

УДК 551.596

## АНИЗОТРОПИЯ ВРЕМЕННЫХ СПЕКТРОВ ФЛУКТУАЦИЙ АМПЛИТУДЫ ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НАД ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

© 1996 г. **Г. Я. Патрушев**, А. П. Ростов

*Институт оптики атмосферы РАН, Сибирское отделение  
634055 Томск, пр. Академический, 1*

Поступила в редакцию 14.09.94 г.

Экспериментально исследуются временные спектры флуктуаций амплитуды звуковой волны в условиях, когда существенны флуктуации скорости ветра и отражения от земной поверхности. Установлена существенная зависимость спектра от взаимной ориентации трассы и направления вектора скорости ветра. За счет отражения от земли спектры становятся более низкочастотными по сравнению со случаем свободного распространения без отражения.

В приземном слое турбулентной атмосферы на флуктуации поля волны оказывает влияние отражение от земной поверхности и пространственное распределение таких метеоэлементов как температура и скорость ветра. В то же время временная структура флуктуаций поля звуковой волны исследовалась главным образом в условиях свободного распространения, когда отражением от земной поверхности и высотным распределением полей метеоэлементов можно пренебречь и учитывать только интенсивность турбулентности по трассе. Эксперименты проводились для случаев, когда вектор скорости ветра был близок к перпендикулярному относительно трассы распространения [1].

Нами экспериментально исследованы временные спектры флуктуаций амплитуды звуковой волны при произвольной взаимной ориентации трассы распространения и вектора средней скорости ветра в условиях, когда существенно отражение от земной поверхности.

Схема эксперимента приведена на рис. 1. Два излучателя И одновременно направляли горизонтально две квазисферические волны (частота  $f = 3.2$  кГц) вдоль средней  $v$  скорости ветра (волновой вектор  $k_{||}$ ) и перпендикулярно к ней (волновой вектор  $k_{\perp}$ ). На расстоянии  $L = 20$  м от излучающих рупоров И находились приемные микрофоны I - III. Ширина диаграммы направленности излучателей по уровню половинной мощности была примерно  $70^\circ$ ; приемные микрофоны имели более широкую диаграмму. Излучатели и приемники располагались на высоте  $h = 1.5$  м. Сигналы с выходных усилителей каждого микрофона поступали на амплитудный детектор, оцифровывались с частотой  $f_d = 150$  Гц и заносились в память компьютера. Измерения проводились синхронно на каждой из двух трасс: наветренной (I) и перпендикулярной к среднему ветру (II); подветренной (III) и трас-

се (II); наветренной (I) и подветренной (III). Продолжительность регистрации сигналов составляла 5 мин, было отобрано 14 сеансов измерений, при которых флуктуации скорости ветра были практически стационарными (не было больших изменений направления вектора средней скорости ветра). Мгновенные значения компонент скорости ветра (относительно трасс распространения) и температуры измерялись ультразвуковыми анемометрами-термометрами [2], расположенными по биссектрисам взаимноперпендикулярных трасс на высоте  $h = 1.5$  м. На рис. 1 они обозначены кружками. Третий анемометр-термометр располагался на высоте  $h = 10$  м и использовался для контроля температурно-ветровой стратификации приземного слоя. Практически одновременно с температурой и скоростью ветра определялись давление и влажность воздуха соответствующими датчиками, конструктивно совмещенными в одном приборе [2]. Расположение анемометров-термометров позволяло определять степень однородности метеорологических параметров атмосферы и определять структурные функции и характеристики компонент скорости ветра  $C_v^2$  по соответствующим трассам и температуры  $C_T^2$  [2]. Значение  $C_T^2$  синхронно контролировалось также по флуктуациям интенсивности оптической волны [3]. Структурная характеристика поля показателя преломления  $C_n^2$  звуковой волны рассчитывалась по формуле [4]:

$$C_n^2 = \frac{C_T^2}{T^2} + 7.33 \frac{C_v^2}{C^2},$$

где  $T$  – средняя температура,  $C$  – скорость звука в неподвижной атмосфере. В измерениях значение  $C_n^2$  изменялось в диапазоне  $(3.6 - 7.1) \times 10^{-6} \text{ м}^{-2/3}$ ,

