

УДК 534.231; 534.87

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Рыжов Николай Александрович¹, кандидат физико-математических наук
e-mail: rynica@gmail.com

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Приведены результаты анализа распределения ширины спектра отраженного турбулентного сигнала, как характеристики внутренней структуры турбулентности. Исследование динамических процессов в атмосферной турбулентности основано на дистанционных экспериментах, проведенных методом акустического зондирования. Показано, что внутренняя пространственная структура турбулентного движения может влиять на взаимодействие турбулентной среды с окружающим и являться фактором, связанным с безопасностью транспорта.

Ключевые слова: акустическое зондирование, атмосферная турбулентность, внутренняя структура турбулентности.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF TURBULENCE INNER STRUCTURE FEATURES IN ATMOSPHERE BOUNDARY LAYER

Ryzhov Nickolay Aleksandrovich¹, Candidate of Physics and Mathematics Sciences
e-mail: rynica@gmail.com

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Analysis of scattered turbulent signal's spectrum width distribution as a characteristic of the internal structure of turbulence. The study of dynamic processes in atmospheric turbulence is based on remote experiments using the acoustic sounding. It is shown that the internal spatial structure of turbulent motion can influence the interaction of the turbulent medium with the environment and be a factor influencing transport safety.

Keywords: acoustic sounding, atmospheric turbulence, internal structure of turbulence.

При рассмотрении течения воздуха и жидкости, и их динамики, существенным местом является анализ турбулентных процессов. Полной теории турбулентности в настоящий момент не сформировано, но существуют отдельные модели, в предположении стационарности и эргодичности процесса [1 – 3]. К общепризнанным моделям относится, предложенная А.Н. Колмогоровым и основанная на соображениях энергетического перетока. В рамках колмогоровской модели турбулентные движения среды зарождаются как крупномасштабное движение на внешнем масштабе турбулентности L , который обычно полагается характерным пространственным размером рассматриваемой задачи, с

последующим перетоком энергии турбулентного движения среды по пространственным масштабам от больших к меньшим. В процессе такого перетока процесс предполагается однородным и изотропным и не имеет выделенных пространственного или временного масштабов [1]. Единственным параметром в модели, характеризующим турбулентность при этом является величина перетока энергии по пространственным масштабам (ε), и одинаково затрагивающая все пространственные масштабы от внешнего масштаба L до внутреннего l_0 , на котором осуществляется диссипация энергии. Для развитой колмогоровской турбулентности [2 – 3] в инерционном интервале масштабов ($l_0 < l < L$):

$$\varepsilon \sim \frac{V_\lambda}{\lambda}, \quad V_\lambda \sim (\varepsilon \lambda)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

где V_λ – характерная скорость, соответствующая пространственному масштабу λ .

Внутренний масштаб турбулентности $l_0 \sim (\nu/\varepsilon)^{1/4}$ определяется вязкостью среды (ν), и для земной атмосферы составляет около 1 мм. Строгого определения внешнего масштаба L нет, и обычно в таком качестве рассматривается характерный масштаб задачи. Между тем в средах, где наблюдается высокий уровень турбулентности (в частности в приземном слое атмосферы), встает вопрос о внешнем размере развитой турбулентности, так же как и о временной эволюции турбулентных неоднородностей, особенно крупномасштабных автономных вихрей, которые регулярно наблюдаются в атмосфере.

Сказанное выше справедливо не только для атмосферы, но и для всех сред, где возможно турбулентное движение, в частности для жидких сред. Наличие же в движущейся среде крупномасштабных вихрей и их динамика очевидно оказывает влияние на безопасность транспортных средств, при этом наличие таких вихрей также связано с внутренней структурой турбулентного движения.

Исследование внутренней структуры развитой атмосферной турбулентности в настоящей работе проведено на базе экспериментов по дистанционному зондированию приземного слоя атмосферы акустическим локатором (сонаром) [4, 5]. При использовании данного дистанционного метода можно считать, что рассеяние происходит на неоднородностях скорости потока среды (турбулентных вихрях). Для случая наклонного рассеяния плоской акустической волны на неоднородности скорости, рассеяние определяется условием брегговского синхронизма для доплеровской частоты:

$$2\pi F_D = (\vec{k}_r - \vec{k}_i) \vec{V}; \quad F_D = -V_\alpha \cdot \frac{F_0}{c_a} (1 - \cos(\alpha)), \quad (2)$$

где F_0 – частота излучаемого сигнала;

F_D – доплеровский сдвиг частоты рассеянного сигнала;

\vec{k}_r, \vec{k}_i – волновые векторы падающей и рассеянной акустических волн;

V_α – скорость среды в направлении на приемник;

c_a – скорость звука.

