

# ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 551.521

## ЛАЗЕРНЫЙ ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОРЫВОВ АТМОСФЕРНОГО ВЕТРА

М.Л. Белов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация  
e-mail: belov@bmstu.ru; gorod@bmstu.ru; ekomonit@bmstu.ru

*При метеорологических наблюдениях измерению подлежат средняя скорость ветра, мгновенная скорость ветра и порывы атмосферного ветра (максимальное значение мгновенной скорости за какой-либо промежуток времени). Для многих практических приложений наиболее перспективными дистанционными методами измерения скорости атмосферного ветра являются лазерные методы (особенно с точки зрения минимизации массо-габаритных характеристик аппаратуры и энергопотребления). В статье рассмотрен лазерный дистанционный метод измерения мгновенной скорости и порывов атмосферного ветра. Описывается простой метод (использующий один лазерный пучок без пространственного сканирования), который может быть использован для приближенного измерения мгновенной скорости и направления атмосферного ветра. Метод основан на анализе измеренных пространственных реализаций объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы. Результаты математического моделирования и обработки экспериментальных данных показывают возможность получения оценки мгновенной скорости ветра с погрешностью  $\sim 20 \dots 30\%$  и оценки направления ветра с погрешностью  $\sim 25^\circ \dots 30^\circ$ .*

**Ключевые слова:** порывы ветра, мгновенная скорость и направление ветра, лазерный дистанционный метод.

## LASER REMOTE METHOD FOR MEASURING GUSTS OF ATMOSPHERIC WIND

M.L. Belov, S.E. Ivanov, V.A. Gorodnichev, B.V. Strelkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: belov@bmstu.ru; gorod@bmstu.ru; ekomonit@bmstu.ru

*An average wind speed, an instantaneous wind speed and gusts of the atmospheric wind (maximum value of instantaneous speed for any period of time) are to be measured during the meteorological observations. In many practical applications, laser methods are most promising remote methods for measuring the atmospheric wind speed (especially from the standpoint of minimization of mass-dimensional characteristics of apparatus and power consumption). For measuring an instantaneous speed and gusts of the atmospheric wind, a laser remote method is considered. A simple method (using one laser beam without spatial scanning) is described which can be applied for the approximate measurement of instantaneous speed and direction of the atmospheric wind. The method is based on the analysis of measured spatial realizations of the volume coefficient of aerosol backscattering*

*of the atmosphere. The results of mathematical simulation and experimental data processing show the possibility of estimation of the instantaneous wind speed with an error of 20–30 % and evaluation of the wind direction with an error of 25°–30°.*

**Keywords:** gusts of wind, instantaneous speed and direction of wind, laser remote method.

При метеорологических наблюдениях измерению подлежат средняя за 2 мин или 10 мин скорость ветра (зависит от типа прибора), мгновенная скорость с усреднением 2...5 с и порывы ветра (порывом называется максимальное значение мгновенной скорости за какой-либо промежуток времени). Штатными метеорологическими приборами для измерения скорости ветра (анемометрами) и приборами для измерения скорости и направления ветра (анеморумбометрами) измеряют среднюю и мгновенную скорости ветра только в точке расположения прибора [1].

Для дистанционного измерения ветра средней скорости на сегодняшний день существуют многочисленные методы и аппаратура (радиолокационная, акустическая, лазерная) [2].

Однако для многих практических задач (например, обеспечения взлета и посадки самолетов особенно в сложных условиях) необходима информация о порывах ветра. Поэтому задача создания дистанционной системы измерения мгновенной скорости и направления ветра является актуальной.

Наибольшее применение на сегодняшний день получили дистанционные радиолокационные методы измерения ветра. Однако их использование имеет ограничения.

Метеорологические радиолокационные станции, работающие на длинах волн 3...10 см, могут быть использованы для измерений ветра только при наличии таких гидрометеоров, как капли дождя или подхваченные ветром естественные (насекомые, семена и др.) или искусственные специальные трассеры в атмосфере.

Радиолокационные станции, работающие на длинах волн 10...30 см, могут обеспечить получение радиолокационных сигналов и в отсутствие гидрометеоров по флуктуациям коэффициента преломления в оптически чистом воздухе. Большая длина волны излучения требует использования в этом случае больших антенн. Однако даже при наличии больших антенн помехи от земной поверхности из-за боковых лепестков диаграммы направленности приводят в такой системе к большим ошибкам измерения скорости ветра при малых углах подъема антенны [3]. Эти ошибки очень существенны, особенно, если учесть, что в доплеровских радиолокаторах для восстановления полного вектора скорости ветра необходимо проводить пространственное сканирование.

