

Г.Г. Матвиенко

ЛИДАРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Статья содержит обзор результатов по разработке лазерных методов зондирования ветровых потоков на основе статистической обработки аэрозольных эхо-сигналов. Приведены данные о флуктуациях оптических характеристик аэрозольных неоднородностей до высоты 5 км. Показано, что границами применимости этих методов по атмосферным условиям являются слабозамутненная атмосфера и основания облачных слоев. Даны описания лидарных систем, предназначенных для измерения ветра в горизонтальной плоскости и профилей около вертикальной оси и вдоль выбранного направления.

Все расширяющееся использование в человеческой деятельности воздушной среды требует получения данных от ветра в местах, недоступных для установки датчиков, а также усредненных по трассе, площади или объему. Эта информация может быть обеспечена применением дистанционных и бесконтактных методов измерения. Среди последних важное место занимают лазерные методы [1], использующие ветровой перенос естественных рассеивателей оптической энергии (аэрозолей, молекул и неоднородностей их свойств). При этом наряду с доплеровскими [2] весьма перспективны методы, использующие случайную структуру аэрозольных полей, контролируемых с помощью лидара. Они не требуют прецизионной лазерной техники и предполагают наличие в атмосфере неоднородностей рассеивающих свойств.

Результаты оптических исследований, выполненных с помощью прожекторного [3], лазерного [4] и самолетного [5] зондирования, показали, что пространственное распределение атмосферного аэрозоля имеет случайную структуру различных масштабов практически на любой высоте. Аэрозольные образования, перемещаясь и видоизменяясь во времени, проявляются во флуктуациях оптических характеристик атмосферного воздуха через неоднородности концентрации аэрозольных частиц и их микрофизических параметров и создают в атмосфере объемное поле коэффициента обратного рассеяния. С этой точки зрения сигналы аэрозольного лидара представляют широкую основу для применения корреляционно-экстремальных и спектральных методов оценки близости и обусловленных ветром пространственно-временных сдвигов аэрозольных полей.

К настоящему времени апробированы различные схемы построения лидаров и обработки сигналов, позволяющие оценивать ветер как вдоль выбранного направления, так и площади, а также сдвиги ветра. Первые измерения [6, 7] проводились с использованием двухточечной методики временного корреляционного анализа [1]. Их положительные результаты заложили основу для создания однотрассовых и многотрассовых (или сканирующих) лидаров, решающих проблему контроля профиля ветра в нижней атмосфере [8–14]. Существование устойчивого аэрозольного слоя в области тропопавузы использовано в [15] для лазерного зондирования скорости ветра на высотах 11–16 км. Аналогично стохастическая структура слоя натрия позволила определить параметры движений с помощью лидара (длина волны 589 нм) на высотах 80–105 км [16].

Реализация пространственного корреляционного метода, близкого к применяемому в спутниковых наблюдениях [17], для определения скорости облачных полей продемонстрирована в [18] на основе сканирования лидаром в горизонтальной плоскости. В работах [19–20] обоснована возможность измерения скорости ветра при регистрации пространственных изображений лазерного пучка в отраженном потоке матричным детектором.

В данной работе содержится обзор результатов, полученных в Институте оптики атмосферы СО АН СССР, по разработке лазерных методов определения скорости ветра, использующих стохастическую структуру атмосферного аэрозоля.

Схемы измерений и обработки информации

Математической основой оценки движений случайно-неоднородных сред служит корреляционный анализ пространственных или временных сигналов, связанных с некоторым контролируемым параметром этой среды, в данном случае коэффициентом обратного рассеяния β . В атмосфере, как правило, скорости горизонтальных потоков значительно превышают скорости вертикальных движений. Поэтому обобщенную пространственно-временную корреляционную функцию поля коэффициента обратного рассеяния можно рассматривать для плоской среды, когда она становится функцией декартовых пространственных сдвигов ξ и η в горизонтальной плоскости и временного смещения τ . При этом без существенного сокращения общности корреляционную функцию в области около мак-

сумма можно представить центральной поверхностью второго порядка [1]. Запишем ее с явным выделением зависимости от скорости ветра

$$R(\xi, \eta, \tau) = g \{A(\xi - V_x\tau)^2 + Q(\eta - V_y\tau)^2 + 2H(\xi - V_x\tau)(\eta - V_y\tau) + K\tau^2\}, \quad (1)$$

где g — некоторая однозначная и ограниченная функция; V_x, V_y — проекции скорости ветра; A, Q и H — коэффициенты квадратичной формы, задающие размеры и форму аэрозольных неоднородностей. Параметр K определяет время жизни неоднородностей и учитывает их эволюцию и случайную составляющую скорости ветра в изотропном приближении. Контур $R(\xi, \eta, \tau) = \text{const}$ представляют собой эллипсоиды, и, следовательно, аэрозольные неоднородности при таком рассмотрении аппроксимируются эллипсами в горизонтальной плоскости.

С целью измерения скорости $V = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$ можно производить два типа наблюдений: наблюдение всей или части среды в два момента времени, разделенных интервалом τ_0 , и наблюдение в нескольких фиксированных точках атмосферы на расстояниях ξ_0 или η_0 . В первом случае — это пространственные измерения корреляции, во втором — временные.

