

УДК 538.56:519.25

**ВРЕМЕННЫЕ СПЕКТРЫ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ
НА ТРАССЕ С ОТРАЖЕНИЕМ***Е. А. Монастырский, Г. Я. Патрушев, А. И. Петров, В. В. Покасов*

Приводятся результаты синхронного измерения временных спектров флуктуаций интенсивности волновых пучков с различными дифракционными параметрами на прямой и локационной трассах с отражением от зеркального диска и трехгранного уголкового отражателя. Отличия особенно существенны для сферической волны, отраженной от плоского зеркала (за счет эффекта усиления флуктуаций), и узкого коллимированного пучка при отражении от уголка. Расширение спектров и уменьшение их максимумов в эксперименте по сравнению с расчетными данными при постоянном ветре объясняются величиной флуктуаций интенсивности и скорости ветрового переноса оптических неоднородностей.

Временные спектры флуктуаций интенсивности оптической волны представляют интерес для ряда задач оптической связи, локации, адаптивной оптики и дистанционного зондирования параметров атмосферы. В известных экспериментальных работах исследования проводились главным образом с квазиплоской и сферической волнами на прямых трассах [1,2]. Однако при отражении плоской, сферической волны и ограниченного пучка от большого зеркала имеют место вариации временного спектра [3]. Кроме того, большинство теоретических исследований выполнено в предположении, что флуктуации скорости ветра малы и не оказывают влияния на спектр, что, однако, справедливо лишь для трасс, которые ориентированы перпендикулярно к направлению ветрового переноса оптических неоднородностей. Отличия экспериментальных спектров флуктуаций интенсивности [4,2,5] и светового потока [5] от рассчитанных в приближении «замороженной турбулентности» объясняются флуктуациями скорости и направления ветра. Измерения не сопровождались одновременным определением флуктуационной компоненты скорости ветра.

В настоящей работе приводятся результаты синхронного измерения временных спектров флуктуаций интенсивности на прямой и локационной трассах с отражением от простейших искусственных объектов—зеркального диска и уголкового отражателя—и приводится сравнение с имеющимися результатами, полученными МПВ [1,3,6] и методом Гюйгенса—Кирхгофа [9]. Световой диаметр уголка—2,6 см, точность изготовления двухгранных уголков при вершине $\approx 1''$, угол между осью волны и нормалью к передней грани не превышал 10° . Экспериментальная установка, регистрирующая аппаратура, трассы и методика измерений описаны в работе [7]. Модифицированный анеморумбометр М-47 позволял оценивать как средний за время измерений поперечный трассе распространения излучения ветер v_{\perp} , так и его флуктуационную компоненту σ_{\perp} . Отношение σ_{\perp}/v_{\perp} изменялось в интервале $0,2 \div 0,5$. Временные спектры рассчитывались методом быстрого преобразования Фурье. Сглаживание периодограмм проводилось по отрезкам реализаций (3—4 с) и по соседним частотам так, что число степеней свободы одной реализации было не менее 10^3 , что

обеспечивало статистическую погрешность оценки примерно 1% при разрашающей способности по всему спектру около 2 Гц. Типичные спектры по реализациям длительностью до 4 минут изображены на рисунках. По оси абсцисс отложен логарифм безразмерной частоты $\Omega_0 = f/(\sqrt{\sigma_{\perp}^2} + \sigma_{\perp}^2/\sqrt{2\pi\lambda L})$, предложенной в [6] и учитывающей как регулярную, так и флуктуационную компоненты скорости ветра, где λ — длина волны излучения, L — длина трассы, f — частота, по оси ординат — логарифмы безразмерного спектра U .

