

А.И. Гришин, Г.Г. Матвиенко

ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ АЭРОЗОЛЯ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Предложен вариант корреляционного измерения профиля вертикальных перемещений аэрозоля с помощью лидара на основе временного корреляционного анализа. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований.

Решение прогностических задач по переносу загрязнений в нижней атмосфере связывают обычно с уравнением атмосферной диффузии [1], которое объединяет концентрацию примеси с характеристиками объемного поля скорости ветра и коэффициента турбулентной диффузии. Если для коэффициента турбулентной диффузии развиты модельные представления, использующие приземные и обобщенные метеорологические данные [1], то для скорости ветра более предпочтительны профильные измерения, причем оперативные. Имеющиеся в настоящее время технические средства дистанционного зондирования атмосферы позволяют с вполне приемлемой для многих практических приложений точностью определить профили вектора скорости ветра. Большие возможности при этом принадлежат активным средствам лазерного зондирования, лидарам, реализующим корреляционные или доплеровские принципы измерения скоростей (например, [2, 3]).

Для многих случаев анализа переноса загрязнений скорость вертикальных движений из рассмотрения исключалась из-за того, что она существенно меньше горизонтальных скоростей ветра, что упрощало решение уравнения диффузии. В то же время нередки ситуации, когда вертикальной скоростью пренебречь нельзя. Таким ситуациям соответствуют штилевые условия, при которых горизонтальные скорости движений малы и диффузия примесей определяется вертикальными движениями. Наибольший интерес из вертикальных потоков представляют неупорядоченные вертикальные скорости, охватывающие масштабы явлений до нескольких сотен метров и имеющие наибольшие скорости. Измерение вертикальных скоростей в таких случаях может решаться при помощи некогерентного аэрозольного лидара с вертикальным направлением зондирования и дальнейшей корреляционной либо спектральной обработкой сигналов. Традиционные шарпилотные средства в таких ситуациях теряют свою эффективность.

В данной статье анализируются методические вопросы оценки неупорядоченных вертикальных скоростей с помощью некогерентного аэрозольного лидара в условиях штиля.

Атмосферные аэрозоли, увлекаясь воздушными потоками, сопровождают вертикальные струи и проявляются во временных и пространственных флуктуациях эхосигналов. Рассчитываемые при этом временные корреляционные функции между сигналами с различных высотных уровней будут смещаться относительно нулевого сдвига, причем масштаб сдвига однозначно связан с величиной скорости вертикальных потоков.

Исследования проводились на трехтрассовом лидаре [2], схема которого (рис. 1) удовлетворяет условиям применения полного корреляционного анализа для оценки значения трехмерного вектора скорости ветра. На основе информации, получаемой при помощи данного лидара, выбирались условия, когда горизонтальные скорости ветра были малы (менее 0,5 м/с), при этом одна из трасс ориентировалась в вертикальном направлении. Методические вопросы применения данного лидара для зондирования горизонтальной скорости ветра рассмотрены нами в [2]. Генерацию коротких световых импульсов на длине волны 0,53 мкм и длительностью 15 нс обеспечивал серийный лазер 1 типа ИЛТИ-407. Приемная оптическая система 2 на базе линзового объектива диаметром 30 см и с фокусным расстоянием 620 мм позволяла регистрировать сигнал с высоты около 1 км для вечерних условий и 750 м – для дневных. Механическое устройство 3 осуществляло сканирование приемно-передающего устройства с частотой

той 0,5 Гц по образующей конуса без вращения оптической системы вокруг ее оси. Фотоэлектронный блок 4 обеспечивал преобразование оптического сигнала в электрический, который в свою очередь направлялся на вход 8-битового аналого-цифрового преобразователя 5 с периодом дискретизации 66,6 нс. Цифровой сигнал направлялся на ЭВМ типа IBM PC AT-286, где проводилась его предварительная обработка и регистрация.