При пространственных измерениях в результате взаимной обработки пространственных распределений β по координатам x, y рассчитывается взаимная корреляционная функция $R(\xi, \eta, \tau_0)$, являющаяся сечением $R(\xi, \eta, \tau)$ при $\tau = \tau_0$. Функция $R(\xi, \eta, \tau_0)$ имеет максимум при сдвигах ξ_m и η_m , удовлетворяющих уравнению

$$\partial R(\xi, \eta, \tau_0) / \partial \xi = 0$$

Дифференцируя (1), получаем

$$A(\xi_m - V_x\tau_0) + H(\eta_m - V_y\tau_0) = 0$$

$$\text{или } \xi_m = V_x\tau_0 \text{ и } \eta_m = V_y\tau_0. \quad (2)$$

Из соотношений (2) находятся проекции средней скорости ветра на координатные оси. Причем коэффициенты квадратичной формы не влияют на оценки V_x и V_y .

Использование такой схемы применительно к зондированию профиля скорости ветра требует регистрации распределений интенсивности обратно рассеянных потоков по сечению лазерного пучка на различных высотах, как это предложено в [19], или быстрого трехмерного сканирования. Практической реализации эта схема еще не получила.

Моностатический лазерный локатор, который посылает импульсы излучения в горизонтальном направлении, регистрирует пространственные распределения неоднородностей коэффициента обратного рассеяния вдоль трассы зондирования, взаимная корреляционная обработка которых дает возможность найти в соответствии с (2) проекцию скорости на трассу зондирования. Для определения вектора средней скорости ветра необходимо провести одновременные или в близкие моменты времени зондирования в нескольких направлениях горизонтальной плоскости.

Временные изменения в двух точках на оси x на расстоянии ξ_0 друг от друга характеризуются временной взаимной корреляционной функцией $R(\xi_0, 0, \tau)$. Положение ее максимума, найденное из условия $\partial R(\xi_0, 0, \tau) / \partial \tau = 0$, определяется соотношением

$$\tau_m = \xi_0(AV_x + HV_y) / (AV_x^2 + QV_y^2 + 2HV_xV_y + K). \quad (3)$$

Как видно из (3), τ_m определяется не только скоростью ветра, но и структурой неоднородностей. Это обстоятельство усложняет применение временного корреляционного анализа. С привлечением данных о параметрах неоднородностей выражение (3) упрощается. Так, полагая неоднородности изотропными и замороженными ($A = Q, H \sim 0, K \sim 0$), (3) принимает следующий вид:

$$\tau_m = \xi_0 V_x / (V_x^2 + V_y^2).$$

Отношение ξ_0 / τ_m дает скорость V'_x , которая связана с модулем скорости V соотношением

$$V'_x = V / \cos \varphi,$$

где φ — угол между осью x и вектором скорости ветра.

Для одномерного движения ($V_x = V, V_y = 0$) из (3) следует

$$V' = V + K / AV.$$

Отношение $(K/A)^{1/2}$ имеет размерность скорости и служит для обозначения скорости случайных процессов V_c , разрушающих неоднородности. Скорость V называется кажущейся, она всегда больше истинной скорости из-за вклада изменчивости неоднородностей. Поэтому для определения скорости ветра при временных наблюдениях необходимо оценивать скорость V_c . Для этого привлекают автокорреляционную функцию $R(0, 0, \tau)$, вид которой обусловлен характеристической скоростью ($V_c = (V^2 + V_c^2)^{1/2}$) изменения рассеянного сигнала для неподвижного наблюдателя. Ее величина определяется следующим образом:

$$V_c' = \xi_0 / \tau_s, \quad (4)$$

где τ_s удовлетворяет уравнению $R(\xi_0, 0, 0) = R(0, 0, \tau_s)$ [1]. Графическая иллюстрация выражений (3) и (4) дана на рис. 1. При практических вычислениях, чтобы сдвиги τ_m и τ_s были в области квадратичной аппроксимации корреляционных функций, их находят по произвольному уровню $R = \gamma$ из соотношений (рис. 1)

$$\tau_s^2 = \tau_1^2 + \tau_1 \tau_2, \quad \tau_m = 0,5 (\tau_1 + \tau_2).$$

В точках τ_1 , τ_2 и τ_γ выполняется равенство

$$R(0, 0, \tau_\gamma) = R(\xi_0, 0, \tau_1) = R(\xi_0, 0, \tau_2) = \gamma.$$

При выборе трех не лежащих на одной прямой точек съема информации о флуктуациях коэффициента обратного рассеяния на выделенной высоте задача нахождения скорости и направления ветра решается полностью и в общем виде. Наиболее удобно, когда измерительные точки размещены в вершинах прямоугольного треугольника. Трехточечная методика есть расширение двухточечной и использует ее результаты на первых этапах, когда определяются три кажущиеся и три характеристические скорости, соответствующие каждой измерительной линии. Как показано в [1], кажущиеся скорости, будучи представленными в системе координат, отражающей взаимное расположение рассеивающих объемов, лежат на одной прямой линии. А значения характеристических скоростей, отложенные в этой же системе координат симметрично относительно начала, зададут эллипс, описывающий форму и ориентацию неоднородностей.

