

Г.Г. Матвиенко, И. В. Самохвалов, В.С. Рыбалко,
Ю.Н. Борцов, Д.И. Шелефонтьюк, Ю.М. Вороведин

ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СКОРОСТИ ВЕТРА С ПОМОЩЬЮ ЛИДАРА

В работе анализируются возможности лидара с двумя лазерными пучками, распространяющимися с малым угловым расстоянием (менее 1°) между ними для оперативного измерения компонентов скорости ветра с использованием взаимного анализа флуктуации лидарных сигналов на атмосферных аэрозолях. Показана перспективность лидара для изучения тонкой структуры ветровых потоков за интервалы времени 5 ... 20 с. Апробирован структурный алгоритм обработки сигналов, отличающийся большей вычислительной эффективностью.

Ряд технических приложений требует оперативного измерения (несколько секунд) одной или нескольких составляющих скорости ветра вдоль горизонтальной или наклонной трассы. Лидарные методы зондирования аэрозольной атмосферы с использованием статистической обработки флуктуации сигналов могут обеспечить решение такой задачи [1]. Методической основой таких измерений служит корреляционный или спектральный анализ сигналов, рассеянных на аэрозоле, увлекаемом воздушными потоками, из нескольких пространственно-разнесенных рассеивающих объемов на каждой высоте. Условие высокой оперативности определяет некоторые требования по сравнительно малым расстояниям между анализируемыми рассеивающими объемами.

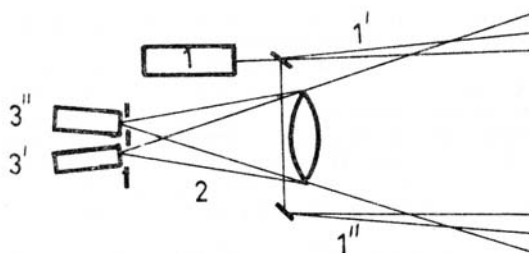


Рис. 1. Геометрическая схема приемопередающей головки лазерного измерителя скорости ветра: 1 — лазер; 1' и 1'' — зондирующие пучки; 2 — приемный телескоп; 3' и 3'' — фотодетекторы

В работах [2—4] экспериментально показана возможность измерения профиля поперечных скоростей ветра вдоль трассы зондирования. При этом обратно рассеянное атмосферой излучение от одного лазерного пучка разделяется в приемной системе лидара на два фотодетектора, сигналы от которых подвергаются взаимной обработке. Наличие в этих лидарах одного лазерного пучка с геометрическим разделением его изображения в отраженном потоке накладывает жесткие требования на стабильность параметров лазерного пучка, включая распределение интенсивности по его сечению. От указанного ограничения в большей степени должны быть свободны лидарные системы с двумя пучками излучения.

В данном сообщении обсуждаются вопросы измерения продольного и поперечного компонентов скорости ветра лидаром с двумя зондирующими пучками, распространяющимися с малым угловым расстоянием (менее 1°) между ними. Апробируется также структурная обработка сигналов.

Геометрическая схема приемопередатчика лидара представлена на рис. 1. Излучение лазера диэлектрическими зеркалами разделяется на два пучка с угловым расстоянием 8 мрад и направляется на исследуемую трассу. Отраженное атмосферой излучение собирается объективом, который направляет световые потоки от лазерных пучков на отдельные фотодетекторы. В лидаре использован лазер с длиной волны излучения 0,53 мкм, частотой посылок импульсов 50 Гц, длительностью импульсов 15 нс. Энергия импульса излучения составляла 0,01 Дж. Диаметр приемного объектива 150 мм, фокусное расстояние 1500 мм.

Система регистрации и обработки выполнена на основе параллельных аналого-цифровых преобразователей К1107ПВЗ и микро-ЭВМ 15ВМ-16. Она обеспечивала оцифровку сигналов по 8 разрядам через пространственный интервал 6 м и обработку массивов объемом до 16 К слов. Дальность действия лидара в слабозамутненной атмосфере, оцениваемая по отношению сигнал — шум, равному 10, составила 300 м. Диапазон измеряемых скоростей ветра 1 ... 30 м/с. Время измерения (накопления информации) 5 ... 20 с.

