

УДК 550.388.2; 551.510.535

Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений некогерентных источников в турбулентной атмосфере

Д.А. Маракасов*

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

Поступила в редакцию 29.01.2016 г.

Проводится анализ возможностей оценки вектора поперечной скорости ветра из временной статистики интегральных характеристик изображения некогерентных источников — принимаемой мощности и смещения центра тяжести изображения. Для режима слабых флуктуаций получены выражения для взаимных корреляционных функций смещений центров тяжести пары некогерентных источников, регистрируемых парой разнесенных приемников. Установлено, что максимум корреляционной функции смещен из начала координат, причем величина смещения определяется скоростью ветра на трассе. Показано, что положение максимума и форма корреляционных функций позволяют оценить усредненный вдоль трассы вектор поперечной скорости ветра. Сформулированы условия регистрации, достаточные для выполнения оценки среднего ветра.

Ключевые слова: некогерентный источник, изображение, интегральная скорость ветра, взаимная корреляционная функция, турбулентность; *incoherent source, image, integral wind velocity, mutual correlation function, turbulence.*

Введение

Задача измерения скорости ветра в атмосфере оптическими методами привлекает внимание исследователей начиная с середины XX в. Для определения скорости ветра использовались пространственно-временная корреляция изображений парных источников (SCIDAR) [1–3], флуктуации углов прихода плоской и сферической волн, искаженных атмосферной турбулентностью [4, 5], пространственно-временная статистика изображения лазерного источника [6, 7]. В настоящее время в мире 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 [8–15]. Основным недостатком указанных методов является необходимость наличия внешнего источника какой-либо известной конфигурации. Например, для реализации алгоритмов SCIDAR требуется пара ярких звезд, разнесенных на достаточно большой угол, в других случаях — когерентный лазерный источник. Представляет интерес задача определения скорости ветра пассивными методами, использующими естественные некогерентные источники излучения. Впервые этот вопрос был рассмотрен в [16], где проведен анализ флуктуаций интенсивности света,

рассеянного диффузной поверхностью. Результаты, достигнутые в этом направлении, связаны со значительным усложнением экспериментального оборудования и методики обработки получаемых распределений интенсивности.

В данной статье проводится анализ возможностей оценки вектора поперечной скорости ветра из временной статистики интегральных характеристик изображения некогерентных источников — принимаемой мощности и смещения центра тяжести изображения. Рассмотрена регистрация временных рядов смещений центров тяжести пары некогерентных источников, регистрируемых парой разнесенных приемников. Для режима слабых флуктуаций получены выражения для взаимных корреляционных функций этих рядов и показано, что положение максимума и форма корреляционных функций позволяют оценить усредненный вдоль трассы вектор поперечной скорости ветра.

Корреляция смещений разнесенных источников

Рассмотрим задачу о дрожании изображений некогерентного источника в разнесенных поперек трассы приемниках вследствие ветрового переноса турбулентности на атмосферной трассе. Схема измерений представлена на рис. 1. Излучение, рассеянное или порождаемое матовой поверхностью, возмущается турбулентностью на атмосферной трассе длиной L и проходит через объективы приемных

* Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru).

устройств. Двумерные распределения интенсивности регистрируются матрицами фотоприемников на расстоянии l позади объективов. Некогерентный источник может быть представлен как суперпозиция точечных источников с заданными амплитудами и произвольными фазами. Любая корреляционная функция от линейной функции интенсивности изображения (поток интенсивности, смещение центров тяжести и т.д.) будет определяться аналогичной функцией от корреляции интенсивности изображений пары точечных источников.