Временные спектры флуктуаций интенсивности сферической волны изображены на рис. 1. Волновой параметр передающей апертуры $a = L/k\alpha_0^2 \simeq 100$, где $k = 2\pi/\lambda$, α_0 — эффективный радиус пучка. Смещение приемника относительно центра излучаемой волны в эксперименте было не более 3 мм. Как видно из рисунка, форма кривых одинакова, но на локационной трассе (кривая 1') спектр сдвинут в область высоких частот относительно спектра на прямой трассе (кривая 1). Расчету в предположении постоянного ветра при смещении приемной апертуры от центра передатчика на $0,2\sqrt{\lambda L}$ и конечном внутреннем масштабе l_0 ($S_m^2 = (l_0/\lambda L)(2\pi/5,92^2) = 0,0064$) [3] соответствует кривая 2', кривая 2 — спектр на прямой трассе. Наблюдается различие в расчетных и экспериментальных данных, особенно заметное на высоких частотах.

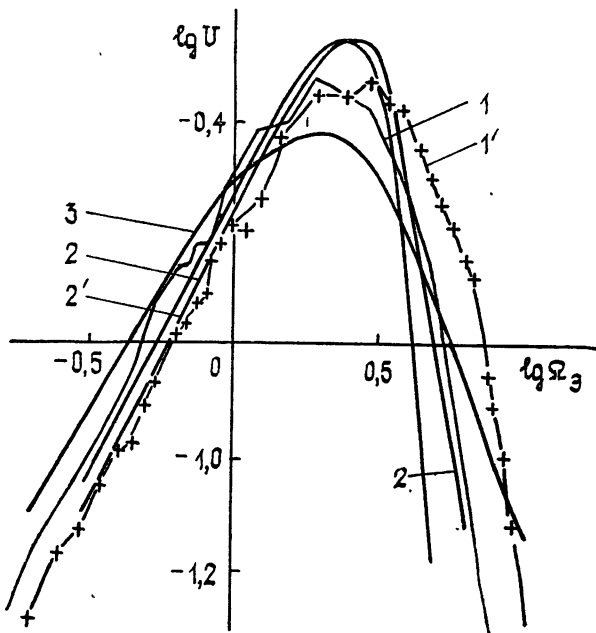


Рис. 1.

Рассмотрим возможные причины расхождения. Вообще говоря, П-образная трасса не полностью соответствует случаю прямого распространения, так как увеличивается время прохождения одних и тех же оптических неоднородностей через волновой пучок. Из-за этого возможен сдвиг спектра на такой трассе в область низких частот по сравнению со спектром на локационной или прямой трассах. Этот же механизм, предложенный в [8], может служить для объяснения различий в спектрах прямого и отраженного сигналов (кривых 2, 2') при смещении приемника от центра излучающей апертуры (случай V-образ-

ного распространения). С другой стороны, относительное среднеквадратичное отклонение флуктуаций интенсивности на трассе с отражением $\sigma_{отр} = 1,68$, а на прямой — $\sigma_{пр} = 1,18$.

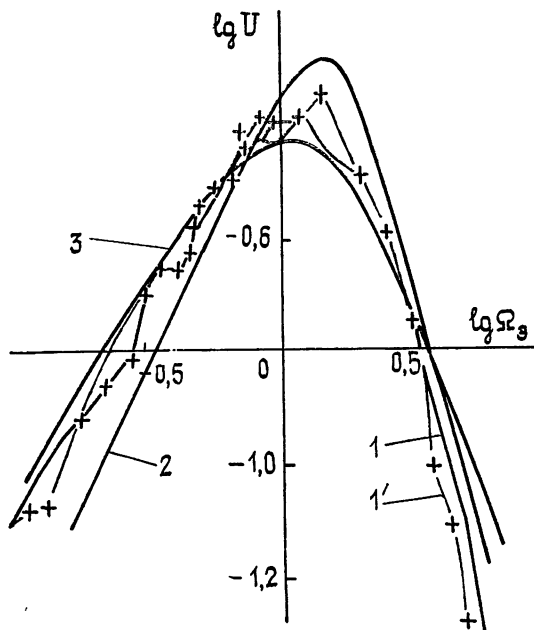


Рис. 2.

