

Г.Я. Патрушев, А.П. Ростов, О.А. Рубцова

АНИЗОТРОПИЯ ФЛУКТУАЦИЙ АМПЛИТУДЫ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Исследовалась временная структура флуктуаций амплитуды звуковых волн, распространяющихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль средней скорости ветра и перпендикулярно к ней. Проведенные измерения показали существенную зависимость временных характеристик флуктуаций амплитуды от взаимной ориентации трассы и направления вектора скорости ветра.

Флуктуации амплитуды звуковой волны, распространяющейся в приземном слое турбулентной атмосферы в условиях отражения от земной поверхности, исследовались в теоретических [1–3] и экспериментальных [4–6] работах. При этом в теории не учитывались особенности распространения звука в случайно-неоднородной движущейся среде [7], а экспериментальные исследования проводились, как правило, при одной неизменной ориентации трассы распространения и вектора скорости ветра. В проведенном эксперименте мы развили и уточнили исследования, описанные в [8].

Отличие представленных в статье результатов от опубликованных в работе [8] заключается в следующем. Использовалась более точная аппаратура. В эксперименте, описанном в [8], применялись разные типы микрофонов и громкоговорителей на разных направлениях. Там также использовалось аппаратно-аналоговое детектирование сигналов с их последующим сглаживанием аналоговыми фильтрами нижних частот 2-го порядка с дальнейшей дискретизацией с частотой 100 Гц. Это могло вносить дополнительную ошибку в оценку пространственной анизотропии распространения звуковых волн. В данной работе мы использовали совершенно одинаковые измерительные конденсаторные микрофоны и динамические громкоговорители. Для квантования сигналов применялись 2-канальный 12-разрядный скоростной аналого-цифровой преобразователь (время преобразования равнялось 3 мкс) и соответственно очень высокая частота дискретизации самих сигналов с микрофонов. Использовался также принципиально иной способ выделения амплитуды. Благодаря применению быстродействующего компьютера стало возможным использование программ, работающих в реальном времени и дающих более точные результаты. Это позволило достичь идентичности сквозных каналов трактов излучатель – микрофон – регистрация с точностью до 1% в рабочей полосе частот.

Иной, чем в работе [8], подход к обработке экспериментальных данных с использованием низкочастотной фильтрации и последующей децимации (без сглаживания), позволил точнее изучить низкочастотную часть спектра.

В настоящем эксперименте, в отличие от [8], было полное синхронное метеосопровождение.

Рассмотрены данные при различной температурно-ветровой стратификации, тогда как в [8] приводятся данные только при одной (неустойчивой) стратификации.

Проведенные нами синхронные измерения относительных флуктуаций амплитуды звуковой волны показали существенную анизотропность флуктуаций, зависящую, при прочих равных условиях, от величины средней скорости ветра. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Одновременно измерялись две квазисферические волны, направленные вдоль средней скорости ветра и перпендикулярно к ней. На расстоянии $L = 30$ м от излучающих рупоров находились приемные микрофоны. Излучатели и приемники располагались на высоте $h = 1,5$ м. В качестве излучателей использовались рупорные громкоговорители мощностью 50 Вт, а в качестве приемников – измерительные конденсаторные микрофоны MV201 фирмы RFT, снабженные противветровой защитой. Каждый микрофон имел предварительный усилитель переменного тока, расположенный в непосредственной близости. Ширина диаграммы направ-

ленности излучателей была близка к 60° , приемные микрофоны имели диаграмму направленности в форме кардиоиды. Сигналы с выходных усилителей микрофонов поступали на треть-октавные фильтры с центральной частотой 1,25 кГц. Выходные сигналы фильтров оцифровывались с помощью 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с частотой 160 кГц, и после амплитудного детектирования их значения заносились в память компьютера с частотой 100 Гц. Амплитудное детектирование было организовано программно по следующему алгоритму: 1600 цифровых значений кодов АЦП запоминались в буфере, затем они детектировались, и из полученного массива находилось максимальное значение, которое и регистрировалось как мгновенное значение амплитуды. Этот алгоритм был реализован на языке Ассемблер с использованием регистровой адресации, что обеспечило его работоспособность в реальном времени.