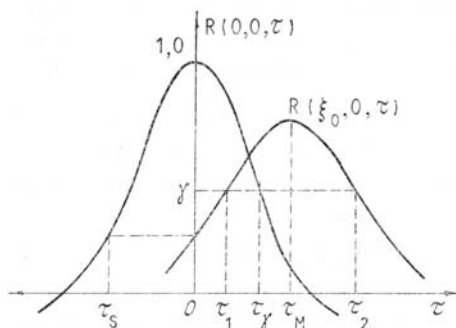


Рис. 1. Корреляционные функции сигналов, зарегистрированных в двух точках случайного поля на расстоянии ξ_0 друг от друга

Соответствующим выбором масштаба характеристических скоростей можно добиться касания эллипса и фронта кажущихся скоростей. Точка касания дает направление искомой скорости, а значения скоростей V' и V_c в этой точке определяют модуль скорости

$$V = V_c'^2 / V'.$$

Таким образом, схемы лидаров, использующие временные ряды сигналов, должны иметь несколько трасс зондирования [12–16]. Причем расстояния между трассами (величина ξ_0) должны удовлетворять условию применимости корреляционного метода [1]

$$\xi_0 \leq 0,85 l, \quad (5)$$

где $l = 2V_c'\tau_{0,5}$ — средний размер неоднородностей; $\tau_{0,5}$ — радиус корреляции на уровне $R = 0,5$. Из (5) следует также неравенство $l \geq 1,18 \xi_0$. Оно задает минимальный размер неоднородностей, вносящих основной вклад в корреляцию и позволяющих определить скорость движения неоднородностей.

Важной характеристикой неоднородностей, необходимой для проектирования ветровых лидаров, является уровень амплитудных флуктуаций β , характеризуемый коэффициентом изменчивости. Коэффициент изменчивости β определяет энергетический потенциал локатора.

Характеристики неоднородностей коэффициента обратного рассеяния в нижней атмосфере

Необходимость получения количественной информации о пространственно-временных и амплитудных флуктуациях β предопределило использование различных технических средств для их изучения. В приземном слое атмосферы применялись лидары с длинами волн 0,53–0,68 мкм [21–23]. Исследования в слое до высоты 5 км осуществлялись самолетным нефелометром внешнего объема с излучением в видимом диапазоне спектра [24–25]. К настоящему времени накоплен значительный объем информации для таких синоптических объектов, как антициклон, малоградиентное поле и тылы холодного и теплого фронтов, который позволяет говорить о некоторой флуктуационной модели коэффициента обратного рассеяния, включающей совокупность статистических закономерностей для пространственно-временной и амплитудной изменчивости β .

На рис. 2 приведены спектральные плотности пространственных флуктуаций β в зависимости от пространственного периода l в атмосфере с неустойчивой стратификацией. Как видно из рисунка, неоднородности β имеют широкий интервал масштабов от единиц до сотен метров. Значения спектральной плотности с уменьшением масштаба падают по степенному закону с показателем «5/3», совпадающим с показателем в спектре турбулентных пульсаций скорости ветра. Этот факт согласуется с теоретическим выводом [1] об определяющем влиянии турбулентности на пространственно-временные характеристики аэрозольных неоднородностей. Для слоев атмосферы с устойчивой стратификацией показатель степени близок к двум.

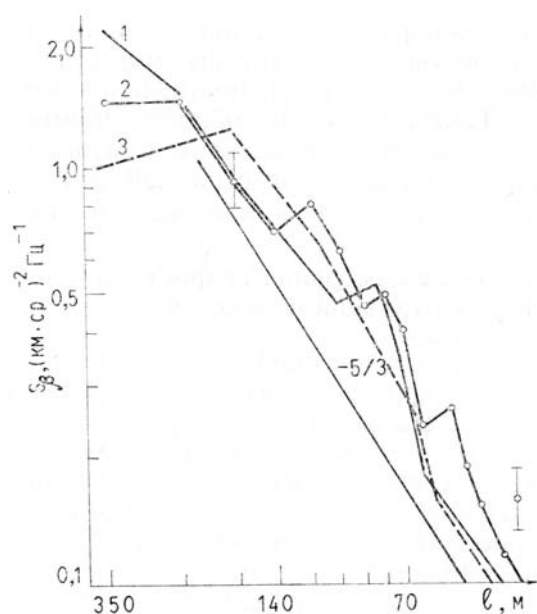


Рис. 2. Спектральные плотности флуктуаций коэффициента обратного рассеяния на длине волны 0,55 мкм для высот 1 – 500, 2 – 2000 и 3 – 4600 м. Вертикальные отрезки дают доверительный интервал для вероятности 0,95

На основе сравнения микрофизических и оптических измерений [25] показано, что флуктуации β обусловлены рассеянием на крупных аэрозольных частицах с размерами более 1–4 мкм. Пространственно-временные характеристики флуктуаций β не обнаруживают зависимости от длины волны в видимом диапазоне спектра.

Коэффициент изменчивости W_{β} флуктуаций β , изменяясь в диапазоне 0,03 ... 0,15, зависит от общего замутнения атмосферы, высоты и длины волны. Если в нижних слоях значения W_{β} одинаковы во всем видимом диапазоне волн, то, начиная с 2 ... 3 км, W_{β} в красной области спектра преобладает. В результате этого красный диапазон спектра становится более выгодным с точки зрения энергетики лидара. С ростом замутненности W_{β} также увеличивается.

Распределения значений β не противоречат гипотезе о нормальном законе с доверительной вероятностью 0,95.

Полученные сведения о пространственных флуктуациях β весьма полезны не только при расчете схем и потенциалов лидаров [1], но и для оценки погрешностей корреляционных измерений, свя-

занных с аппаратурой (шумы, статистические объемы информации) и с самой атмосферой. Последние имеют принципиальное значение, определяя границы применимости метода по атмосферным условиям. Здесь имеется в виду погрешность, обусловленная влиянием флуктуации прозрачности за счет аэрозольных неоднородностей на трассе, которые искажают локальную принадлежность эхо-сигнала.