Акустические методы также имеют ограничение: акустические системы требуют низкого уровня акустических шумов (поэтому использование такой аппаратуры, например на аэродромах, часто невозможно) [2].

Для многих практических приложений наиболее перспективными дистанционными методами измерения ветра являются лазерные (особенно с точки зрения минимизации массо-габаритных характеристик аппаратуры и энергопотребления). Лазерные методы свободны от многих недостатков, присущих

другим дистанционным методам (хотя возможности лазерных методов не перекрывают напрямую возможности, например, радиолокационных методов).

Скорость ветра может быть измерена лазерными локаторами (лидарами), использующими как доплеровские, так и корреляционные методы [2, 4, 5].

Доплеровские лазерные методы (как и доплеровские методы в радиодиапазоне) основаны на использовании доплеровского смещения частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися в атмосфере отражателями (аэрозольными частицами всегда присутствующими в атмосфере). Недостаток доплеровских методов — измерение только продольной составляющей скорости ветра (по отношению к локатору). Полный вектор скорости ветра можно восстановить из данных измерений продольной скорости только при проведении дополнительного углового сканирования. При этом для увеличения точности определения поперечной скорости ветра необходим большой угол сканирования (десятки градусов), что приводит к большому пространственному усреднению (и к большим ошибкам при измерении мгновенной скорости ветра). Причем такие измерения в принципе нельзя провести при неоднородном профиле скорости и направлении ветра вдоль трассы зондирования (например, в горах при сложном рельефе местности).

Более простыми и, соответственно, требующими менее дорогую аппаратуру являются корреляционные методы (см., например [4–12]). В основе лазерных корреляционных методов измерения скорости атмосферного ветра лежит предположение о полном увлечении аэрозольных частиц ветровым потоком и гипотеза “замороженности турбулентности”, согласно которой пространственные неоднородности, обусловленные турбулентностью, переносятся от точки к точке практически без изменений.

Лазерные корреляционные методы могут обеспечить дистанционное измерение мгновенной скорости ветра, ее отдельных компонент (поперечной по отношению к оптической оси лидара и продольной) и направления ветра при использовании малой измерительной базы [4, 6, 10–12]. Однако определение модуля и направления мгновенной скорости ветра требует сложных методов измерения (использующих многолучевые схемы или сканирование лазерного луча и требующих запоминания больших объемов данных) и сложных алгоритмов обработки данных измерений.

Гораздо более просто измерить приближенное значение мгновенной скорости и направления ветра. Это можно сделать без использования многолучевых схем и запоминания больших объемов данных.

Далее приведено описание простого метода (использующего один лазерный пучок без пространственного сканирования), который можно применить для приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра (порывов ветра).

Метод основан на регистрации пространственных реализаций сигналов обратного рассеяния атмосферы, однако не является ни доплеровским, ни корреляционным. Метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра основан на анализе перемещения (обусловленного ветром)

случайной структуры аэрозольных образований в атмосфере, которое произошло за 2...5 с.

Исходной информацией для описываемого лазерного метода оценки мгновенной скорости и направления ветра (оценки порывов ветра) являются временные реализации принимаемых лазерных сигналов, полученные для каждого зондирующего импульса. Эти реализации используются для получения пространственных реализаций (в зависимости от расстояний от лидара) объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы вдоль трассы зондирования [4, 5] (расстояние от лидара определяется по времени задержки лазерного импульса). Узкий лазерный пучок и короткие зондирующие импульсы позволяют достаточно точно локализовать рассеивающие объемы атмосферы и описать пространственное распределение объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы.

На рис. 1 показана геометрическая схема измерений лидара для получения оценки мгновенной скорости и направления ветра.

Однолучевой лидар зондирует атмосферу короткими зондирующими импульсами. Лазерные импульсы рассеиваются на атмосферном аэрозоле (во всех направлениях, в том числе и в направлении назад на лидар) и поступают в приемную систему лидара.

