

ТУРБУЛЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 621.391.812.01

Е.Р. Милютин, А.А. Таклая

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПРИНИМАЕМОЙ МОЩНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВАРИАЦИЯМИ ШИРИНЫ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния вариаций ширины лазерного пучка в турбулентной атмосфере на флуктуации принимаемой мощности. Показано, что распределения флуктуаций ширины лазерного пучка и принимаемой мощности подчиняются логарифмически нормальному закону.

Случайные изменения показателя преломления среды распространения приводят к процессам, вызывающим флуктуации мощности сигнала в месте приема лазерного пучка. Основными из этих процессов являются: перераспределение интенсивности излучения внутри пучка (сцинтилляции), случайные блуждания (смещения) и уширение пучка. Вышеперечисленные процессы могут рассматриваться как мультипликативные помехи в атмосферных оптических информационных системах (АОИС).

При расчете основных характеристик АОИС необходимо знать закон распределения вероятностей флуктуаций принимаемой мощности в результате действия каждой из помех [1]. Такие законы распределения установлены для сцинтилляций [2] и случайных блужданий [3] пучка, тогда как для <чистого> уширения пучка подобные данные отсутствуют.

Определение функции плотности вероятностей флуктуаций принимаемой мощности в этом случае предполагает знание функции плотности вероятностей флуктуаций мгновенной ширины пучка и связи между этими функциями. Для установления этих зависимостей предположим, что лазерный пучок имеет, в самом общем случае, гауссово распределение интенсивности в поперечном сечении, которое, так же как и приемная антенна, представляет собой окружности

$$I(x, y) = P_t (2\pi R_m)^{-1} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2 R_m}\right), \quad (1)$$

где P_t – общая мощность излучения в пучке; R_m – мгновенный радиус пучка на уровне $\exp(-1/2)$ по мощности; x, y – текущие координаты в плоскости сечения пучка.

Тогда мощность, принимаемая апертурой радиуса r , будет [4]

$$P_r = \int \int_{x^2 + y^2 \leq r^2} I(x, y) dx dy = P_t \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{R_m}\right)^2\right) \right]. \quad (2)$$

При $r/\langle R_m \rangle \ll 1$, где $\langle \rangle$ означает усреднение, получаем

$$P_r \approx \frac{P_t}{2} \left(\frac{r}{R_m}\right)^2. \quad (3)$$

Поскольку R_m есть случайная величина, то обычно исследуют его среднее значение $\langle R_m \rangle$, для установления которого используют два способа [5]. По одному – усреднение производят в неподвижной, а по другому – в подвижной системе координат, связанной с центром тяжести пучка. Соответственно получаются долговременный R_L и кратковременный R_S радиусы пучка, связь между которыми устанавливается соотношением

$$R_L^2 = R_S^2 + \langle R_M^2 \rangle, \quad (4)$$

причем R_S измеряется за время, существенно меньшее характерного времени блуждания пучка.

Долговременный радиус R_L учитывает весь спектр возмущений в турбулентной атмосфере и достаточно подробно исследовался в целом ряде теоретических и экспериментальных работ [6, 7, 8 и др.], тогда как экспериментальным исследованиям мгновенного радиуса, и, в частности, его функции плотности вероятностей посвящено лишь несколько работ.

Впервые попытка установления вида распределения $W(R_M)$ и связи его параметров с характеристиками турбулентности была экспериментально предпринята в [9, 10]. Полученные распределения достаточно хорошо аппроксимировались логарифмически нормальным законом. Однако четкого разделения эффекта увеличения диаметра от практически всегда происходящего одновременно эффекта случайного блуждания пучка в этих работах не прослеживается. Это потребовало проведения более тщательных экспериментальных исследований законов распределения флуктуаций радиуса пучка с синхронной и раздельной фиксацией упомянутых эффектов.

Экспериментальная установка представляла модифицированный вариант для измерения мгновенных значений ширины пучка <ножевым> методом, использовавшимся в [9, 10]. На рис. 1. приведена функциональная схема экспериментальной установки.

