

**КООРДИНАТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ
В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ****Введение**

Информация о величине турбулентного потока тепла $Q = c_p \rho \overline{w'T'}$, влаги $E = \rho \overline{q'w'}$ и импульса $\tau = \rho \overline{w'u'}$ количества движения в приземном слое атмосферы, где c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, ρ – плотность, T – температура, q – влажность воздуха, u и w вертикальная и горизонтальная составляющие скорости ветра V соответственно, а также данные о высоте h_i температурной инверсии на вершине конвективного пограничного слоя очень важны для разработки прогнозов термодинамических процессов в пограничном слое атмосферы [1].

Прогнозирование вертикальных движений необходимо для решения задач экологии в части разработки прогнозов процесса переноса вещества и расчетов конфигурации зоны загрязнения в местах расположения источников вредных выбросов. Информация о вертикальных движениях и, в частности информация о нисходящих потоках, также необходима для обеспечения безопасности воздушного движения в зоне взлетно-посадочной полосы аэропортов.

Для определения параметров турбулентного движения атмосферы наиболее распространенными являются контактные точечные методы, основанные на применении чашечных или пропеллерных анемометров и ультразвуковых датчиков скорости [2]. Такие датчики устанавливаются в некоторой точке пространства на высоте $h_m \cong (5 \div 10) m$.

Очевидно, что с помощью контактных методов невозможно получить информацию о текущих процессах энергообмена вдоль всей высоты h_n пограничного слоя атмосферы в реальном времени и, следовательно, применение только этих методов ограничивает достоверность прогнозирования термодинамических процессов в пограничном слое атмосферы.

Из известных бесконтактных дистанционных методов наиболее близким к решению рассматриваемой задачи является метод акустического зондирования [3]. Анализ сведений литературных источников [4 – 8] показывает, что все реально существующие системы акустического зондирования используют для измерения радиальной скорости движения воздушной массы доплеровский анализ частоты эхо-сигналов.

Из работ [9 – 15], посвященных анализу результатов акустического зондирования атмосферы в различных условиях, следует, что данному методу свойственен существенный недостаток, состоящий в том, что контроль соотношения сигнал/шум затруднен вследствие широкого динамического диапазона акустических помех, их явно выраженного нестационарного характера, а также вследствие существования отражений от местных объектов. Поэтому подход, основанный на доплеровском анализе сигналов в данном случае нельзя считать оптимальным, тем более в условиях аэропортов. Тем не менее, в отдельных случаях в относительно стационарных условиях измерение радиальной скорости методом акустического зондирования, основанное на доплеровском анализе эхо-сигналов, показывает удовлетворительное согласие с прямыми методами измерения скорости движения воздушных масс, которые осуществлялись с помощью контактных датчиков, установленных на метеорологических мачтах.

В работе [16] для измерения радиальной скорости движения воздушной массы предложено использовать корреляционный анализ последовательно получаемых реализаций эхо-сигналов (профилей) акустического зондирования. Такой подход по существу реализует

координатный метод определения скорости движения объектов локации, отнесенный в данном случае к пространственно-распределенным целям. Согласно этому подходу рассчитывается зависимость коэффициента корреляции $k_{rs} [U_{si}(h), U_{s(i+1)}(h)]$ между двумя смежными профилями эхо-сигналов $U_{si}(h)$ и $U_{s(i+1)}(h)$ как функция величины сдвига τ вдоль высоты h и определяется величина сдвига τ_m , при котором коэффициент корреляции принимает максимальное значение $k_{rs}(\tau_m) = k_{rs \max}$. Очевидно, что величина полученного сдвига τ_m пропорциональна $\tau_m = F(w)$ радиальной V_R составляющей полного вектора \vec{V} скорости (вертикальной при вертикальном зондировании w) движения воздушной массы.