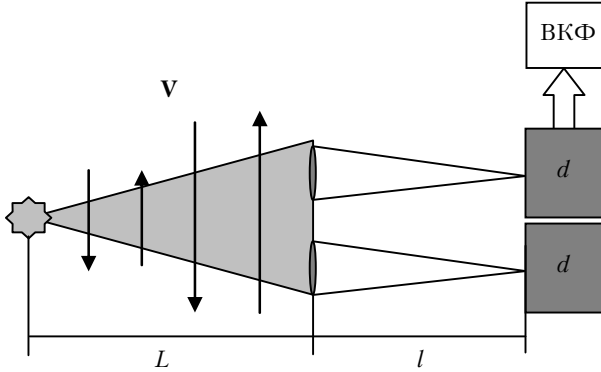


Рис. 1. Схема измерения интегральной боковой скорости ветра. ВКФ – взаимная корреляционная функция

Вычислим ее в режиме слабых флуктуаций. Пусть имеются источники с комплексными амплитудами

$$U_j(z=0, \mathbf{p}) = A_j \delta(\mathbf{p} - \mathbf{R}_j), \quad j = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Здесь A_j – амплитудный множитель; \mathbf{R}_j – радиус-вектор источника в поперечной к оптической оси плоскости; $\delta(\mathbf{p})$ – двумерная дельта-функция Дирака. В плоскости $z = L$ находятся приемные объективы с оптическими осями, параллельными оси z , с координатами центров $\mathbf{p} = \mathbf{r}_k$, $k = 1, 2, \dots$. Для простоты положим, что матрица фотоприемников, находящаяся за k -м объективом, регистрирует изображение точечного источника с номером j . Будем считать, что изображения источников полностью попадают в регистрируемое изображение. Поскольку распределенный некогерентный источник может быть представлен как суперпозиция точечных источников с заданными амплитудами и произвольными фазами, предлагаемый подход будет справедлив и для контрастного объекта на однородном фоне, угловые размеры которого меньше угла изопланатизма

$$\theta_p = (43,03\lambda^{-2}C_n^2L^{8/3})^{-3/5}, \quad (2)$$

где λ – длина волны; C_n^2 – структурная характеристика показателя преломления. По результатам измерений регистрируются поток интенсивности

$$P_{jk}(t) = \int d\mathbf{p} I_{jk}(\mathbf{p}, t) = \langle P_{jk} \rangle + \delta P_{jk}(t) \quad (3)$$

и смещение (ненормированного) центра тяжести изображения j -го источника в k -м приемнике

Оценка средней скорости ветра из корреляции смещений центров тяжести изображений...

$$\mathbf{d}_{jk}(t) = \int d\mathbf{p} I_{jk}(\mathbf{p}, t) \mathbf{p} = \langle \mathbf{d}_{jk} \rangle + \delta \mathbf{d}_{jk}(t), \quad (4)$$

где $I_{jk}(\mathbf{p}, t)$ – интенсивность, создаваемая j -м источником в k -м приемнике.

Вычисление корреляционных функций в первом приближении метода малых флуктуаций дает (для гауссовых функций пропускания объективов, в плоскости резкого изображения $\frac{1}{L} + \frac{1}{l} = \frac{1}{F}$, где F – фокусное расстояние объектива)

$$\langle \delta P_{jk}(t) \delta P_{mn}(t + \tau) \rangle = \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \exp\left\{-\frac{r^2 + r'^2}{a^2}\right\} \times \\ \times [\Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \tau) - \Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \infty)] \Big|_{\substack{\mathbf{s}=0 \\ \mathbf{s}'=0}}$$

$$\langle \delta P_{jk}(t) \delta \mathbf{d}_{mn}(t + \tau) \rangle = \\ = \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \exp\left\{-\frac{r^2 + r'^2}{a^2}\right\} \left\{ \frac{\lambda l}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial \mathbf{s}'} - \frac{l}{L} \mathbf{r}' \right\} \times \\ \times [\Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \tau) - \Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \infty)] \Big|_{\substack{\mathbf{s}=0 \\ \mathbf{s}'=0}}$$

$$\langle \delta \mathbf{d}_{jk}(t) \delta \mathbf{d}_{mn}(t + \tau) \rangle = \int d\mathbf{r} d\mathbf{r}' \exp\left\{-\frac{r^2 + r'^2}{a^2}\right\} \times$$

$$\times \left(\frac{\lambda l}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial \mathbf{s}} - \frac{l}{L} \mathbf{r} \right) \left(\frac{\lambda l}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial \mathbf{s}'} - \frac{l}{L} \mathbf{r}' \right) \times$$

$$\times [\Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \tau) - \Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \infty)] \Big|_{\substack{\mathbf{s}=0 \\ \mathbf{s}'=0}} \quad (5)$$

