности классическим активным методом оптического просвечивания, полученные из измерений, одновременных с пассивными. Для когерентного лазерного излучения метод реализуется с применением взаимного корреляционного анализа флуктуаций интенсивности по задержке максимума пространственно-временной корреляционной функции флуктуаций интенсивности в двух приемных точках. В проведенных экспериментах оптические измерения сопровождались локальными измерениями ветра с помощью акустических анемометров.

Известно, что влияние атмосферной турбулентности на изображения, формируемые оптическими системами с большими апертурами, проявляется в дрожании изображений. При наблюдении протяженных объектов в некогерентном естественном свете в турбулентной атмосфере границы объекта размываются. Эта размытость границ вызвана случайными вариациями наклонов волнового фронта рассеянного объектом света или тем фактом, что оптические волны, излучаемые различными областями поверхности наблюдаемого объекта, распространяются по разным путям в атмосфере и приобретают разные наклоны волнового фронта вследствие случайных изменений показателя преломления воздуха в пространстве и во времени.

Данный эффект известен под обобщенным названием «анизопланатизм наклонов волнового фронта». Благодаря этому эффекту внутренние детали изображения также случайно смещаются во времени соответственно пространственным вариациям наклонов. При этом в приемной плоскости размер подобласти изображения, смещающейся как целое (без изменения внутренней структуры), определяется угловым масштабом изопланатичности

$$\alpha_0 = \left[\left(\frac{3}{8} \right) 2,91 k^2 C_n^2 L^{8/3} \right]^{-3/5},$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны; C_n^2 — структурная постоянная турбулентных флуктуаций показателя преломления; L — длина оптической трассы. Данный масштаб является характерным для турбулентных искажений углов прихода. Приемная оптическая система действует как пространственный фильтр, выделяя градиенты фазы на базе приемной апертуры. Влияние меньших масштабов пространственно усредняется (приводит к размытию — ухудшению качества).

Подобласти, разделенные на угловое расстояние, большее чем масштаб изопланатичности, движутся независимо. Эти перемещения частей изображения вызваны турбулентными вихревыми движениями объемов воздуха, переносимых ветром поперек луча зрения. Вследствие того, что турбулентные вихри перемещают объемы воздуха с различающимися

значениями показателя преломления, локальная фазовая скорость оптической волны изменяется случайным образом в пространстве и во времени и волновой фронт приобретает локальные случайные наклоны. Следовательно, скорость поперечного ветра может быть определена из измерений пространственно-временной статистики локальных наклонов волнового фронта. Таким образом, измерения локальных наклонов обеспечивают физическую осуществимость пассивного ветрового зондирования на основе анализа видеоизображений топографических объектов.

2. Эксперимент

Пассивный метод оптического измерения скорости был апробирован в атмосфере. Длина трассы составляла 475 м и проходила в среднем на высоте 2,5 м над ровной подстилающей поверхностью. Оптические измерения проводились в дневное время в условиях развитой турбулентности приземного слоя.

С целью оценки ветровых характеристик пассивным методом применялся подход, основанный на анализе излучения, рассеянного на природных или искусственных топографических объектах в условиях естественного дневного освещения. Метод заключается в формировании некогерентных оптических изображений и корреляционном анализе искажений этих изображений, вызванных атмосферной турбулентностью между объектом и плоскостью наблюдения.

Приемная оптическая система экспериментально-го макета пассивного измерителя поперечного к направлению наблюдения ветра состояла из двух телескопических объективов, разнесенных на некоторое фиксированное расстояние в приемной плоскости. В качестве приемников использованы два зеркально-менисковых объектива МТО-100 диаметром 10 см. Объективы были разнесены в горизонтальном направлении. Расстояние между их центрами в поперечной к линии визирования плоскости составляло 17 см. Изображения произвольно выделенного на фоне окружающего пейзажа неподвижного удаленного объекта, формируемые совмещенными полями зрения двух объективов приемной системы, оптически сводились на одну фотоприемную матрицу скоростной видеокамеры. Регистрация изображений производилась видеокамерой HotShot 512SC фирмы NAC со скоростью 2000 кадр./с. Затем видеозаписи поступали в компьютер, где по специальному алгоритму производилась дальнейшая обработка.