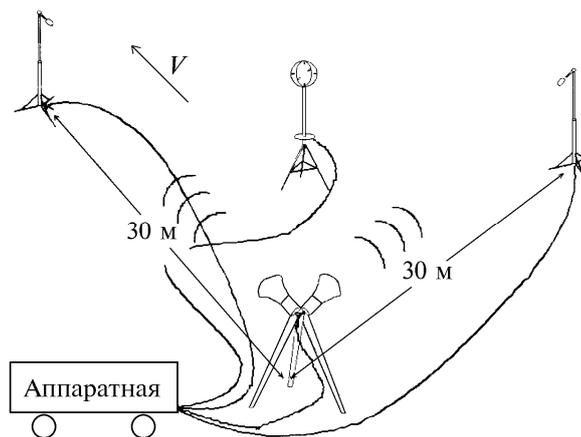


Рис. 1. Схема эксперимента

Мгновенные значения компонент скорости ветра и температуры измерялись с помощью трехкомпонентного ультразвукового анемометра-термометра [9], расположенного на высоте $h = 1,5$ м на биссектрисе угла, образованного микрофонами. Подстилающей поверхностью было ровное поле полеглового овса высотой 15–20 см. Частота излучаемой волны $f = 1,25$ кГц. Измерения проводились как при устойчивой, так и при неустойчивой стратификации атмосферы, длительность отдельной реализации равнялась 300 с. Диапазон изменения средней температуры во время измерений на высоте $h = 1,5$ м составил 1,5–6,8 °С, относительной влажности воздуха 99–75%, давления – 752–755 мм рт.ст.

Дальнейшая статистическая обработка полученных временных рядов мгновенных значений амплитуды включала в себя устранение грубых промахов с помощью неравенства Чебышева, низкочастотную фильтрацию с использованием фильтра Баттеруорта 6-го порядка [10] и согласованную с ней децимацию данных с индексом 8. Затем производилось удаление тренда, и после применения процедуры быстрого преобразования Фурье рассчитывались автоспектры. Эффект «просачивания» устранялся с помощью окна ГЭО [10] после расчета коэффициентов Фурье. Наряду с автоспектрами были также рассчитаны средние значения амплитуд, их дисперсии и автокорреляционные функции.

На рис. 2 приведены значения относительного среднеквадратического отклонения β флуктуаций амплитуды A

$$\beta^2 = \frac{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}{\langle A \rangle^2} = \frac{\langle A^2 \rangle}{\langle A \rangle^2} - 1$$

в зависимости от величины средней скорости ветра V для продольной и поперечной относительно ветра трасс. На рисунке нанесены также соответствующие им прямые, построенные как наилучшая линейная аппроксимация экспериментальных данных. Как показывают полученные данные, для поперечной трассы наблюдается более сильная зависимость флуктуаций амплитуды от значений ветра по сравнению с продольной.

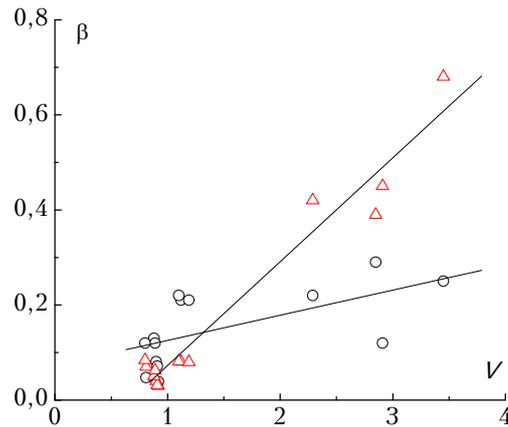


Рис. 2. Зависимость относительного среднеквадратического отклонения β от средней скорости ветра V для продольной (o) и поперечной (Δ) относительно ветра трасс

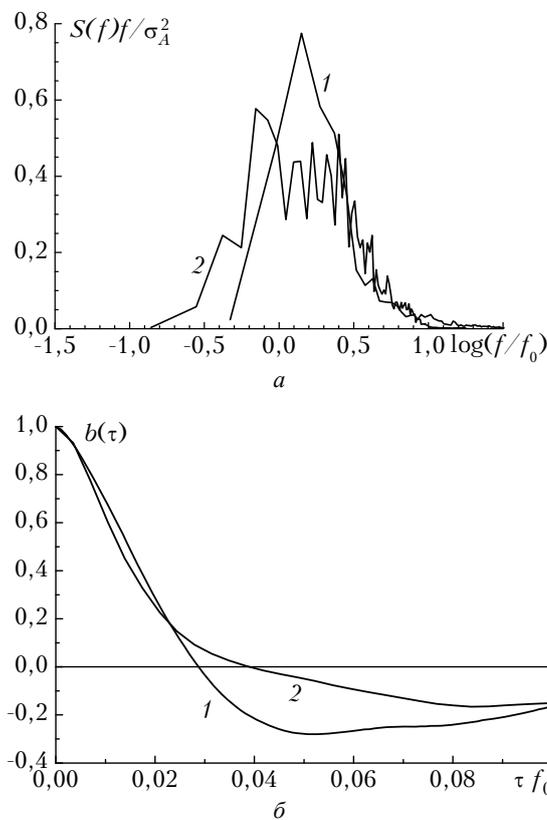


Рис. 3. Временные спектры (a) и автокорреляционные функции (б) флуктуаций амплитуды звуковой волны для продольной (1) и поперечной (2) трасс при устойчивой стратификации атмосферы ($\xi = +0,1$): 1 - $V_{\perp} = 0,008$ м/с; $\sigma_{\perp} = 0,3$ м/с, 2 - $V_{\perp} = 0,9$ м/с; $\sigma_{\perp} = 0,4$ м/с