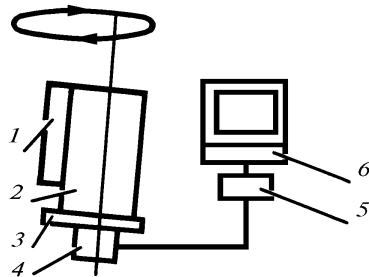


Рис. 1. Блок - схема корреляционного сканирующего лидара

Отраженный атмосферой сигнал записывался в памяти ЭВМ в виде трехмерного массива F_{hjk} , где h – номер высотного уровня, $h = 1 \dots 128$; j – номер канала, по которому проводится зондирование, $j = 1 \dots 3$; k – номер <выстрела> по данному направлению, $k = 1 \dots 1024$. Далее из этого массива формировались два одномерных временных массива $P_{h_1 j_1}(t)$ и $P_{h_2 j_1}(t)$, где h_1 и h_2 – фиксированные высотные уровни, j_1 – фиксированный номер канала, текущее время $t = k/f$, где f – частота посылок импульсов по данному направлению. Временные массивы подвергались низкочастотной фильтрации при помощи цифрового фильтра Баттерворта шестого порядка [4], после чего из сглаженных временных рядов удалялся тренд методом аппроксимации степенным полиномом четвертого порядка [5]. Затем находились Фурье-образы обработанных временных рядов:

$$F_1(\omega) = \sum_{k=1}^N P_{h_1 j_1}(t) \exp(-2\pi i f t),$$

$$F_2(\omega) = \sum_{k=1}^N P_{h_2 j_1}(t) \exp(-2\pi i f t),$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, i – мнимая единица, $N = 1024$. После этого производилось комплексное перемножение найденных Фурье-образов:

$$F_{12}(\omega) = F_1(\omega) F_2^*(\omega).$$

Звездочка в индексе указывает на комплексное сопряжение. Находя обратное преобразование комплексного произведения, получаем взаимно-корреляционную функцию $R_{h_1 h_2}(\tau)$:

$$R_{h_1 h_2}(\tau) = \sum_{k=1}^N F_{12}(\omega) \exp(-2\pi i f t),$$

где τ – временной сдвиг. Величина временного сдвига использовалась непосредственно для определения вертикальной компоненты скорости воздушных потоков на высотах от h_1 до h_2 .

Погрешность получаемых значений скорости движения определяется, в основном, методическими и аппаратными ошибками. Так как в основе методики измерения вертикальной компоненты лежат алгоритмы для определения горизонтальной компоненты скорости ветра, то к анализу погрешностей измерений вполне применим подход, предложенный в [2]. Анализ ошибок показал, что интегральная погрешность единичного измерения не превышает 28–32%. Однако учитывая, что полученные значения вертикальной компоненты для повышения точности усреднялись по числу высотных уровней между h_1 и h_2 и по трем каналам, ошибка измерений не превышает 8%.

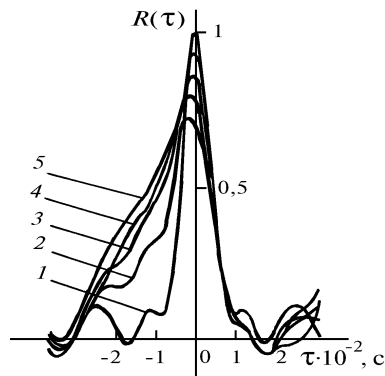


Рис. 2. Типичный вид функций автокорреляции (кривая 1) и взаимной корреляции между уровнями 300 и 320 (2); 300 и 340 (3); 300 и 360 (4); 300 и 380 м (5)

На рис. 2 представлены типичные корреляционные функции для различных уровней, полученные в июне 1988 г. на полигоне в г. Томске в условиях, когда горизонтальный ветер был менее 0,4 м/с.

