

Распределение плотности вероятностей флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка в приземной атмосфере в дожде, мороси, тумане

Н.А. Вострецов*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 10.04.2017 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований статистических параметров флуктуаций излучения фокусированного лазерного пучка, рассеянного частицами осадков в дождях, мороси, тумане, на трассе 130 м. Анализируется зависимость распределений плотности вероятностей от вида осадков, коэффициента рассеяния, скорости ветра и ее перпендикулярной составляющей к трассе.

Ключевые слова: туман, морось, дождь, флуктуации, плотность вероятности, коэффициенты асимметрии и эксцесса; fog, drizzle, rain, fluctuations, probability density, skewness, kurtosis.

Введение

В работах [1–3] были проведены исследования распределений плотности вероятностей (РПВ) флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка (0,63 мкм) в приземной атмосфере в снегопадах с применением анализатора импульсов АИ-1024 (1024 канала). По экспериментальным РПВ рассчитаны [1]:

нормированный коэффициент асимметрии

$$\mu_3 = \frac{\sum_{I=1}^{N_0} (U_I - \mu_1)^3 \omega(U_I)}{(\mu_1)^3};$$

нормированный коэффициент эксцесса (островишинности)

$$\mu_4 = \frac{\sum_{I=1}^{N_0} (U_I - \mu_1)^4 \omega(U_I)}{(\mu_1)^4}$$

(U_I – значение сигнала; μ_1 – среднее значение сигнала; $\omega(U_I)$ – плотность вероятностей U_I ; N_0 – номер канала анализатора, в котором зарегистрирован сигнал).

Установлено [1], что μ_3 и μ_4 увеличиваются с ростом коэффициента рассеяния α при близких значениях максимального размера снежинок $l_{\text{макс}}$. Большинство экспериментальных РПВ в снегопадах аппроксимируются гамма-распределением [2].

Распределения плотности вероятностей флуктуаций интенсивности излучения необходимы для расчета вероятности искажения информации, передаваемой по лазерному пучку.

В данной работе представлены результаты исследований распределения плотности вероятностей флуктуаций интенсивности лазерного излучения, распространяющегося в осадках в виде тумана, мороси и дождя.

Аппаратура и методика измерений

Схема и методика измерений подробно описаны в [3]. Распределения плотности вероятностей измерялись в области рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка на трассе длиной $L = 130$ м на высоте 2,5 м над поверхностью земли. В качестве источника использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 0,6328$ мкм. Диаметр пучка при выходе из передатчика равнялся 160 мм, а в плоскости приема (фокусировки) не превышал 3 мм. Перед фотоприемником располагалась диафрагма диаметром $D_{\text{пр}} = 0,1$ мм. Угол поля зрения фотоприемника (ФЭУ-38) составлял $2,7 \times 10^{-2}$ рад. Фотоприемник устанавливался в фокальной плоскости лазерного пучка на расстоянии $\Delta l = 10$ или 15 мм от оси пучка.

Сигнал с ФЭУ-38 одновременно подавался на дисперсиометр, частотный анализатор спектра FSP-80, анализатор импульсов АИ-1024 и коррелятор Х6-4. По результатам измерений рассчитывались нормированная дисперсия, спектральная функция (спектр), РПВ и корреляционная функция. Коэффициент рассеяния α вычислялся по прозрачности атмосферы T ,

* Николай Арсеньевич Вострецов (vna@iao.ru).

измеряемой регистратором дальности видимости РДВ-3 на трассе 2×100 м с отражением. По T и L вычислялась оптическая толщина τ и коэффициент рассеяния $\alpha = \tau/L$ (км^{-1}). Скорость ветра V и ее направление V^0 измерялись метеостанцией М63-м-1 на высоте 2,5 м. По V и V^0 определялась перпендикулярная к трассе составляющая скорости ветра V_{\perp} . Размеры частиц тумана взяты из литературы. Размер частиц дождя и мороси оценивался визуально.

Результаты измерений

Измерения проводились в течение 15 сут – в дождь, морось или туман. Скорость ветра изменялась от 0 до 10 м/с, а перпендикулярная к трассе составляющая – от 0 до 5,4 м/с, коэффициент рассеяния – от 0,15 до 3,8 км^{-1} ; диаметр капель дождя $d = 1-3$ мм, мороси – < 1 мм, тумана – 1–10 мкм. Проанализированы 95 распределений плотности вероятностей.