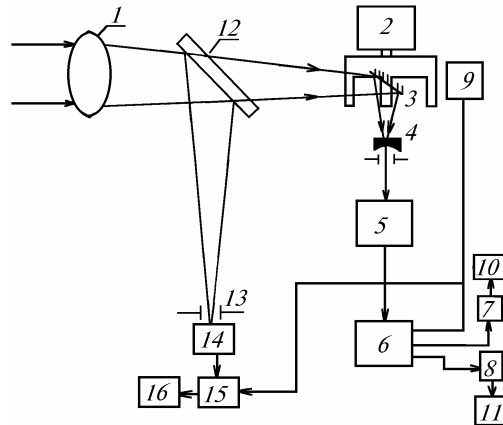


Рис. 1

Линза 1 уменьшает диаметр принимаемого лазерного пучка для того, чтобы уменьшить габариты вращающегося барабана 2. Степень уменьшения зависит от расстояния между линзой и барабаном, а ее максимальная величина (при максимальном расстоянии) – от допустимых возмущений интенсивности, обусловленных флуктуациями фазы. В данной установке диаметр пучка уменьшался в 3 раза. Барабан имеет восемь прямоугольных вырезов. Частота вращения барабана ($f = 50$ Гц) выбрана достаточно большой с учетом спектров флуктуаций интенсивности световых пучков в атмосфере, рассчитанных по [11]. Это позволяет распределение интенсивности в поперечном сечении пучка за время одного измерения ($\tau_i \leq i_k \sim 1$ мс) считать неизменным.

Пучок, отразившись от плоского неподвижного 12 и вращающегося 3 полупрозрачных зеркал, пройдя фильтр 4, установленный для подавления фона, фокусируется на фотодиодном приемнике 5. Напряжение сигнала с выхода фотодиода обрабатывалось специально разработанным электронным устройством 6, которое вырабатывало импульсы, амплитуды которых были пропорциональны измеренным значениям либо ширины, либо смещения пучка. Затем эти импульсы поступали для статистической обработки соответственно на анализаторы импульсов АИ-128 (7 и 8), на выходе которых были установлены цифро-печатающие устройства (10 и 11), регистрирующие гистограммы.

Для измерителя отклонений требуется синхроимпульс, запускающий интегратор в блоке 6, который вырабатывался от кромки выреза барабана в блоке 9 путем перекрытия излучения инфракрасного светодиода, находящегося перед специальным фотодиодом. Одновременно

менно с измерением ширины и отклонения пучка измерялись флуктуации принимаемой мощности, которые преобразовались с помощью фотоприемника 14 с апертурой, определяемой диафрагмой 13, в напряжение для последующей статистической обработки в анализаторе импульсов 15 АИ-256 и регистрировались с помощью цифрпечати 16.

Таким образом, результаты измерений получались в виде трех гистограмм распределения плотности вероятностей исследуемых величин, которые затем регистрировались с помощью цифрпечатающих устройств для последующей обработки на ЭВМ.

Измерения проводились на полигоне Института физических исследований (ИФИ) (Аштак, Республика Армения) на двух параллельных (с разнесением 3 м) горизонтальных трассах длиной 950 м, проходивших на высоте 15 м над поверхностью земли в течение 4-х месяцев. На основной трассе осуществлялись измерения величин случайного блуждания, мгновенного радиуса пучка и принимаемой мощности, а на вспомогательной – параметра C_n^2 с помощью прибора, измеряющего размер лазерного пятна в фокусе приемной линзы [12]. Прибор обеспечивал диапазон измерений C_n^2 от $5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ до $5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$. Время проведения одного сеанса измерений составляло 240 с, в течение которых анализировалось 96000 импульсов.

Перед каждым сеансом измерений аппаратура калибровалась с помощью щелей, освещаемых источником с равномерно распределенной интенсивностью. Измеритель отклонения пучка калибровался путем последовательных смещений щелей шириной 0,5 мм, а измеритель радиуса пучка – набором щелей определенной ширины.

Пример результатов измерений флуктуаций мгновенного радиуса пучка показан на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведены гистограммы плотности вероятностей флуктуаций при $2a = 7 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ (где a – радиус передающей апертуры) при различных значениях C_n^2 (таблица), а на рис. 3 – распределения вероятностей при тех же значениях C_n^2 . В таблице даются вычисленные для этих же гистограмм значения первого, второго нормированного моментов. Из рис. 2, как и из всех результатов измерений, следует вывод, что флуктуации мгновенного радиуса пучка действительно подчиняются логарифмически нормальному закону.

N	$C_n^2 \text{ м}^{-2/3}$	$\langle 2 R_M \rangle, \text{ мм}$	$\langle (2 R_M)^2 \rangle, \text{ мм}$	$\frac{\langle R_M^2 \rangle}{\langle R_M \rangle^2}$
1	$3,6 \cdot 10^{-15}$	22,6	40,2	0,078
2	$5,1 \cdot 10^{-15}$	27,5	49,1	0,069
3	$1,1 \cdot 10^{-14}$	41,6	89,3	0,052
4	$2,2 \cdot 10^{-14}$	54,7	175,3	0,058