Дополнительно в качестве независимых измерителей скорости ветра были использованы трассовый оптический измеритель [26] и два акустических анемометра [27].

В основе работы трассового оптического измерителя скорости [26] лежит классический способ оценки интегральной скорости поперечного ветра по временному сдвигу взаимной корреляционной функции флуктуаций интенсивности лазерного излучения в двух точках, разнесенных в приемной плоскости перпендикулярно трассе в пределах первой зоны Френеля $\sqrt{\lambda L}$. В качестве оптического источника был

использован твердотельный лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм и средней мощностью 30 мВт. Излучение лазера проходит турбулентный слой атмосферы и попадает в приемный блок на два пространственно разнесенных фотоприемника. Перенос неоднородностей показателя преломления на трассе вызывает флуктуации интенсивности излучения на фотоприемниках. Флуктуации имеют временную задержку друг относительно друга, равную времени пролета неоднородностей между фотоприемниками. Сигналы с фотоприемников трассового измерителя поступали на устройство подготовки данных с USB-интерфейсом и регистрировались на компьютере с частотой 5 кГц. Статистический анализ сигналов с фотоприемников позволяет определить время ветрового переноса турбулентных неоднородностей на заданное расстояние и затем вычислить скорость ветра. Скорость ветра оценивалась по сдвигу максимума взаимных корреляционных функций сигналов, а структурная характеристика C_n^2 — по дисперсии флуктуаций. В атмосферном эксперименте данные трассового измерителя использовались для сравнения с результатами определения интегральной поперечной скорости пассивным методом.

Акустические анемометры были объединены в общую вычислительную сеть, по которой данные о значениях скорости ветра и температуры поступали в компьютер. Частота регистрации равнялась 3 Гц.

Таким образом, на одной и той же измерительной трассе одновременно было реализовано три независимых метода измерения скорости ветра. Регистрация потоков информации от оптических и акустических датчиков производилась синхронно.

В ходе экспериментов также были проведены совместные измерения поперечной к линии визирования компоненты скорости ветра с помощью доплеровского лидара Stream Line [28]. Приемопередающая система лидара была ориентирована перпендикулярно линии визирования на объект наблюдения. При такой геометрии эксперимента измеряемая лидаром радиальная компонента скорости являлась поперечной для пассивного измерителя. Аэрозольный рассеивающий объем, используемый для лидарных оценок ветра, выбирался вблизи середины оптической трассы. Здесь же размещался акустический анемометр. В течение примерно часового интервала было проведено 13 видеозаписей различных топографических объектов одновременно с лидарными и акустическими измерениями ветра.

3. Обработка экспериментальных данных

Информативной характеристикой для оценки скорости ветра пассивным методом являются турбулентные искажения изображения, обусловленные температурными микропульсациями показателя преломления воздуха.

При реализации пассивного оптического метода ветровых оценок удобным способом получения трехмерного пространственно-временного массива данных о флуктуациях интенсивности оптического излучения

с высоким временным и пространственным разрешением является использование скоростной видеозаписи. Для дальнейшего пространственно-временного анализа становится доступным массив временных флуктуаций распределений интенсивности в выбранной пространственной области или по всему кадру в плоскости наблюдения. Временные изменения фиксируются с частотой кадров видеоизображения.

При дальнейшей обработке в изображениях левого и правого объективов выделялся один и тот же участок размером 20×20 пикселей. В данном случае размер пикселя изображения соответствовал 2 мм на мишени. Угловое поле зрения выделенного блока пикселей – 87 мкрад.

Оценки локальных наклонов волнового фронта осуществлялись посредством вычисления энергетических центров тяжести участков видеоизображения в каждом из объективов. В качестве объектов корреляционного анализа использовались временные ряды флуктуаций координат ЭЦТ выделенных блоков пикселей.

Примеры получаемых изображений, искаженных турбулентными флуктуациями показателя преломления воздуха, и выбор анализируемых блоков показаны на рис. 1.