В результате анализа РПВ флуктуаций рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка в дожде, мороси, тумане установлено, что РПВ, как и в случае измерений в снегопадах, – одномодальное и имеет правую асимметрию.

Рис. 1 показывает влияние коэффициента рассеяния α на форму РПВ при близких атмосферных условиях (нормированной дисперсии σ_s^2 , диаметре (размере) частиц d и виде осадков), а рис. 2 – влияние диаметра частиц атмосферных осадков при близких значениях коэффициента рассеяния. В таблице представлены зависимости нормированных коэффициентов асимметрии и эксцесса от коэффициента рассеяния и диаметра частиц осадков.

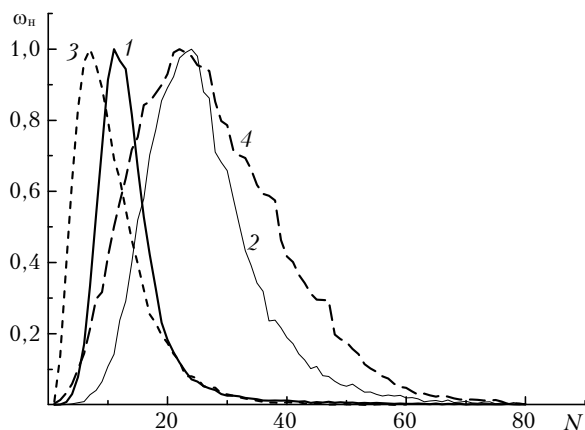


Рис. 1. Влияние коэффициента рассеяния α на форму РПВ: 1 – $\sigma_s^2 = 0,28$; $\alpha = 0,9 \text{ км}^{-1}$; $\mu_3 = 0,53$; $\mu_4 = 1,73$ (дождь); 2 – $\sigma_s^2 = 0,25$; $\alpha = 0,5 \text{ км}^{-1}$; $\mu_3 = 0,068$; $\mu_4 = 0,12$ (дождь); 3 – $\sigma_s^2 = 0,27$; $\alpha = 1,2 \text{ км}^{-1}$; $\mu_3 = 0,36$; $\mu_4 = 1,06$ (морось); 4 – $\sigma_s^2 = 0,3$; $\alpha = 0,47 \text{ км}^{-1}$; $\mu_3 = 0,06$; $\mu_4 = 0,14$ (морось); ω_n – плотность вероятности, нормированная на максимальное значение плотности вероятности в реализации; N – номер канала анализатора импульсов АИ-1024

Рис. 1, 2 и таблица позволяют сделать следующие выводы: μ_3 и μ_4 в дожде и в мороси растут с увеличением α при близких значениях σ_s^2 и d ;

вершина распределений становится более полой при уменьшении α ; распределение в дожде более асимметрично, а коэффициенты μ_3 и μ_4 в дожде выше, чем в мороси и тумане. Такие отличия обусловлены разницей в размерах частиц и, как следствие, дифракцией и угловым распределением рассеянного излучения.

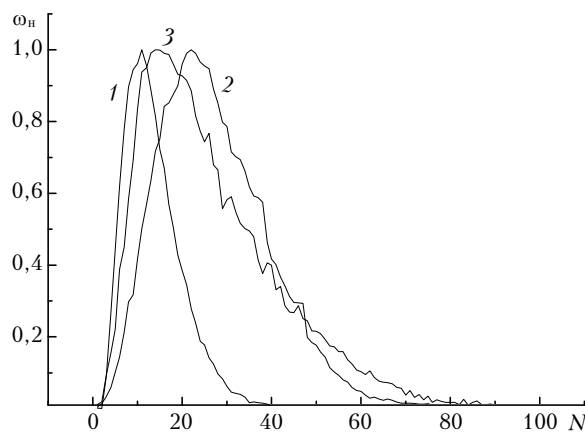


Рис. 2. Влияние диаметра (размера) d частиц атмосферных осадков на форму РПВ: 1 – $\sigma_s^2 = 0,28$; $\alpha = 1,0 \text{ км}^{-1}$; $\mu_3 = 0,53$; $\mu_4 = 1,73$; $d = 1-3$ мм (дождь); 2 – $\sigma_s^2 = 0,2$; $\alpha = 1,12 \text{ км}^{-1}$; $\mu_3 = 0,36$; $\mu_4 = 1,06$; $d < 1$ мм (морось); 3 – $\sigma_s^2 = 0,3$; $\alpha = 1,07 \text{ км}^{-1}$; $\mu_3 = 0,07$; $\mu_4 = 0,12$; $d = 1-10$ мкм (туман). Обозначение осей как на рис. 1