Поскольку доплеровское смещение частоты соответствует мгновенной скорости неоднородностей, имеющих масштаб длины зондирующего импульса, то мы измеряем при этом скорость турбулентных вихрей заданного масштаба.

В проведенных экспериментах [6] вместо традиционного подхода, при котором нет возможности исследовать внутреннюю структуру турбулентности при фиксированной частоте излучателя, применялась бистатическая схема с разнесенными излучателем и приемником с узкими лучами (рис. 1). При такой схеме пространственное разрешение определяется размером области пересечения лучей, а разрешение по частоте – длительностью зондирующего импульса ($\Delta f \sim 1/\tau$). Таким образом, в таком эксперименте

можно осуществлять дистанционные исследования турбулентности, получая спектральную информацию в месте расположения «датчика», которым является область пересечения лучей антенн (в эксперименте такой размер составлял около 50 м). При этом внутренняя структура движения в области рассеяния будет проявляться в виде изменения спектра рассеянного сигнала, так если величина доплеровского сдвига частоты говорит о мгновенной величине ветрового сноса, то уширение спектра (дисперсия доплеровской частоты) характеризует динамику внутренних движений.

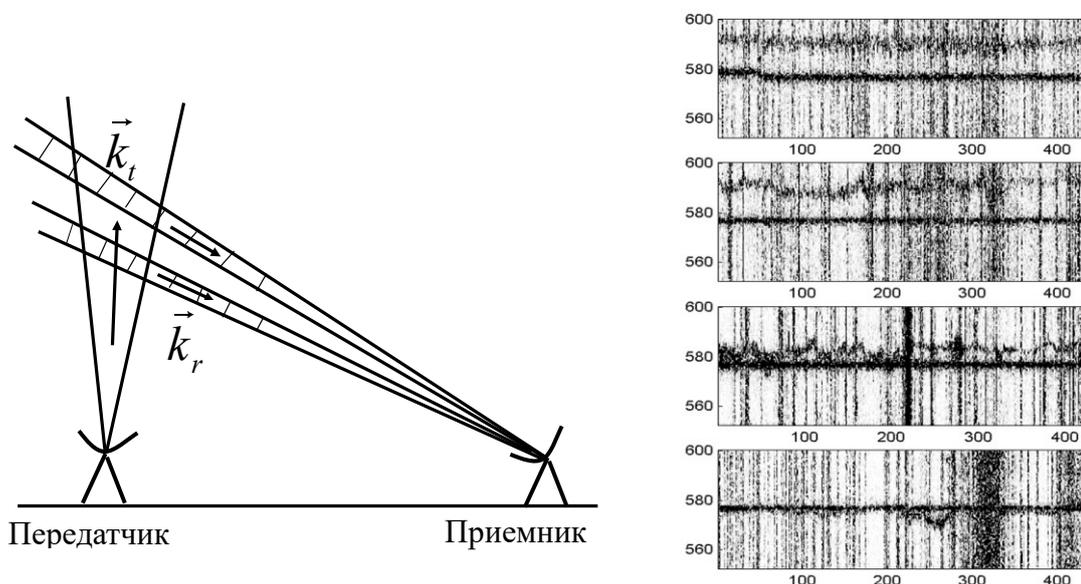


Рисунок 1 – Схема содара и характерные виды динамических спектров

Рассеяние происходит на ветровых неоднородностях, расположенных внутри области локации, имеющих размеры, соответствующие условию брэгговского синхронизма (длина волны соответствует размеру неоднородности), а сдвиг частоты рассеянного сигнала связан с величиной неоднородности скорости доплеровским условием (2).

Полученные сигналы непрерывной записи подвергались Фурье-преобразованию: для каждого отдельного акустического импульса получался отдельный спектр с разрешением 0,5 Гц (длительность импульса составляла 2 с). Характерные динамические спектры для различных сеансов приведены на (рис. 1. справа).