Проведенный в [1] анализ этой погрешности на статистически однородных трассах показал, что не зависит от длины трассы и мала при выполнении неравенства

$$l^2(m_\alpha^2 + D_\alpha) \leq 0,45, \quad (6)$$

где m_α и D_α — среднее значение и дисперсия коэффициента рассеяния. Из (6) следует, что погрешность за счет прозрачности существенна при больших $\xi_0 = l \geq 0,1$ км и в мутной атмосфере $m_\alpha \geq 2$ км⁻¹. Что касается тумана и облачных слоев, то корреляционный метод допускает контроль движений только на их передней границе. При этом, в качестве альтернативы могут выступить параметры излучения, не зависящие от прозрачности, например поляризационные.

Таким образом, область применения лидарных методов измерения атмосферных потоков с использованием неоднородных аэрозольных полей и с регистрацией интенсивности эхо-сигналов ограничена слабозамутненной и безоблачной атмосферой.

Лидарные измерения скорости ветра в горизонтальной плоскости

Моностатический лазерный локалатор обеспечивает получение во времени пространственных распределений коэффициента обратного рассеяния вдоль трассы зондирования. Полагая ветровой режим в горизонтальном направлении в пределах дальности действия лидара однородным, эту способность лидаров можно использовать для бесконтактных измерений скорости ветра с применением как пространственного, так и временного корреляционного анализа. Пространственный корреляционный анализ используется в случае одномерного поля коэффициента обратного рассеяния. При этом пространственный сдвиг максимума ξ_m взаимно-корреляционной функции в соответствии с (2) определяет проекцию V_x на трассу зондирования. Временной корреляционный анализ применяется к временным реализациям эхо-сигналов на двух дальностях трассы локализации, разделенных некоторым расстоянием ξ_0 . Такая методика испытана на лидаре с длиной волны 0,53 мкм, длительностью импульсов 10 нс и энергией 0,02 Дж. Дальность действия лидара с указанными параметрами в условиях слабозамутненной атмосферы составила 800 м (отношение сигнал—шум—30). Высота трассы над подстилающей поверхностью — 40 ... 60 м. Пространственные радиусы корреляции β , измеренные в разных направлениях, были близки, и неоднородности можно было считать изотропными в горизонтальной плоскости.

На рис. 3 приведены функции $R(\xi, \tau_0)$ при зондировании по горизонтальной трассе со средней скоростью ветра 1,4 м/с (данные анемометра). Каждая кривая на рис. 3 есть результат усреднения пяти корреляционных функций, что во времени составило 0,5—3 мин. Как видно из рисунка, нормированные корреляционные функции $R(\xi, \tau_0)$ имеют максимумы не в нулевой точке, а при некотором сдвиге ξ_m . С увеличением τ_0 значения ξ_m возрастают, однако при этом абсолютное значение максимума уменьшается, а форма $R(\xi, \tau_0)$ все более уширяется. Поэтому точность определения ξ_m понижается и, следовательно, увеличивается ошибка оптических измерений скорости ветра. Сравнение отношений ξ_m/τ_0 с анемометрическим и измерениями показывает их удовлетворительное согласие. Для примера, приведенного на рис. 3, среднее значение скорости ветра из корреляционной обработки равняется 1,6 м/с.

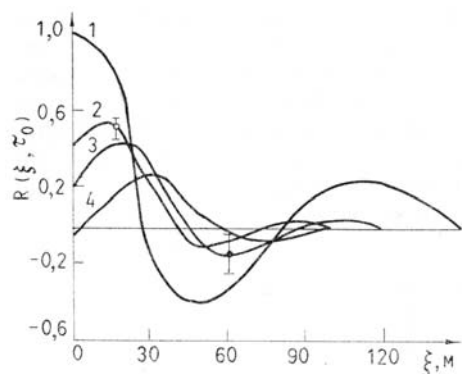


Рис. 3. Пространственные корреляционные функции $R(\xi, \tau_0)$, полученные при зондировании под углом 45° относительно направления ветра: 1—4 соответствуют $\tau_0 = 0, 10, 20, 30$ с. Вертикальными отрезками обозначено среднеквадратическое отклонение

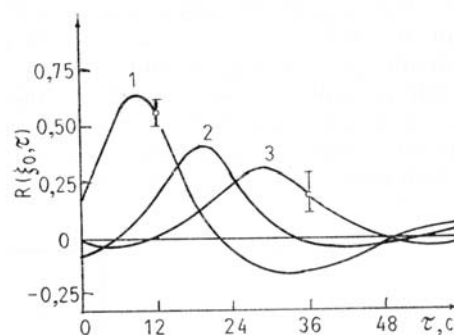


Рис. 4. Временные взаимные корреляционные функции при зондировании в направлении $\varphi = 45^\circ$: 1—3 — соответствуют $\xi_0 = 20, 40, 60$ м. Вертикальные отрезки дают среднеквадратичную погрешность

При изменении угла φ значения V_x изменяются по закону, близкому к закону косинуса. Для $\varphi > 60^\circ$ значения $R(\xi_m, \tau_0)$ становятся малыми и сдвиги ξ_m определяются с большой погрешностью.

На рис. 4 показаны функции $R(\xi_0, \tau)$, полученные при тех же условиях, что и на рис. 3. Каждая кривая является усредненной по пяти корреляционным функциям на различных дальностях. Длительность временных реализаций 2 мин. Как видно из рисунка, величина сдвига τ_m , который определяет скорость V'_x , с ростом расстояния ξ_0 также увеличивается, а значение корреляции в максимуме уменьшается. При приближении направления визирования лидара к ветру скорости ветра сдвиг τ_m максимума $R(\xi_0, \tau)$ увеличивается. При больших углах ($\varphi > 45^\circ$) максимум $R(\xi_0, \tau)$ становится довольно широким и значение τ_m находится с большой ошибкой. Так как с ростом ξ_0 уменьшается абсолютный уровень корреляции, наиболее оптимальными следует считать значения ξ_0 , близкие к пространственному радиусу корреляции 20 ... 40 м, когда измерительное расстояние соответствует размерам неоднородностей, определяющих вид корреляционной функции.