На рис. 3, 4 приведены безразмерные временные спектры флуктуаций амплитуды для обеих трасс и соответствующие этим спектрам нормированные временные автокорреляционные функции, полученные при устойчивой (см. рис. 3) и неустойчивой (см. рис. 4) стратификациях атмосферы. Масштабом подобия, учитывающим вариации средней перпендикулярной трассе скорости ветра V_{\perp} и флуктуационной составляющей σ_{\perp} , является характерная частота $f_0 = [(V_{\perp}^2 + \sigma_{\perp}^2)/(\lambda L)]^{1/2}$ [10], где λ – длина волны излучения; L – длина трассы. Из приведенных данных видно, что временной спектр для перпендикулярной среднему ветру трассы претерпевает уширение в область низких частот по сравнению с временным спектром, полученным для трассы, направленной

ной вдоль средней скорости ветра, причем при неустойчивой стратификации уширение значительно заметнее и составляет приблизительно полпорядка по шкале относительных частот.

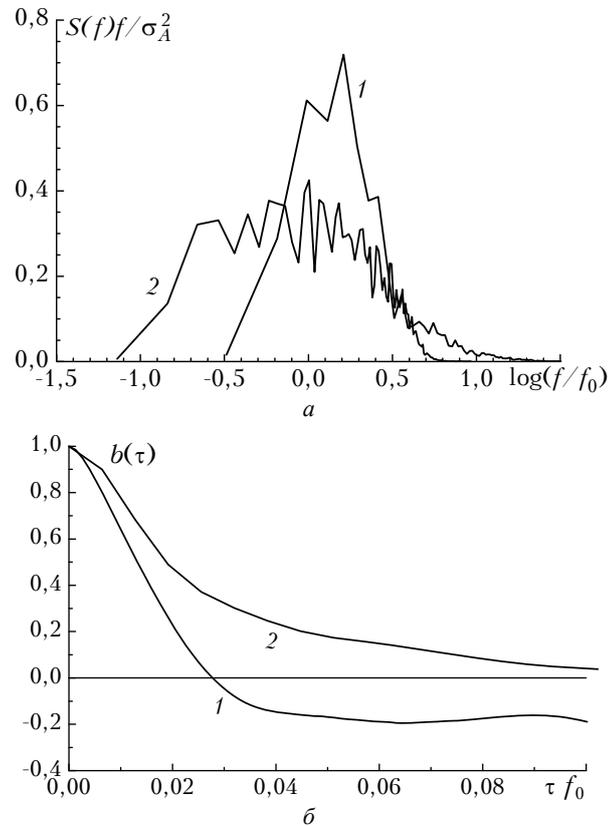


Рис. 4. Временные спектры (а) и автокорреляционные функции (б) флуктуаций амплитуды звуковой волны для продольной (1) и поперечной (2) трасс при неустойчивой стратификации атмосферы ($\xi = -0,9$):
 $1 - V_{\perp} = 0,06$ м/с; $\sigma_{\perp} = 0,27$ м/с, $2 - V_{\perp} = 1,2$ м/с; $\sigma_{\perp} = 0,32$ м/с

1. Daagle C. A. // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 68. N 1. P. 297–302.
2. Clufford S. F., Lataitis R. J. // J. Acoust. Soc. Am. 1983. V. 73. N 5. P. 1545–1550.
3. Hidaka T., Kageyama K., Masuda S. // J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 1985. V. 6. N 4. P. 247–256.
4. Parkin P. H., Scholes W. E. // J. Sound Vib. 1965. N 2. P. 353–374.
5. Daigle G. A., Piercy J. E., Embleton T. F. W. // J. Acoust. Soc. Am. 1978. V. 64. P. 622–630.
6. Бочкарев Н. Н., Красненко Н. П. // VIII Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере: Тезисы докл. Ч. II. Томск, 1986. С. 304–308.
7. Осташев В. Е. Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 208 с.
8. Патрушев Г. Я., Ростов А. П. // Акустический журнал. 1996. Т. 42. N 1. С. 88–90.
9. Патрушев Г. Я., Ростов А. П. // I Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Ч. 2. Томск, 1994. С. 152–153.
10. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
30 декабря 1996 г.

G. Ja. Patrushev, A. P. Rostov, O. A. Rubtsova. **Anisotropy of Amplitude Fluctuations of acoustic Wave Propagated through Ground Turbulent Atmosphere.**

Temporal behavior of amplitude fluctuation of an acoustic wave propagated in two mutually perpendicular directions: along the vector of the wind averaged velocity and perpendicularly to it. The measurements conducted have shown the temporal characteristics of the amplitude fluctuations to depend significantly on mutual orientation of the path and the direction of the vector of the wind velocity.