Алгоритм обработки предусматривает возможность выбора в изображениях высококонтрастных областей с повышенным отношением сигнал-шум. Это оказывается полезным при решении задачи отсева ошибочных данных, появление которых вызывается шумами и ошибками в определении положения максимума корреляционной функции, неизбежными при автоматизированной обработке больших массивов данных.

Мерой изменения локального наклона волнового фронта (угла прихода) в приемной плоскости является величина смещения соответствующего локального участка изображения [23]. Смещение участка изображения в процессе турбулентного дрожания определяется как вектор, на величину которого нужно сдвинуть изображение в одном приемнике, чтобы получить максимальную корреляцию с изображением

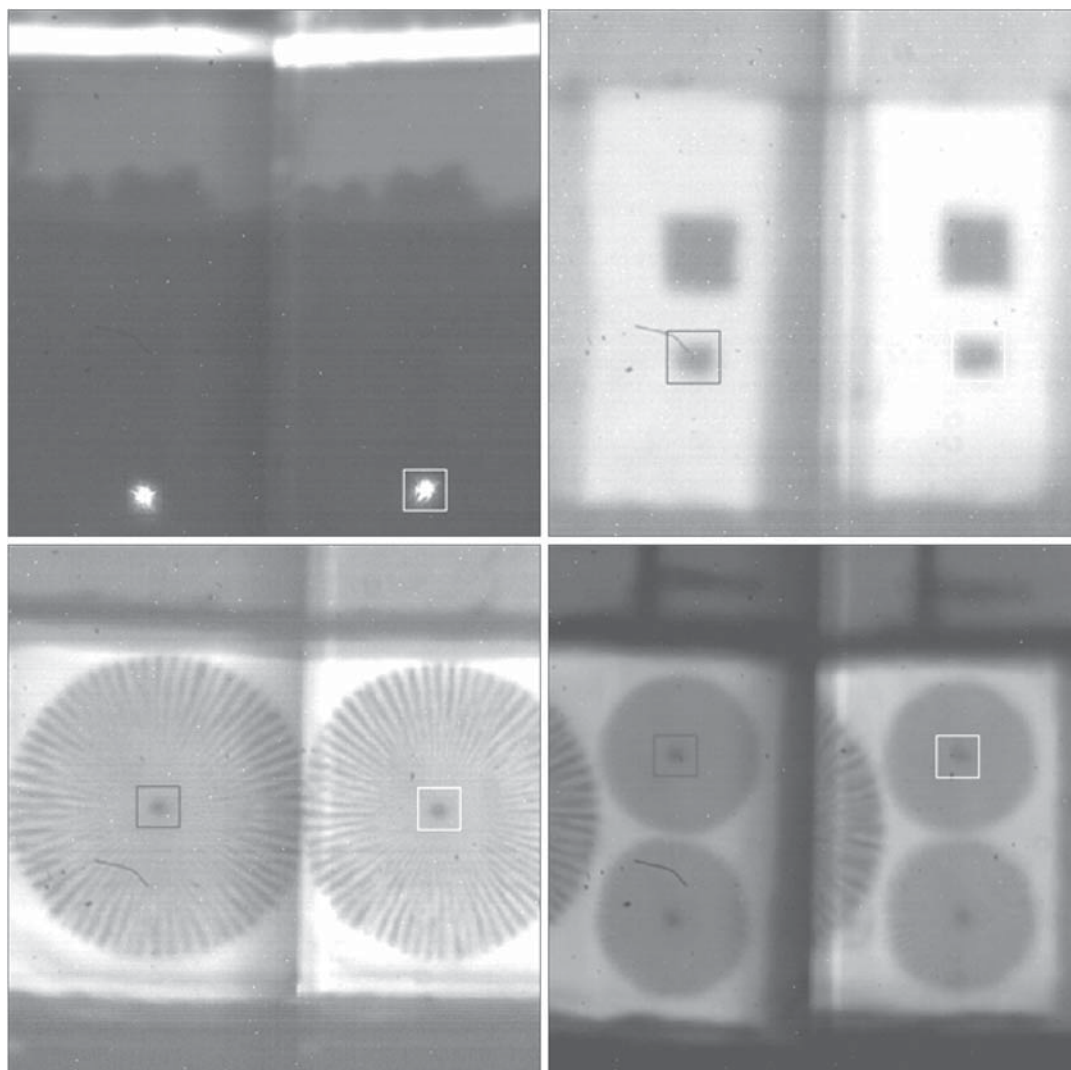


Рис. 1. Примеры изображений объектов, формируемые стереоскопической приемной системой, и выбор анализируемых участков