При объединении временного и пространственного корреляционного анализа сигналов горизонтального зондирования возникает метод определения вектора средней скорости ветра при локации только в одном направлении ($\varphi \leq 45^\circ$). Результаты сравнения оптических и анемометрических методов измерения скорости ветра показывают, что среднеквадратичный разброс отклонений модуля скорости ветра в исследованном интервале 1 ... 8 м/с от показаний анемометра составляет 0,7 м/с, расхождение в азимуте скорости ветра 10–15°.

Данные результаты иллюстрируют возможности обычного лазерного локатора для бесконтактных измерений скорости ветра в горизонтальном направлении. Такая методика может быть полезна в приложениях, где необходим контроль характеристик движения воздушных масс, усредненных по значительной площади, в районах со сложным рельефом (например, диагностика переноса загрязнений в городских условиях).

Лазерная локация профиля скорости ветра

Для решения задачи измерения вертикального профиля скорости и направления ветра необходимы лидарные системы, реализующие временной корреляционный анализ, со съемом информации о движущемся аэрозольном поле в нескольких фиксированных объемах (не менее чем в трех) на последовательных высотных уровнях. Разработанный нами корреляционный лидар [12] производит сканирование оптико-механическим узлом, осуществляя обзор атмосферы по образующей конуса около вертикальной оси без вращения оптических элементов. При этом поле зрения приемопередатчика описывает конус около вертикальной оси. Наибольшее отклонение оси лидара от вертикали составляет 10°. Скорость обзора 2 рад/с.

В лидаре использован лазер с длиной волны излучения 0,53 мкм, энергией излучения в импульсе 0,01 Дж и длительностью 10 нс. Диаметр приемного телескопа составлял 305 мм. Дальность действия лидара в слабозамутненной атмосфере достигала 1 км. Запуск лазера проводился в четырех фиксированных положениях одного периода сканирования. Следовательно, информация об изменчивости коэффициента обратного рассеяния снимается в четырех точках горизонтальной плоскости, лежащих в вершинах квадрата на каждой исследуемой высоте. Четвертая точка взята для контроля.

Лидарные сигналы поступают на систему сбора и обработки, выполненную на базе микро-ЭВМ 15BM–16, где они стробируются с последовательных высотных уровней, оцифровываются десятиразрядным аналого-цифровым преобразователем и подвергаются корреляционной обработке. С учетом полноты статистики время измерения одного профиля составляет 5 ... 10 мин. Определяемая лидаром скорость является средней в пространстве объемом 3 м по высоте и диаметром 30 ... 200 м в горизонтальной плоскости.

Применение полного корреляционного анализа к сигналам этого лидара иллюстрируется рис. 5, где показана геометрия расположения информационных точек на высоте 550 м и полученные авто- и взаимно-корреляционные функции лидарных сигналов из объемов O , A , B . Максимумы взаимно-корреляционных функций определяют сдвиги $\tau_m(OA)$, $\tau_m(OB)$, $\tau_m(AB)$, с которыми связаны кажущиеся скорости V'_{OA} , V'_{OB} , V'_{AB} соотношением $V' = \xi_0/\tau_m$, где ξ_0 принимает значения длин сторон измерительного треугольника OA , OB и AB соответственно. Значения скоростей V' , представленные с учетом знака в системе координат, отражающей взаимное расположение рассеивающих объемов, определяет фронт движения неоднородностей. Так как в треугольнике при любом направлении обхода должно выполняться условие $\sum \tau_m = 0$, этот фронт должен быть прямой линией. При нарушении данного условия можно рекомендовать процедуру «выравнивания» τ_m [1], заключающуюся в равномерном распределении величины $\sum \tau_m$ между слагаемыми. «Выравненные» значения τ_m используются в дальнейших расчетах.

Сдвиги τ_s , алгоритм нахождения которых понятен из рис. 5, задают характеристические скорости изменения сигнала $V_c = \xi_0/\tau_s$. Для нахождения скорости ветра пользуются связью, существующей ме-

жду скоростями V' и V'_c и их составляющими $V'_c = V \cdot V'$. Для обсуждаемого примера результаты промежуточных расчетов сведены в таблицу.

	τ_M, c	τ_S, c	ξ_0, M	$V', m/c$	$V'_c, m/c$
OA	14	21	108	7,5	5,1
OB	8	16	108	13	6,5
AB	-6	13	153	-25	11,2

Используя эти данные, получаем значение модуля скорости $V = 5,0$ м/с и направления $\varphi = 40^\circ$ относительно стороны OA, для треугольника ABC получены $V = 5,6$ м/с, $\varphi = 33^\circ$. Результаты двух измерений согласуются, что подтверждает правильность проведенных оценок и позволяет проводить дополнительное усреднение.