причем основной вклад (до 90%) вносили флуктуации скорости ветра. Все измерения проведены при неустойчивой стратификации, причем градиенты скорости ветра на высоте не превышали величины  $\approx 0.3 \text{ сек}^{-1}$ , температуры  $- 0.13 \text{ град/м}$  и  $2.17 \text{ сек}^{-1}$  — для нижнего отраженного луча. Для реализованных условий в эксперименте на приемные микрофоны поступали один прямой и один отраженный лучи [5]. Отражающей поверхностью служило ровное скошенное и убранное овсяное поле, для которого значение параметра шероховатости  $z_0$  согласно [6] не превышает 1 - 2 см. Для излучения с длиной волны  $\lambda = 10.3 \text{ см}$  отражение от поверхности с такими неоднородностями можно считать приближенно зеркальным, с локальным коэффициентом отражения  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{\sin \Psi - z_1/z_2}{\sin \Psi + z_1/z_2},$$

где  $z_2/z_1$  — нормированный импеданс отражающей поверхности,  $\Psi$  — угол скольжения. В нашем случае его можно определить согласно [7] выражением:

$$\frac{z_2}{z_1} = R + iX; \quad R = 1 + 9.08 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0.75},$$

$$X = 11.9 \left(\frac{\sigma}{f}\right)^{0.73},$$

где  $\sigma$  — удельное сопротивление потоку,  $f$  — частота (Гц). Согласно имеющимся данным для условий эксперимента [8] величина  $\sigma$  находится в диапазоне  $\sigma = (200 - 300)$ , что дает значение модуля коэффициента отражения  $|\Gamma| = 0.5 - 0.6$  при угле скольжения  $\Psi = 9^\circ$ . Все измерения проведены в условиях слабых флуктуаций амплитуды, когда относительные среднеквадратические значения флуктуаций  $\beta^2 \leq 0.1$ , а значения обобщенного параметра  $\beta_0^2 = 1.21 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ , характеризующего турбулентные условия распространения, меньше 0.3 [1].

На рис. 2 приведены типичные безразмерные нормированные временные спектры для всех трех трасс  $W(f) = S(f)f/\sigma_A^2$ , где  $S(f)$  — истинный спектр,  $f$  — частота,  $\sigma_A^2$  — дисперсия флуктуаций амплитуды звука. По оси абсцисс отложен логарифм относительной частоты  $f/f_0$  ( $\log f/f_0$ ), где  $f_0 = [(v_\perp^2 + \sigma_\perp^2)/\lambda L]^{1/2}$ , где  $v_\perp$ ,  $\sigma_\perp$  — среднее и среднеквадратическое значение перпендикулярной к трассе распространения компоненты скорости ветра. Введение эффективной нормальной к лучу компоненты скорости  $v_s = (v_\perp^2 + \sigma_\perp^2)^{1/2}$  и пренебрежением продольной  $v_\parallel$  относительно трассы компоненты скорости понятно из следующих соображений. Рассмотрим для простоты пря-