в другом в тот же момент времени. При вычислении этого смещения необходимо использовать двумерный взаимный корреляционный анализ изображений, требующий определенных вычислительных ресурсов и затрат времени. В то же время оценка ЭЦТ блока изображения является сравнительно простой операцией, легко реализуемой в реальном времени. Поэтому при реализации метода оценки наклонов волнового фронта целесообразно производить по ЭЦТ. Однако при выборе рабочих участков изображений и оценке наклонов волнового фронта по ЭЦТ следует учитывать влияние структуры изображения в окрестности выделяемого блока.

В зависимости от размеров анализируемых блоков и особенно от структуры изображений выделенных блоков, смещения ЭЦТ и истинное смещение блока в целом могут не совпадать. Действительно, если турбулентные дрожания изображения точечного источника не приводят к смещениям источника за пределы выделенного блока, то смещение изображения блока как целого и смещение его ЭЦТ практически эквивалентны. В общем же случае смещения изображения и смещения ЭЦТ не совпадают, вследствие постоянного входа и выхода элементов изображения на края блока, а также эволюции изображения внутри блока.

В связи с этим предпочтительным является выбор высококонтрастных участков изображения, а угловой размер выбранного участка не должен превосходить размер области изопланатизма α_0 .

Для анализа полученных временных рядов ЭЦТ использован кросс-корреляционный алгоритм. Ряды ЭЦТ могут быть разбиты на временные участки длительностью, равной выбранному времени осреднения для получения одного значения оценки скорости. На рис. 2 показан пример изменения сдвига максимума корреляции во времени для трех последовательных временных интервалов видеозаписи. Для более точной оценки положения максимума применялась сплайн-аппроксимация вершины корреляционной кривой.

По задержке максимума взаимной корреляции дрожания изображений τ (в единицах интервала дискретизации) с учетом пространственного разнеса приемных объективов ρ и частоты кадров видеосъемки f_{frame} проводились оценки скорости перемещения оптических неоднородностей поперек поля зрения приемной системы $V = \rho f_{frame} / (2\tau)$.

Интегральное по трассе значение C_n^2 оценивалось по дисперсии дрожаний выделенного участка изображения

$$C_n^2 = \sigma_\alpha^2 D^{1/3} / (1,14L),$$

где σ_α^2 – дисперсия дрожания ЭЦТ; D – диаметр объектива.

4. Результаты измерений

На рис. 3, *a* и *б* соответственно представлены примеры одновременных оценок интегральной (усредненной вдоль трассы) средней поперечной скорос-