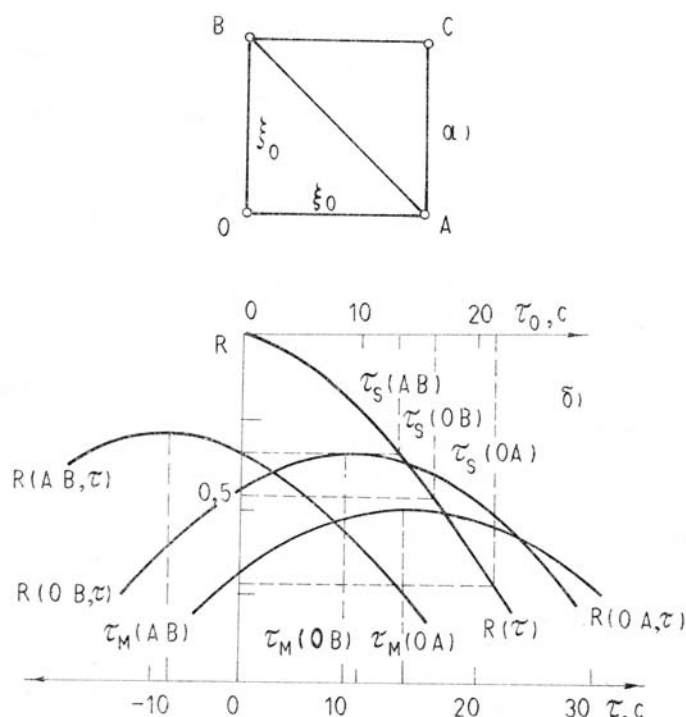


Рис. 5. Пример применения трехточечного временного анализа для оценки скорости на высоте 550 м: a – схема измерений, b – авто- и взаимно-корреляционные функции

Кроме информации о скорости из анализа корреляционных функций могут быть получены сведения о форме и размерах пространственных неоднородностей β . Форма неоднородностей приближенно совпадает с формой эллипса скоростей V'_c , который получается, если на систему координат измерительного треугольника нанести симметрично относительно начала значения $V'_{cOA}, V'_{cOB}, V'_{cAB}$. Сравнение значений последних для данного случая показывает, что размер неоднородностей в направлении, ортогональном скорости ветра, в два раза больше, чем в направлении ветра. Абсолютный размер неоднородностей в направлении ветра, оцениваемый на уровне корреляции 0,5, равен 80 м.

Лазерные измерения не сопровождалось шар-пилотным зондированием, поэтому для оценки точностных характеристик лидара был поставлен специальный цикл измерений при довольно устойчивом ветровом режиме. Приземная скорость ветра при этом была 4,5 м/с. На рис. 6 приведены результаты этих измерений.

Из рисунка видно, что модуль скорости ветра возрастает до высоты 550 м и далее его значение так же, как и направление скорости, существенно не изменились. Среднеквадратичный разброс V и φ в нижних слоях атмосферы заметно меньше, чем при $H \leq 550$ м. Величина среднеквадратичного разброса складывается из погрешности лазерных измерений V и φ и временной изменчивости ветрового движения. Если обратить внимание на высоту 350 м, где разброс минимальный, и считать, что именно на этой высоте ветер был наиболее стабилен, можно утверждать, что погрешность лидарных измерений не хуже ± 1 м/с или 10%. Среднеквадратичный разброс измеренных направлений ветра составил $\pm 10^\circ$. Локатор с такими характеристиками близок к контактным средствам измерения профиля ветра.

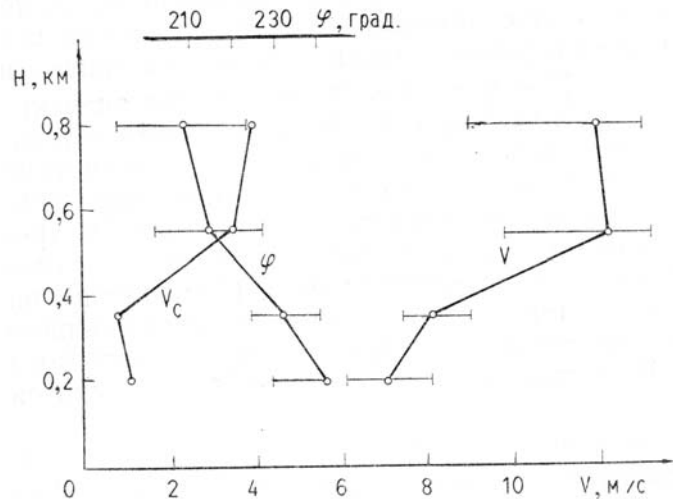


Рис. 6. Усредненные в течении одного часа профили скорости ветра V , направления φ и скорости случайных процессов V_c . Горизонтальные отрезки показывают среднеквадратичный разброс

На этом же рисунке показаны профили скорости случайных процессов, которая обусловлена пульсационной составляющей скорости ветра и эволюцией неоднородностей. Как видно, значения V_c в нижних слоях сравнительно невелики, это указывает на слабую турбулентность на этих высотах. В то же время для $H \geq 550$ м V_c достигает 4 м/с, что свидетельствует о большом уровне турбулентности. Все это наблюдается при практически постоянном $V(H)$. Такое поведение характерно уже для свободной атмосферы.

Измерения мгновенных значений скорости ветра

Для многих технических приложений необходимы данные о мгновенных значениях (измеренных за интервалы несколько секунд) одной или нескольких составляющих ветра вдоль горизонтальной или наклонной трассы. Лазерные корреляционные методы могут обеспечить такие измерения, если предъявить определенные требования к геометрической схеме локатора, и тогда неоднородности малого масштаба (около 1 м и менее) станут более информативными. Дисперсия флуктуации β , приходящаяся на эти периоды, как видно из рис. 1, мала. Поэтому лидар для измерения мгновенных значений скорости должен иметь большое отношение сигнал — шум и соответственно дальность его действия будет меньше, чем у лидаров с таким же потенциалом, но с большим временем измерения.

