

Н.А. Вострецов, А.Ф. Жуков, М.В. Кабанов, Р.Ш. Цвык

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СНЕГОПАДЕ

Приводятся результаты анализа законов распределения вероятностей интенсивности лазерного излучения в снегопаде. Установлено, что закон распределения вероятностей флуктуации интенсивности узкого расходящегося лазерного пучка в снегопаде в отсутствие сплошных хлопьев имеет один максимум и правостороннюю асимметрию. В большинстве случаев он описывается гамма-распределением.

1. Введение

Проблемы, связанные с оценкой потенциальных возможностей атмосферных лазерных систем и с выбором эффективных методов обработки случайных сигналов, определяют актуальность исследований распределения вероятностей флуктуации интенсивности лазерного излучения при распространении в атмосфере.

В настоящее время наиболее исследованы законы распределения вероятностей для интенсивности лазерного излучения в турбулентной атмосфере. Из [1, 2] следует, что в области слабых флуктуации распределение вероятностей интенсивности оптического излучения чаще всего описывается логарифмически нормальной функцией. Для области сильных флуктуации пока нет единого решения, и исследования до сих пор продолжаются [1, 2].

В средах с дискретными рассеивателями, как следует из теоретической работы [3], случайная интенсивность распределена по логарифмически нормальному закону на расстояниях $L \gg ka^2$ и по пуассоновскому закону при $L \ll ka^2$, где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, a – радиус частицы.

При атмосферных осадках выявление закона распределения интенсивности осложняется одновременными флуктуациями за счет рассеяния как на турбулентных неоднородностях, так и на частицах осадков. Поэтому теоретические исследования в этом направлении отсутствуют полностью, а экспериментальные ограничены лишь несколькими результатами для дождя и снегопада [4–8].

В настоящей статье представлены результаты анализа законов распределения вероятностей интенсивности лазерного пучка в снегопаде.

2. Аппаратура

Схема и методика измерений подробно описывалась нами ранее [9]. Лазерное излучение от ЛГ-38 ($\lambda = 0,6328$ мкм) после прохождения трассы длиной в 964 м принималось на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), перед которым устанавливалась диафрагма диаметром 0,3 мм. Угол расходимости лазерного пучка был равен $5 \cdot 10^{-4}$ рад. Сигнал с ФЭУ усиливался и поступал на анализатор импульсов АИ-1024, а также на дисперсиометр, который позволял измерять нормированную дисперсию флуктуации интенсивности (σ_s^2). Динамический диапазон входных сигналов для АИ-1024 составлял от 0,2 до 10 В. Длительность одной выборки составляла 1 мкс, а частота квантования (f_k) выбиралась с учетом времени корреляции (t_k), по условию $1/f_k \gg t_k$, чтобы исключить корреляцию выборок. Время анализа не менее 20–30 с.

3. Результаты измерений

Всего было обработано около ста распределений. На рис. 1 приведены типичные примеры распределения плотности вероятностей флуктуации интенсивности в снегопаде. Для них характерны один максимум, правосторонняя асимметрия и усиление асимметрии с ростом оптической толщи (τ) снегопада.

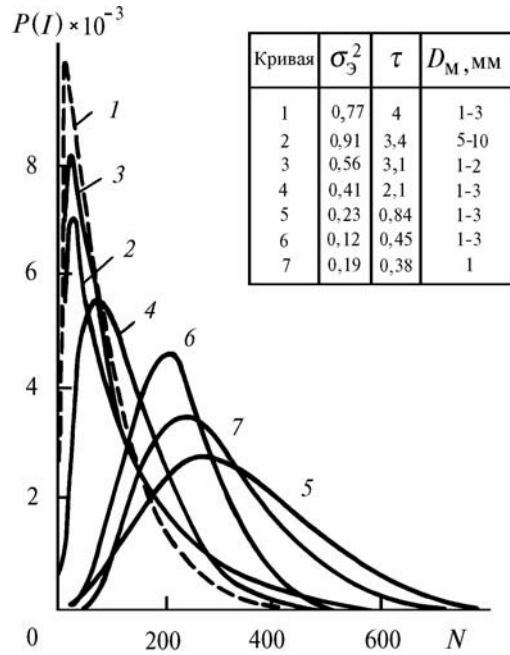


Рис. 1. Распределение плотности вероятности флуктуации интенсивности

Был проведен подбор аналитического выражения для эмпирических распределений путем графического представления вероятностей. Для этого полученные экспериментальные данные наносились на специальную графическую бумагу, предназначенную для выбранного распределения (т.е. использовался метод выпрямленных диаграмм).

