

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.521

### Лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра

**В.И. Козинцев, С.Е. Иванов, М.Л. Белов, В.А. Городничев\***

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
НИИ радиоэлектроники и лазерной техники  
107005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5*

Поступила в редакцию 5.03.2012 г.

Рассмотрен лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра в атмосфере. Показано, что анализ пространственных реализаций объемного коэффициента обратного аэрозольного рассеяния атмосферы позволяет получить приближенное значение мгновенной скорости ветра с погрешностью ~20–30% для модуля и ~25–30° для направления ветра.

*Ключевые слова:* мгновенная скорость и направление ветра, лазерный дистанционный метод; instantaneous wind velocity and direction, laser remote sensing method.

Необходимость оперативного (единицы секунд) измерения скорости и направления атмосферного ветра требует развития существующих лазерных методов измерения.

Дистанционные лазерные методы измерения скорости ветра разделяются на доплеровские и корреляционные. Недостатком доплеровских лазерных методов является их способность измерять только продольную составляющую скорости ветра. Полный вектор скорости ветра можно восстановить из данных измерений продольной скорости при угловом сканировании.

Более простыми (и, соответственно, требующими менее дорогую аппаратуру) являются корреляционные методы [1, 2]. Хотя корреляционные методы обеспечивают меньшую дальность зондирования (по сравнению с доплеровскими), они являются наиболее подходящими для ряда практических приложений. Теоретическому и экспериментальному исследованию лазерных корреляционных систем и смежных вопросов посвящено большое число публикаций (см., например, [1–9]).

При метеорологических наблюдениях измерению подлежат средняя за 2 или 10 мин скорость ветра (зависит от типа измерительного прибора) и мгновенная скорость с усреднением 2–5 с. Лазерные 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 (см., например, [1–3, 9]). Однако решение полной задачи опреде-

ления модуля и направления мгновенной скорости ветра требует сложных методов измерения (использующих многолучевые схемы и требующих запоминания больших объемов данных) и сложных алгоритмов обработки данных измерений.

Ниже описывается простой метод, основанный на использовании одного лазерного пучка без пространственного сканирования. Этот метод может применяться для приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра.

Отметим, что приближенная оценка мгновенной скорости и направления ветра не только представляет самостоятельный интерес, она позволяет (при ее использовании) упростить методы получения точного значения мгновенной скорости ветра.

В основе метода приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра лежит анализ перемещения (обусловленного ветром) случайной структуры аэрозольных образований в атмосфере.

В настоящей статье используются экспериментальные данные, полученные авторами при натурных измерениях на созданном макете лидара (описание лидара приведено в [9]). Макет лидара имеет следующие геометрические характеристики:

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
спектральная ширина интерференционного фильтра	1 нм
Параметры АЦП:	
разрешение	2 бит
частота дискретизации	100 МГц

Для уменьшения влияния шума измеряемый сигнал сглаживался двумерным фильтром, размер

\* Валентин Иванович Козинцев; Сергей Евгеньевич Иванов (ekomonit@bmstu.ru, ivanov\_sergey2@mail.ru); Михаил Леонидович Белов (ekomonit@bmstu.ru, belov@bmstu.ru); Виктор Александрович Городничев.

окна составлял по пространственной оси 3 отсчета, что эквивалентно 1,5 м, и по временной оси – 200 отсчетов – эквивалентно 0,4 с.

Примеры экспериментальных данных приведены на рис. 1 (вертикальный ряд слева). Эти данные 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 эхоимпульса).

Так, для рис. 1, *a* скорость ветра, измеренная анемометром, составляет  $V_{ан} = 6,7$  м/с, направление ветра  $\varphi_{ан}$  близко к направлению вдоль оптической оси лазерного пучка от лидара. Для рис. 1, *б*  $V_{ан} = 2,75$  м/с, направление ветра близко к направлению вдоль оптической оси лазерного пучка к лидару. Для рис. 1, *в*  $V_{ан} = 2,8$  м/с, направление ветра  $\varphi_{ан} \cong \cong 30^\circ$  (под углом к оптической оси лазерного пучка от лидара). Для рис. 1, *г*  $V_{ан} = 4,5$  м/с, направление ветра близко к направлению вдоль оптической оси лазерного пучка от лидара.

