

Н.А. Вострецов, А.Ф. Жуков

Эмпирические соотношения для оценки дисперсии флуктуаций излучения расходящихся лазерных пучков в снегопадах

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 7.05.2004 г.

Предложены эмпирические соотношения для оценки дисперсии флуктуаций излучения расходящихся лазерных пучков в снегопадах, учитывающие длину трассы, коэффициент рассеяния, диаметр приемника и расходимость пучка.

Введение

В снегопадах флуктуации излучения лазерного пучка определяются совместным действием турбулентности атмосферного воздуха σ_t^2 и частиц снегопадов σ_c^2 . В этой статье рассматривается дисперсия σ^2 , обусловленная совместным действием турбулентности и осадков.

1. Методика и результаты измерений

Подробные сведения о наших экспериментах приведены в прежних работах, например в [1]. В предлагаемой работе мы изложим только основную суть измерений. Нами использовался узкий расходящийся пучок (УРП) от He-Ne ($\lambda = 0,63$ мкм) лазеров типа ЛГ-38А и ЛГН-215. Начальный радиус пучка α_0 , измеренный на уровне $1/e$, не более 3 мм, а полный угол расходимости θ равен 10^{-3} рад. Будем различать прямую трассу (без отражения от плоских зеркал) и «ломаную» (наш термин для трассы с отражением от плоских зеркал). В УРП измерения проведены в 80 снегопадах на прямых трассах $L = 37, 130$ и 964 м и на «ломаных» трассах $L = 130P$, где $n = 2 \div 7$ – число отражений от плоских зеркал. Диаметр приемника D был равен $0,5; 0,3$ или $0,1$ мм (в большинстве случаев $D = 0,1$ мм). Полный угол поля зрения приемника $\gamma = 2,7 \cdot 10^{-2}$ рад. Рассчитывалась относительная дисперсия $\sigma^2 = \langle (U - \langle U \rangle)^2 \rangle / \langle U \rangle^2$, где U – сигнал на выходе линейного усилителя, на вход которого подается сигнал с выхода фотоприемника; символ $\langle \rangle$ означает среднее во времени. Время осреднения ≈ 20 с. Погрешность измерения σ^2 в интервале изменения от $0,01$ до $1,0$ не превышала по нашим оценкам 15% . Ранее в [2–4] установлены три режима флуктуаций в УРП с ростом оптической толщи τ на измерительной трассе. Дисперсия σ^2 , а также уровень σ вначале растут, насыщаются, а затем уменьшаются. В дальнейшем их будем называть первым, вто-

рым и третьим режимами соответственно. В [2–4] установлено, что в УРП в первом и втором режимах флуктуаций σ^2 увеличиваются с ростом максимального размера частиц снегопада D_m . Такое поведение флуктуаций предсказано в [5]. Для УРП в [4] установлено уменьшение дисперсии флуктуаций с ростом диаметра приемника в первых двух режимах. Распределение частиц по размерам не измерялось, а только оценивался максимальный размер частиц D_m . Измеренные значения дисперсии σ^2 систематизировались по оптической толщине τ и максимальному размеру частиц D_m .

На рис. 1 приведены результаты измерения дисперсии на трассе длиной 964 м в УРП. Подчеркнем, что измерения, показанные на рис. 1, на прямой трассе выполнены без отражения от плоских зеркал.

При оптической толщине $\tau \leq 4,5$ дисперсия измерялась приемником $D = 0,1$ мм. Отношение сигнала S к шуму N S/N было не хуже 20 . При $\tau \geq 4,5$ для улучшения отношения S/N диаметр приемника был увеличен до $0,5$ мм. Измерения дисперсии проведены в 23 снегопадах, и получено 1800 значений дисперсии. Только часть из них показана на рис. 1. В первом и во втором режимах значительная часть измеренных значений дисперсии совпадает со значениями, приведенными на рис. 1. Особенно часто совпадение имеет место в первом режиме. Из рис. 1 явно видны большие различия в измеренной дисперсии при близких значениях оптической толщи. Как и ранее, мы считаем, что они вызваны существенным изменением размеров частиц снегопадов. Из рис. 1 следует, что максимальное значение дисперсии в крупнодисперсных снегопадах близко к единице. Это не аппаратный эффект, так как в сплошных хлопьях, когда $D_m \approx 7$ мм, средняя дисперсия [4] достигает значения $\approx 2,2$ и насыщается на уровне $\approx 1,2$ при $\tau = 2 \div 3$. Дисперсию больше единицы мы измеряли одним и тем же дисперсиомером на трассе 964 м в УРП без осадков (в солнечную погоду).