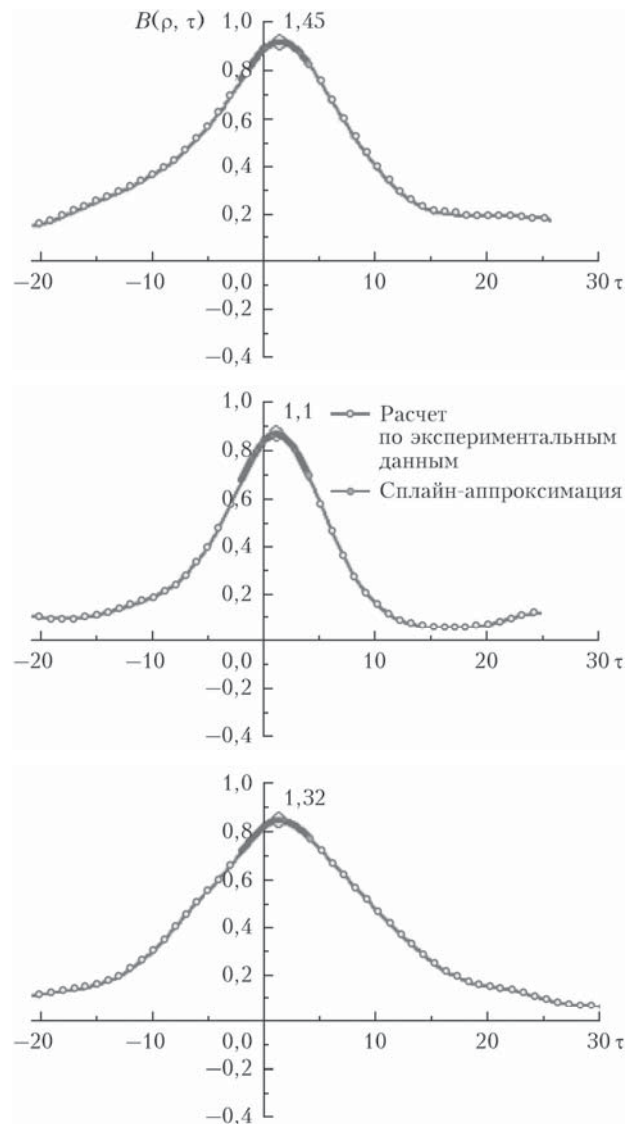


Рис. 2. Временные изменения задержки максимума взаимной корреляции рядов ЭЦТ выделенных блоков изображений

ти ветра и структурной характеристики показателя преломления C_n^2 пассивным методом наблюдения удаленных объектов и активным методом лазерного просвечивания, а также приведены синхронные данные локальных акустических измерений. На протяжении всего периода измерений данные, полученные оптическими методами, удовлетворительно согласуются между собой, также прослеживается совпадение динамики интегральных оптических и локально измеренных акустических данных.

На рис. 4 приведено сопоставление оценок интегральной скорости ветра пассивным методом с локальными данными когерентного доплеровского ветрового лидара Stream Line и акустического анемометра, размещенного на высоте 2,5 м в середине трассы. В отличие от предыдущих измерений, в данном эксперименте видеозапись изображения осуществлялась одним объективом. В этом случае оценивалась корреляция сигналов не на базе разнеса приемников,