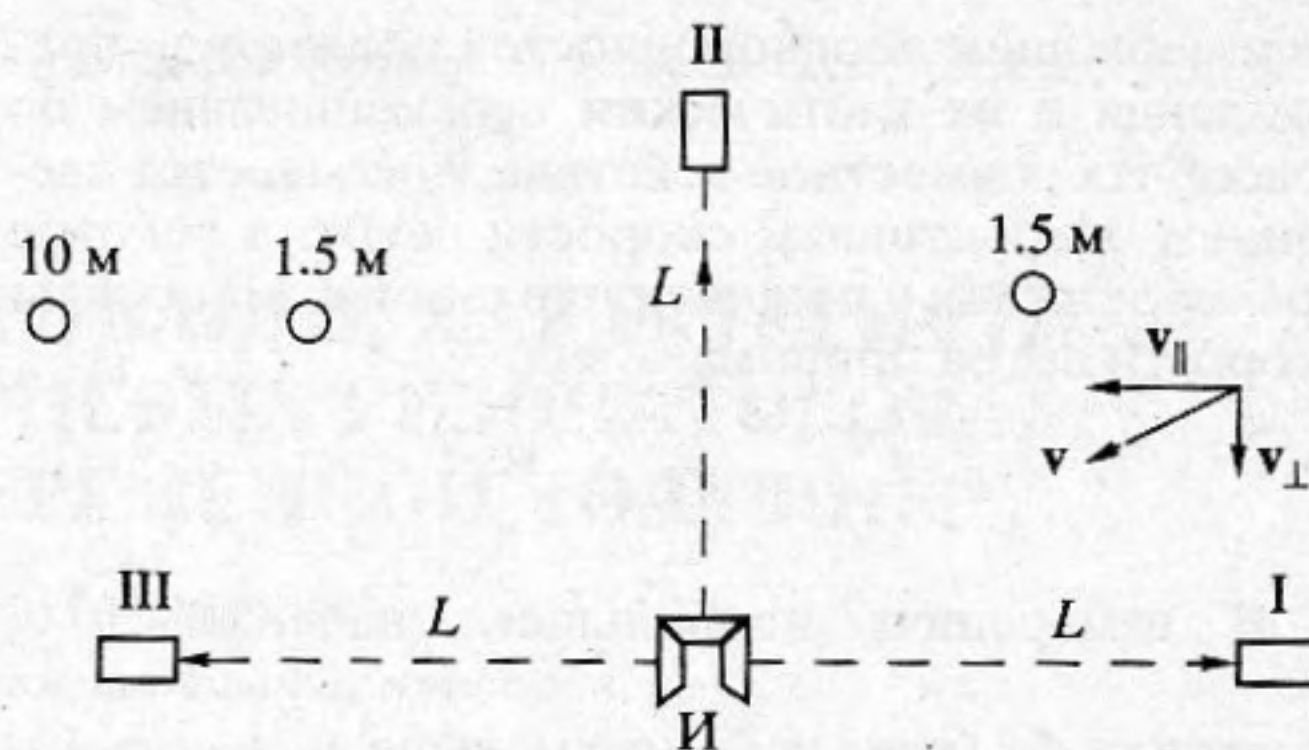


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

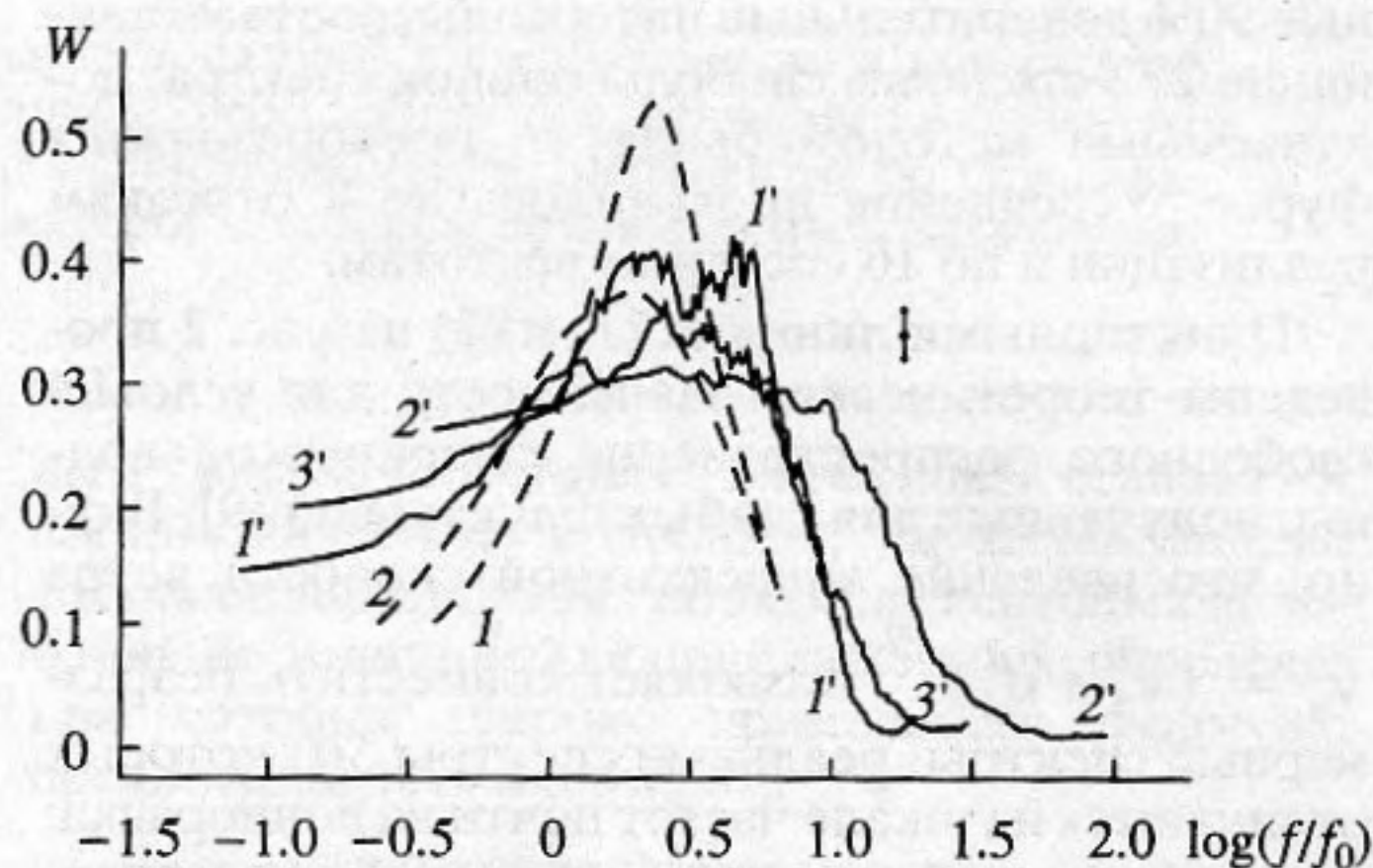


Рис. 2. Временные спектры  $W(f)$  флуктуаций амплитуды звуковой волны при поперечном I, I', продольном 2, 2' и под углом  $45^\circ$  (3') к трассе распространения ветра. 1, 2 — расчеты [9]  $\sigma_\perp = 0$  и  $v_\perp = 0$  соответственно; 1', 2', 3' — экспериментальные значения, 1' —  $\sigma_\perp = 0.64 \text{ м сек}^{-1}$ ;  $v_\perp = 3.5 \text{ м сек}^{-1}$ ; 3' —  $\sigma_\perp = 0.63 \text{ м сек}^{-1}$ ;  $v_\perp = 2.21 \text{ м/сек}$ ; 2' —  $\sigma_\perp = 0.67 \text{ м сек}^{-1}$ ,  $v_\perp = 0.47 \text{ м сек}^{-1}$ .

мой луч. Пусть  $v_\perp = 0$ . Тогда за время  $\tau$  происходит продольное перемещение неоднородностей на величину  $v_\parallel \tau$ , что приводит к смене неоднородностей поля показателя преломления  $n$  на концах трассы (у приемника и передатчика). Одновременно в середине трассы происходит взаимное хаотическое смещение неоднородностей в среднем на величину  $\sigma_\perp \tau$ . Если  $\sigma_\perp \tau = \sqrt{\lambda L}$  при условии  $v_\parallel \tau \ll L$ , что эквивалентно