В приближении однократного рассеяния мощность  $P(L)$  лидарного сигнала (обратно рассеянного атмосферным аэрозолем лазерного сигнала) определяется следующим выражением [4, 5]:

$$P(L) = K_t K_r c \tau_i S_r \beta(L) b(\pi) T(L) P_0 G(L) / 2L^2, \quad (1)$$

где  $K_t$ ,  $K_r$  — коэффициенты пропускания передающей и приемной (вместе с интерференционным фильтром) оптических систем;  $c$  — скорость света;  $\tau_i$  — длительность лазерного импульса;  $S_r$  — площадь приемного объектива;  $\beta(L)$  — объемный коэффициент аэрозольного рассеяния;  $b(\pi)$  — индикатриса обратного рассеяния;  $\beta(L)b(\pi)$  — объемный коэффициент обратного аэрозольного рассеяния;  $T^{1/2}(L) = \exp\left(-\int_0^L \beta(z) dz\right)$  — коэффициент пропускания атмосферы;  $P_0$  — мощность лазерного источника излучения;  $L$  — расстояние до рассеивающего объема атмосферы, связанное с временем задержки  $t$  прихода эхо-импульса на приемник лидара соотношением  $t = 2L/c$ ;  $G(L)$  — геометрическая функция лидара (учитывающая частичное перекрытие лазерного пучка полем зрения приемной оптической системы в случае биаксиальной оптической системы лидара).

Из формулы (1) следует, что при небольших расстояниях, когда коэффициент пропускания атмосферы  $T \sim 1$ , мощность обратно рассеянного лазерного сигнала прямо пропорциональна объемному коэффициенту обратного аэрозольного рассеяния. Поэтому анализ флуктуаций мощности обратно

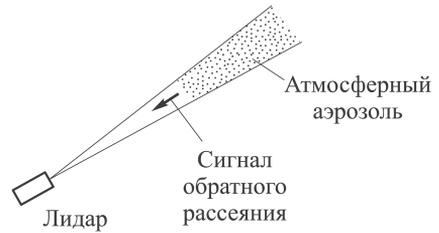


Рис. 1. Схема измерений

рассеянного лазерного сигнала позволяет определять характеристики флуктуаций поля объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы  $\beta(L)b(\pi)$  и измерять перемещение этого поля (т.е. проводить измерение скорости и направления ветра).

Конечным результатом обработки сигналов была относительная величина — коэффициент вариации флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния  $\frac{\tilde{\beta}(L)}{\bar{\beta}(L)}$ . Оценка  $\frac{\tilde{\beta}(L)}{\bar{\beta}(L)}$  проводилась по формуле

$$\frac{\tilde{\beta}(L)}{\bar{\beta}(L)} = \frac{\beta(L) - \bar{\beta}(L)}{\bar{\beta}(L)} \approx \frac{P(L) - \bar{P}(L)}{\bar{P}(L)},$$

где  $\bar{\beta}(L)$  — среднее значение объемного коэффициента обратного рассеивания (полагалось, что оно связано линейной зависимостью со средним (по ансамблю реализаций принимаемого сигнала) значением мощности  $\bar{P}(L)$  сигнала обратного рассеяния);  $\tilde{\beta}(L)$  — реализация флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния (полагалось, что реализация  $\beta(L)$  объемного коэффициента обратного рассеяния связана линейной зависимостью с реализацией принимаемой мощности  $P(L)$  сигнала обратного рассеяния).

Для проверки описанного метода проводилось математическое моделирование и обработка экспериментально полученных данных.

Для математического моделирования был использован комплекс программ, имитирующий работу лидара. Комплекс программ включает в себя блок моделирования двумерных полей аэрозольных неоднородностей, блок моделирования перемещения полей аэрозольных неоднородностей под действием средней скорости ветра, блок расчета принимаемых сигналов от зондируемых объемов атмосферы при наличии шума измерения и блок обработки сигналов, реализующий описанный метод измерения мгновенной скорости ветра. При математическом моделировании не рассматривались флуктуации скорости ветра, т.е. во время всего измерения (5 с) скорость и направление ветра считались постоянными. Считалось, что неоднородности переносятся в атмосфере под действием ветра, не изменяясь.

Основной объем вычислений и, соответственно, времени моделирования занимает этап моделирования двумерных полей коэффициента объемного рассеяния, поэтому в работе использовались два метода моделирования двумерных полей: метод канонического разложения в ряд Фурье (спектральный метод) и метод формирующего фильтра [13]. Если значение дискретного двумерного поля незначительно изменяется от точки к точке, то более рационально использовать спектральный метод, если значительно — то метод формирующего фильтра.