Здесь a – радиус объектива; j, m – порядковые номера источников; k, n – порядковые номера приемников; $\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'$ – координатные вектора, перпендикулярные оптической оси; τ – временной сдвиг; функция $\Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \tau)$ определяется аналогично формуле (10) в [17] с учетом попарного совпадения координат в плоскости источника и в плоскости регистрации;

$$\Gamma_{jkmn}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \mathbf{s}, \mathbf{s}'; \tau) = \frac{\langle |A_j A_m|^2 \rangle}{\lambda^4 L^4} \times \\ \times \exp\left\{ \frac{2\pi i}{\lambda L} [\mathbf{s}(\mathbf{r} + \mathbf{r}_k - \mathbf{R}_j) + \mathbf{s}'(\mathbf{r}' + \mathbf{r}_n - \mathbf{R}_m)] \right\} \times \\ \times \left[1 - \frac{8\pi^2 L}{\lambda^2} \int_0^1 d\xi C_n^2(\xi) \sigma^2 + \frac{4\pi^2 L}{\lambda^2} \int_0^1 d\xi C_n^2(\xi) \int d\mathbf{k} \Phi(\mathbf{k}) \times \right. \\ \times \left[\exp(2\pi i \xi \mathbf{k} \mathbf{s}) + \exp(2\pi i \xi \mathbf{k} \mathbf{s}') + 2 \exp(2\pi i \xi \mathbf{k} \mathbf{b}_0) \times \right. \\ \left. \left. \times (\cos(\pi \mathbf{k}(\mathbf{s} + \mathbf{s}')) - \cos(\pi \mathbf{k}(\mathbf{s} - \mathbf{s}')) - 2\pi i \lambda L \mathbf{k}^2 \xi(1 - \xi)) \right] \right], \\ \mathbf{b}_0 = (1 - \xi)(\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_m) + \xi(\mathbf{r} + \mathbf{r}_k - \mathbf{r}' - \mathbf{r}_n) + \mathbf{V}(\xi)\tau, \quad (6)$$

где $\xi = z/L$ – нормированная координата точки на трассе; $\mathbf{V}(\xi)$ – скорость ветра на трассе; $C_n^2(\xi)$ – структурная характеристика; \mathbf{k} – двумерный вектор пространственных частот; $\Phi(\mathbf{k})$ – нормированный спектр флуктуаций показателя преломления; $\sigma^2 = \int d\mathbf{k}\Phi(\mathbf{k})$.

Примем, что радиус объектива достаточно велик ($a^2 \gg \lambda L$), а спектр показателя преломления описывается степенным законом $\Phi(\mathbf{k}) = 0,009693\mathbf{k}^{-11/3}$. Для корреляции смещений энергетических центров тяжести $\mathbf{f}_{jk}(t) = \frac{\mathbf{d}_{jk}(t)}{P_{jk}(t)} = \langle \mathbf{f}_{jk} \rangle + \delta\mathbf{f}_{jk}(t)$ после вычисления всех интегралов будем иметь:

$$K_{jkmn}(\tau) = \langle \delta\mathbf{f}_{jk}(t)\delta\mathbf{f}_{mn}(t+\tau) \rangle = 4,57l^2La^{-1/3} \int_0^1 d\xi C_n^2(\xi)\xi^{-1/3} M\left(\frac{1}{6}, 1; -\frac{b^2}{2a^2\xi^2}\right), \quad (7)$$

$$\mathbf{b} = (1-\xi)(\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_m) + \xi(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n) + \mathbf{V}(\xi)\tau.$$

Здесь $M(\alpha, \beta; z)$ – вырожденная гипергеометрическая функция Куммера [18]. Данное выражение является отправной точкой для дальнейшего анализа. Соотношение (7) связывает турбулентные и ветровые характеристики атмосферной трассы и взаимную корреляционную функцию смещений энергетических центров тяжести (ЭЦТ) изображений точечных источников, регистрируемых в плоскости резкого изображения приемными объективами, разнесенными в перпендикулярной к оптической оси плоскости.

