

Н.А. Вострецов, А.Ф. Жуков

О флуктуациях лазерного сигнала в атмосферных осадках

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.

Анализируется индекс мерцания лазерного излучения узкого расходящегося пучка в снегопадах в зависимости от коэффициента рассеяния на трассах длиной от 14 до 1928 м. Показано, что характер влияния коэффициента рассеяния на индекс мерцания зависит от длины трассы и максимальных размеров частиц снегопада.

Введение

Атмосферные осадки – частое явление. При выпадении осадков происходят оптически важные изменения характеристик приземного слоя атмосферы, с которыми необходимо считаться разработчикам всепогодных лазерных систем. Частицы осадков сильно рассеивают оптическое излучение, и поэтому средний лазерный сигнал уменьшается. Это неоднократно наблюдалось в снегопадах [1–3] и, несомненно, имеет первостепенное значение для практики.

Осадки обуславливают также некоторые отличительные свойства временных флуктуаций принимаемого лазерного сигнала. В первых [4] и последующих за ними измерениях с помощью малоинерционной аппаратуры [5–8] установлено совместное влияние на флуктуационные характеристики турбулентности атмосферного воздуха и частиц осадков, что следует из временных спектров флуктуаций с двумя максимумами. Совместное влияние, естественно, сказывается и на других характеристиках флуктуаций, но его не удается выделить в эксперименте. Более того, не всегда можно определить турбулентную составляющую в измеренном индексе мерцания, так как спектр не во всех случаях имеет выраженный минимум между максимумами. Влияние турбулентности уменьшается с ростом оптической толщи осадков [7–9].

Информацию о различных теоретических подходах к обсуждаемой проблеме можно найти в работах [10–12] и ссылках к ним. В [10–12] предложена во многом приемлемая для осадков качественная модель флуктуаций.

Не углубляясь в сравнительный анализ опубликованных подходов, на основе известных фактов из различных публикаций можно вполне обоснованно считать, что это проблема в целом далека от решения, поскольку не определены уровень оптической турбулентности (C_n^2) и значения внутреннего масштаба турбулентности (l_0) в осадках, которые существенно влияют на индекс мерцания лазерного излучения без осадков [13, 14]. Имеются и другие нерешенные вопросы, например каково влияние на флуктуации в осадках когерентности излучения, которое уменьшается при рассеянии.

В данной статье поставлена цель проанализировать прежние результаты измерений по величине коэффициента рассеяния, т.е. в близких условиях распространения. Эта цель фактически не достигнута в [15, 16], в чем нетрудно убедиться. Достаточно уточнить, что в [15, 16] сравниваются характеристики, измеренные при близких значениях максимального размера частиц снегопада и оптической толщи по всей трассе. Но при разной длине трассы равное (близкое) значение τ можно получить при существенно отличающихся значениях интенсивности (коэффициента рассеяния) осадков. А это означает, что в данном случае проводится сравнение флуктуаций при разных условиях распространения. Следовательно, цель статьи не случайна, ибо логично искать для сравнения иные пути, предложенные ниже.

1. Методика измерений и систематизации экспериментальных результатов

Методика измерений ранее подробно описана в работах [6–8, 15, 16]. Для удобства восприятия кратко изложим основную суть измерений.

Измерения проводились на трассах от 14 до 1928 м в узком расходящемся пучке (УРП), представляющем собой световой пучок из выхода лазера. Его параметры определены техническими характеристиками используемых лазеров ЛГ-38А и ЛГН-215 (ЛГН-215: длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм, начальный диаметр пучка меньше или равен 4 мм, энергетическая расходимость лазерного излучения равна $5 \cdot 10^{-4}$ рад). Параметры световых пучков ЛГ-38А и ЛГН-215 близки.

Прием излучения проводился на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-38). Перед ним устанавливалась диафрагма 0,1 мм. Полный угол поля зрения фотоприемника равнялся $3,7 \cdot 10^{-2}$ рад (около 2°).

В данной статье систематизация индекса мерцания β^2 (нормированной дисперсии флуктуаций интенсивности) проведена по значениям коэффициента рассеяния α . Здесь $\beta^2 = \langle (U - \bar{U})^2 \rangle / \bar{U}^2$, U – лазерный сигнал, \bar{U} – его среднее значение и символ $\langle \rangle$ – усред-

нение по времени (20 с). Коэффициент рассеяния α , км^{-1} , рассчитывался по значениям оптической толщи τ и длине трассы L ($\alpha = \tau/L$). Считалось, что коэффициент поглощения оптического излучения в осадках пренебрежительно мал [17]. Как и ранее, в [15, 16] оценивался максимальный размер частиц снегопада D_m .

2. Результаты измерений

На рис. 1 приведена зависимость среднего индекса мерцания $\bar{\beta}^2$ от коэффициента рассеяния α на двух трассах длиной 130 и 964 м в УРП при $D_m = 1 \div 3$ мм.