Такой подход основан на предположении о том, что при периоде T_z повторения зондирующих импульсов порядка $T_z = [1, 3]c$ «мгновенная» структура турбулентности не успевает существенно измениться и перемещается в пространстве как одно целое в слое зондирования. В этом случае смежные профили $U_{si}(h)$, $U_{s(i+1)}(h)$ эхо-сигналов предположительно оказываются «похожими», т.е. коэффициент корреляции $k_{rs \max}$ отвечает условию: $k_{rs \max}(\tau) > 0,65$, при этом последующий из двух сравниваемых профилей $U_{s(i+1)}(h)$ смещен относительно начала предыдущего $U_{si}(h)$ на некоторый интервал времени Δt_w , величина которого определяется величиной средней за время T_z радиальной \bar{V}_R (вертикальной \bar{w}) составляющей скорости ветра. При этом составляющая помехи $U_N(h)$ в последовательно полученных профилях $U_{si}(h)$ эхо-сигналов, как следует из [12, 14], оказываются некоррелированными, т.е. $k_{rs \max}(\tau) \leq 0,65$ и, следовательно, такой подход позволяет повысить помехозащищенность метода измерения скорости.

Применение рассматриваемого метода оправдано при условии справедливости теоремы «замороженности» турбулентности атмосферы на рассматриваемых интервалах пространства и времени. Также следует иметь в виду, что воздушная масса перемещается как по вертикали $W \neq 0$, так и по горизонтали $V_g, U_g \neq 0$. Поэтому успех применения метода зависит также и от выполнения условия: время жизни турбулентного моля t_m , попавшего в «поле зрения» акустического локатора, не меньше периода повторения акустических зондирующих импульсов $t_m > T_z$.

Цель работы – анализ практических результатов применения метода [16] для измерения вертикальной составляющей скорости ветра с помощью систем акустического зондирования атмосферы в реальных условиях.

Методика и результаты экспериментальных наблюдений

Процедуру определения вертикальной составляющей скорости движения воздушной массы продемонстрируем путем анализа реальной выборки акустических эхо-сигналов, типичной для условий спонтанной термической конвекции контактного типа. Графическое представление выборки приведено на рис. 1.

Визуальный анализ записи показывает, что характерной особенностью ансамблей эхо-сигналов, представленных эхограммой, является присутствие спонтанно возникающих областей рассеяния акустических сигналов, которые, тем не менее, группируются в некоторую квазиорганизованную структуру, как это можно видеть на приведенном примере записи рис. 1 (спонтанные, вертикально организованные группы сигналов). При этом видно, что отдельные эхо-сигналы группируются в кластеры, при этом, как следует из [12, 14], соотношение сигнал/шум невелико, что не позволяет осуществить прямые (поимпульсные) измерения мощности эхо-сигналов. Однако визуальный анализ позволяет легко выделить области присутствия сигналов и определить геометрию их кластеров. Этот практический вывод является

основанием для применения корреляционного анализа ансамблей эхо-сигналов акустического зондирования.