Для оценки интегральной скорости ветра положим, что скорость ветра и структурная характеристика не меняются вдоль трассы. Можно выделить два предельных случая, когда корреляционная функция ЭЦТ оказывается, с точностью до амплитудного множителя, функцией трех параметров. Первый – корреляционная функция смещений центров тяжести пары источников, регистрируемых через один и тот же объектив. В этом случае

$$\mathbf{b} = (1-\xi)(\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_m) + \mathbf{V}(\xi)\tau. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (7) дает

$$K_{jkmk}(\tau) = K \int_0^1 d\xi \xi^{-1/3} \times M\left(\frac{1}{6}, 1; -(1/\xi-1)^2 D_s^2 [\sin^2 \varphi_s + (\cos \varphi_s + \gamma_s/(1-\xi))^2]\right). \quad (9)$$

Здесь $D_s = \frac{|\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_m|}{\sqrt{2}a}$ – нормированный разнос источников; φ_s – угол между скоростью ветра и разносом источников; $\gamma_s = \frac{V\tau}{|\mathbf{R}_j - \mathbf{R}_m|}$ – задержка, норми-

рованная на время пролета неоднородностей через базу наблюдения; $K = 4,57l^2La^{-1/3}C_n^2$. Поведение корреляционной функции (9) в зависимости от нормированной задержки показано на рис. 2.

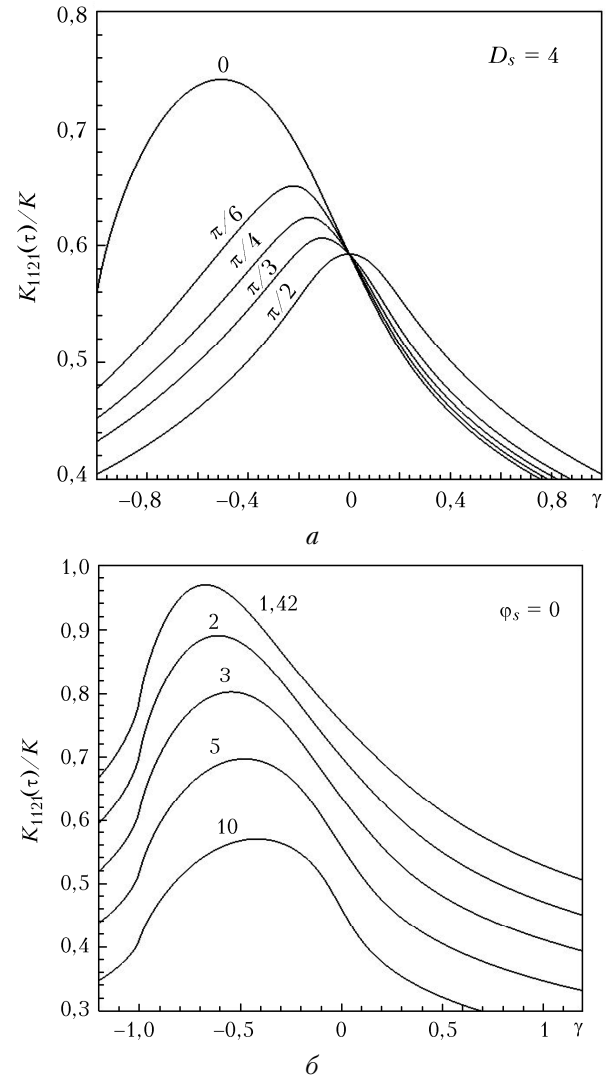


Рис. 2. Корреляционные функции смещений центров тяжести изображений (2 источника, 1 приемник) при фиксированном разносе (a , значения φ_s указаны рядом с кривыми) и при базе наблюдения, параллельной боковому ветру (b , значения D_s указаны рядом с кривыми)

Отметим, что смещение максимума корреляционной функции (9) наиболее заметно при разносе источников вдоль направления бокового ветра. Увеличение угла φ_s ведет к быстрому приближению абсциссы точки максимума γ_m к нулю. Имеет место некоторое увеличение нормированной задержки при сближении объективов, хотя в целом ее значения незначительно отклоняются от 0,5.