Как уже говорилось, величина среднего доплеровского смещения частоты определяется проекцией мгновенной скорости ветра на направление луча приемной антенны. Характерные значения данной величины составляли от 0 до 14 м/с (по модулю). Для приведенных на рис. 1 записей эта величина составляет от -3 м/с до 6,7 м/с. Длительность зондирующего составляла 2 с, что соответствует пространственной протяженности ~ 680 м, что заметно больше размера области рассеяния, таким образом длительность полезного сигнала определяется длительностью зондирующего импульса. Период повторения составлял 8 с, следовательно, каждый импульс можно считать статистически независимым.

Спектр отдельного импульса имеет вид, представленный на рис. 2 (слева). Видно, что внутренняя структура рассеянного сигнала имеет изрезанный вид, то есть в спектре отчетливо присутствуют 2 различных сигнала отраженных от неоднородностей с разными скоростями. (При этом корреляция между спектрами соседних импульсов составляет в среднем 0.85, то есть данный вид спектра не является случайным). На приведенном спектре видно, что средняя скорость в области рассеяния составляла 2,36 м/с. Обычно предполагается, что в потоке все турбулентные неоднородности перемещаются с общей

скоростью, независимо от масштабов (гипотеза "вмороженности" Тейлора). При таком предположении, в отсутствии внутренних относительных движений, в спектре рассеянного сигнала будет наблюдаться уширенная квазимонохроматическая линия, для которой уширение будет определяться только геометрическими размерами. Поскольку в геометрии эксперимента уширение линии, вызванное геометрическими факторами составляет не более чем $\delta f = 0.1 \cdot (f - f_0)$, то для максимального наблюдавшегося сдвига частоты $F_D = (f - f_0) = 30 \text{ Гц}$ оно не может превышать 3 Гц . Между тем, в эксперименте наблюдалось уширение спектра сигнала до $8 - 10 \text{ Гц}$, что соответствует разбросу скоростей $\sim 5 \text{ м/с}$.

Дальнейшее рассмотрение основано на анализе дневного сеанса длительностью 1 час (10 июля, 13:15 – 14:15). В данном сеансе средняя доплеровская частота составляет 6.24 Гц , а среднее уширение частоты – 2.27 Гц . Поскольку как обсуждалось выше геометрические факторы приводят к уширению спектра порядка $0.1 \cdot F_D$ (в данном случае $\sim 0,6 \text{ Гц}$), то объяснить такое уширение спектра можно только разбросом скоростей неоднородностей в области рассеяния [5, 7].

Для анализа данных фактов предполагаем модель турбулентности как набора неоднородностей разных масштабов, двигающихся независимо друг от друга. При этом наблюдаемый рассеянный акустический сигнал является результатом рассеяния на совокупности ветровых неоднородностей с конкретным масштабом, равным длине акустической волны. При таком рассмотрении мы, фактически, говорим, что интенсивность рассеянного сигнала соответствует количеству рассеивающих неоднородностей в области рассеяния.