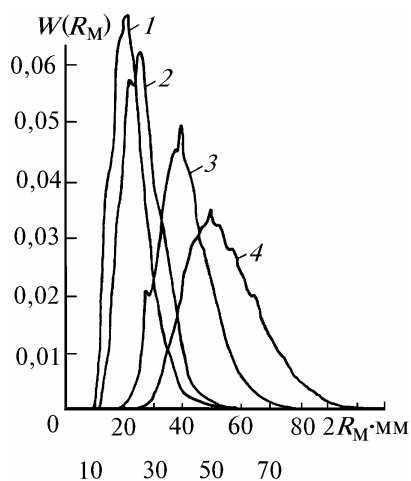


Рис. 2. Гистограммы плотности вероятностей флуктуаций мгновенных значений радиуса пучка R_M при $C_n^2 \text{ (м}^{-2/3}\text{)}$: кривая 1 – $3,6 \cdot 10^{-15}$; 2 – $5,1 \cdot 10^{-15}$; 3 – $1,1 \cdot 10^{-14}$; 4 – $2,2 \cdot 10^{-14}$

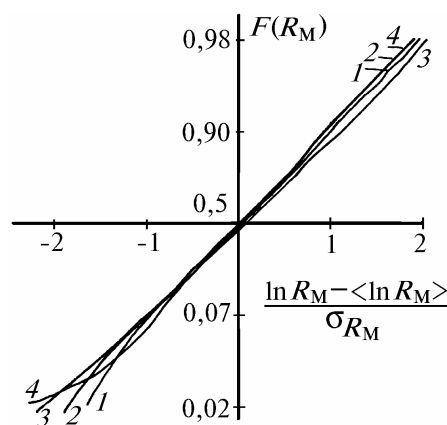


Рис. 3. Распределения вероятностей, соответствующие гистограммам на рис. 2

Из рис. 2 и данных таблицы видно, что как среднее, так и дисперсия радиуса пучка растут при увеличении C_n^2 , но при этом относительная величина флуктуаций показывает тенденцию к уменьшению. Хотя второй нормированный момент порядка 0,052–0,078, но относительные флуктуации ширины пучка могут быть в пределах 23–28%, а поскольку интенсивность в центре пучка обратно пропорциональна квадрату радиуса, то относительные флуктуации интенсивности, обусловленные только флуктуациями ширины пучка, могут достичь значений 45–56%.

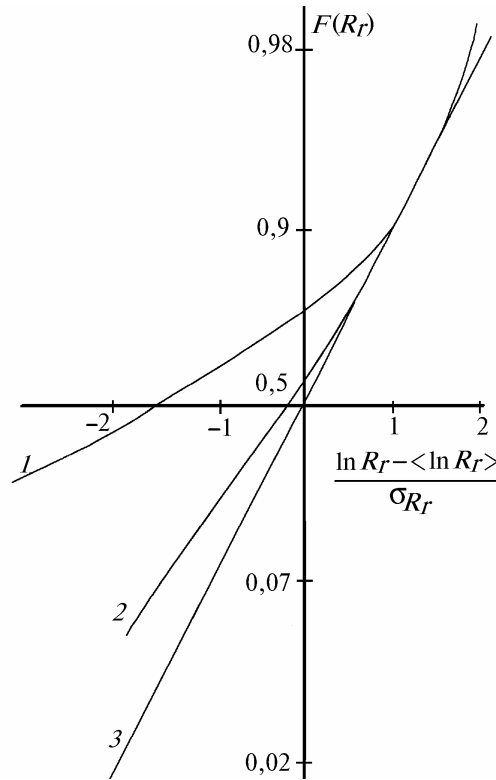


Рис. 4. Кривые распределения вероятностей флуктуации принимаемой мощности: 1 – при блуждающем пучке; 2 – неблуждающем пучке; 3 – логнормальном законе

Поскольку флуктуации мгновенного радиуса пучка, а следовательно, флуктуации принимаемой мощности вызываются совместным действием эффектов блуждания и расширения пучка, то для устранения влияния блуждания в дальнейших экспериментах пучок расфокусировался в приемной плоскости. На рис. 4 приведены в качестве примера единичные реализации распределения вероятностей флуктуаций принимаемой мощности для приемной апертуры диаметром 9,4 мм при $C_n^2 = 1,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ и $D_S(a) = 17$. Наблюдается отклонение обеих кривых от логарифмически нормального закона, причем в области глубоких замираний отклонения для блуждающего пучка заметно больше. Результаты усредненных измерений показывают гораздо большее приближение распределения вероятностей флуктуации для неблуждающего пучка к логарифмически нормальному закону.