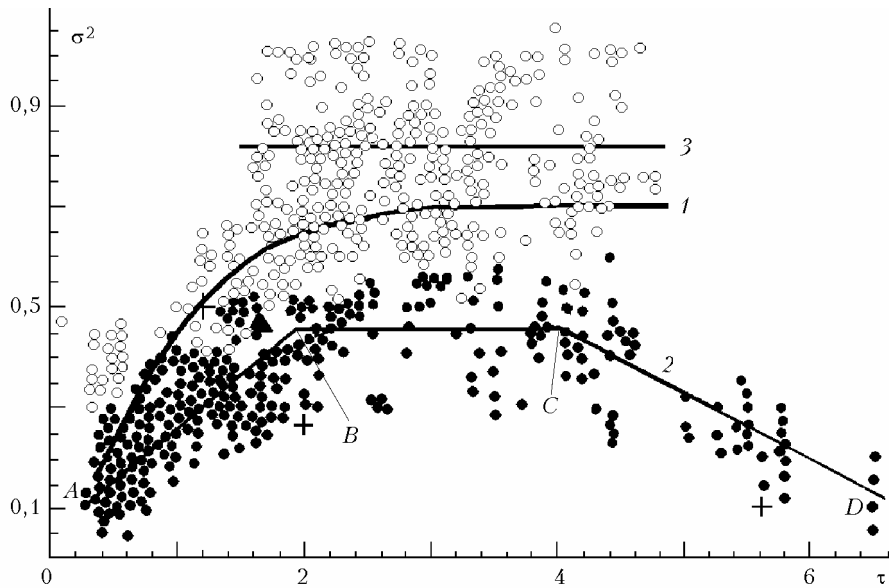


Рис. 1. Зависимость дисперсии σ^2 от оптической толщи τ : $\circ - D_m < 5$ мм; $\bullet - D_m \geq 5$ мм; $L = 964$ м

В [4] определены средние значения уровня σ^2 при $\tau \leq 4,5$ по всем измерениям без учета сплошных хлопьев при $D = 0,1$ мм для УРП и предложено соотношение, связывающее σ^2 и τ , которое мы здесь преобразуем для дисперсии. В итоге имеем

$$\bar{\sigma}^2(\tau) \cong 0,7 [1 - \exp(-1,65\tau)]^2. \quad (1)$$

Ему соответствует кривая 1 на рис. 1. Отдельно подчеркнем, что соотношение (1) аппроксимирует измеренные значения дисперсии в УРП на 11 трассах в 80 снегопадах, включая ломаные трассы. Кривая 1 (рис. 1) плохо описывает отдельные измерения. Отклонения от нее могут быть больше чем в два раза, например при $\tau \approx 2$. Логично искать лучшее описание результатов эксперимента. Для этого все измерения были разделены на две категории по максимальному размеру частиц. Снегопады с $D_m < 5$ мм будем называть мелкодисперсными, а с $D_m \geq 5$ мм – крупнодисперсными. В мелкодисперсных снегопадах хорошо видны уже упомянутые выше три режима флуктуаций.

Физические процессы, определяющие наличие трех различных режимов флуктуаций, описаны в [5]. Рост дисперсии в первом режиме вызван увеличением числа частиц снегопадов, насыщение во втором режиме – взаимной экранировкой между частицами (о чем впервые сказано в [6]), затухание дисперсии в третьем режиме – увеличением роли в среднем сигнале слабо флуктуирующего преломленного излучения [3]. Первопричина флуктуаций принимаемого сигнала обусловлена движением частиц осадков [7].

В каждом из режимов зависимость дисперсии от оптической толщи в мелкодисперсных снегопадах аппроксимируем «ломаной» прямой 2 (см. рис. 1). Границы второго режима в мелкодисперсных снегопадах определим по величине насыщения ($\sigma_{н,2}^2 \approx 0,45$) и погрешности измерения дисперсии. Нижнюю и верхнюю границы второго режима

в мелкодисперсных снегопадах определим по «ломаной» прямой 2 при тех значениях оптической толщи, в которых значения дисперсии отличаются на 30% (2×15) от «насыщенного» $\sigma_{н,2}^2$, т.е. граничное значение $\sigma_{гр,2}^2$ приблизительно равно 0,30. В этом случае нижняя граница второго режима достигается при $\tau \approx 1,2$, а верхняя при $\tau \approx 5,1$.