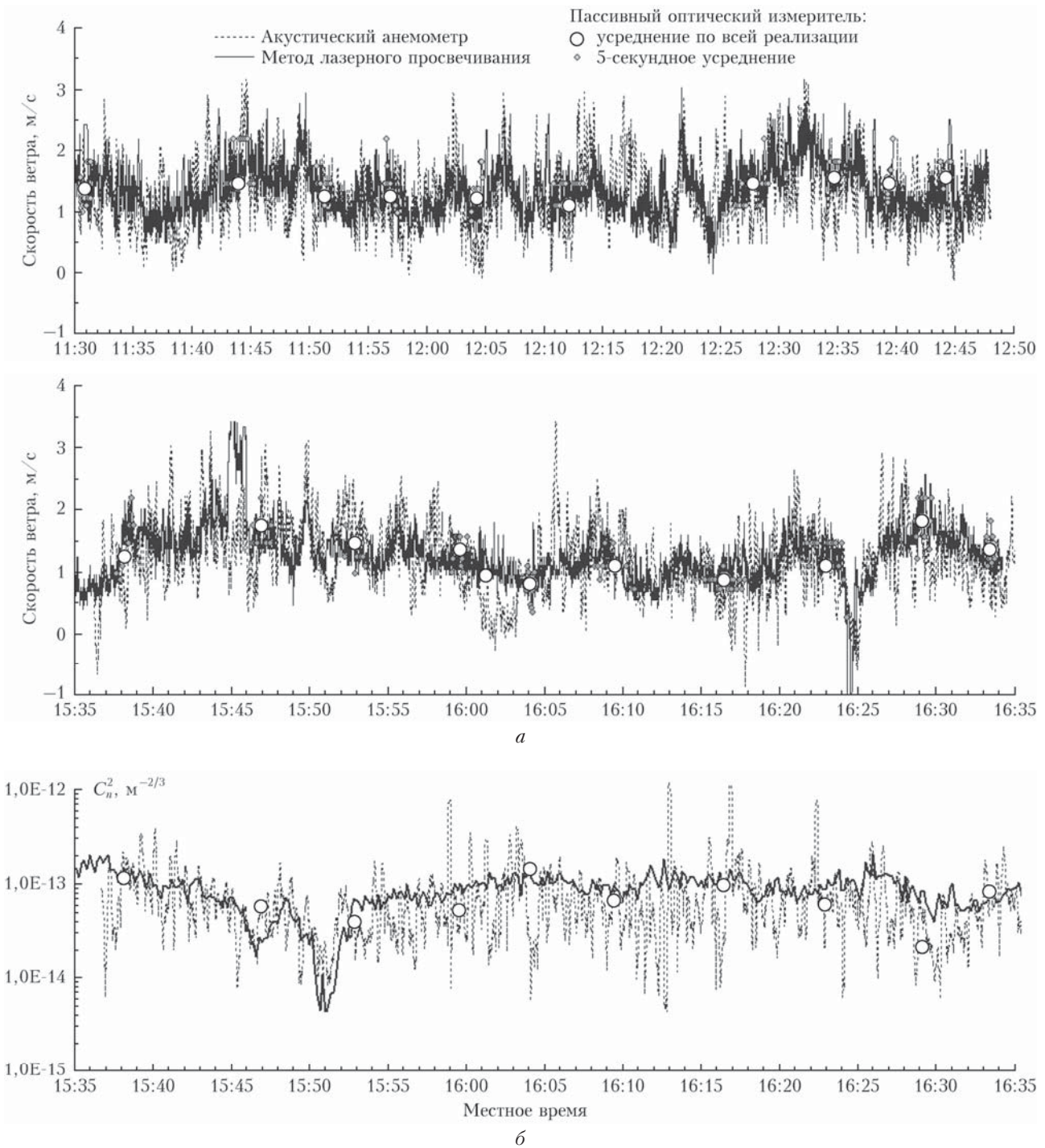


Рис. 3. Оценки интегральных значений среднего поперечного ветра (а) и структурной характеристики показателя преломления воздуха (б) активным и пассивным оптическими методами и ультразвуковым анемометром

а на базе разнеса выделенных участков (некогерентных источников) в плоскости объекта наблюдения. На рис. 5 показан единичный кадр анализируемой видеозаписи и положение выбранных участков изображения. Горизонтальный разнос центров блоков составлял 14 пикселей при размере блока 11×11 пикселей (соответственно 100 мм и 81×81 мм на объек-

те). Далее, как и для бинокулярной схемы, вычислялись временные ряды флуктуаций координат ЭЦТ выделенных блоков изображения, рассчитывались временные задержки положения максимума взаимной корреляции и скорость ветра. В целом, здесь также наблюдается удовлетворительное совпадение независимых оценок скорости ветра.

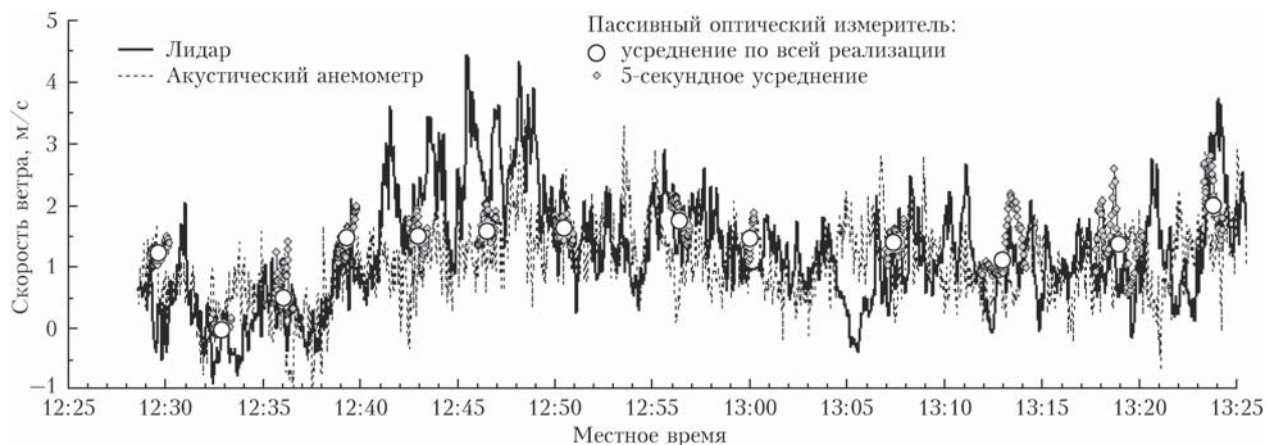


Рис. 4. Сравнение ветровых оценок пассивным монокулярным методом, акустическим анемометром и когерентным доплеровским ветровым лидаром