Из рисунка видно, что по мере увеличения расстояния между коррелируемыми уровнями максимум корреляционной функции смещается пропорционально пространственному разному. Одновременно уменьшается значение корреляционной функции в максимуме, что свидетельствует об уменьшении статистической взаимосвязи динамических атмосферных процессов с ростом расстояния между уровнями. Однако значения корреляции даже при разном по высоте на 80 м остаются высокими (около 0,8). Данное обстоятельство указывает на слабую изменчивость аэрозольных структур при их переносе между уровнями съема информации, что позволяет для оценки скорости вертикальных движений V использовать условие <замороженности> [2]. При этом справедливо соотношение $V = \xi_0 / \tau_m$, где ξ_0 – расстояние между коррелируемыми уровнями трассы зондирования, τ_m – положение максимума функции взаимной корреляции.

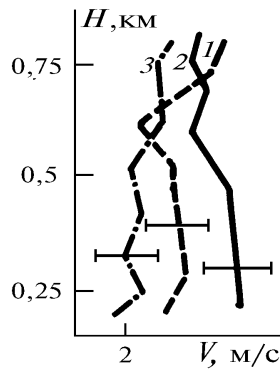


Рис. 3. Зависимость скорости вертикального движения аэрозоля V от высоты для дневных условий зондирования по трем трассам. Горизонтальные отрезки указывают на доверительный интервал для вероятности 0,95

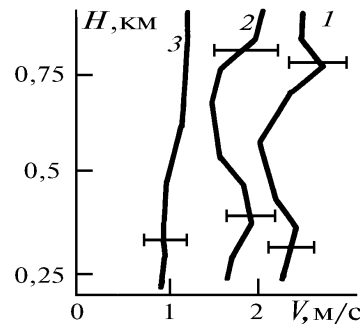


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для вечерних условий

На основе подобных корреляционных функций находились значения вертикальной составляющей скорости переноса аэрозоля. На рис. 3 и 4 показаны профили вертикальной компоненты скорости движения аэрозоля, полученные 12 июня 1988 г. в дневных и вечерних условиях соответственно в диапазоне высот 200 – 800 м. Из рисунков видно, что вертикальная скорость аэрозоля в данном высотном диапазоне остается почти постоянной, незначительно увеличиваясь с ростом высоты. При этом дневным условиям зондирования соответствует небольшое увеличение скоростей вертикальных перемещений аэрозоля, что связано с более сильным прогревом подстилающей поверхности для дневных условий зондирования и, следовательно, с увеличением интенсивности конвективных процессов в атмосфере.

Это обстоятельство подтверждается тем, что именно в это время на лидарном эхосигнале отчетливо наблюдались всплывающие термики. В вечернее время интенсивность флуктуаций лидарных сигналов, обусловленная термическими <пузырями> воздуха, существенно уменьшалась. Подобная ситуация представлена в [6], где описаны лидарные исследования атмосферы в условиях неупорядоченной конвекции.

В заключение отметим, что возможности зондирования вертикальной компоненты скорости вертикальных перемещений аэрозоля с помощью корреляционного лидара не исчерпываются описанным методом. Аналогичная информация может быть получена путем корреляционного анализа не временных, а пространственных реализаций лидарного сигнала. Получение и обработка таких данных будет являться целью дальнейших исследований.

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
2. Матвиенко Г. Г., Задде Г. О., Фердинандов Э. С. и др. Корреляционные методы лазерно-локационных измерений скорости ветра. Новосибирск: Наука, 1985. 223 с.
3. Коор F., Schwiesow R. L., Werner Ch. // J. Climate Appl. Meteor. 1984. V. 23. P. 148–154.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 463 с.
5. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
6. Балин Ю. С., Разенков И. А. // 10-й Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию. (Тез. докл.) Ч. 2. Томск, 1989. С. 44–47.

Институт оптики атмосферы
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию
15 ноября 1993 г.

A. I. Grishin, G. G. Matvienko. **Lidar Sounding of Vertical Motion of Aerosol in the Low Atmosphere.**

This paper discusses a version of correlation lidar measurements of vertical motion of aerosol using analysis of temporal correlations. Some results of the experimental studies are discussed in the paper.