Соотношения, описывающие зависимость $\sigma^2(\tau) = f(\tau)$, в каждом из режимов имеют вид:

режим 1 (прямая AB)

$$\sigma^2(\tau) = 0,06 + 0,2\tau \quad \text{при } 0,2 \leq \tau \leq 1,9, \quad (2)$$

режим 2 (прямая BC)

$$\sigma^2(\tau) \cong 0,45 \quad \text{при } 1,9 \leq \tau \leq 4,0, \quad (3)$$

режим 3 (прямая CD)

$$\sigma^2(\tau) = 1,0 - 0,13\tau \quad \text{при } 4,0 \leq \tau \leq 6,5. \quad (4)$$

Максимальная относительная погрешность в описании экспериментальных результатов прямой AB не хуже 40, BC – 70 и CD – 120%. Измеренные значения дисперсий, имеющие максимальные погрешности, при представлении зависимости «ломаной» прямой отмечены крестиками. Расчет максимальной относительной погрешности проводился по соотношению $(|x_2 - x_1|/x_1) \cdot 100\%$, где x_1 – измеренное значение дисперсии, x_2 – рассчитанные значения дисперсии по (2)–(4).

Дисперсию в крупнодисперсных снегопадах во втором режиме (в режиме насыщения) аппроксимируем прямой 3 (см. рис. 1):

$$\sigma^2 \cong 0,80 \quad \text{при } 1,6 \leq \tau \leq 4,8, \quad (5)$$

которая близко совпадает с результатами [2]. Максимальная относительная погрешность, рассчитанная, как и раньше, составляет не более 80% для значения дисперсии, отмеченного треугольником возле буквы B.

2. Зависимость дисперсии σ^2 от угла расходимости пучка θ

Только в первом режиме и в мелкодисперсных снегопадах были сделаны измерения в расходящихся пучках при увеличении угла их расходимости. На рис. 2 показана зависимость дисперсии σ^2 от логарифма угла расходимости θ узкого лазерного пучка в мелкодисперсных снегопадах. В этих измерениях $\tau \approx 0,1$, $L = 130$ м, $D_m = 1 \div 3$ мм, $\theta = 10^{-3} \div 8,3 \cdot 10^{-2}$.

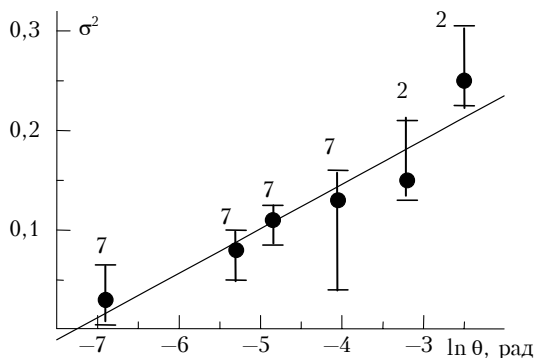


Рис. 2. Зависимость дисперсии σ^2 от угла расходимости пучка θ ; $L = 130$ м. Цифры 7 и 2 указывают количество снегопадов

Цифрами отмечено количество снегопадов, в которых проведены измерения. При всех θ в каждом снегопаде проведено не менее десяти измерений дисперсии. Вертикальными линиями показан диапазон изменения σ^2 по всем имеющимся данным, точками — средние значения. Расходимость лазерного пучка от He-Ne-лазера изменялась путем применения сменных линз с различными фокусными расстояниями, устанавливаемых на оси пучка. Левая точка на рис. 2 соответствует УРП. Средняя дисперсия линейно увеличивается с ростом $\ln \theta$. Увеличение $\ln \theta$ при $-7 \leq \ln \theta \leq -2,5$ рад описывается зависимостью вида

$$\sigma,^{-2} = 0,30 + 0,04 \ln \theta. \quad (6)$$

Увеличение $\sigma,^{-2}$ с ростом θ , по-видимому, прекратится, когда лазерный пучок приблизится к сферической волне.

3. Осредняющее действие приемной апертуры

Оценку влияния диаметра приемника на дисперсию проведем с помощью функции осреднения [8]:

$$G(R) = \frac{\{ \langle P^2 \rangle / \langle P \rangle^2 - 1 \} \{ \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1 \}^{-1}}{\sigma_I,^2} = \sigma_P,^2$$

которая показывает, во сколько раз $\sigma_P,^2$ — относительная дисперсия флуктуаций потока P , прошедшего через апертуру радиусом R ($D = 2R$), меньше, чем $\sigma_I,^2$ — относительная дисперсия флуктуаций интенсивности принимаемой волны, т.е. когда $R \ll R_k$, где R_k — пространственный радиус корреляции флуктуаций интенсивности. Так как $D = 0,1$ мм,

то мы измеряем флуктуации интенсивности, ибо измерения проводятся в первом режиме, где R_k приближенно равно $D_m/2$ [4].