Общая длительность временных реализаций T , являющихся временным интервалом усреднения измеряемой скорости ветра, связана с расстоянием между рассеивающими объемами ξ_0 и минимальной измеряемой скоростью V_m соотношением [1]

$$T = 10 \xi_0 / V_m.$$

Для конкретного порогового значения скорости можно оценить геометрию рассеивающих объемов лазерного измерителя мгновенной скорости ветра. Так, для $V_m = 1$ м/с и $T = 5$ с ξ_0 должно составлять 0,5 м. Следовательно, в таком лидаре должно быть предусмотрено разделение лазерного пучка на два с необходимым расстоянием между ними или разделение изображения одного лазерного пучка в приемном объективе на два детектора, как это осуществлялось в [8, 9].

Нами испытаны лидары с обоими вариантами разделения [26, 27]. Оказалось, что разделение непосредственно лазерного пучка снимает ряд ограничений на стабильность параметров лазерного пучка, включая прежде всего распределение интенсивности по его сечению. В лидарах использованы лазеры с длиной волны 0,53 мкм, частотой посылок 50 Гц, длительностью импульсов 15 нс и энергией в импульсе 0,01 Дж. При диаметре приемного объектива 100 мм достигнута дальность действия 300 м. Пространственный интервал оцифровки сигналов 6 м.

Измеряемыми величинами были профили поперечной скорости ветра с пространственным дискретом 6 м и продольная скорость, усредненная по участкам трассы длиной не менее 60 м. Среди погрешностей, вносящих основной вклад в измеренные лидарами с малыми значениями ξ_0 скорости, необходимо отметить ошибки за счет дискретности посылок зондирующих импульсов и съема информации и ограниченность длительности (256 временных отсчетов) реализаций (статистическая погрешность). Для среднеквадратичной погрешности, обусловленной дискретным характером выборок, выполняется следующее выражение: $\sigma_V = tV^2/2\xi_0$, где t — период следования лазерных импульсов.

Откуда $\sigma_V = 10^{-2}V^2$ ($t = 0,02$ с), т. е. погрешность 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.

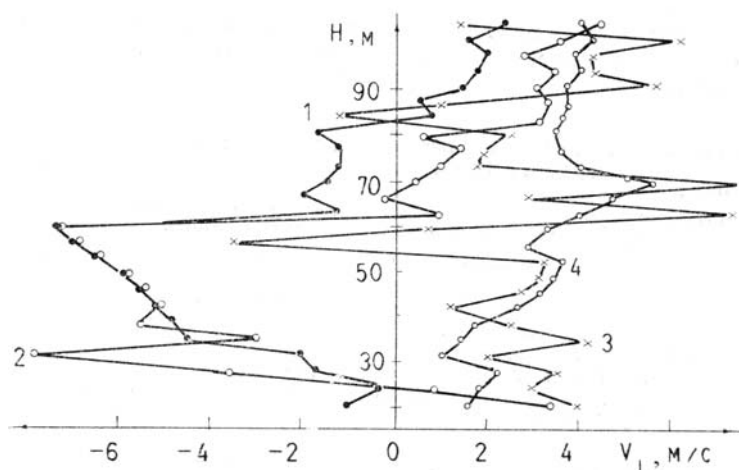


Рис. 7. Профили поперечной скорости ветра, измеренные в последовательные моменты времени через 30-минутный интервал

Статистическая погрешность описывается более сложными соотношениями [1], максимальна при малых скоростях (для $V = 1$ м/с среднее квадратичное значение погрешности составляет 50 ... 60%) и с увеличением скорости существенно уменьшается, принимая значения менее 10% при $V \geq 8$ м/с. Суммарная среднее квадратичная погрешность может быть аппроксимирована значением $\sigma_V = \pm 1$ м/с для $V \leq 10$ м/с и зависимостью $\sigma_V = tV^2/2\xi_0$ для больших скоростей. Для понижения погрешности при 10 м/с в [27] предложено аппроксимировать корреляционные функции в области максимума параболой (методом наименьших квадратов) и уже для параболы определять положение ее максимума. Таким образом удастся уменьшить погрешность лазерных измерений при больших скоростях до 15 ... 20%.

Для иллюстрации возможностей лидаров с малой измерительной базой ξ_0 на рис. 7 представлены профили поперечной скорости ветра, полученные при зондировании с углом места 20° в условиях городской застройки. Из рисунка видно, что профили в области высот 30 ... 50 м и более 85 м отличаются устойчивостью. На других высотах наблюдаются существенные изменения как по высоте, так и во времени, превышающие инструментальную погрешность. Эти вариации, по-видимому, обусловлены порывами и пульсациями ветра и связаны с ходом динамических процессов в приземной атмосфере.

Способность лидара с малой измерительной базой и большой частотой посылок зондирующих импульсов обнаруживать локальную структуру ветровых потоков делает его перспективным для изучения динамики пограничного слоя. Время измерения может быть еще более уменьшено, если увеличить частоту излучения лазерных импульсов и уменьшить измерительную базу.

В заключение отметим, что представленные результаты не ограничивают на этом возможности лидарных систем, использующих случайную структуру аэрозольных образований, для контроля движений в атмосфере. Как показано в [27], применение структурных и других критериальных функций облегчает задачу оперативной обработки лидарных сигналов. Существенные преимущества может дать спектральный анализ временных реализаций, так как фазовый спектр свободен от влияния пульсационной составляющей скорости ветра [23].