Алгоритм формирования дискретных значений  $a_{p,s}$  двумерных полей коэффициента объемного рассеяния с помощью метода канонического разложения в ряд Фурье для корреляционной функции, имеющей вид функции Гаусса ( $Kr(\xi) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\xi^2}{b^2}\right)$ ), где  $b$  — размер неоднородностей,  $\sigma$  — СКО

неоднородностей, можно записать так:

$$\begin{aligned}
 a_{p,s} &= \frac{\sigma \cdot b}{\sqrt{\pi}} \left[ \sum_{k=1}^M \left( A0_{k,p} \cos \left( \frac{k}{T} s \right) + B0_{k,p} \cos \left( \frac{k}{T} s \right) \right) + \frac{1}{2} A0_{0,p} \right]; \\
 A0_{k,p} &= \sum_{l=1}^M \left[ A_{l,k} \cos \left( \frac{l}{T} p \right) + B_{l,k} \sin \left( \frac{l}{T} p \right) \right] + \frac{1}{2} A_{0,k}; \\
 B0_s &= \sum_{l=1}^M \left[ B'_{l,k} \cos \left( \frac{l}{T} p \right) - A'_{l,k} \sin \left( \frac{l}{T} p \right) \right] + \frac{1}{2} B_{0,k},
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $M$  – число членов ряда;  $A'_{l,k}$ ,  $A_{l,k}$ ,  $B'_{l,k}$ ,  $B_{l,k}$  – случайные независимые коэффициенты, распределенные по нормальному закону с СКО, равным

$$\sigma_{l,k} = \sqrt{\frac{\exp \left( -\frac{(k^2 + l^2)b^2}{4T^2} \right)}{T^2}} \tag{3}$$

( $T$  – интервал на котором задано поле  $a_{p,s}$ ).

Алгоритм формирования дискретных двумерных полей  $a_{p,s}$  с помощью метода формирующего фильтра имеет вид

$$\begin{aligned}
 a_{p,s} &= \frac{2\sigma}{\sqrt{\pi}b} \left[ \sum_{k=1}^N \exp \left( -\frac{(k)^2}{b^2} \right) \left( X0((k+p), s) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + X0((-k+p), s) + X0(p), s) \right) \right];
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$X0(i, s) = \sum_{l=1}^N \exp \left( -\frac{(l)^2}{b^2} \right) [u(i, (l+s)) + u(i, (-l+s))] + u(i, s),$$

где  $u(x, y)$  – формирующий шум с СКО = 1, распределенный по нормальному закону,  $N$  – порядок фильтра.

Математическое моделирование проводилось для разных размеров аэрозольных неоднородностей атмосферы, различном ОСИШ (шум считался белым, распределенным по нормальному закону со средним значением, равным нулю, и заданной дисперсией) в широком диапазоне скоростей ветра. Время измерения составляло 5 с. Задаваемые при моделировании параметры атмосферных неоднородностей соответствовали условиям приземного слоя атмосферы. Трасса зондирования считалась горизонтальной.

Натурные измерения скорости ветра проводились на созданном макете лидара [12]. В качестве лазера использовался твердотельный лазер YAG:Nd с диодной накачкой и с удвоением частоты NL210 фирмы EKSPLA. Лазер генерировал короткие импульсы (с длительностью  $\sim 7$  нс) на длине волны 532 нм с энергией в импульсе 2 мДж и частотой повторения до 500 Гц. В приемном канале использовался интерференционный фильтр фирмы THORLABS FL-532-1 со спектральной шириной 1 нм (по уровню 0,5). В качестве фотоприемника оптического излучения использовался модуль ФЭУ фирмы

НАМАМАТСU H7826-01. Сигнал с ФЭУ поступал на АЦП (параметры АЦП: разрешение АЦП — 12 бит, частота дискретизации АЦП — 100 МГц) и далее в ЭВМ.

Геометрические характеристики макета лидара: начальный диаметр лазерного пучка 0,8 мм; расходимость лазерного пучка 3 мрад; диаметр приемной апертуры 100 мм; размер базы (расстояние между оптической осью передающего и приемного каналов) 150 мм; угол поля зрения приемного канала 7,5 мрад. Для уменьшения влияния шума измеряемый сигнал сглаживался двумерным фильтром, размер окна составлял по пространственной оси 3 отсчета, что было эквивалентно 1,5 м и по временной оси — 200 отсчетов, что было эквивалентно 0,4 с.

Для контроля скорости и направления атмосферного ветра использовался анеморумбометр. Для определения ошибки измерения скорости ветра в ЭВМ поступали данные с анеморумбометра.