Среднее значение функции $G,^{-}$ линейно уменьшается с ростом $\ln D$. Подчеркнем, что функция $G(D/2)$ получена по измерениям на ломаной трассе $L = 260 = (130 \times 2)$ м в мелкодисперсных снегопадах [4]. На рис. 3 прямой линии соответствует соотношение

$$G,^{-}(D/2) = 0,6 - 0,15 \ln D, \quad (7)$$

когда $-2,3 \leq \ln D \leq 3,2$ мм.

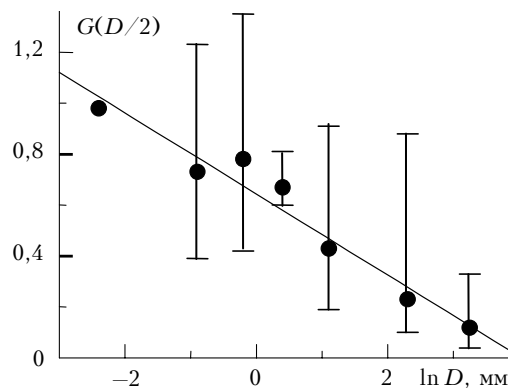


Рис. 3. Функция усреднения приемной апертуры: $L = 260$ м; $D_m = 1 \div 3$ мм; $\tau \approx 0,1 \div 0,5$

Как и следовало ожидать, измеренная дисперсия $\sigma,^{-2}$ уменьшается с ростом диаметра приемника:

$$\sigma,^{-2} = \sigma_{0,1},^2 G,^{-}(D/2). \quad (8)$$

4. Оценка дисперсии по метеорологической дальности видимости

Обычно на практике для характеристики оптических атмосферных условий определяют метеорологическую дальность видимости S_m . Будем далее полагать, что точно известна длина трассы L . Зная S_m , легко найти объемный коэффициент рассеяния α (км^{-1}) для видимого излучения по соотношению $\alpha = 3,9/S_m$ и оптическую толщину по $\tau = \alpha L$. При известных L и α (или S_m) для мелкодисперсного снега ($D_m < 5$ мм), $D = 0,1$ мм и оптической толщины ($\tau \leq 0,6$ — первый режим) оценку дисперсии можно провести по соотношению, полученному в [9]:

$$\sigma^2 \approx 0,3L\alpha \approx 1,2L/S_m. \quad (9)$$

Соотношение (9) выполняется для УРП при $L = 14 \div 964$ м и вышеотмеченных условиях. Тогда по [9] максимальная относительная погрешность при использовании (9) не более 40%.

5. Примеры оценки дисперсии

Оценку σ^2 можно провести по соотношениям (1)–(9). Оценка σ^2 может быть полезной при наведе-

нии управляемой ракеты на цель по лазерному пучку в снегопадах [10]. Особо подчеркнем, что в снегопадах первостепенно ослабление лазерного пучка, а флуктуации его излучения хотя и имеют место всегда, но они гораздо меньше максимальных турбулентных флуктуаций [1] и значительно уменьшаются при увеличении диаметра приемника. Из вышеизложенного следует, что для оценки σ^2 необходимо знать D_m и τ . Предполагается в дневное время вместо τ оценивать S_m по визуальным наблюдениям, а в ночное время по прозрачности атмосферы.

Приведем примеры оценки σ^2 для расходящихся пучков в некоторых конкретных случаях. Пусть $S_m = 1$ км; $L = 1$ км; $D = 0,1$ мм; $\theta = 10^{-3}$ рад, $D_m < 5$ мм, т.е. выпадает мелкодисперсный снег. Тогда $\alpha = 3,9$ ($\tau = 3,9$) и реализуется второй режим, в котором $\sigma^2 \approx 0,45$. При $S_m = 0,5$ км и при тех же L , D , θ и D_m ($\tau \approx 8$) реализуется третий режим, для которого при $\tau \approx 8$ характерно малое значение σ^2 ($\sigma^2 \leq 0,1$). Если же $S_m \approx 3$ км и те же L , D , θ и D_m , то $\alpha \approx 1,3$ км $^{-1}$ ($\tau \approx 1,3$), т.е. реализуется первый режим. Тогда можно использовать соотношение (2), по которому $\sigma^2 \approx 0,3$. Если же $S_m \approx 7$ км, то $\alpha \approx 0,5$ ($\tau \approx 0,5$). Тогда по (2) $\sigma^2 \approx 0,16$, а по (9) $\approx 0,17$. Значит, оценки σ^2 по (2) и (9) весьма близки. Если же выпадает крупнодисперсный снег ($D_m \geq 5$ мм), то оценку σ^2 мы сможем проводить только во втором режиме по соотношению (5). Подчеркнем, что влияние угла расходимости узкого лазерного пучка и диаметра приемника исследовано при весьма малых значениях оптической толщи.