Как известно, увеличение флуктуаций сопровождается уширением и сдвигом в более высокочастотную область их временных спектров [2]. Эффект усиления флуктуаций интенсивности при отражении назад вызывает смещение спектра в сторону высоких частот по сравнению со случаем прямого распространения. А так как этот эффект наиболее существен для сферической волны, то и сдвиг будет максимальным в отличие от плоской волны или узкого коллимированного пучка (см. рис. 2). На прямой трассе флуктуации интенсивности еще далеки от области насыщения, но вид спектра отличается от расчета в приближении «замороженной турбулентности». На рисунке показана полученная в приближении «локальной замороженности» [4] граница эволюции временного спектра флуктуаций интенсивности при изменении отношения σ_{\perp}/v_{\perp} от 0 до ∞ (кривая 3 — $v_{\perp} = 0$) [6]. Сравнивая экспериментальные данные с расчетами, можно сказать, что уменьшение максимума и расширение спектра на прямой трассе хорошо объясняется флуктуациями скорости и направления ветра ($\sigma_{\perp}/v_{\perp} \sim 0,2 \div 0,3$). Однако это отношение оценивалось по механическому анемометру с большой погрешностью, поэтому можно говорить лишь о хорошем качественном совпадении. Прояснить этот вопрос может эксперимент, в котором будут организованы синхронные измерения на двух взаимно перпендикулярных трассах, таких, чтобы ветер был направлен вдоль одной из них и перпендикулярно другой, а отношение σ_{\perp}/v_{\perp} было бы существенно различным.

На рис. 2 проводится сравнение частотных спектров флуктуаций интенсивности узкого коллимированного пучка (волновой параметр равен 1) на прямой трассе (кривая 1) и трассе с отражением от зер-

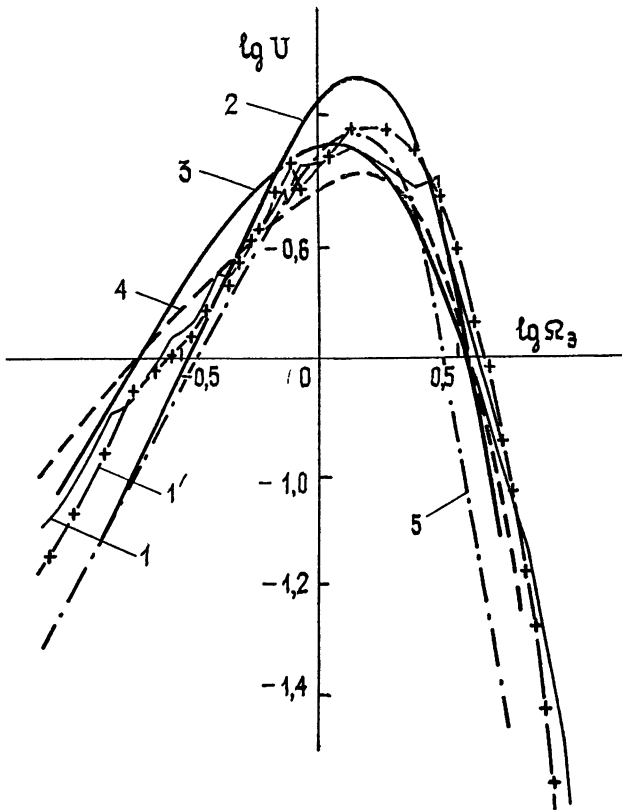


Рис. 3.

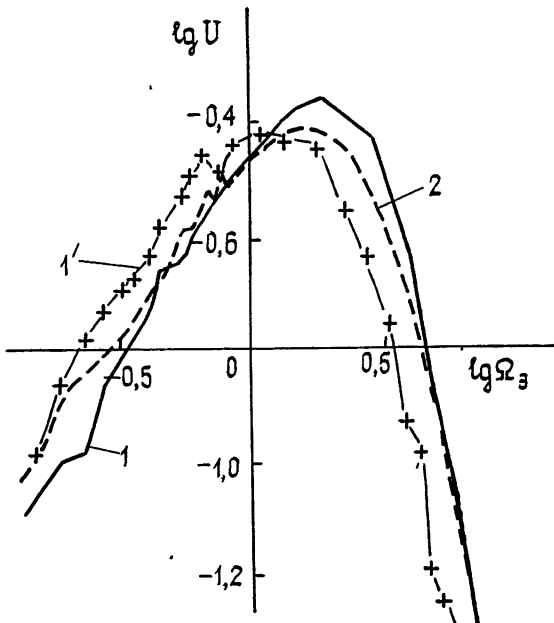


Рис. 4.