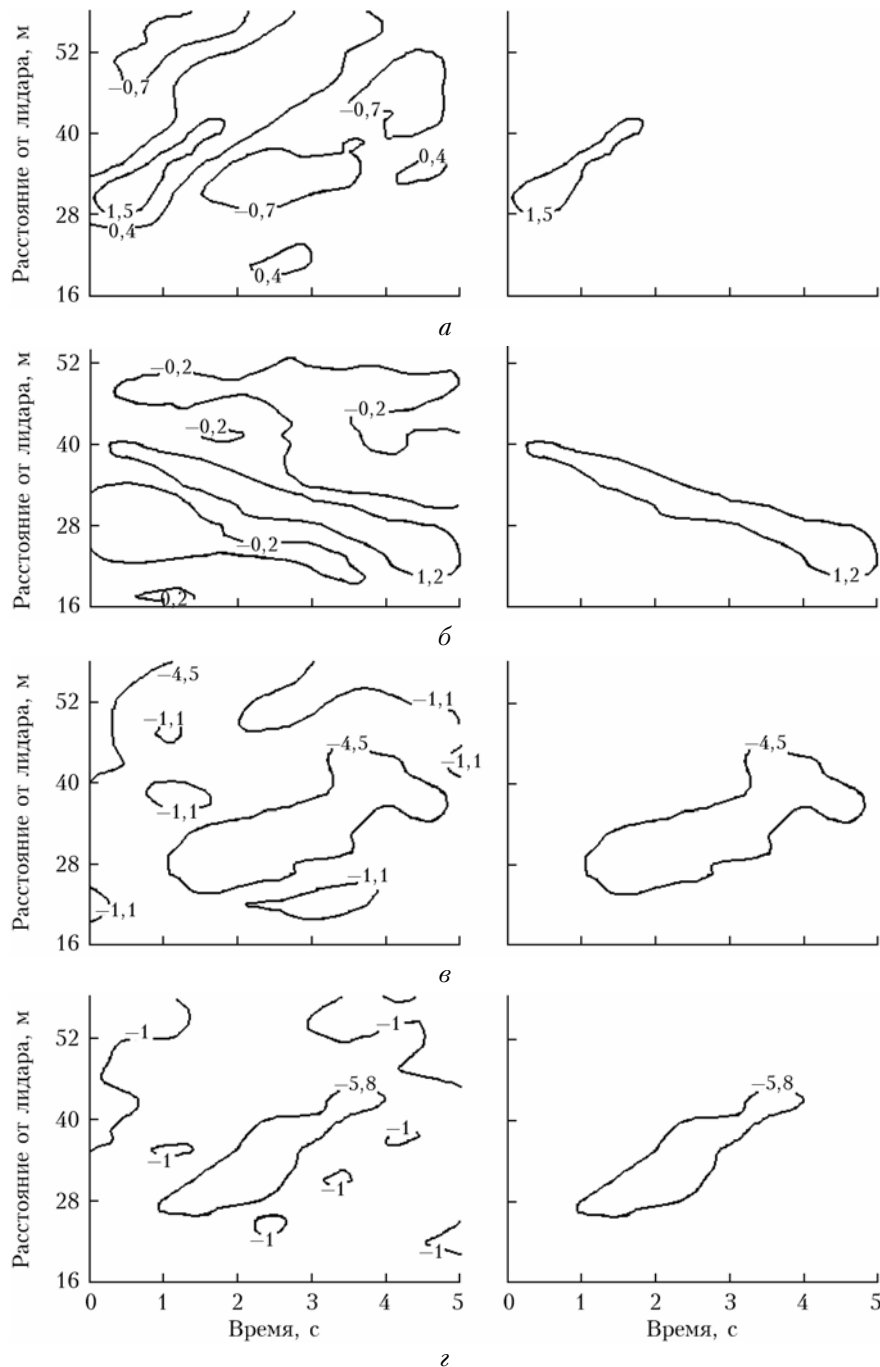


Рис. 1. Результаты эксперимента и обработки данных измерений: *a* –  $V_{ан} = 6,7$  м/с,  $\varphi_{ан} \approx 0^\circ$ ; *б* –  $V_{ан} = 2,75$  м/с,  $\varphi_{ан} = 180^\circ$ ; *в* –  $V_{ан} = 2,8$  м/с,  $\varphi_{ан} = 30^\circ$ ; *г* –  $V_{ан} = 4,5$  м/с,  $\varphi_{ан} \approx 0^\circ$

На рис. 1 (вертикальный ряд справа) 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. В идеале, если направление ветра точно совпадает с оптической осью лидара и оптические оси лазерного пучка и приемной оптической системы будут совмещены, то «образ» каждой неоднородности будет пересекать плоскость «время измерения – расстояние от лидара» в виде полосы.

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.

Полученные в течение времени  $t_{\text{изм}} = 5$  с (частота повторения импульсов лазерного источника в экспериментах 500 Гц [9]) 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» выделя-

ется наиболее контрастная неоднородность. Выбранная неоднородность должна представлять собой односвязанную 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. 2) размеры неоднородности по оси времени ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ); координаты начала и конца неоднородности ( $R_1, R_2$ ) по оси расстояний от лидара; размер неоднородности  $\delta R = R_2 - R_1$  по оси расстояний от лидара (соответствующий ее середине –  $t_1 + \Delta t/2$  по временной оси) в направлении оси расстояния от лидара.

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

$$V_{\parallel} = (\Delta R - \delta R)/\Delta t,$$

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 – к лидару).

Приближенное значение поперечной составляющей мгновенной скорости  $V_{\perp}$  определялось (полагая неоднородности изотропными [1, 2]) из соотношения

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

Направление поперечной составляющей скорости можно определить, используя, например, двухплощадочный фотоприемник. При этом площадки фотоприемника последовательно расположены в виде линейки, состоящей всего из двух элементов, ориентированной в горизонтальной плоскости перпендикулярно оптической оси приемной системы.