Рассеивающие объемы имели форму, близкую к цилиндрической, с диаметром 20 ... 30 см (в зависимости от дальности) и длиной около 2 м. Наши самолетные исследования [5] флуктуационной структуры отраженных оптических сигналов в рассеивающих объемах, близких к лидарным, и счетной концентрации аэрозоля показали, что в нижней атмосфере за флуктуации коэффициента обратного рассеяния ответственны крупные частицы с размером более 4 мкм. С учетом увлекаемости ветром таких частиц [6] компоненты скорости можно оценивать по положению экстремума взаимно-корреляционной [1] или взаимно-структурной функции сигналов в рассеивающих объемах вдоль или поперек трассы. Для поперечной скорости V_{\perp} справедливо следующее выражение:

$$V_{\perp}(L) = \xi(L)/\tau_m(L),$$

где L — дальность; $\xi(L)$ — расстояние между лазерными пучками на дальности L (для данного лидара $\xi(L) = 0,008 \cdot L + 0,2$), L выражено в метрах; $\tau_m(L)$ — положение максимума временной взаимно-корреляционной $R(\tau, L)$ или минимума взаимно-структурной $D(\tau, L)$ [7] функций лидарных сигналов из двух пучков излучения на дальности L .

Продольная скорость определяется по пространственным реализациям лидарных сигналов и по этому является усредненной по участкам трассы зондирования

$$V_{\parallel} = l_m/\tau_0,$$

где l_m — сдвиг максимума пространственной взаимнокорреляционной $R(l, \tau_0)$ или минимума взаимно-структурной $D(l, \tau_0)$ функций сигналов вдоль трассы через интервал времени τ_0 . Для лидара с данной геометрией τ_0 должно составлять 4 ... 16 с, а протяженность участков трассы — не менее 60 м.

Корреляционные и структурные функции оценивались по последовательным мультипликативным алгоритмам. Временные реализации сигналов предварительно подвергались фильтрации линейного тренда и экспоненциальному сглаживанию с периодом среза 8 дискретов. Пространственные корреляционные и структурные функции усреднялись по 50 функциям. Время обработки составило около 1 минуты для расчета одного значения скорости. Проведение расчетов в реальном масштабе времени может быть обеспечено использованием параллельных алгоритмов [8] или специализированных процессоров.

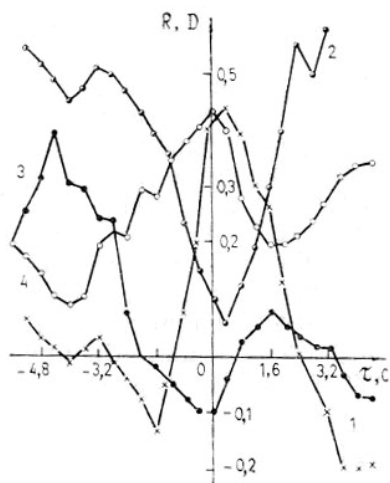


Рис. 2. Нормированные временные взаимно-корреляционная (1, 3) и структурная (2, 4) функции сигналов для определения поперечного ветра на дальности 102 м (1, 2) и 270 м (3, 4)

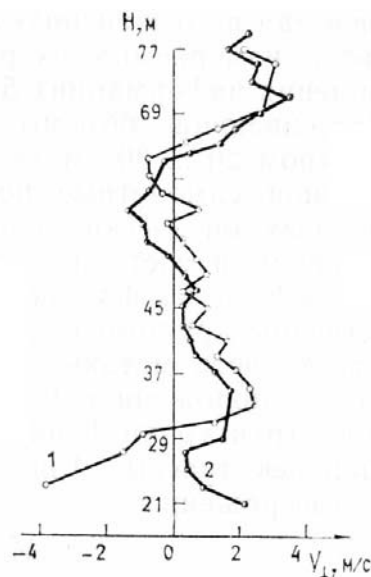


Рис. 3. Высотные профили поперечной скорости ветра, полученные при зондировании с углом места 20° 25.06.86 г. в 3–00 (1) и 4–11 (2). Длительность измерения 5 с

На рис. 2 приведены результаты обработки для определения поперечного компонента скорости ветра на горизонтальной трассе при слабом ветре с приземным значением модуля $V \sim 1$ м/с. Зондирование осуществлялось на приемном пункте ИОА СО АН СССР в условиях сложного берегового рельефа. Из рисунка следует, что корреляционные функции имеют области наибольших значений корреляции при некоторых значениях временных сдвигов, отличных от нуля. Приблизительно этим же сдвигам соответствуют области наименьших значений взаимно-структурных функций. Причем значения τ_m для максимума $R(\tau, L)$ и минимума $D(\tau, L)$ практически совпадают. Другие особенности пове-

дения $R(\tau, L)$ и $D(\tau, L)$ также близки. Это указывает на идентичность данных, получаемых из корреляционных и структурных функций, и возможность использования в ветровом зондировании структурного анализа, более эффективного с точки зрения технической реализации алгоритмов обработки.