$$\frac{v_\parallel}{\sigma_\perp} \ll \left(\frac{L}{\lambda}\right)^{1/2},$$

то флуктуации вызываются главным образом взаимным хаотическим перемешиванием оставшихся в объеме первого параболоида Френеля неоднородностей поля показателя преломления, а также появлением новых неоднородностей из соседнего (второго) параболоида Френеля. При наличии регулярной перпендикулярной к трассе  $v_\perp$  составляющей скорости ветра флуктуации вызываются совместным действием: регулярным

перемещением неоднородностей показателя преломления и их хаотическим перемешиванием по трассе. Их совместное действие учитывается введением эффективной скорости ветра, а условие пренебрежения влияния продольной компоненты скорости ветра принимает вид:

$$\frac{v_{\parallel}}{v_3} \ll (L/\lambda)^{1/2}.$$

В измерениях наибольшее значение  $v_{\parallel}/v_3$  равнялось 4.8 (кривая 3'), что меньше  $(\frac{L}{\lambda})^{1/2} = 14$ .

Вертикальными скобками указаны максимальные 90% доверительные интервалы, соответствующие 272 степеням свободы оценок спектра, получаемыми методом быстрого преобразования Фурье. Усреднение проводилось по 8 отрезкам реализации и по 16 соседним частотам.