Если аэрозольная неоднородность входит в поле зрения приемной системы, то ее изображение появляется в плоскости двухплощадочного фотоприемника и регистрируется сначала только одной площадкой фотоприемника. Под действием поперечной

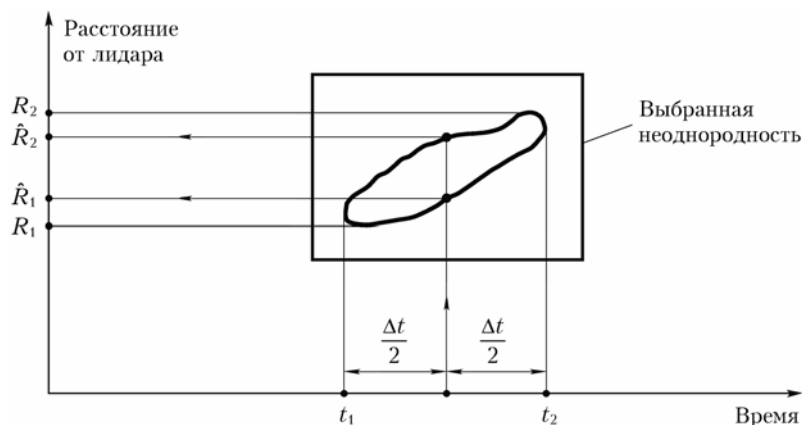


Рис. 2. Определение размеров неоднородности на плоскости «время измерения – расстояние от лидара»

составляющей ветра аэрозольная неоднородность пересекает поле зрения приемной системы, соответственно ее изображение перемещается в плоскости двухплощадочного фотоприемника с одной площадки на другую и начинает регистрироваться второй площадкой фотоприемника. Анализ последовательности сигналов, регистрируемых двумя площадками фотоприемника, дает возможность определить направление поперечной скорости ветра.

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

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

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

Макет лидара для натуральных измерений был реализован только с одноплощадочным фотоприемником, поэтому экспериментальное определение направления поперечной скорости ветра с использованием двухплощадочного фотоприемника не проводилось. Тем не менее эта методика проверялась с использованием математического моделирования.

Результаты проведенного математического моделирования и обработки полученных в натурном

эксперименте данных показали, что использование однолучевого, без пространственного сканирования, импульсного 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 с погрешностью в среднем ~20–30% для модуля и ~25–30° для направления ветра.

1. *Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра* / Г.Г. Матвиенко, Г.О. Задде, Э.С. Фердинандов, И.Н. Колев, Р.П. Аврамова. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
2. *Применение корреляционных методов в атмосферной оптике* / В.М. Орлов, Г.Г. Матвиенко, И.В. Самохвалов, Н.И. Юрга, М.Л. Белов, А.Ф. Овчаренко. Новосибирск: Наука, 1983. 160 с.
3. *Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В., Рыбалко В.С., Борцов Ю.Н., Шелефонтюк Д.И., Вореводин М.Ю.* Оперативное определение компонентов скорости ветра с помощью лидара // *Оптика атмосф.* 1988. Т. 1, № 2. С. 68–72.
4. *Матвиенко Г.Г.* Лидарные измерения скорости ветра с использованием стохастической структуры аэрозольных полей // *Оптика атмосф.* 1988. Т. 1, № 6. С. 3–15.
5. *Балин Ю.С., Бельский М.С., Разенков И.А., Сафонова Н.В.* Пространственно-временная структура сигналов аэрозольного лидара // *Оптика атмосф.* 1988. Т. 1, № 8. С. 77–83.
6. *Белан Б.Д., Матвиенко Г.Г., Гришин А.И., Ковалевский В.К., Мелешкин В.Е.* Сравнение лазерного и радиозондового методов зондирования скорости и направления ветра // *Оптика атмосф.* 1991. Т. 4, № 10. С. 1070–1076.
7. *Астафуров В.Г., Игнатова Э.Ю., Матвиенко Г.Г.* Эффективность лидарных измерений скорости ветра корреляционным лидаром // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 1, № 2. С. 497–503.
8. *Гришин А.И., Матвиенко Г.Г.* Лидарные исследования атмосферного аэрозоля в области ветровых сдвигов // *Оптика атмосф. и океана.* 1995. Т. 8, № 7. С. 1056–1062.
9. *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 атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 2. С. 165–170.

*V.I. Kozintsev, S.E. Ivanov, M.L. Belov, V.A. Gorodnichev. Laser method of approximate measurement of instantaneous wind velocity and direction.*

In this paper a laser method of approximate measurement of instantaneous wind velocity and direction in the atmosphere is considered. It is shown that analysis of spatial realization of atmospheric aerosol backscatter coefficient allows one to find approximate value of instantaneous wind velocity with an accuracy of ~20–30% for modulus and ~25–30° for direction.