Рис. 5. Изображение объекта, формируемое монокулярной приемной системой, и выбор анализируемых участков

Заключение

Реализован пассивный оптический метод измерений поперечной к линии визирования (направлению на объект наблюдения) компоненты скорости ветра на атмосферной трассе посредством корреляционной обработки бинокулярных видеоизображений удаленных топографических объектов при естественном (солнечном) освещении.

Используемый подход базируется на анализе искажений, вносимых в некогерентные изображения вследствие температурных микропульсаций плотности воздуха и соответствующих флуктуаций показателя преломления.

Проведено сравнение одновременных измерений интегрального поперечного ветра активным и пассивным оптическими методами на одной и той же измерительной трассе. Полученные оценки согласуются с независимыми лидарными, активными лазерными

измерениями и показаниями ультразвуковых анемометров.

Преимущества пассивных оптических методов измерения ветра по сравнению с активными оптическими методами просвечивания очевидны: нет необходимости в организации трассовых измерений, юстировки передающего и приемного каналов. Пассивные дистанционные измерители ветра допускают компактность в изготовлении, высокую оперативность получения данных, скрытность использования и простоту в эксплуатации.

Выработка практических рекомендаций по проведению таких измерений, оценка технических возможностей и условий реализации метода, создание реально действующих алгоритмов получения и обработки некогерентных изображений и реализация приборов на их основе являются актуальными задачами. Экспериментальная апробация метода, описанная в данной статье, является необходимым этапом при решении таких задач. Проведенные эксперименты показали практическую возможность использования подобных пассивных измерений для оценки интегральных значений поперечного ветра и структурной характеристики показателя преломления в атмосфере.

Благоприятные условия осуществления оценок интегральной поперечной скорости ветра пассивным оптическим методом реализуются во многих практических ситуациях — на взлетно-посадочных полосах аэропортов, на открытых равнинных участках сельскохозяйственных полей, над водной поверхностью и других случаях, когда характер турбулентных ветровых полей имеет устойчивую структуру, характерную для плоской однородной подстилающей поверхности.

Область возможных применений подобных измерителей довольно обширна: это получение данных о структуре и параметрах мелкомасштабной турбулентности атмосферы, оперативная дистанционная оценка ветровой обстановки в районах природных и техногенных катастроф, а также военные технологии.