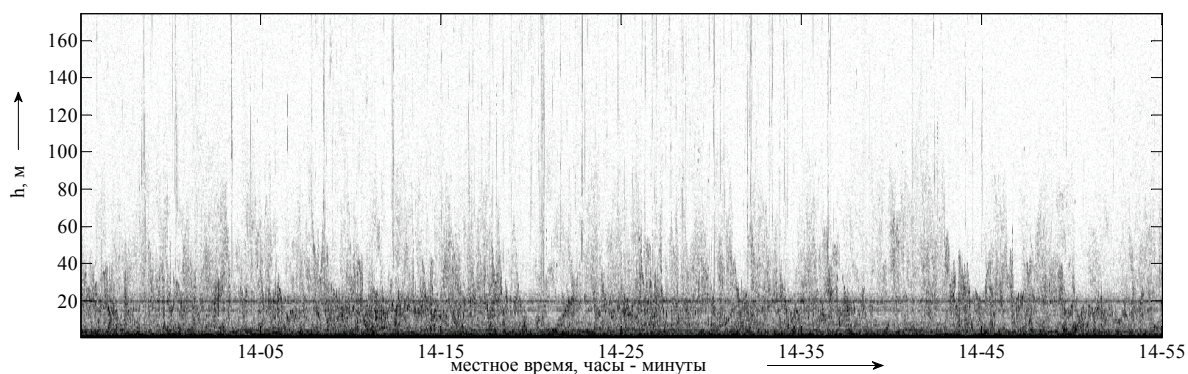


Рис. 1

Графические изображения сигналов не позволяют осуществить их количественный анализ. Поэтому в настоящей работе, как и в предыдущих [9 – 15], авторами анализируются цифровые аналоги эхограмм, которые представляют собой ансамбли реализаций эхо-сигналов, организованные в виде $(m \times n)$ матрицы S_a цифровых отсчетов эхо-сигналов $s_{i,j}$, где $i = 1 \dots m$, $j = 1 \dots n$, причем столбцы матрицы представляют собой вертикальные одиночные профили эхо-сигналов $s_j(i)$ и, следовательно, каждая строка $s_i(j)$ матрицы S_a представляет собой ряд дискретных отсчетов эхо-сигналов для данной высоты $h_i = \Delta h \cdot i$, где Δh – дискретный шаг высоты.

Согласно поставленной цели будем проверять возможность измерения вертикальной составляющей w воздушного потока методом измерения величины вертикального сдвига dh объекта зондирования, а именно – вертикального «столба» воздуха, ограниченного диаграммой направленности антенны акустического локатора, за время T_z периода повторения зондирующих импульсов, как это предложено в работе [16]. Для этого будем рассчитывать зависимости коэффициента корреляции k_{rj} между смежными, последовательно полученными реализациями эхо-сигналов $s_j(i)$, $s_j(i + \tau - 1)$ в интервале высот $H_m = [h_0, h_{\max}]$ как функции сдвига τ вдоль высоты h для каждого значения j из диапазона значений $j = [1, 2, \dots, n - 1]$:

$$k_{rj}(\tau) = \frac{1}{\tilde{\sigma}[s_j^\circ(i)] \tilde{\sigma}[s_{j+1}^\circ(i + \tau - 1)]} \cdot \left\{ \left(\frac{1}{m - \tau + 1} \right) \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ \tau=1}}^{m-\tau+1} [s_j^\circ(i) \cdot s_{j+1}^\circ(i + \tau - 1)] \right\}, \quad (1)$$

где $\tau = 1, 2, \dots, p$, p – максимальная величина сдвига, целое число; $p < m$; тогда абсолютная величина сдвига: $\Delta h = \tau dh$, знак $^\circ$ в выражении (1) означает процедуру центрирования. В результате расчетов получаем набор $(n - 1)$ корреляционных функций $k_{rj}(\tau)$.

Далее, для каждой из полученных зависимостей $k_{rj}(\tau)$ определяется величина τ_m , при которой выполняется условие: $k_{rj}(\tau) = k_{r \max}$. В результате получаем зависимости $\tau_m(j)$ и $k_{r \max}(j)$.

Из полученных значений выбираем только те, которые отвечают условию:

$$w(j) = \tau_m \cdot dh / T_z \text{ при } k_r \max \geq k_p \quad (2)$$

$$w(j) = 0 \text{ и } k_r = 0 \text{ при } k_r \max < k_p, \quad (3)$$

где $dh = c_s \frac{T_z}{2m}$, т. е. $w(j) = \tau_m(j) \cdot c_s / 2m$, $c_s = 20,06\sqrt{T_\theta}$, $T_\theta K$ – температура воздуха по шкале Кельвина, k_p – некоторое пороговое значение коэффициента корреляции. В данном исследовании примем $k_p = 0,65$. Таким образом, событие, состоящее в обнаружении вертикального перемещения части атмосферного воздуха, ограниченного диаграммой направленности акустического локатора, принимается с вероятностью $H_w = k_p$, а величина скорости смещения рассчитывается согласно выражению (2), при этом знак (направление) скорости перемещения определяется знаком коэффициента корреляции ($-k_p$ означает нисходящее движение). На рис.2 приведены графики зависимостей $w(j)$ и $k_r \max(j)$.