кального диска (кривая 1'). Параметр $\beta_0 = 1,24 C_n^2 k^{1/6} L^{11/6} = 1,34$. Параметр $D_s(2\alpha) = 1,1 C_n^2 k^2 (2\alpha)^{5/3}$, характеризующий условия распространения узкого пучка [9], равен 5,1; C_n^2 — структурная характеристика показателя преломления, $\sigma_{отр} = 1,31$, $\sigma_{пр} = 1,12$; по оценкам $\sigma_{\perp}/v_{\perp} \sim 0,3 \div 0,4$. На рис. 2 также показаны временные спектры, рассчитанные в приближении «локальной замороженности» (кривая 2 — $\sigma_{\perp} = 0$, 3 — $v_{\perp} = 0$) [6], а также приведены теоретические данные работы [9], полученные для узкого пучка $a = 1$ при $D_s = 3$ (кривая 4).

Как видно из рисунка, экспериментальные спектры на прямой и локационной трассах отличаются незначительно, что согласуется с работой [3]. Небольшое увеличение дисперсии флуктуаций интенсивности на трассе с отражением не приводит к сдвигу спектра отраженного сигнала в область высоких частот по сравнению со спектром на прямой трассе. Реальная точность наведения отраженной строго назад волны $\Delta = 0,5 \div 1$ см. Для узкого коллимированного пучка эта величина сравнима с его размером. Поэтому не только условия распространения излучения и флуктуации скорости ветра, но и неточность настройки может привести к заметному изменению вида спектральных функций. Кривая 5 соответствует случаю, когда $\Delta = 0,12\sqrt{\lambda L}$ [3].

Сравнивая экспериментальные кривые с зависимостями 2—5, можно сказать, что уменьшение максимума и расширение спектра по сравнению с расчетом МПВ в приближении «замороженной турбулентности» может быть качественно объяснено флуктуациями скорости и направления ветра, условиями распространения излучения (β_0), неточностью наведения пучка.

Результаты синхронных измерений частотных спектров флуктуаций интенсивности излучения, отраженного от уголкового отражателя, и на трассе, имитирующей прямую, приведены на рис. 3, 4.

При отражении квазиплоской волны от уголка спектр (кривая 1', рис 3) близок к спектру на прямой трассе (кривая 1), $\sigma_{отр} = 0,98$, $\sigma_{пр} = 1,07$. Отличия наблюдаются в высокочастотной области, где при различных значениях β_0 спектр отраженного сигнала систематически ниже, чем в случае прямого распространения. Совпадение с расчетом в приближении «локальной замороженности» для плоской волны на прямой трассе (кривая 2 — $\sigma_{\perp} = 0$, 3 — $v_{\perp} = 0$) [6] хорошее.

На рис. 4 кривая 1' — спектр при отражении узкого пучка от уголкового отражателя, кривая 1 — спектр на прямой трассе ($\sigma_{отр} = 0,95$, $\sigma_{пр} = 0,92$). Как видно из рисунка, наблюдается существенный сдвиг спектра в низкочастотную область на трассе с отражением. Вид спектров ($\sigma_{\perp}/v_{\perp} \sim 0,3 \div 0,4$) хорошо согласуется с расчетом в приближении «локальной замороженности» [6]. Интересно провести сравнение результатов при отражении строго назад от плоского зеркала и от уголка. К сожалению синхронные измерения не проводились, но наложение кривой 1' рис. 2 на рис. 4 (кривая 2) показывает существенное отличие временных спектров. При отражении от уголка спектр более низкочастотный.