Однако хотя основные особенности поведения корреляционных и структурных функций совпадают, побочные минимумы структурной функции более близки с главному минимуму, чем соответствующие максимумы корреляционной функции. Это наглядно видно из сравнения значений $R(270, \tau)$ и $D(270, \tau)$ при $\tau = +1,6$ и $\tau = -4$ с. Указанное обстоятельство позволяет предположить, что структурный алгоритм менее эффективен при выделении основной закономерности (главного минимума) в условиях заметного вклада шумов. Для геофизических полей более существенное влияние шумов на алгоритмы типа структурного обосновано в [7].

Зависимостям на рис. 2 соответствуют значения скорости $V_{\perp}(102) = 2,5$ м/с и $V_{\perp}(270) = -0,5$ м/с. То есть наблюдается существенное отличие не только по величине скорости, но и по знаку, вполне объяснимое влиянием местности. Пространственная изменчивость поперечной скорости ветра более наглядно видна из данных, представленных на рис. 3, где показаны вертикальные профили V_{\perp} , полученные в условиях устойчивого слабого ветра с приземным значением модуля около 1 м/с и направлении около 40° относительно направления трассы. Из рисунка видно, что профили в диапазоне высот от 33 до 77 м близки друг к другу, хотя при этом показывают существенную изменчивость по высоте. Так, на высотах 53 м и 65 м осуществляется смена знака. Значения скорости на высотах более 65 м выше, чем в слое ниже 53 м. Повышенной изменчивостью обладают воздушные потоки на высотах 20–25 м, где размах изменения при слабом приземном ветре (~ 1 м/с) достигает 6 м/с. Из приведенных данных следует, что этим методом можно анализировать тонкую структуру профилей скорости ветра.

На рис. 4 приведены результаты обработки для оценки продольной скорости ветра, усредненной по участку трассы 90 м. Функции 1 и 2 получены в тех же условиях, что и зависимости на рис. 2, а кривая 3 — при зондировании по горизонтальной трассе с приземным ветром около 6 м/с и его направлением, близким к трассе зондирования. Из рисунка следует, что характерные особенности в поведении пространственной корреляционной функции (как и для временной) повторяются на взаимной структурной функции с обратным знаком. Положение максимума на $R(l, \tau_0)$ совпадает с положением минимума на $D(l, \tau_0)$, обеспечивая получение оценки V_{\parallel} . Для кривых 1 и 2 значение l_m близко к 6 м и соответствующее значение продольной скорости составляет величину, меньшую 0,5 м/с. Для кривой 3 l_m существенно больше и равно 30 м, а скорость $V_{\parallel} = 7,5$ м/с. Следовательно, с увеличением скорости положение экстремума $R(l, \tau_0)$ и $D(l, \tau_0)$ смещается в сторону больших сдвигов, в отличие от временных корреляционных и структурных функций, у которых с ростом скорости экстремум смещается к нулевому сдвигу.

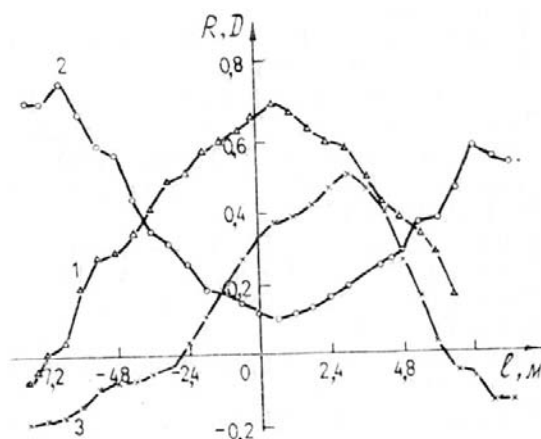


Рис. 4. Нормированные пространственные взаимокорреляционные (1, 3) и структурная (2) функции сигналов в диапазоне расстояний 90 ... 180 м при временном интервале между регистрациями сигналов 16 с (1, 2) и 4 с (3)