Отметим также, что увеличение разноса может привести к снижению корреляции и уменьшению модуля абсциссы точки экстремума за счет наличия компоненты поперечной скорости ветра, ориентированной перпендикулярно базе. Оптимальным выбором представляется регистрация источников,

разнесенных вдоль вектора бокового ветра на расстояние, близкое к диаметру объектива.

Во втором случае обе видеокамеры наведены на один и тот же источник ($j = m$). Тогда эффективный разнос лучей запишется как

$$\mathbf{b} = \xi(\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n) + \mathbf{V}(\xi)\tau, \quad (10)$$

а корреляционная функция ЭЦТ будет по форме записи близка к (9):

$$K_{jkm}(\tau) = K \int_0^1 d\xi \xi^{-1/3} M\left(\frac{1}{6}, 1; -D_r^2 [\sin^2 \varphi_r + (\cos \varphi_r + \gamma_r / \xi)^2]\right), \quad (11)$$

но параметры будут переобозначены. Здесь

$D_r = \frac{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n|}{\sqrt{2}a}$ – нормированный разнос приемников;

φ_r – угол между скоростью ветра и разном приемников, $\gamma_r = \frac{V\tau}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n|}$ – задержка, нормированная

на время пролета неоднородностей через базу наблюдения. Ее поведение в зависимости от нормированной задержки показано на рис. 3.

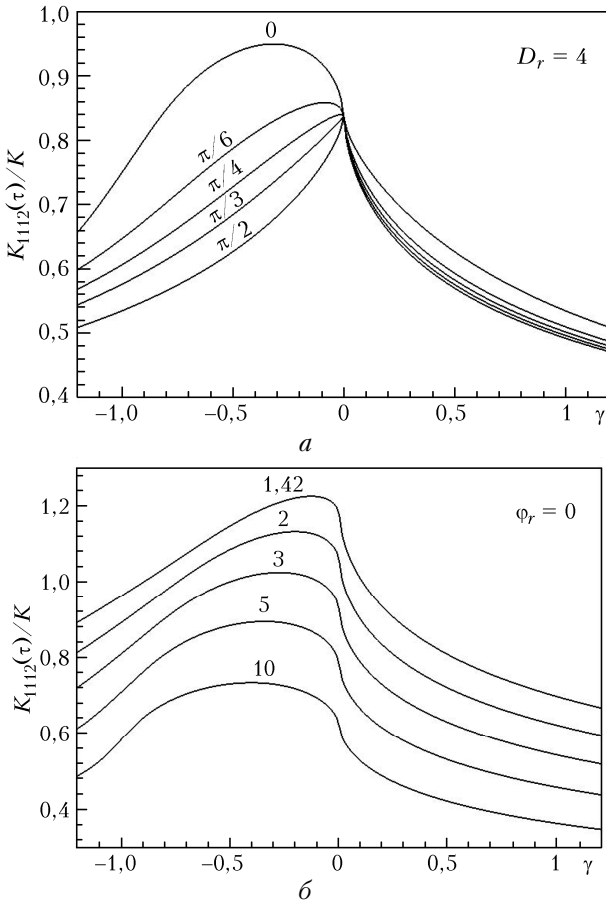


Рис. 3. Корреляционные функции смещений центров тяжести изображений (1 источник, 2 приемника) при фиксированном разноре (a , значения φ_r указаны рядом с кривыми) и при базе наблюдения, параллельной боковому ветру (b , значения D_r указаны рядом с кривыми)

Так же, как и на рис. 2, смещение максимума корреляционной функции (11) наиболее заметно при разноре объективов вдоль направления бокового ветра, а увеличение угла φ_r ведет к быстрому приближению абсциссы точки максимума γ_m к нулю. Напротив, при сближении объективов отметим уменьшение нормированной задержки. Это существенно при пересчете задержки τ_m , соответствующей максимуму корреляционной функции ЭЦТ, в интегральную скорость бокового ветра

$$V = \gamma_m \frac{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|}{\tau_m}. \quad (12)$$

Коэффициент γ_m стремится к 0,5 при увеличении разноре объективов и уменьшается до 0,05 при максимальном сближении объективов. Вследствие снижения корреляции и уменьшения модуля абсциссы точки экстремума при увеличении базы наблюдения, оптимальным выбором представляется регистрация бинокулярных изображений через объективы, установленные вплотную.