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

1. *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.
2. *Smalikho I.N., Banakh V.A., Holzäpfel F., Rahm S.* Method of radial velocities for the estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured by coherent Doppler lidar // *Opt. Express.* 2015. V. 23, N 19. P. A1194–A1207.
3. *Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V.* Lidar investigation of the atmospheric boundary layer dynamics in the coastal zone of Lake Baikal // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. P. 968039-1–968039-5.
4. *Smalikho I.N., Banakh V.A.* Estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured by a Stream Line lidar // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. P. 968037-1–968037-7.
5. *Смалихо И.Н., Банах В.А., Holzäpfel F., Rahm S.* Оценивание параметров самолетных вихрей из массива радиальных скоростей, измеренных когерентным доплеровским лидаром // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 8. С. 742–750.
6. *Banakh V.A., Smalikho I.N.* Aircraft wake vortex parametrization based on 1.5 μm coherent Doppler lidar data // *Proc. 27th Int. Laser Radar Conf.* 5–10 July, 2015. New York, USA. Abstracts. P. PS-B2.0201–PS-B2.0204.
7. *Banakh V.A., Smalikho I.N., Rahm S.* Estimation of refractive index structure characteristic of air from coherent Doppler wind lidar data // *Opt. Lett.* 2014. V. 39, N 15. P. 4321–4324.
8. *Banakh V.A., Smalikho I.N., Rahm S.* Determination of the optical turbulence intensity from data measured by a coherent Doppler lidar // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. DOI: 10.1117/12.2074238.
9. *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.
10. *Wang T.-I., Ochs G.R., Lawrence S.* Wind measurements by the temporal cross-correlation of the optical scintillations // *Appl. Opt.* 1981. V. 20, N 23. P. 4073–4081.
11. *Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П.* Определение скорости ветра в атмосфере по турбулентным искажениям видеоизображений лазерного пучка // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 8. С. 723–729; *Afanas'ev A.L., Banakh V.A., Rostov A.P.* Estimate of wind velocity in the atmosphere based on analysis of turbulent distortions of laser beam images registered by video camera // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 1. P. 88–94.
12. *Shapira J., Porat O., Livneh M., Wies Z., Heflinger D., Fastig S., Glik Y., Engel A.* Atmospheric cross wind and turbulence measurements using turbulence-induced scintillations // *Proc. SPIE.* 2010. V. 7684. P. 7684L1-1–7684L1-11.
13. *BLS2000 Large Aperture Scintillometer for Very Long Paths.* 2012. URL: www.scintec.com
14. *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, N 1. P. 67–84.
15. *Peskoff A.* Theory for remote sensing of wind-velocity profiles // *Proc. IEEE.* 1971. V. 59. P. 324.
16. *Banakh V.A., Marakosov D.A.* Wind profiling based on the optical beam intensity statistics in a turbulent atmosphere // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2007. V. 24, N 10. P. 3245–3254.
17. *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, N 4. P. 404–408.
18. *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.
19. *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.
20. *Walters D.L.* Passive remote crosswind sensor // *Appl. Opt.* 1977. V. 16, N 10. P. 2625–2626.
21. *Stell M.F., Moore C.L., Burris H.R., Suite M.R., Vilchec M.J., Davis M.A., Mahon R., Oh E., Rabinovich W.S., Gilbreath G.C., Scharpf W.J., Reed A.E.* Passive optical monitor for atmospheric turbulence and windspeed // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5160. P. 422–431.
22. *Porat O., Shapira J.* Crosswind sensing from optical-turbulence-induced fluctuations measured by a video camera // *Appl. Opt.* 2010. V. 49, N 28. P. 5236–5244.
23. *Татарский В.И.* Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
24. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмельцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 280 с.
25. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 270 с.
26. *Ростов А.П., Иванов А.П., Афанасьев А.Л.* Экспериментальное сравнение трассового оптического измерителя воздушного потока с массивом ультразвуковых датчиков в приземном слое атмосферы: Тезисы докл. // IX Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: ИОА СО РАН, 2002. С. 121.
27. *Ростов А.П.* Ультразвуковой анемометр-термометр для измерения турбулентных характеристик в приземном слое атмосферы // *Наука производству.* 2003. № 9. С. 44–48.
28. *Банах В.А., Смалихо И.Н., Фалиц А.В., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Антохин П.Н.* Совместные радиозондовые и доплеровские лидарные измерения ветра в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 10. С. 911–916; *Banakh V.A., Smalikho I.N., Falits A.V., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Antokhin P.N.* Joint radiosonde and Doppler lidar measurements of wind in the atmospheric boundary layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 185–191.

***A.L. Afanasiev, V.A. Banakh, A.P. Rostov.* Estimation of integral wind velocity and turbulence in the atmosphere from distortions of optical images of naturally illuminated objects.**

Crosswind and strength of atmospheric turbulence are simultaneously estimated by the classical laser scintillation method and passive optical method from analysis of the light scattered by a natural or man-made topographic objects in natural daylight illumination conditions. The passive sensing method does not require artificial light sources and consists in the formation of incoherent images of topographic objects in the natural sunlight and analysis of image distortions induced by turbulence between the object and the plane of observation. The estimates of integral crosswind and index of refraction structure constant of air were compared in atmospheric experiments at the same measuring optical path by both methods. The comparison with lidar data was made. Optical measurements of integral characteristics were accompanied by independent local acoustic measurements using a sonic anemometer.