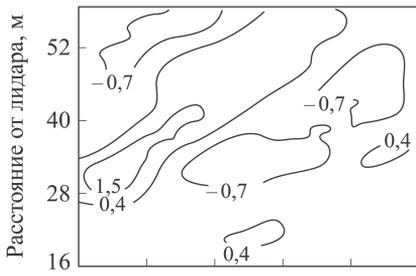
Измерения проводились в осенне-летний период на базе филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в Дмитровском районе Московской области при различных метеоусловиях. Макет лидара был установлен на плоской крыше трехэтажного здания на расстоянии 32 м от края крыши и позволял измерять скорость ветра на расстояниях до  $\sim 150$  м. Анеморумбометр располагался на самом краю крыши в непосредственной близости от лазерного луча.

Примеры данных измерений приведены на рис. 2, а, в, д и 3, а. Данные измерений представлены в виде изолиний коэффициента вариации флуктуаций (в процентах) объемного коэффициента обратного рассеяния на плоскости “время измерения – расстояние от лидара” (расстояние от лидара определяется по задержке принимаемого эхо-импульса).

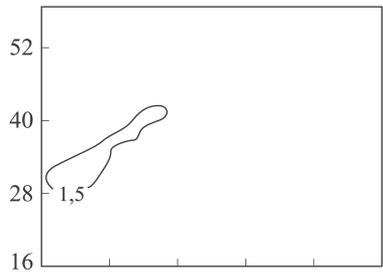
На рис. 2, б, г, е и 3, б приведены результаты обработки данных измерений. На каждом из этих рисунков оставлена наиболее контрастная неоднородность в области расстояний от лидара (16...46 м), не очень сильно отличающихся от расстояния анемометр – лидар (анемометр расположен на расстоянии 31 м от лидара).

Если ветер направлен почти вдоль оптической оси лазерного пучка, то неоднородности сильно вытянуты и видно существенное изменение (увеличение или уменьшение) расстояния от лидара до неоднородности в течение времени измерения.

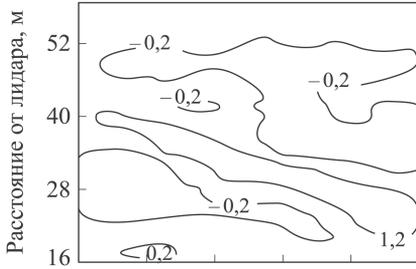
Метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра основан на анализе размеров неоднородностей объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния на двумерной плоскости время измерения – расстояние от лидара. Исходной информацией для него являются временные реализации принимаемых лазерных сигналов, полученные для каждого зондирующего импульса. Эти реализации используются для получения пространственных реализаций объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы вдоль трассы зондирования. Узкий лазерный пучок и короткие зондирующие импульсы позволяют достаточно точно локализовать рассеивающие объемы атмосферы и описать пространственное распределение объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы.