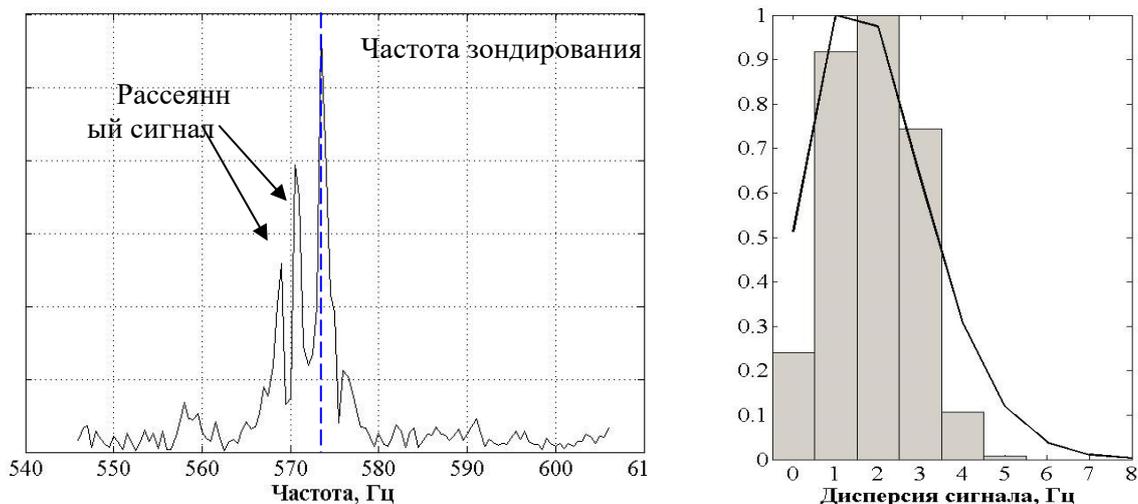


Рисунок 2 – Энергетический импульс отдельного импульса (слева) и распределение ширины спектра рассеянного сигнала (справа)

Для стационарного случайного процесса, которым является вмороженная турбулентность, в таком случае можно говорить о среднем числе неоднородностей в реализации (или случайных импульсов рассеяния). Если число случайных импульсов (неоднородностей скорости в исследуемом объеме) достаточно велико, то усредненная по ансамблю функция распределения будет близка к нормальной. В ином случае (если число импульсов в реализации невелико), то функция распределения по числу неоднородностей будет иметь другой характер. Если ввести понятие «плотность неоднородностей в области рассеяния», определив его как отношение числа неоднородностей данного масштаба к

объему рассеяния ($\rho \sim N_{irr}/l_{sc}^3$, где l_{sc} – размер области рассеяния), то отличие функции распределения по числу неоднородностей от нормальной приведет к тому, что определяемое по этому распределению число неоднородностей будет отличаться от l_{sc}^3/λ^3 (отношения объема рассеяния к объему одной неоднородности, размер которой определяется длиной волны λ). Указанные величины можно рассматривать как характеристики атмосферной турбулентности.

Разброс скоростей неоднородностей внутри области рассеяния определяется дисперсией доплеровской частоты $\sigma^2 = \langle (\Delta F_D)^2 \rangle$. Гистограмма распределения дисперсии (точнее среднеквадратичного отклонения), непосредственно связанной с шириной спектра рассеянного сигнала приведена на рис.2 справа (гистограмма нормирована на 1). Распределение σ существенно отличается от нормального закона и достаточно хорошо (с вероятностью 98%) аппроксимируется распределением Пуассона. Сплошной кривой на том же рисунке приведено распределение Пуассона ($P = \frac{\alpha^\sigma e^{-\alpha}}{\sigma!}$) с параметром $\alpha = 2.0$.

Полученный результат говорит о том, что в объеме рассеяния наблюдалось рассеяние на неоднородностях, имеющих четко выраженные различные скорости (см. характер спектра на рис. 2), и число этих скоростей малое. Это дает основание утверждать, что в приземной турбулентности наблюдаются «кластеры» размерами ~ 20 метров.

Обнаружение указанных «кластеров» может свидетельствовать об одном из двух вариантов:

- либо внутри объема рассеяния имеется разделение нескольких различно движущихся слоев, когда каждый из этих слоев движется отдельно от другого, и неоднородности, на которых происходит рассеяние движутся в рамках этих отдельных слоев;

- либо же мелкомасштабные вихри, на которых происходит рассеивание сигнала совершают совместное движение в рамках крупномасштабного вихря.

В первом случае, данный эксперимент позволяет говорить о непосредственном детектировании внешнего масштаба турбулентности.

Список литературы:

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. – Москва: Наука, 1967. – 548 с.
2. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория. – Москва: Физматгиз, 1963. – 680 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – Москва: Наука, 1988. – 736 с.
4. Обухов А.М. О рассеянии звука в турбулентном потоке // ДАН СССР. – 1941. – Т. 30. – С. 611.
5. Рапопорт В.О. и др. Исследования ветровых характеристик на высотах 200-800 м с помощью дециметрового содара // Известия вузов. Радиофизика. – 1998. – Т. 41. – № 7. – С.841-848.
6. Рапопорт В.О. и др. Исследование ветровых характеристик атмосферной турбулентности с помощью многолучевого содара // Изв. вузов. Радиофизика. – 2003. – Т. 46. – №. 3. – С. 192-200.
7. Бэтчелор Дж. К. Теория однородной турбулентности, пер. с англ. – Москва. 1955. – 200 с.