Далее оценим влияние угла расходимости пучка. Пусть $\tau \approx 0,5$, тогда по (2) получаем $\sigma^2 \approx 0,16$. При увеличении расходимости пучка дисперсия увеличивается, например при $\ln \theta = -4$ ($\theta = 1,85 \cdot 10^{-2}$ рад) она в соответствии с (6) возрастает в 4,7 раза по сравнению с УРП, т.е. $\sigma^2 \approx 0,75$.

С ростом диаметра приемника дисперсия уменьшается и при $\ln D = 2,3$ ($D = 10$ мм) согласно (7) $G(D/2) = 0,27$. В соответствии с (8) получим $\sigma^2 = 0,85 \times 0,27 = 0,20$. Это и есть оценка дисперсии в мелкодисперсном снегопаде при $\tau \approx 0,5$, $\theta = 1,8 \cdot 10^{-2}$ рад, $D = 10$ мм.

Основные выводы

На прямой трассе длиной, близкой к одному километру, при приемнике весьма малого диаметра мы получили эмпирические соотношения, пригодные для оценки дисперсии в УРП в мелкодисперсном снегопаде в зависимости от оптической толщи в трех режимах, а также эмпирическое соотношение для дисперсии в крупнодисперсном снегопаде в зависимости от D_m в режиме насыщения. Влияние

максимального размера частиц снегопада на дисперсию в УРП можно ослабить, если начальный диаметр пучка взять больше размеров частиц снегопада. Увеличение дисперсии с ростом расходимости пучка установлено нами впервые экспериментально при малых значениях оптической толщи. Оно может оказаться не действительным при увеличении замутнения атмосферы снегопадом, так что не стоит автоматически применять эту зависимость при больших замутнениях. Для этого требуются соответствующие экспериментальные данные.

Уменьшение дисперсии с ростом диаметра приемника получено нами при малых значениях оптической толщи. С увеличением оптической толщи апертурный эффект также будет иметь место. Но количественное соотношение для него будет отличаться от приведенного здесь, так как с ростом оптической толщи из теоретических расчетов ожидается уменьшение пространственного радиуса корреляции интенсивности.

Благодарим Р.Ш. Цыпка и А.Г. Борового за постоянное внимание к результатам исследования.

1. Жуков А.Ф., Вострецов Н.А. О флуктуациях излучения лазерного пучка в приземной атмосфере при снегопадах // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 12. С. 1089–1098.
2. Жуков А.Ф. Об уровне флуктуаций интенсивности узкого расходящегося пучка в снегопаде // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 1. С. 33–36.
3. Боровой А.Г., Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Каргин Б.А., Пригарин С.М. Затухание флуктуаций при распространении лазерных пучков в снегопадах // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 227–233.
4. Жуков А.Ф., Вострецов Н.А. Влияние диаметра приемника на флуктуации светового потока при распространении узкого расходящегося пучка в снегопаде. 1. Уровень флуктуаций // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9. № 8. С. 1058–1068.
5. Боровой А.Г. Распространение света в осадках // Изв. вузов. Радиофиз. 1982. Т. 25. № 4. С. 391–409.
6. Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Гологузов В.Е. О высокочастотных флуктуациях прозрачности атмосферы при осадках // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1971. Т. 7. № 7. С. 804–807.
7. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 368 с.
8. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.
9. Вострецов Н.А., Жуков А.Ф. О флуктуациях лазерного сигнала в атмосферных осадках // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 42–43.
10. Шипунов А.Г., Семашин Е.Н. Оптические линии связи малогабаритных управляемых ракет в условиях действия помех двигательных установок. М.: ТНЦ Информатика, 2000. 180 с.

N.A. Vostretsov, A.F. Zhukov. Empirical equations for estimating the variance of radiation fluctuations in divergent laser beams in snowfalls.

Empirical equations are proposed for estimating the variance of radiation fluctuations in divergent laser beams in snowfalls with allowance for the path length, scattering coefficient, detector diameter, and beam divergence.