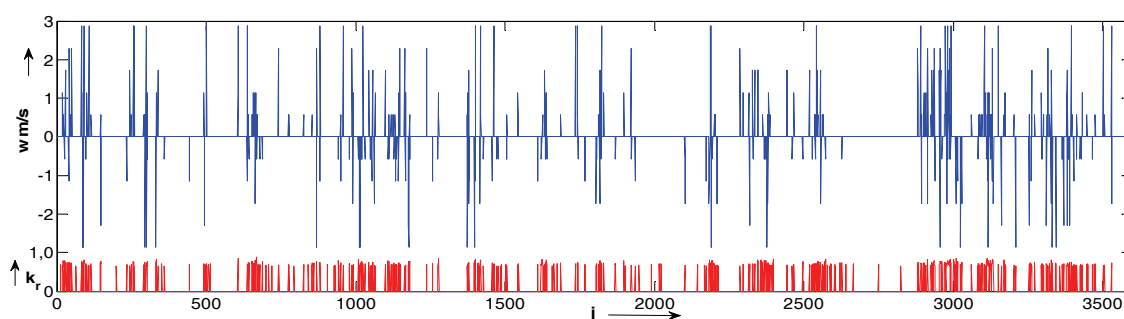


Рис. 2

Как следует из анализа данных, приведенных на рис. 2, основная особенность исследуемого процесса состоит в чередовании восходящего и нисходящего движения. На рис. 3 приведен фрагмент рис. 2 в увеличенном масштабе по горизонтали при котором это явление прослеживается максимально наглядно. Величина вертикальной скорости невелика и имеет значение $w \cong \pm(1 \div 2) \text{ м/с}$. Полученная зависимость вертикальной скорости может наблюдаться при слоисто-волновой внутренней структуре турбулентного моля.

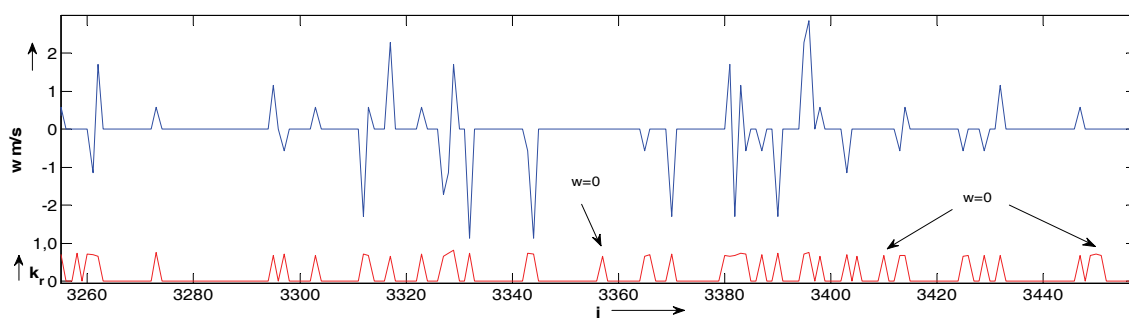


Рис. 3

В настоящем исследовании также обнаруживаются случаи, соответствующие условию: $w = 0$ при $k_r > 0,65$. Примеры таких случаев на рис. 3 обозначены стрелками. Эти данные показывают, что турбулентный моль обнаружен, но за время t_H наблюдения, равное периоду $t_H = T_z = 1 \text{ с}$ турбулентный моль перемещался только по горизонтали как единое целое, при этом его вертикальная структура практически не изменяется.

В остальных случаях, то есть при $k_r < 0,65$, имеет место неопределенность, так как эти случаи в данном исследовании исключены из рассмотрения. Однако это не означает, что в этих случаях отсутствует эхо-сигнал, эхограмма которого приведена на рис. 1. Для этих случаев необходимо определить величину q соотношение сигнал/шум [14] и при выполнении условия $q \geq 15dB$ можно применить доплеровский анализ частоты эхо-сигнала.

Выводы

Основным результатом исследования является обоснование возможности использовать координатный метод, предложенный в работе [16], для обнаружения и оценки величины скорости вертикальных перемещений воздушных масс в приземном слое атмосферы при хорошо прогретой подстилающей поверхности.