Таким образом, из приведенных данных следует, что временные спектры флуктуаций интенсивности на трассах с отражением отличаются от спектров на прямых трассах. Отличия особенно существенны для сферической волны, отраженной от плоского зеркала (сдвиг спектра в высокочастотную область за счет эффекта усиления флуктуаций интенсивности), и для узкого пучка, отраженного от уголкового отражателя (смещение в сторону низких частот). Экспериментальные спектры на прямой трассе изменяются в пределах, определяемых расчетом в приближении «локальной замороженности».

Авторы благодарят Т. П. Печеркину и А. П. Ростова за помощь в проведении эксперимента и обработке результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурвич А. С., Кон А. И., Миронов В. Л., Хмелевцов С. С., Лазерное излучение в турбулентной атмосфере — М: Наука, 1976.
2. Гурвич А. С., Еленов Б. С., Покасов В. В., Сабельфельд К. К., Татарский В. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 2, с. 198.
3. Патрушев Г. Я., Покасов В. В. Проблемы оптики атмосферы. (Распространение лазерного излучения в атмосфере). — Новосибирск: Наука, 1983, с. 108.
4. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. — М.: Наука, 1967.
5. Монастырный Е. А., Патрушев Г. Я., Петров А. И., Покасов В. В. — Квантовая электроника, 1980, 7, № 7, с. 1580.
6. Монастырный Е. А., Патрушев Г. Я., Покасов В. В. — Оптика и спектроскопия, 1984, 56, вып. 1, с. 41.
7. Патрушев Г. Я., Петров А. И., Покасов В. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1983, 26, № 7, с. 823.
8. Коваль С. С., Патрушев Г. Я., Петров А. И., Покасов В. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 23, № 3, 1980, с. 326
9. Миронов В. Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере.— Новосибирск: Наука, 1981.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР

Поступила в редакцию
13 декабря 1982 г.,
в окончательном варианте
27 июня 1983 г.

TIME SPECTRA OF THE INTENSITY FLUCTUATIONS ALONG THE REFLECTING PATH

E. A. Monastyrnyj, G. Ya. Patrushev, A. I. Petrov, V. V. Pokasov

The paper presents the results of the synchronous measurements of time spectra of wave beam intensity fluctuations with different diffraction sizes along straight and sounding paths with the reflection from a mirror disk and corner cube reflector. The differences are of great importance especially for a spherical wave, reflected from the plane mirror (due to the effect of fluctuation amplification) and for a narrow collimated beam, reflected from the corner cube. The expansion of the experimental spectra and the reduction of their maxima, in comparison with the calculations with invariable wind, are accounted for by the value of intensity fluctuations and the fluctuations of speed of the optical inhomogeneity wind transfer.

IV ВСЕСОЮЗНЫЙ СЕМИНАР ПО ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

(Продолжение)

Был проведен ряд работ, направленных на увеличение частоты излучения релятивистских СВЧ приборов. Мощность релятивистских СВЧ генераторов, основанных на различных типах индуцированного излучения электронов, в длинноволновой части миллиметрового диапазона волн достигла уровня 100 МВт в режиме коротких импульсов (орotronы — в ИПФ АН СССР, МЦР на аномальном эффекте Доплера — НИИЯФ при ТПИ). В коротковолновой части миллиметрового диапазона волн мощность достигает десятков мегаватт (релятивистский гиротрон с высокоселективной электродинамической системой, работающий на E-моды, — ИПФ АН СССР, совместный эксперимент ИСЭ СО АН СССР и ИПФ АН СССР по эффективному рассеянию мощного 3-сантиметрового излучения карсинотрона на релятивистском электронном пучке в диапазон длин волн 3—6 мм). В оротроне с длиной волны 0,9 мм в многомодовом режиме получена СВЧ мощность 0,5 МВт (ИПФ АН СССР). Следует отметить также определенные успехи в разработке слаборелятивистских длинноимпульсных гиротронов: на длине волны 3 мм получена СВЧ мощность 1,5 МВт в импульсах длительностью 30 мкс, субмиллиметровый диапазон волн перекрыт вплоть до 0,5 мм, при этом на длинах волн свыше 0,6 мм СВЧ мощность превышает 100 кВт в импульсах длительностью 100 мкс (ИПФ АН СССР)

(Окончание см. с. 947)