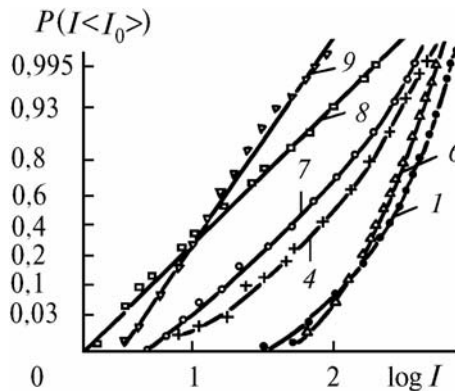


Рис. 2. Примеры проверки логарифмически нормального закона распределения вероятности флуктуации. Для кривых 1-7 значения σ_{Σ}^2 , τ и D_M мм даны в таблице на рис. 1; 8- $\sigma_{\Sigma}^2 = 1,46$; $\tau = 0,54$; 9- $\sigma_{\Sigma}^2 = 0,98$, $\tau = 0,53$ – снега нет, плотная дымка

На рис. 2 приведены примеры проверки логарифмически нормального распределения. Как видно, эта модель плохо описывает экспериментальные распределения при выпадении осадков. Напротив, в плотной дымке при $\tau = 0,5$, как и следовало ожидать, логарифмически нормальное распределение хорошо описывает данные во всем диапазоне изменений сигнала. На наш взгляд, этот факт подтверждает правильность используемой методики измерений и обработки данных. Обращает на себя внимание то, что в этих координатах эмпирические распределения для осадков в области малых значений $\lg I$ лежат значительно выше, чем ожидаемые по логарифмически нормальной модели. Ранее такие отклонения были установлены также и в [5]. Эта особенность характерна для гамма-распределений [10], плотность которых выражается формулой, при $I > 0$

$$P_{\alpha, \beta}(I) = \frac{1}{\Gamma(\alpha + 1) \beta^{\alpha+1}} I^{\alpha} \exp\left(-\frac{I}{\beta}\right),$$

где параметры $\alpha > -1$, $\beta > 0$, а $\Gamma(\alpha + 1)$ – гамма-функция (равная $\alpha!$ при целом α).

На рис. 3, 4 приведены примеры проверки гамма-распределения. Построение масштабной сетки по ординате проводилось в соответствии с методикой, описанной в [10]. Здесь для определенности уточним, что она является аналогом хорошо известной вероятностной сетки для выпрямления нормального (или логарифмически нормального) распределения. Анализ показывает, что около 90 эмпирических распределений из 100 лучше описываются гамма-распределением по сравнению с логарифмически нормальными, а также Раиса–Накагами-распределениями. При этом параметр α (рис. 3, 4) уменьшается с ростом оптической толщи. Последнее является естественным следствием того факта, что гамма-распределениям с более высоким индексом α соответствуют меньшие значения дисперсии логарифма интенсивности (дисперсии интенсивности тоже) [10], а также зависимости дисперсии флуктуации (σ_s^2) от оптической толщи [9]. Вместе с тем пока накопленного материала недостаточно для установления желаемой зависимости параметров α и β от погодных условий. Для этого нужны измерения в более широком диапазоне вариаций погодных условий.