Зависимость нормированных коэффициентов асимметрии (μ_3) и эксцесса (μ_4) от коэффициента рассеяния (α) и диаметра (размера) частиц осадков (d)

σ_s^2	α , км^{-1}	μ_3	μ_4	d , мм	Вид осадков	График
0,25	0,50	0,068	0,12	1–3	дождь	рис. 1, кривая 2
0,28	0,90	0,53	1,73	1–3	дождь	рис. 1, кривая 1
0,28	1	0,53	1,73	1–3	дождь	рис. 2, кривая 1
0,30	0,47	0,06	0,14	< 1	морось	рис. 1, кривая 4
0,26	1,20	0,36	1,06	< 1	морось	рис. 1, кривая 3
0,20	1,12	0,36	1,06	< 1	морось	рис. 2, кривая 2
0,30	1,07	0,07	0,12	$(1-10) \times 10^{-3}$	туман	рис. 2, кривая 3

Анализ зависимости формы РПВ от скорости ветра V и ее перпендикулярной составляющей к трассе V_{\perp} в дожде и мороси при близких атмосферных условиях показал, что форма РПВ не зависит от V и V_{\perp} .

В тумане измерения проводились только 1 день, когда скорость ветра изменялась лишь от 0 до 1 м/с, поэтому зависимость формы РПВ от скорости ветра в тумане не изучалась.

Выбор распределений, пригодных для аппроксимации измеренных РПВ, проведен по известному методу плоскости моментов [4]. В этом методе выбор аппроксимирующего распределения выполняется в соответствии с местом измеренного в плоскости

(β_1, β_2) , где $\beta_1 = (\mu_3)^2/(\mu_2)^3$ – показатель асимметрии, $\beta_2 = \mu_4/(\mu_2)^3$ – показатель островершинности и μ_2 – дисперсия. На рис. 3 показаны положения в плоскости (β_1, β_2) полученных экспериментальных РПВ. Из рисунка следует неопределенность выбора распределения для аппроксимации, так как экспериментальные данные расположены в области между гамма-распределением 2, верхней границей области бета-распределения 3 и областью бета-распределения 4. В область, прилегающую к логарифмически-нормальному распределению, попадает слишком мало данных, чтобы говорить и его применимости к данной задаче.

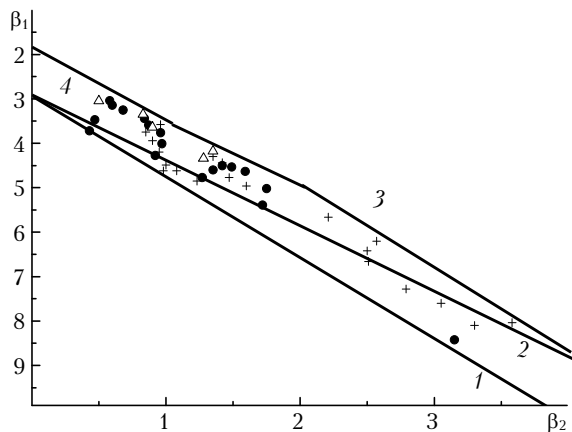


Рис. 3. Положение в плоскости (β_1, β_2) различных распределений вероятностей: 1 – логарифмически-нормальное; 2 – гамма-распределение; 3 – верхняя граница области бета-распределения; 4 – область бета-распределения; ● – дождь; + – морось; Δ – туман

Для уточнения выбора был использован критерий первого выхода из области сравнения (КПВОС) [2], который успешно применялся для снегопадов. Решение о пригодности аналитического распределения для аппроксимации (описания) экспериментальных РПВ принимается по первому выходу значения аналитического распределения за пределы области сравнения. Область сравнения формируется симметрично возле исследуемой зависимости при всех значениях так, чтобы формы ее верхней и нижней границ повторяли форму исследуемой зависимости.

Общий вертикальный размер области сравнения составляет $2\kappa\omega_i$, в положительной области определяется отношением $(\omega_i + \kappa\omega_i)$, в отрицательной – $(\omega_i - \kappa\omega_i)$. Коэффициент $\kappa = 0,15; 0,1; 0,075; 0,05$ – это количественная мера определения качества аппроксимации. Чем меньше κ , тем лучше аппроксимация распределения. КПВОС выполняется, когда модуль разности между значениями аналитического и экспериментального РПВ меньше половины вертикального размера области сравнения.

