

О ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В АТМОСФЕРЕ

Проведены экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик флуктуаций интенсивности световой волны на длинных приземных трассах. Показано, что полоса частот флуктуаций (ширина временного спектра) в области насыщенных мерцаний определяется эффективной скоростью ветра, а полоса частот значимой когерентности флуктуаций интенсивности в двух точках приема, расстояние между которыми превосходит меньший из масштабов корреляции флуктуаций интенсивности, определяется этим расстоянием, параметром β_0 , эффективной скоростью ветра и соответствует низкочастотному максимуму двухмасштабного временного спектра флуктуаций интенсивности, влияние флуктуаций скорости ветра в области насыщенных флуктуаций интенсивности в целом такое же, что и при слабых флуктуациях.

В последнее время опубликован ряд работ, в которых рассмотрена временная и пространственно-временная структура поля оптической волны в условиях флуктуаций скорости переноса турбулентных неоднородностей показателя преломления по трассе распространения [1–5]. Оказалось, что введение эффективной скорости переноса неоднородностей (ветра) позволяет единым образом описать временную и пространственно-временную структуру флуктуаций интенсивности при слабых флуктуациях, когда значение индекса мерцаний $\beta \leq 1$ [2, 3].

Пространственно-временная структура оптической волны при сильных флуктуациях интенсивности изучалась в работах [4, 5] в условиях, когда перпендикулярная к трассе распространения флуктуационная компонента скорости ветра σ_{\perp} много меньше регулярной v_{\perp} ($\sigma_{\perp}/v_{\perp} \ll 1$). На трассе $L = 1,75$ км и расстоянии между приемниками от 1 до 7 см обнаружено удовлетворительное совпадение рассчитанных и измеренных спектров когерентности флуктуаций интенсивности при значении параметра $7 \leq \beta_0^2 \leq 11$. В то же время на более длинной трассе $L = 13,5$ км, $68 \leq \beta_0^2 \leq 640$ и расстоянии между приемниками 3,5 см когерентность флуктуаций оказалась значительно большей, чем на трассе длиной 1,75 км. Причина такого поведения экспериментальных спектров когерентности неизвестна.

В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по временной и пространственно-временной структуре флуктуаций интенсивности при сильных и насыщенных флуктуациях. В отличие от работ [5], где значения σ_{\perp}/v_{\perp} не изменялись и принимались равными $\sim 0,17$, рассмотрим случаи как «слабых», так и «сильных» флуктуаций перпендикулярной к трассе распространения скорости ветра.

Измерения пространственно-временной структуры проводились по методике [3, 6] на трассах с отражением V -образного типа общей длиной 1,3 и 2,5 км. Средняя и флуктуационная компоненты скорости ветра, перпендикулярные к трассе, регистрировались акустическим анеруботермометром импульсного типа [7] синхронно с записью сигналов с фотоумножителей на магнитную ленту [6]. Анализ реализаций продолжительностью до 2-х мин проводился на ЭВМ по программе взаимного спектрального анализа стационарного случайного процесса, построенной на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье и по структуре, аналогичной [8]. В результате обработки получались сглаженные по отрезкам реализации и спектральным интервалам оценки спектра когерентности $\kappa_{1,2}(\omega)$ фазового спектра $\varphi_{1,2}(\omega)$:

$$\kappa_{1,2}(\omega) = |W_{1,2}(\omega)|^2 / W_1(\omega) W_2(\omega); \quad (1)$$

$$\varphi_{1,2}(\omega) = \arctg \frac{\text{Im } W_{1,2}(\omega)}{\text{Re } W_{1,2}(\omega)}, \quad (2)$$

где $W_{1,2}(\omega)$ — оценка взаимного спектра на круговой частоте ω ; $W_1(\omega)$, $W_2(\omega)$ — автоспектральные плотности (автоспектры) в пространственно разнесенных точках 1 и 2 в картинной плоскости на расстоянии ρ .