В этом случае амплитудный коэффициент K имеет смысл характерного значения корреляционной функции вблизи максимума. Эта величина соответствует квадрату относительных смещений центров тяжести изображений, которые необходимо отслеживать для построения корреляционной функции, т.е. 1 пиксель изображения должен соответствовать деталям объекта размером порядка

$$\Delta R = 0,1 \sqrt{4,57 L^3 a^{-1/3} C_n^2}.$$

Отсюда можно сформулировать условия, необходимые для оценки интегральной скорости поперечного ветра по корреляции смещений энергетического центра тяжести изображений некогерентного источника, формируемых приемными объективами, разнесенными в плоскости, перпендикулярной направлению визирования:

– угловое разрешение не хуже чем

$$\Delta \varphi = 0,1 \sqrt{4,57 L a^{-1/3} C_n^2};$$

– объективы расположены вплотную ($D_r = \sqrt{2}$);

– база наблюдения ориентирована вдоль вектора поперечной скорости ветра;

– частота следования кадров должна обеспечивать регистрацию не менее чем десяти кадров за время пролета неоднородности между лучами $f > 10V/|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$;

– регистрируется изображение контрастного объекта на однородном фоне;

– угловой размер объекта не превосходит размер области изопланатизма.

Отметим обстоятельство, которое следует учитывать при использовании корреляционных функций (9), (11). Если изображение точечного источника не выходит за пределы поля зрения за счет турбулентных искажений, смещение изображения как целого, которое мы определим как вектор, на который нужно сдвинуть окрестность максимума

интенсивности изображения в одной видеокамере, чтобы получить максимальную корреляцию с изображением в другой камере в тот же момент времени, и смещение его ЭЦТ эквивалентны. В общем же случае смещения изображения и смещения его ЭЦТ могут не совпадать вследствие появления на краях поля зрения других источников. Это существенно, поскольку корреляционный анализ изображений требует времени и едва ли может быть реализован в режиме реального времени на компактном устройстве, в то время как расчет ЭЦТ изображения требует существенно меньших ресурсов. Поэтому критичным становится выбор наблюдаемого участка изображения.

Участок изображения должен быть высококонтрастным. Идеальный объект наблюдения — темный объект на светлом фоне, полностью попадающий в поле зрения. В этом случае двумерный вектор смещения ЭЦТ совпадает со смещением изображения. Чуть менее удобна вертикальная или горизонтальная граница светлой и темной областей. В этом случае смещение ЭЦТ совпадает со сдвигом изображения поперек границы, продольные сдвиги не будут зарегистрированы. Кроме смещений ЭЦТ в этом случае имеет смысл регистрировать полную мощность — она пропорциональна поперечному смещению изображения. Третий вариант с тривиальной взаимосвязью между смещениями изображения и ЭЦТ — узкая контрастная полоса. В этом случае смещение ЭЦТ поперек полосы пропорционально смещению изображения в том же направлении. Более сложные изображения требуют дополнительного анализа и определения матричного коэффициента пропорциональности между смещениями изображения и его ЭЦТ.

Заключение

Проведен анализ временных корреляционных функций смещения центров тяжести изображения некогерентных источников в плоскости резкого изображения. Максимумы корреляционных функций соответствуют ненулевой задержке, величина которой определяется скоростью ветра на трассе и параметрами приемных устройств. Показано, что регистрация временных рядов смещений центров тяжести и принимаемого потока мощности позволяют определять усредненную по трассе скорость ветра.

При регистрации временных рядов смещений центров тяжести некогерентных источников, регистрируемых парой разнесенных приемников, существенной становится взаимная ориентация скорости ветра и разноса приемников. Наиболее значительна асимметрия корреляционных функций при разное приемников вдоль вектора средней скорости ветра с базой, как минимум десятикратно превышающей радиус объективов.