Наконец, далеко еще не раскрыты закономерности формирования аэрозольных полей и их взаимосвязь с метеорологическими процессами. Работы в названных и других направлениях, связанных с расширением измеряемых лидарами характеристик аэрозольной атмосферы, будут продолжены.

1. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра/Матвиенко Г.Г., Заде Г.О., Фердинандов Э.С. и др. Новосибирск: Наука, 1985. — 224 с.
2. Лазерные доплеровские измерители скорости/Василенко Ю.Г., Дубнищев Ю.Н., Коронкевич В.П. и др. Новосибирск: Наука, 1975. — 192 с.
3. Георгиевский Ю.С., Дривинг А.Я., Золотавина Н.В. и др. Прожекторный луч в атмосфере. М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 292 с.
4. Post M.J. — Optics Letts., 1978, v. 2, № 6, p. 166–168.
5. Белан Б.Д., Гришин А.И., Заде Г.О., Матвиенко Г.Г. — Изв. АН СССР. ФАО, 1987, т. 23, № 4, с. 402–407.
6. Strauch R.G., Derr V.E. — Third conference on laser studies of the atmosphere. Conf. Abstr. 9–12 Sept. 1970, Ocho Rios; Jamaica, p. 52–54.
7. Матвиенко Г.Г., Самохвалов И.В. — Метеорология и гидрология, 1978, № 7, с. 99–103.
8. Armstrong R.L., Mason J.V., Barber T. — Appl. Opt., 1976, v. 15, № 11, p. 2891–2895.

9. Байков Ю. П., Захаров В. М., Крученицкий Г. М. и др. — В кн.: VI Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Тез. докладов. Ч. I, Томск: ИОА СО АН СССР, 1980, с. 180—182.
10. Аврамова Р., Колев И., Саввов С. — Резюмета доклади I Симпозиум Физика и електронизация», Пловдив (НРБ), 1979, с. 62.
11. Eloranta E. W., King J. M., Weinman J. A. — *J. Appl. Meteorol.*, 1975, v. 14, № 8, p. 1485—1489.
12. Вороводин Ю. М., Журавлев В. И., Матвиенко Г. Г. и др. — В кн.: VI Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Тез. докладов. Ч. 2. Томск: ИОА СО АН СССР, 1980, с. 12—14.
13. Kunkel K. E., Eloranta E. W., Weinman J. A. — *J. Atmos. Scien.*, 1980, v. 37, № 5, p. 978—985.
14. Kolev I. N., Parvanov O. P., Avramova R. P. e. a. — *Int. Conf. Opt. and Millim. wave Propag. and Scatter. Atmos.*, Florence, May 27—30, 1986, Dig. 1986, p. 271—274.
15. Clemesha B. R., Kirchhoff V. W. J. H., Simonich D. M. — *Appl. Opt.*, 1981, v. 20, № 17, p. 2907—2910.
16. Clemesha B. R., Simonich D. M., Batista P. P. — *Sixth conference on laser atmospheric studies. Abstracts. Sendai (Japan)*, 1974, p. 173.
17. Leese J. A., Novak C. S. — *J. Appl. Meteorol.*, 1971, v. 10, p. 118—132.
18. Sasano Y., Hirohara H., Yamasaki T. e. a. — *J. Appl. Meteorol.*, 1982, v. 21, №10, p. 1516—1523.
19. Ferdinandov E. S., Mitev V. A. — *Bulg. J. Phvs.*, 1984, v. 11, № 4, p. 430—441.
20. Ferdinandov E. S. — *Bulg. J. Phys.*, 1984, v. 11, № 5, p. 520.
21. Zuev V. E., Vorevodin Y. M., Matvienko G. G., Samokhvalov I. V. — *Appl. Opt.*, 1977, v. 16, № 8, p. 2231—2235.
22. Вороводин Ю. М., Заде Г. О., Матвиенко Г. Г., Самохвалов И. В. — *Вопросы лазерного зондирования атмосферы*. Новосибирск: Наука, 1976, с. 45—53.
23. Балин Ю. С., Беленький М. С., Миронов В. Л. и др. — *Изв. АН СССР. ФАО*, 1986, т. 22, № 10, с. 1060—1064.
24. Гришин А. И., Матвиенко Г. Г. — *Изв. АН СССР. ФАО*, 1981, т. 17, № 11, с. 1148—1154.
25. Белан Б. Д., Гришин А. И., Задде Г. О., Матвиенко Г. Г. — *Изв. АН СССР. ФАО*, 1987, т. 23, № 4, с. 402—408.
26. Самохвалов И. В., Вороводин Ю. М., Матвиенко Г. Г. — *Тезисы докладов 7-го Всес. совещания по радиометеорологии*. М.: Информ. центр ВНИИГМИ—МЦД, 1986, с. 133.
27. Матвиенко Г. Г., Самохвалов И. В., Рыбалко В. С. и др. — *Оптика атмосферы*, 1988, т. 1, № 2, с. 68—72.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
25 апреля 1988 г.

G. G. Matvienko. Lidar Observations of Wind Velocity Using Aerosol Field Stochastic Structure.

A state-of-the-art review of laser methods for sounding wind velocity on the basis of the statistical data on lidar returns backscattered by atmospheric aerosols is given. Fluctuations of aerosol inhomogeneity optical characteristics up to the 5-km altitude are discussed. The methods of interest are shown to be applicable to laser sensing of slightly turbid atmosphere and cloud bases. Described are lidar systems designed to measure wind velocity profiles for horizontal and vertical atmospheric paths and along a certain direction chosen.