Значение параметра $\beta_0^2 = 1,21 C_n^2 \kappa^7 / 6 L^{11/6}$ (где C_n^2 — структурная характеристика показателя преломления, $\kappa = 2\pi/\lambda = 10^7 \text{ м}^{-1}$ — волновое число) определялось по синхронным измерениям флуктуаций интенсивности на вспомогательной трассе длиной $L_1 = 200$ м [6].

На рис. 1 сравниваются временные спектры и спектры когерентности интенсивности плоской волны при одинаковых условиях распространения излучения и различных отношениях флуктуационной и средней составляющих скорости ветра. По оси абсцисс отложен логарифм круговой частоты $\omega = 2\pi f$, нормированной на эффективную скорость ветра $v_3 = (v_{\perp}^2 + \sigma_{\perp}^2)^{1/2}$; по оси ординат слева — величина квадрата спектра когерентности, справа — безразмерный спектр $u = f\omega(f) / \sigma_I^2$. Кривые 1 и 2 — временные спектры; кривые 3–6 — спектры когерентности флуктуаций интенсивности. Зависимости 1, 3, 4, обозначенные крестиками, соответствуют экспериментальной реализации при $\beta_0 = 11,6$; $\beta_I \approx 1,16$; $v_{\perp} \approx 1,7$ м/с, $\sigma_{\perp} \approx 0,7$ м/с, $\sigma_{\perp}/v_{\perp} \approx 0,4$. Зависимости 2, 5, 6 — $\beta_0 \approx 12,9$; $\beta_I \approx 1,13$; $v_{\perp} \approx 0,1$ м/с, $\sigma_{\perp} \approx 0,70$ м/с, $\sigma_{\perp}/v_{\perp} \approx 7$. Кривые 3 и 5 — разнос точек наблюдения ρ 14 мм, 4 и 6 — 21 мм. Вертикальными отрезками нанесены 90%-ные доверительные интервалы [10]. Как видно из рисунка, полоса частот флуктуаций интенсивности световой волны в области насыщенных флуктуаций однозначно определяется эффективной скоростью ветра. Форма временных спектров практически одна и та же при существенно различных отношениях σ_{\perp}/v_{\perp} (0,42 и 7,0). Если в области слабых и промежуточных флуктуаций вид спектра определяется значением σ_{\perp}/v_{\perp} то в области насыщенных флуктуаций этой зависимости не обнаружено. Полоса частот когерентности сигналов в двух разнесенных точках приема определяется эффективной скоростью ветра и разномом между приемниками и соответствует положению низкочастотного максимума двухмасштабного временного спектра. В области высоких частот флуктуаций интенсивности когерентность равна нулю. Величина спектра когерентности в низкочастотной области зависит от значения σ_{\perp}/v_{\perp} . При увеличении флуктуаций скорости ветра когерентность уменьшается.

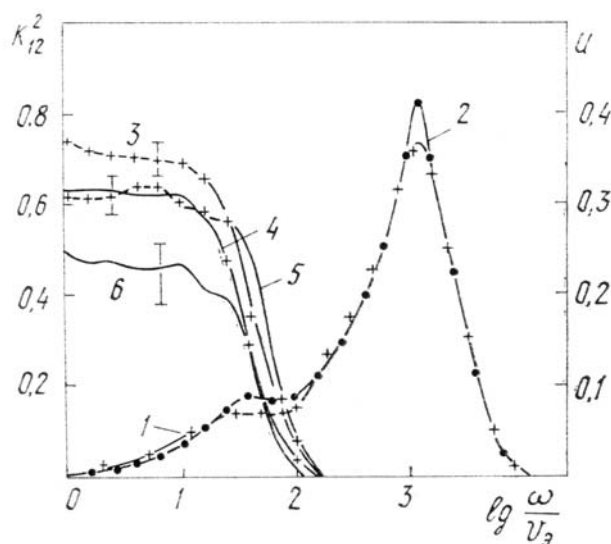


Рис. 1

Пространственная корреляция флуктуаций интенсивности в области насыщенных мерцаний характеризуется двумя масштабами [9]. Для приблизительной оценки верхней границы меньшего из них при $50 \leq \beta_0^2 \leq 70$ были проведены измерения усредняющего действия приемной апертуры. Ее диаметр изменяется от 0,1 до 4 мм. При наибольшей апертуре (4 мм) дисперсия флуктуаций светового потока составляет $\approx 0,6$ от дисперсии флуктуаций интенсивности, то есть оценки взаимных статистических характеристик при разноме между приемниками 14 и 21 мм проводятся на расстояниях, превосходящих меньший из масштабов пространственной корреляции флуктуаций интенсивности. Это объясняет нулевую когерентность сигналов в высокочастотной области и высокий уровень $\kappa_{1,2}(\omega)$ в области низкочастотного максимума полосы частот сигналов.