Полученные экспериментально результаты легко объясняются. Действительно, если флуктуации мгновенного радиуса лазерного пучка подчиняются логарифмически нормальному закону

$$W(R_M) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} R_M \sigma_{R_M}} \exp \left[- \left(\ln R_M - \ln \langle R_M \rangle + \frac{\sigma_{R_M}^2}{2} \right)^2 / 2 \sigma_{R_M}^2 \right], \quad (5)$$

где $\sigma_{R_M}^2$ – дисперсия флуктуаций логарифма радиуса, то с учетом соотношения (2) и известной формулы для нелинейного преобразования случайных величин [13]

$$W(P_r) = W(R_M) \left| \frac{\partial R_M}{\partial P_r} \right| = W(R_M(P_r)) \left| \frac{\partial (R_M(P_r))}{\partial P_r} \right|, \quad (6)$$

где $R_M(P_r)$ – обратная функция к $P_r(R_M)$; $\left| \frac{\partial R_M}{\partial P_r} \right|$ – якобиан преобразования, получаем плотность вероятностей флуктуаций принимаемой мощности в виде

$$W(P_r) = \left\{ P_T / \sqrt{2\pi} \sigma_{R_M} 2 \left[\ln \left(1 - \frac{P_r}{P_T} \right) \left(1 - \frac{P_r}{P_T} \right) \right] \right\} \exp \left\{ - \left[\ln 2 \left[- \ln \left(1 - \frac{P_r}{P_T} \right) \right] - \ln P_T \frac{r^2}{\langle R_M \rangle^2} - \sigma_{R_M}^2 \right] / 8 \sigma_{R_M}^2 \right\}. \quad (7)$$

При точечной апертуре ($r/\langle R_M \rangle \ll 1$), используя (3),

$$W(P_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} P_r \sigma_{R_M}} \exp \left[- \left(\ln 2 P_r - \ln P_T \frac{r^2}{\langle R_M \rangle^2} - \sigma_{R_M}^2 \right) / 8 \sigma_{R_M}^2 \right]. \quad (8)$$

Таким образом, показано, что логнормальные флуктуации мгновенного радиуса пучка вызывают флуктуации принимаемой мощности также подчиняющиеся логнормальному закону. С формально математической точки зрения это объясняется своеобразной <инертностью> логнормального закона к процедурам умножения, представленным соотношением (3), и деления, что показано в [14], аналогично <инертности> нормального закона к действиям суммирования и вычитания. Что же касается неполного совпадения экспериментальных распределений флуктуаций принимаемой мощности для расфокусированного пучка с прямой, представляющей логарифмический закон (рис. 4), то, очевидно, здесь сказывается влияние быстрых сцинтилляций внутри пучка.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела ИФИ, возглавляемого проф. Р.А. Казаряном, помощь которых сделала возможным появление данной работы.

1. Милютин Е.Р. Методика расчета совместного действия помех в атмосферном канале оптических информационных систем // Радиотехника. 1995 (в печати).
2. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 5. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 270 с.
3. Милютин Е.Р., Таклая А.А. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. N 8. С. 1611–1617.
4. Esposito R. // Prog. IEEE. 1967. V. 55. N 12. P. 1533–1534.
5. Кон А.И., Миронов В.Л., Носов В.В. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1976. Т. 19. N 7. С. 1015–1019.
6. Прохоров А.М., Бункин Ф.В., Гочелашвили К.С., Шишов В.И. // УФН. 1974. Т. 114. Вып. 3. N 11. С. 415–456.
7. Каллистратова М.А., Покасов В.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. N 8. С. 1200–1207.
8. Виск А.Л. // Appl. Opt. 1967. V. 6. N 4. P. 703–708.
9. Акопян Р.Б., Вартанян Х.В., Погосян К.П. // Тезисы докл. I Респ. научно-техн. конф. <Оптические системы связи>. Ереван. 1980. С. 14–16.
10. Погосян К.П. // Тезисы докладов II совещания по атмосферной оптике (ч. II). Томск. 1980. С. 69–72.
11. Миронов В.А. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 246 с.
12. Акопян Р.Б., Погосян К.П. // Тезисы докл. II Совещания по атмосферной оптике. (ч. IV). Томск, 1980. С. 23–26.
13. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. Радио, 1966. 728 с.
14. Милютин Е.Р., Никитин В.Н. // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. 1977. Вып. 5(12). С. 96–100.

Санкт-Петербургский государственный университет
телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

Поступила в редакцию
2 февраля 1994 г.

E.R. Milutin, A.A. Taklay. Distribution of Fluctuations of a Received Power due to Laser Beam Width Variations in the Turbulent Atmosphere.

The experimental results are presented of investigation of dependence of fluctuations of a received power on the laser beam width variation in the turbulent atmosphere. The distributions of fluctuations both of the laser beam width and the received power are shown to obey the lognormal law.