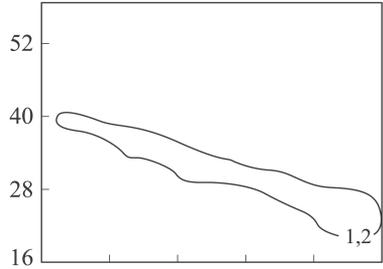
*a*



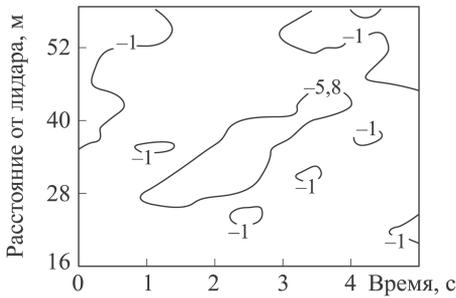
*б*



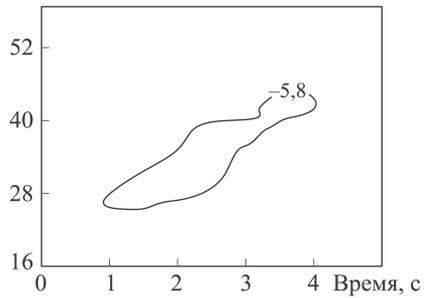
*в*



*г*

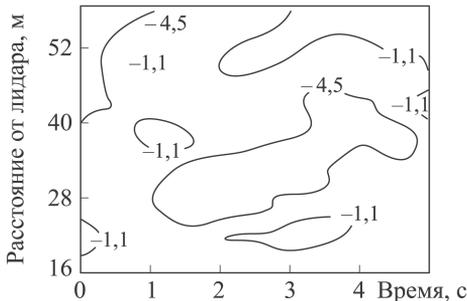


*д*

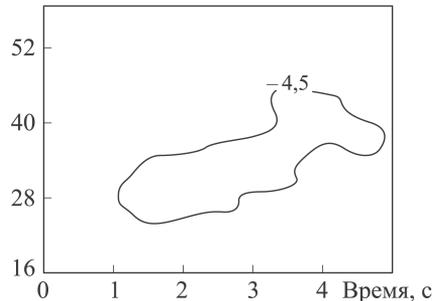


*е*

**Рис. 2.** Результаты измерений при  $V_{ан} = 6,7$  м/с (*a*, *б*);  $2,75$  м/с (*в*, *г*);  $4,5$  м/с (*д*, *е*) направление ветра близко к направлению вдоль оптической оси лазерного пучка от лидара

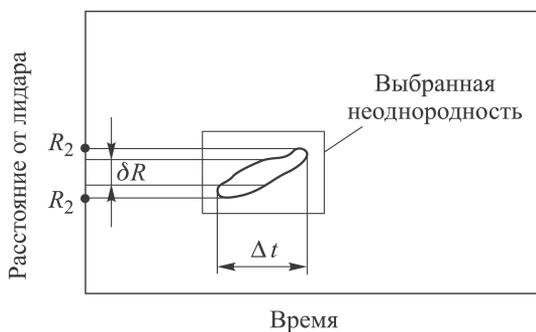


*a*



*б*

**Рис. 3.** Результаты измерений при  $V_{ан} = 2,8$  м/с, направление ветра  $\varphi_{ан} \cong 30^\circ$



**Рис. 4. Параметры, определяемые для выбранной неоднородности**

Полученные в течение времени  $t_{\text{изм}} = 5$  с данные измерений пространственных реализаций объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы представляются в виде двумерного массива данных на плоскости время измерения – расстояние от лидара. Для получения приближенного значения мгновенной скорости и направления ветра на плоскости время измерения – расстояние от лидара выделяется наиболее контрастная неоднородность. Выбранная неоднородность должна представлять собой односвязную область (для выбранной неоднородности проводится проверка: коэффициент вариации флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния в пределах всей неоднородности больше или меньше выбранного порогового значения) и целиком находится в области регистрации – двумерной плоскости время измерения – расстояние от лидара. Для выбранной неоднородности определяют (рис. 4):

- размеры неоднородности по оси времени  $\Delta t$ ;
- координаты начала и конца неоднородности ( $R_1, R_2$ ) по оси расстояний от лидара;
- размер неоднородности  $\delta R$  по оси расстояний от лидара (соответствующий ее середине по временной оси) в направлении оси расстояния от лидара.

Приближенное значение продольной составляющей мгновенной скорости  $V_{\parallel}$  определялось из соотношения

$$V_{\parallel} = \frac{\Delta R - \delta R}{\Delta t},$$

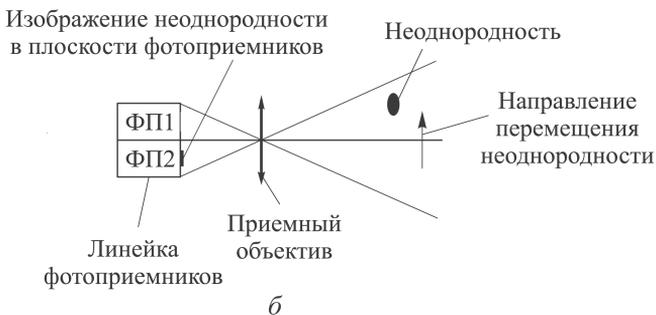
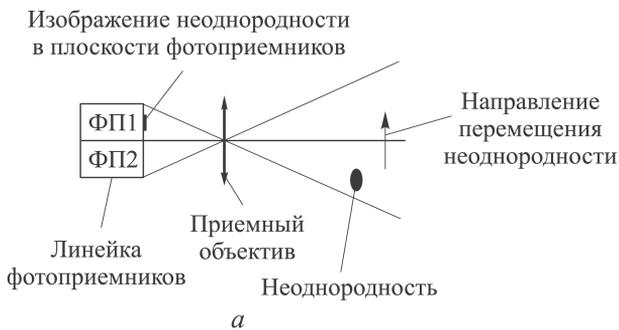
где  $\Delta R = |R_2 - R_1|$ .