Погрешности корреляционных измерений скорости ветра проанализированы в [1]. Для данного лидара основной вклад в погрешность вносят дискретность съема информации и ограниченность длительности реализаций (статистическая погрешность). Для среднеквадратичной погрешности, обусловленной дискретным характером выборок, выполняется следующее выражение: $\Delta V = TV^2/2\xi$, где T — период следования лазерных импульсов. Откуда при $T = 0,02$ с и $\xi \sim 1$ м, погрешность $\Delta V = 10^{-2} V^2$, т.е. мала при малых скоростях ветра и растет с увеличением V по квадратичному закону, достигая 10% при $V = 10$ м/с и 30% при $V = 30$ м/с.

Статистическая погрешность описывается более сложными выражениями [1], максимальна при малых скоростях (для $V = 1$ м/с среднеквадратическая погрешность составляет 50 ... 60%) и с увели-

чением скорости существенно уменьшается, принимая значения менее 10% при $V \geq 8$ м/с. Суммарная среднеквадратичная погрешность может быть аппроксимирована значением $\Delta V = 1$ м/с для скоростей менее 10 м/с и зависимостью $\Delta V = TV^2/2\xi$ для больших скоростей. Поэтому для больших скоростей актуальны поиски путей понижения погрешности, что, в частности, для поперечной скорости соответствует диапазону временных сдвигов в области нуля. Для этой цели нами использован тот факт, что корреляционные и структурные функции в области экстремума по форме близки к параболе (рис. 2 и 4). То есть если некоторым оптимальным образом аппроксимировать экспериментальную корреляционную или структурную функцию параболой и уже для параболы определить положение ее экстремума, то погрешность за счет дискретности может быть уменьшена в 2 ... 3 раза [9]. Аппроксимация параболой осуществляется нами по методу наименьших квадратов. Таким образом, погрешность измерений для больших скоростей мы сократили, используя квадратичную аппроксимацию до 15 ... 20%.

На основании приведенных результатов можно отметить, что рассмотренный лидар перспективен для измерения скоростей, близких к мгновенным, а также тонкой пространственной структуры профилей скорости ветра. Лидар допускает дальнейшее повышение оперативности путем увеличения частоты следования лазерных импульсов и соответствующего подобного изменения геометрической схемы приемопередатчика. Для обработки сигналов могут быть использованы структурные алгоритмы, более эффективные при технической реализации.

1. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра / Матвиенко Г.Г., Задде Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Новосибирск: Наука, 1985. — 223 с.
2. Armstrong R. L., Mason J. B., Barber T. — Appl. Opt., 1976, v. 15, № 11, p. 2891—2895.
3. Егоров Ю.П., Вороводин Ю.М., Матвиенко Г.Г. и др. — В кн.: Тезисы докладов VI Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 2, Томск: ИОА СО АН СССР, 1980, с. 9—11.
4. Банков Ю.П., Захаров В.М., Крученицкий Г.М. и др. Там же. Ч. 1, с. 180—182.
5. Гродзовский Г.Л. — Учен. зап. ЦАГИ, 1974, т. 5, № 2, с. 80—89.
6. Белан Б.Д., Гришин А.И., Задде Г.О., Матвиенко Г.Г. — Изв. АН СССР, ФАО, 1987, т. 23, № 4, с. 402—408.
7. Баклицкий В.К., Бочкарев А.М., Мусьяков М.П. Методы Фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. М: Радио и связь, 1986. — 216 с.
8. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Сов. радио, 1971. — 326 с.
9. Котюк А.Ф., Райцин А.М. — В кн.: Труды XI Всес. симпозиума «Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей». Л.: ИВМ АН СССР, 1980, с. 53—57.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
16 ноября 1987 г.

G. G. Matvienko, I. V. Samokhvalov, V. S. Rybalko, Yu. N. Bortsov,
D. I. Shelenfontyuk, Yu. M. Vorevodin. **High-Data-Rate Lidar Sounding of Wind Velocity Components.**

The feasibility of a ground-based lidar using two closely spaced laser beams (with an angular distance of 1°) for high data-rate measurement of wind velocity components is discussed. The proposed technique is based on the correlation analysis of the lidar fluctuations due to atmospheric aerosol backscattering.

The double-beam lidar in question offers good promise for studying the wind fine structure within a period as short as 5—20 s.

The lidar data processing algorithm developed is shown to be of great computational efficiency.