Пунктирными линиями (1) и (2) на рис. 2 проведены теоретические зависимости для условий свободного распространения сферической волны, полученные для слабых флуктуаций [9]. Видно, что введение эффективной скорости ветра  $v_3 = (v_{\perp}^2 + \sigma_{\perp}^2)^{1/2}$  позволяет совместить безразмерные спектры, реальные спектры  $S(f)$  которых отличаются на шкале частот почти на полпорядка:  $v_3 = 3.55$  для зависимости (1') и  $v_3 = 0.8$  для зависимости (3'). При этом оказывается, что увеличение флуктуационной компоненты скорости ветра  $\sigma_{\perp}$  относительно средней ( $v_{\perp}$ ) приводит к относительному уменьшению максимума безразмерного спектра. При этом в обоих случаях величина максимумов оценок спектров заметно меньше теоретических. По-видимому, это связано с тем, что отраженная волна, будучи существенной по амплитуде, вносит заметный вклад в суммарное звуковое поле. Действительно, большую часть трассы прямая и отраженная волна проходят так, что расстояние между ними существенно меньше внешнего масштаба турбулентности для скорости ветра, что дает заметную корреляцию флуктуации поля прямой и отраженной волн. Поэтому временной спектр флуктуаций амплитуды не будет простой суммой соответствующих спектров прямой и отраженной волн. Отраженная волна в силу граничного условия для ветра  $|v|(z_0) = 0$  имеет более низкочастотный спектр, чем прямая, что приводит к низкочастотному уширению спек-

тра флуктуаций амплитуды принятого сигнала по сравнению со случаем свободного распространения. Однако высокочастотная часть спектра ( $f > f_0$ ) во всех случаях близка к степенной зависимости  $W(f) \sim (f/f_0)^{-5/3}$ , характерной для свободного распространения [1, 9].

Спектры для наветренного и подветренного (рис. 1) распространения практически совпадают (различие в пределах статистической погрешности измерений).

Авторы выражают признательность Н.Г. Абрамову за консультацию и помощь при анализе экспериментальных данных, Н.Н. Бочкареву за обсуждение затронутых вопросов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-05-16601).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
2. Патрушев Г.Я., Ростов А.П., Иванов А.П. Автоматизированный ультразвуковой анемометр-термометр для измерения турбулентных характеристик в приземном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 11 (в печати).
3. Исакова А.И., Монастырский Е.А., Патрушев Г.Я., Петров А.И., Печеркина Т.П., Ростов А.П., Теуцков В.Д. Автоматизированная система регистрации, отображения и обработки оптико-метеорологических измерений // Автометрия. 1987. № 4. С. 15 - 21.
4. Остаев В.Е. Распространение звука в движущихся средах. М.: Наука, 1992. 208 с.
5. Halberg B., Larsson C., Israelsson S. Numerical ray tracing in the atmospheric surface layer // J. Acoust. Soc. Amer. 1988. V. 83. № 6. P. 2059 - 2068.
6. Kondo J., Yamadzava H. Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface // Boundary-Layer Meteorology. 1986. V. 35. № 3. P. 331 - 348.
7. Delany M., Bazley E. Acoustical properties of fibrous absorbent materials // Appl. Acoust. 1970. V. 3. № 1. P. 105 - 116.
8. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П. Особенности приземного распространения звуковых волн. Томск, 1986. Деп. ВИНТИ № 501-886.
9. Монастырский Е.А., Патрушев Г.Я., Покасов В.В. Экспериментальное исследование влияния флуктуации ветра на временные характеристики световой волны // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31. № 1. С. 14 - 19.

## Anisotropy of the Temporal Amplitude Fluctuations of a Sound Wave Propagating over the Ground Surface in a Turbulent Atmosphere

G. Ya. Patrushev and A. P. Rostov

Time spectra of sound amplitude fluctuations are studied experimentally under conditions such that the fluctuations of wind speed and reflection from the ground surface play a significant role. A strong dependence of the spectra on the mutual orientation of the propagation track and the vector of wind speed is found. Because of the reflection from the ground, the spectra shift to lower frequencies, as compared to the case of free propagation without reflection.