Полученные результаты показывают, что координатный метод в системах акустического зондирования позволяет измерять малые скорости вертикального перемещения воздушных масс $w < \pm(1 \div 2) м/с$, что важно для изучения процессов теплообмена между подстилающей поверхностью и атмосферой. Следует отметить, что измерение малых скоростей перемещения воздушных масс с помощью доплеровского анализа частоты эхо-сигналов в системах акустического зондирования является проблематичным.

Список литературы: 1. Монин, А. С., Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы / А. С. Монин, А. М. Обуков // Труды Геофиз. ин-та АН СССР. – 1954. – № 24 (151). – С. 163-187. 2. Тихомиров, А.А. Ультразвуковые анемометры для измерения пульсаций скорости воздушных потоков. Обзор // Оптика океана и атмосферы. -2010. – 23, №7. 3. Little, C.G. Acoustic Methods for the Remote Probing of the Lower Atmosphere // Proc. IEEE. – 1969. – 57. – P. 571-578. 4. Weill, A. Measuring heat flux and structure functions of temperature fluctuations with an acoustic Doppler sodar / Weill, A., Klapisz, C., Strauss, B., Baudin, F., Jaupart, C. Van Grundebееck, P. and Goutorbe, J. P. // J. Appl. Meteorol. – 1980. – №19. – С. 199-205. 5. Gaynor, J.E. Quantifying errors in sodar wind variance measurements // 6th Symposium on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans, Athens 26-29 May 1992, pp. 47-52. 6. Hayashi, M., G. Yokoyama and Y. Kobori Acoustic Doppler Measurements of Vertical Velocity in the Atmosphere // J. Met. Soc. Japan. – 1978. – Vol. 56. – p. 516-522. 7. Kaimal, J.C. and D.A. Haugen An Acoustic Doppler Sounder for Measuring Wind Profiles in the Lower Boundary Layer // J. Appl. Meteor., 1977. -Vol. 16. – p. 1298-1305. 8. Kalagiros, J. A., Helmis, C.G., Asimakopoulou, D. N. and Papageorgas, P. G. Estimation Of ABL Parameters Using The Vertical Velocity Measurements Of An Acoustic Sounder. Boundary-Layer Meteorology 91: 413–449, 1999. © 1999 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 9. Семенец, В.В. Акустическое зондирование атмосферы в проблеме изучения процессов теплообмена в зоне мегаполиса / В.В. Семенец, В.И. Леонидов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – 6/8(54). – С.54. 10. Леонидов, В.И. Формализация описания эхограмм акустического зондирования атмосферы в зоне мегаполиса / В.И. Леонидов, В.В. Семенец // Радиотехника. – 2010. – Вып.160. – С 177 -183. 11. Леонидов, В.И. Анализ квазипериодических амплитудно-временных структур эхо-сигналов акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов, В.В. Семенец // Радиотехника. – 2011. – Вып.167. – С. 27 -31. 12. Леонидов, В.И. Статистические характеристики эхо-сигналов акустического зондирования в зоне мегаполиса / В.И. Леонидов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №6/4, (60). – С.46-50. 13. Леонидов, В.И. Модельно-структурный анализ эхо-сигналов акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов // Радиотехника. – 2012. – Вып. 168. – С.47-54. 14. Леонидов, В.И. Задача обнаружения сигналов в системах акустического зондирования атмосферы / В.И. Леонидов, О.В. Зубков // Радиотехника. – 2014. – Вып. 178. – С.13-19. 15. Леонидов, В.И., Бобнев, Р.А. Вспомогательный канал акустического локатора для компенсации отражений от местных предметов. 5-й междунар. радиоэлектрон. форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – 2014. – Т.3. – С.172- 175. 16. Семенец, В.В., Сидоров, Г.И., Леонидов, В.И. Спосіб виміру вертикальної складової швидкості вітру за результатами акустичного зондування. Патент України (11) 73397 кл (19)(UA) (51) 7 G01S13/95 опубл. 15.07.2005. Бюл. №7.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 25.08.2016