Направление продольной составляющей скорости ветра определялось по знаку разности  $R_2 - R_1$  (положительное значение разности соответствует направлению от лидара, отрицательное – направлению к лидару).

Приближенное значение поперечной составляющей мгновенной скорости  $V_{\perp}$  определялось (полагая неоднородности изотропными [4, 5]) из соотношения

$$V_{\perp} = \frac{\delta R}{\Delta t}.$$

Направление поперечной составляющей скорости можно определить, используя, например, двухплощадочный фотоприемник.



**Рис. 5. Измерение направления поперечной составляющей скорости ветра**

Физической основой определения направления поперечной скорости ветра является построение приемной оптической системой (в плоскости двухплощадочного фотоприемника) изображения освещенного объема атмосферы. При этом площадки фотоприемников ФП1 и ФП2 последовательно (рис. 5) расположены в горизонтальной плоскости в виде линейки (состоящей всего из двух элементов), ориентированной в горизонтальной плоскости перпендикулярно оптической оси приемной системы (см. рис. 5 — вид сверху на схему зондирования; для простоты считаем, что схема зондирования коаксиальная, моностатическая и угол расходимости передающего канала совпадает с полем зрения приемного канала) и простейшая приемная система в виде одной положительной линзы.

Если аэрозольная неоднородность входит в поле зрения приемной системы, то ее изображение появляется в плоскости двухплощадочного фотоприемника и регистрируется сначала только одной площадкой фотоприемника ФП1 (рис. 5, а). Под действием поперечной составляющей ветра аэрозольная неоднородность пересекает поле зрения приемной системы и соответственно ее изображение перемещается в плоскости двухплощадочного фотоприемника с одной площадки на другую (и начинает регистрироваться второй площадкой фотоприемника ФП2, рис. 5, б). Анализ последовательности сигналов, регистрируемых двумя площадками фотоприемника, дает возможность определить направление поперечной скорости ветра.

Таким образом, результаты проведенного математического моделирования и обработки полученных в натурном эксперименте данных показывают, что использование однолучевого, без пространственного сканирования, им-

пульсного лидара и анализ измеренных пространственных реализаций объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы на плоскости время измерения – расстояние от лидара позволяют получить приближенное значение мгновенной скорости ветра (порывов ветра) с погрешностью в среднем  $\sim 20 \dots 30\%$  для модуля и  $25 \dots 30^\circ$  для направления ветра.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Моргунов В.К.* Конспект лекций по курсу “Метеорология и климатология”. Часть 3. “Метеорологические приборы и методы наблюдения”. Новосибирск. 2003. [http://www.zao.nsawt.ru/files/g/4/meteorologiya\\_i\\_klimatologiya-3ch.pdf](http://www.zao.nsawt.ru/files/g/4/meteorologiya_i_klimatologiya-3ch.pdf) (Дата обращения: 22.09.2013).
2. *Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С.* Лидары и исследование климата. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 320 с.
3. *Мензис Р.Т., Хардести Р.М.* Когерентный доплеровский лидар для измерения полей ветра // ТИИЭР. 1989. Т. 77. № 3. С. 57–70.
4. *Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Заде, Э.С. Фердинандов и др.* Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
5. *Применение корреляционных методов в атмосферной оптике / В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов и др.* Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
6. *Оперативное определение компонентов скорости ветра с помощью лидара / Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, В.С. Рыбалко и др. // Оптика атмосферы.* 1988. Т. 1. № 2. С. 68–72.
7. *Матвиенко Г.Г.* Лидарные измерения скорости ветра с использованием стохастической структуры аэрозольных полей // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 3–15.
8. *Балин Б.Д., Беленький М.С., Разенков И.А., Сафонова Н.В.* Пространственно-временная структура сигналов аэрозольного лидара // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 8. С. 77–83.
9. *Сравнение лазерного и радиозондового методов зондирования скорости и направления ветра / Ю.С. Белан, Г.Г. Матвиенко, А.И. Гришин и др. // Оптика атмосферы.* 1991. Т. 4. № 10. С. 1070–1076.
10. *Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А.* Корреляционный лазерный метод с адаптивным выбором измерительной базы для оперативного измерения скорости ветра // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 2. С. 165–170.
11. *Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А.* Лазерный метод оперативного измерения скорости и направления ветра // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 1. С. 57–66.
12. *Экспериментальные исследования оперативного метода измерения скорости ветра с адаптивным выбором измерительной базы / В.И. Козинцев, С.Е. Иванов, М.Л. Белов и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* 2012. № 2. С. 79–86.
13. *Быков В.В.* Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 328 с.