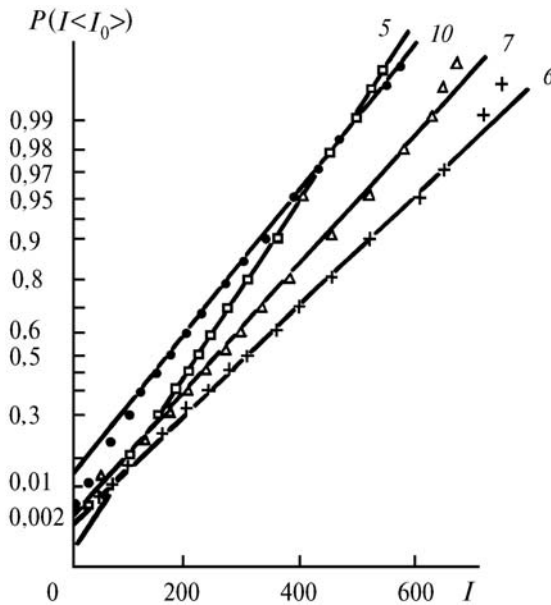


Рис. 3. Проверка гамма-распределения для $\alpha = 7$. Кривые 5 – $\tau = 0,84$; $\sigma_s^2 = 0,23$; 6 – $\tau = 0,45$; $\sigma_s^2 = 0,12$; 7 – $\tau = 0,38$; $\sigma_s^2 = 0,19$; 10 – $\sigma_s^2 = 0,3$, $\tau = 1,2$; $D_m = (2-3)$ мм

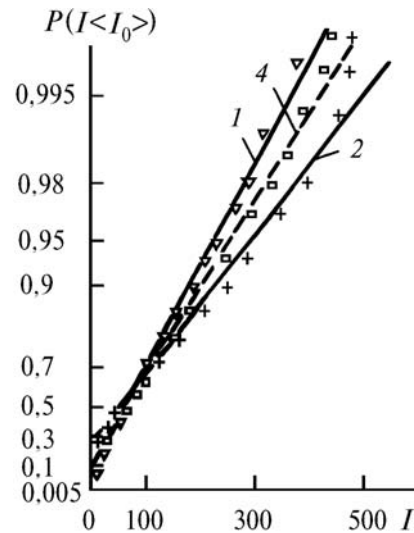


Рис. 4. Проверка гамма-распределения для $\alpha = 1$. Для кривых 1, 2, 4 значения σ_s^2 , τ , D_m , мм даны в таблице на рис. 1

Были также проведены одновременные записи сигналов на магнитографе Н-038 в узком расходящемся пучке на двух трассах длиной 964 и 260 м, а также на трассе 964 м при диаметре приемной линзы 160 мм. Диаметр пучка в плоскости приема был равен одному метру. Линза устанавливалась с визуальной точностью в центре пучка, а меньший приемник располагался рядом с правой линзы. Оптические оси приемников были почти параллельны между собой и разнесены на расстоянии около 160 мм. Из рис. 5 отчетливо видно вышеотмеченное усиление асимметрии с ростом оптической толщи, но оно установлено в одних и тех же атмосферных условиях. Более того, при $D_{пр} = 160$ мм распределение становится левосимметричным в отличие от правосимметричного для $D_{пр} = 0,3$ мм.

4. Обсуждение результатов

Экспериментальных данных пока недостаточно для полной характеристики вида функции распределения флуктуации интенсивности в различных атмосферных осадках. Вместе с тем проведенный анализ позволяет определить класс функций, пригодных для описания

флуктуации интенсивности в снегопаде в отсутствие хлопьев в узком пучке. Это функции с одним максимумом с правой асимметрией. Мы исследовали применимость трех распределений, имеющих вышеперечисленные особенности.

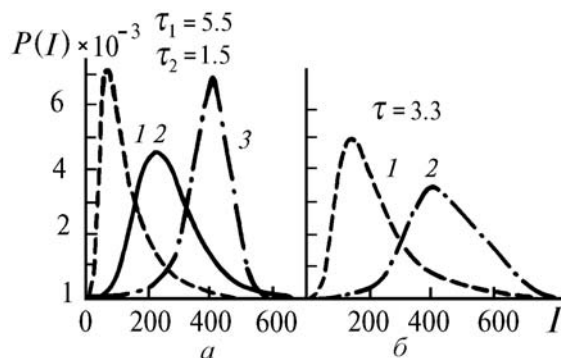


Рис. 5. Распределение плотности вероятности флуктуации интенсивности: а) кривая 1 – 964 м, $D_{пр} = 0,3$ мм; 2 – 260 м, $D_{пр} = 0,3$ мм; 3 – 964 м; $D_{пр} = 160$ мм; б) кривая 1 – 964 м, $D_{пр} = 0,3$ мм; 2 – 964 м, $D_{пр} = 160$ мм