Фазовые спектры при $\sigma_{\perp} \gg v_{\perp}$ практически равны нулю. Оценки $\phi(\omega)$ при $\sigma_{\perp}/v_{\perp} < 1$ отличны от нуля. Общий наклон фазового спектра зависит от разнота точек наблюдения. Однозначный вывод о линейной или нелинейной зависимости $\phi(\omega)$ от частоты с учетом доверительных интервалов сделать нельзя.

Взаимные корреляционные функции $b_{12}(\tau)$ чувствительны к изменению значения отношения σ_{\perp}/v_{\perp} . При увеличении флуктуаций скорости ветра их максимум уменьшается, смещается в сторону меньших задержек. В предельном случае, когда $\sigma_{\perp} \gg v_{\perp}$, $b_{12}(\tau)$ становятся четными.

Рассмотрим спектры когерентности флуктуаций интенсивности плоской волны в области насыщенных мерцаний при флуктуирующем ветре (рис. 2). Как и на предыдущем рисунке, по оси абсцисс отложен логарифм круговой частоты, нормированной на эффективную скорость ветра, по оси ординат — квадрат спектра когерентности. Кривые 1 и 2 соответствуют экспериментальной реализации при $\beta_0 \approx 7$; $\beta_I \approx 1,27$; $v_{\perp} \approx 0,12$ м/с; $\sigma_{\perp} \approx 0,7$ м/с; $\sigma_{\perp}/v_{\perp} \approx 6$. Кривые 3 и 4 — $\beta_0 \approx 14$; $\beta_I \approx 1,16$;

$v_{\perp} \approx 0,2$ м/с; $\sigma_{\perp} \approx 0,7$ м/с; $\sigma_{\perp}/v_{\perp} \approx 3,3$. Зависимости 1 и 3 — разнос между приемниками равен 14 мм, 2 и 4 — 21 мм. Вертикальные отрезки — 90%-ные доверительные интервалы. Заштрихованная область соответствует данным работы [5]. Как видно из рисунка, полоса частот когерентности флуктуаций интенсивности световой волны в целом определяется расстоянием между приемниками и величиной эффективной скорости. Разброс значений спектра когерентности в области его уменьшения больше, чем при одинаковых условиях распространения (см. рис. 1). Этот разброс соответствует наблюдаемому сдвигу временных спектров флуктуаций интенсивности в сторону высоких частот при увеличении параметра β_0 . Полоса частот когерентности соответствует положению первого максимума энергетического спектра. Усиление флуктуаций интенсивности, в данном случае увеличение параметра β_0 , приводит к уменьшению когерентности в области низких частот. Причем для меньшего разноса точек наблюдения это падение больше по величине. Сравнение с результатами работы [5] показывает, что ширина полосы частот когерентности при близких значениях параметра β_0 примерно одинакова на различных трассах (2,5 и 13,5 км) и существенно разных величинах σ_{\perp}/v_{\perp} (эксперимент [5] проведен при направлении ветра, поперечном относительно оптической трассы). Высокая когерентность сигналов, зафиксированная в этой работе, по-видимому, объясняется тем, что флуктуационная составляющая много меньше средней поперечной скорости ветра. В эксперименте она не измерялась. Фазовые спектры в описываемых реализациях в отличие от [5], близки к нулю. Взаимные корреляционные функции $b_{12}(\tau)$ имеют слабо выраженный максимум, сдвинутый относительно нулевой временной задержки ($\sigma_{\perp}/v_{\perp} \approx 3,3$), или практически симметричны по отношению к оси ординат ($\sigma_{\perp}/v_{\perp} \approx 6$). Увеличение параметра β_0 приводит к уменьшению пространственной корреляции флуктуаций интенсивности $b_{1,2}(\rho)_{\tau=0}$.