## REFERENCES

- [1] Morgunov V.K. Konspekt leksiyy po kursu “Meteorologiya i klimatologiya”. Ch. 3. Meteorologicheskie pribory i metody nablyudeniya [Lectures on “Meteorology and Climatology”. Part 3. Meteorological instruments and methods of observation]. Novosibirsk, NGAVT Publ., 2003. 97 p. Available at: [http://www.zao.nsawt.ru/files/g/4/meteorologiya\\_i\\_klimatologiya-3ch.pdf](http://www.zao.nsawt.ru/files/g/4/meteorologiya_i_klimatologiya-3ch.pdf) (accessed 22 September 2013).

- [2] Zakharov V.M., Kostko O.K., Khmelevtsov S.S. Lidary i issledovanie klimata [Lidars and climate research]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 320 p.
- [3] Menzies R.T., Hardesty R.M. Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields. *Proc. IEEE*, 1989, vol. 77, no. 3, pp. 449–462.
- [4] Matvienko G.O. Zade E.S. Ferdinandov G.G. Korrelyatsionnye metody lazerno-lokatsionnykh izmereniy skorosti vetra [Correlation methods for laser-radar measurements of wind speed]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 223 p.
- [5] Orlov V.M., Matvienko G.G., Samokhvalov I.V. Primenenie korrelyatsionnykh metodov v atmosferno optike [The use of correlation methods in atmospheric optics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 160 p.
- [6] Matvienko G.G., Samokhvalov I.V., Rybalko V.S., Bortsov Yu.N., Shefontyuk D.I., Vorevodin M.Yu. On-the-fly measurements of wind velocity components by lidar. *Optika Atmosfery* [Atmos. Opt.], 1988, vol. 1, no. 2, pp. 68–72 (in Russ.).
- [7] Matvienko G.G. Lidar measurements of wind speed using the stochastic structure of aerosol fields. *Optika Atmosfery* [Atmos. Opt.], 1988, vol. 1, no. 6, pp. 3–15 (in Russ.).
- [8] Balin B.D., Belen'kiy M.S., Razenkov I.A., Safonova N.V. The space-time structure of aerosol lidar signals. *Optika Atmosfery* [Atmos. Opt.], 1988, vol. 1, no. 8, pp. 77–83 (in Russ.).
- [9] Belan B.D., Matvienko G.G., Grishin A.I., Kovalevskiy V.K., Meleshkin V.E. A comparison of laser and radiosonde methods for sensing the wind speed and direction. *Optika Atmosfery* [Atmos. Opt.], 1991, vol. 4, no. 10, pp. 1070–1076 (in Russ.).
- [10] Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Laser correlation method with adaptive choice of measuring base for on-the-fly measurements of wind velocity. *Atmos. Oceanic Opt.*, 2012, vol. 25, no. 4, pp. 263–268. doi: 10.1134/S1024856012040070
- [11] Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A. A laser method for on-the-fly measurements of the wind speed and direction. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2011, no. 1, pp. 57–66 (in Russ.).
- [12] Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L. Experimental studies of the on-the-fly method for measuring a wind speed with adaptive choice of measuring base. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2012, no. 2, pp. 79–86 (in Russ.).
- [13] Bykov V.V. Tsifrovoye modelirovaniye v statisticheskoy radiotekhnike [Numerical simulations in statistical radio engineering]. Moscow, Sovetskoye Radio Publ., 1971. 328 p.

Статья поступила в редакцию 25.02.2013

Михаил Леонидович Белов — д-р техн. наук, вед. научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

M.L. Belov — Dr. Sci. (Eng.), leading researcher of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and atmosphere optics. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Виктор Александрович Городничев — д-р техн. наук, зав. кафедрой “Элементы приборных устройств” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

V.A. Gorodnichev — Dr. Sci. (Eng.), head of “Elements of Instrument Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сергей Евгеньевич Иванов — канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области атмосферной оптики.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

S.E. Ivanov — Cand. Sci. (Eng.), researcher of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 publications in the field of atmosphere optics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Борис Викторович Стрелков — канд. техн. наук, декан факультета “Радиоэлектроника и лазерная техника”, руководитель НУК “Радиоэлектроника, лазерная и медицинская техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области лазерной и измерительной техники.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

B.V. Strelkov — Cand. Sci. (Eng.), dean of “Radio-Electronics and Laser Technology” faculty of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of laser and measuring technology.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.