Найдены условия, при выполнении которых становится возможным оценивание вектора интегральной поперечной скорости ветра из дрожания изображения контрастных некогерентных источников в турбулентной атмосфере. Одному пикселю

изображения должен соответствовать разнос $\Delta R = 0,21\sqrt{L^3 a^{-1/3} C_n^2}$ в плоскости источника. В изображении должны присутствовать контрастные элементы, разнесенные параллельно скорости ветра не менее чем на $10\Delta R$. Регистрация временных рядов должна осуществляться с частотой не менее $10V/(R_1 - R_2)$, т.е. пролет неоднородностей через базу наблюдения должен отображаться не менее чем в десяти кадрах.

Статья подготовлена при поддержке РФФИ (грант № 15-05-04210 А).

1. Johnston R., Dainty C., Wooder N., Lane R. Generalized scintillation detection and ranging results obtained by use of a modified inversion technique // *Appl. Opt.* 2002. V. 41, N 32. P. 6768–6772.
2. Kluckers V.A., Wooder N.J., Nicholls T.W., Adcock M.J., Munro I., Dainty J.C. Profiling of atmospheric turbulence strength and velocity using generalized SCIDAR technique // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1998. V. 130, iss. 1. P. 141–155.
3. Prieur J.-L., Avila R., Daigne G., Vermin J. Automatic determination of wind profiles with generalized SCIDAR // *Pub. Astron. Soc. Pac.* 2004. V. 116, N 822. P. 778–789.
4. Cheon Y., Muschinski A. Closed-form approximations for the angle-of-arrival variance of plane and spherical waves propagating through homogeneous and isotropic turbulence // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2007. V. 24, N 2. P. 415–422.
5. Cheon Y., Hohreiter V., Behn M., Muschinski A. Angle-of-arrival anemometry by means of a large-aperture Schmidt–Cassegrain telescope equipped with a CCD camera // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 2007. V. 24, N 11. P. 3478–3492.
6. Banakh V.A., Marakasov D.A. Wind profiling based on the optical beam intensity statistics in a turbulent atmosphere // *J. Opt. Soc. Amer. A.* V. 24, N 20. P. 3245–3254.
7. Афанасьев А.Л., Банах В.А., Ростов А.П. Локализация турбулентных потоков по флуктуациям интенсивности просвечивающего лазерного излучения // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 7. С. 640–647.
8. Smalikho I.N., Banakh V.A. Estimation of aircraft wake vortex parameters from data measured with 1.5 mkm coherent Doppler lidar // *Opt. Lett.* 2015. V. 40, N 14. P. 3408–3411.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Смалыхо 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.

13. *Banakh V.A., Smalikho I.N.* Aircraft wake vortex parametrization based on 1.5-mcm coherent Doppler lidar data // Proc. 27th Int. Laser Radar Conf. [Электронный ресурс]. 05–10 July, 2015. New York, USA. Abstracts. PP. PS-B2.0201–PS-B2.0204.
14. *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.
15. *Banakh V.A., Smalikho I.N., Rahm S.* Determination of the optical turbulence intensity from data measured by a coherent Doppler lidar // Proc. SPIE. V. 9292. 20th Int. Symp. on “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”, June 23–27, 2014. P. 92921U.
16. *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.
17. *Маракасов Д.А.* Восстановление профиля скорости ветра по флуктуациям интенсивности лазерного пучка в приемном телескопе // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 304–307.
18. *Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовиц, И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.*

D.A. Marakasov. Estimation of mean wind velocity from correlations of centers of gravity shifings for non-coherent sources in the turbulent atmosphere.

The article considers the problem of wind velocity estimation from the statistics of the integral characteristics of the images of incoherent sources in the turbulent atmosphere, namely, the received power and the bias vector of the center of gravity of the image. In the framework of the first approximation of the method of small perturbations, expressions for the mutual correlation functions of these characteristics and the bias vectors for a couple of point sources registered through a couple of receivers are derived. It is shown the correlation maxima are shifted from the origin of coordinates and the shift value depends on the wind velocity. The possibility of estimation of the vector of transverse velocity averaged over the optical path from the shape of correlation functions and shifts of correlation maxima is shown.