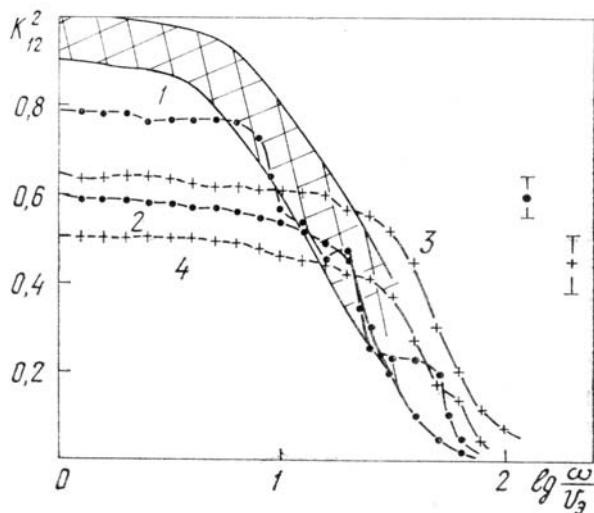


Рис. 2

Основные закономерности изменения пространственно-временных характеристик интенсивности квазисферической волны в области насыщенных мерцаний при флуктуирующем ветре в целом те же, что и для плоской волны.

Полученные результаты согласуются с известными зависимостями дисперсии флуктуаций интенсивности от параметра β_0 [9], пространственной корреляции флуктуаций, трансформации временных спектров при увеличении флуктуаций интенсивности [9].

Таким образом, в работе показано: 1) что временной спектр интенсивности в области сильных флуктуаций определяется эффективной скоростью ветра; 2) полоса частот значимой когерентности флуктуаций интенсивности в двух точках приема, расстояние между которыми превосходит меньший из масштабов корреляции флуктуаций интенсивности насыщенных мерцаний, определяется этим расстоянием, параметром β_0 , эффективной скоростью ветра и соответствует первому (низкочастотному) максимуму двухмасштабного временного спектра флуктуаций интенсивности; 3) влияние флуктуаций скорости ветра в области насыщенных флуктуаций интенсивности в целом такое же, как и при слабых флуктуациях интенсивности [2, 3].

1. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 1988. 271 с.

2. Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. Вып. 5. С. 1068—1075.

3. Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я. // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33. № 10. С. 2183—2185.

4. Безверхний В.А., Гурвич А.С., Покасов Вл.В. //Известия АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14. № 1. С. 102–105.
5. Безверхний В.А., Грачева М.Е., Гурвич А.С. и др. //Известия вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 2. С. 135–143.
6. Исакова А.И., Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я. и др. //Автометрия. 1987. № 4. С. 15–21.
7. Анисимов М.В., Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. № 4. С. 194–196.
8. Патрушев Г.Я., Печеркина Т.П. //Алгоритмы и программы. 1987. № 7. С. 20.
9. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 276 с.
10. Koopmans L. H. The spectral analysis of time series. N. Y., 1974. 386 p.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
31 января 1989 г.

E. A. Monastyrnyi, G. Ya. Patrushev. On the Spatial-temporal Structure of the Intensity Pulsations due to Atmospheric Turbulence.

The results of experimental studies of the spatial-temporal characteristics of the light wave intensity fluctuations are presented for the case of long propagation paths in the ground atmospheric layer. It is shown in the paper that the frequency bandwidth (temporal spectrum width) of the fluctuations in the region of saturated flickers is determined by the efficient value of the wind speed. The frequency band width of significant coherence of the intensity fluctuations recorded at two points spaced by a distance exceeding the least correlation scale of the fluctuations is determined by this distance, β_0 , as well as by the wind speed and corresponds to the low frequency maximum of the two scale temporal spectrum of the intensity fluctuations. The influence of the wind speed fluctuations in the region of saturated fluctuations is on the whole the same as in the case of weak fluctuations.