Естественно возникает желание найти логическое обоснование применимости гамма-распределения с учетом знаний о физике флуктуаций интенсивности в осадках. Можно предположить, что закон распределения вероятностей представляет собой смесь нескольких распределений. Если всю трассу условно разделить на ближнюю и дальнюю части по отношению к приемнику в случаях малого турбулентного вклада во флуктуации (что и было в наших измерениях при $\tau > 1$), то получится смесь логарифмически нормального и пуассоновского распределений. Пуассоновские флуктуации будут также за счет перекрытия возле источника узкого пучка как целого частицами, размеры которых больше диаметра пучка, поскольку здесь будет также ярко выражено действие каждой частицы, как и в ближней зоне от приемника. При ощутимом влиянии турбулентности будет увеличиваться вес логарифмически нормальных флуктуаций в этой смеси.

Однако остался открытым вопрос, можно ли из смеси логарифмически нормального и пуассоновского распределений получить гамма-распределение. И если это возможно, то желательно определить, при каких значениях весовых коэффициентов составляющих смеси это наблюдается. Весовые коэффициенты можно грубо оценить из спектральных измерений [11]. Все это может стать предметом дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

5. Заключение

Закон распределения вероятностей флуктуации интенсивности узкого расходящегося лазерного пучка в снегопаде в отсутствие сплошных хлопьев имеет один максимум, и правостороннюю асимметрию в большинстве случаев и неплохо описывается в области слабых и сильных флуктуации гамма-распределением.

В заключение выражаю благодарность Н.П. Кривоपालову за участие в некоторых измерениях в осадках.

1. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. С. 270.
2. Jakerman E., Tough R.J.A. //Adv. in Phys. 1988. V. 37. № 5. P. 471–529.
3. Крутиков В.А. //Рассеяние и рефракция оптических волн в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 28–51.
4. Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Гологузов В.Е. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1971. Т. 7. № 7. С. 804–807.
5. Галахов В.Н., Ефремов А.В., Жуков А.Ф., Рейно В.В., Цвык Р.Ш. Статистические характеристики флуктуации интенсивности лазерного излучения при распространении в осадках. Томск, 1976. С. 51. (Препринт / Институт оптики атмосферы СО АН СССР, № 17).
6. Горячев Б. В., Могильницкий С.Б. //IV Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере (Тезисы докл.). Томск, 1977. С. 75–78.
7. Патрушев Г.Я., Петров А.И. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 10. С. 1050–1058.

8. Borovoy A.G., Patrushev G.Ya., Petrov A.I. //Appl. Optics. 1987. V. 27. № 17. P. 3704–3714.
9. Жуков А.Ф., Кабанов М.В., Цвык Р.Ш., Вострецов Н.А., Кривопапов Н.П. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 4. № 4. С. 347–352.
10. Левин Л.М. Исследования по физике грубодисперсных аэрозолей. М.: Изд.АН СССР, 1961. С. 267.
11. Жуков А.Ф., Цвык Р.Ш. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1980 Т. 16. № 2. С. 164–171.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
20 октября 1992 г.

N.A. Vostretsov, A.F. Zhukov, M.V. Kabanov, R.Sh. Tsvyk. **Probability Distribution of Intensity Fluctuations of Laser Radiation in Snowfall.**

Analysis of distribution laws for probability of intensity fluctuations of a laser radiation in snowfalls is given. The analysis has revealed that for a narrow diverging laser beam propagating in a snowfall without solid floes the law of the intensity fluctuations probability distribution has only one maximum and a right-hand side asymmetry. In the majority of cases the distribution law is described by a gamma-distribution law.