На рис. 3 показана только часть рассчитанных β_1 и β_2 . Не показаны те, которые совпадают или находятся вблизи приведенных значений. Как указывалось выше, большинство значений β_1 и β_2 находятся в области гамма-распределений 2 и бета-

распределений 4. Логарифмически-нормальное распределение 1 не используется в качестве аналитического, так как оно непригодно для аппроксимации экспериментальных РПВ [5]. Поэтому логично взять распределения 2 и 4 в качестве аппроксимирующих (аналитических).

На рис. 4 приведен пример применения КПВОС для дождя.

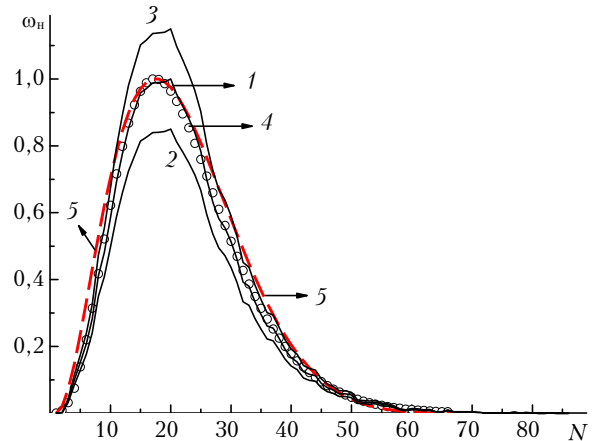


Рис. 4. Зависимость плотности вероятностей флуктуаций рассеянного излучения ω_n от номера канала N (дождь: $\sigma^2 = 0,13$; $\alpha = 1,04 \text{ км}^{-1}$; $d = 1-3 \text{ мм}$; $L = 130 \text{ м}$; расстояние от фотоприемника до оптической оси $\Delta l = 10 \text{ мм}$; $\kappa = 0,15$): 1 – экспериментальное РПВ; 2 и 3 – нижняя и верхняя границы области сравнения соответственно; 4 – аналитическое гамма-распределение (обозначено точками); 5 – бета-распределение (штриховая линия)

Видно, что значения гамма-распределения не выходят из области сравнения, а значения бета-распределения выходят. Следовательно, гамма-распределение описывает экспериментальное РПВ, а бета-распределение нет. По результатам аппроксимации экспериментальных распределений установлено, что большинство из них аппроксимируются обобщенным гамма-распределением, т.е. гамма-распределение аппроксимирует экспериментальное распределение наиболее точно.

Заключение

На основе проведенного анализа экспериментальных распределений плотности вероятностей установлено, что нормированные коэффициенты асимметрии и эксцесса увеличиваются с ростом коэффициента рассеяния в близких атмосферных условиях (значениях дисперсии и размера частиц осадков). С увеличением α форма РПВ становится более асимметричной и более островершинной. Нормированные коэффициенты μ_3 и μ_4 растут с диаметром (размером) частиц при близких атмосферных условиях (близких значениях коэффициента рассеяния). Коэффициенты μ_3 и μ_4 в дожде больше, а асимметрия РПВ сильнее, чем в мороси и тумане при близких значениях α . Форма РПВ не зависит от скорости ветра и ее перпендикулярной составляющей к трассе. Большинство РПВ аппроксимируются обобщенным гамма-распределением.

1. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф.* Распределение плотности вероятностей флуктуаций интенсивности рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка в приземной атмосфере в снегопадах // Изв. вуз. Физ. 2012. № 9/2. С. 110–112.
2. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф.* Пригодность критерия аппроксимации для распределения плотности вероятностей флуктуации излучения сфокусированного лазерного пучка в снегопадах // Оптика атмосфер. и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 98–99.
3. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф.* Флуктуации интенсивности рассеянного излучения фокусированного лазерного пучка в приземном слое атмосферы. Ч. 1. Снегопад // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 8. С. 689–693.
4. *Хан Г., Шапиро С.* Статистическая модель в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 443 с.
5. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф.* Распределение вероятностей флуктуаций интенсивности лазерного излучения в снегопадах // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 12. С. 1790–1798.

N.A. Vostretsov. The probability density of fluctuations of focused laser beam scattered radiation in the surface air layer under rain, drizzle, fog.

The results of experimental studies of the statistical parameters of fluctuations of focused laser beam radiation scattered in rain, drizzle, fog by precipitation particles along a 130 m atmospheric path are considered. The dependences of the probability density on precipitation form, scattering coefficient, and wind speed and its path-normal component are analyzed.