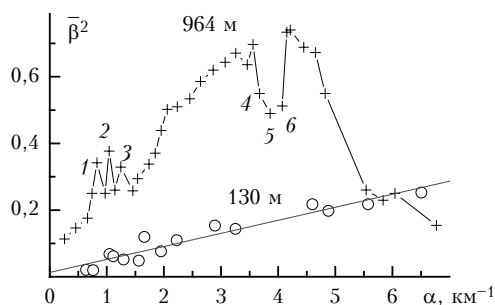


Рис. 1

Средние значения $\bar{\beta}^2$ рассчитывались с интервалом $0,1 \text{ км}^{-1}$ для α по четырем и более значениям β^2 .

Из рис. 1 видно, что с ростом α индекс мерцания $\bar{\beta}^2$ по-разному зависит от α на различных трассах. На трассе 130 м $\bar{\beta}^2$ линейно увеличивается с ростом α и описывается зависимостью

$$\bar{\beta}^2 = (0,013 \pm 0,009) + (0,039 \pm 0,003)\alpha$$

$$\text{при } \alpha = 0,5 \div 10 \text{ км}^{-1}.$$

Часть зависимости $\bar{\beta}^2 = \bar{\beta}^2(\alpha)$ для трассы 130 м при изменении α от $6,5$ до 10 км^{-1} не приведена на рис. 1. На трассе 964 м флуктуации с ростом α вначале растут, насыщаются, а затем затухают. Иными словами, зависимость $\bar{\beta}^2 = \bar{\beta}^2(\alpha)$ при $L = 964$ м имеет три характерных участка (режима) в диапазоне изменения α от $0,25$ до 7 км^{-1} . Локальные отклонения в зависимости $\bar{\beta}^2 = \bar{\beta}^2(\alpha)$ вызваны тем, что измерения β^2 в точках 1, 2, 3 проведены, когда максимальный размер частиц снегопада D_m мало изменялся и был близок к 3 мм, а точки 4, 5, 6 примерно к 1 мм.

Важны и другие детали в обсуждаемой зависимости. Рост $\bar{\beta}^2$ увеличивается с ростом длины трассы (см. рис. 1). Отношение $\bar{\beta}^2/L$ (рис. 2) линейно увеличивается с ростом α и описывается зависимостью

$$\bar{\beta}^2/L = (0,015 \pm 0,004) + (0,312 \pm 0,02)\alpha.$$

С увеличением максимальных размеров частиц снегопада $\bar{\beta}^2$ увеличивается (рис. 3). Для случая выпадения хлопьев ($D_m \geq 5$ мм) нами выделены два типа

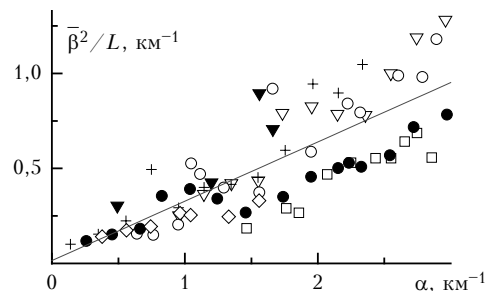


Рис. 2. Зависимость отношения $\bar{\beta}^2/L$ от коэффициента рассеяния α в узком расходящемся пучке при $D_m = 1 \div 3$ мм и различных длинах трасс: \square - 14; ∇ - 37; $-$ 130; $+$ - 260; $-$ 650; $-$ 964; \diamond - 1928 м

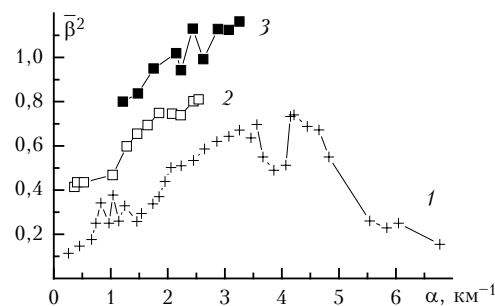


Рис. 3. Зависимость среднего измеренного индекса мерцания $\bar{\beta}^2$ от коэффициента рассеяния α в узком расходящемся пучке на трассе длиной 964 м при максимальном размере частиц снегопада: $D_m = 1 \div 3$ мм (1); $5 \div 10$ мм (2) - хлопья; $5 \div 20$ мм (3) - сплошные хлопья

осадков. Если хлопья выпадают совместно с меньшими частицами, то это хлопья, а если выпадают одни хлопья, то это сплошные хлопья. Эти особенности качественно согласуются с результатами теоретических работ [10–12] и результатами работ [15, 16], где экспериментальные значения β^2 систематизированы по значениям оптической толщи для всей трассы в выделенных диапазонах для D_m .

В итоге установлено, что характер влияния коэффициента рассеяния на индекс мерцания зависит от длины трассы и максимального размера частиц снегопада, что необходимо учесть в разработке модели флуктуаций излучения лазерного пучка в снегопаде.

Авторы благодарят Р.Ш. Цыпка за предложенную идею исследования.

- Hutt D.L., Bissohette L.R., Cernain D.St., Oman J. Extinction of visible and infrared beams by falling snow // Appl. Opt. 1992. V. 31. № 24. P. 5121–5132.
- Ужегов В.Н., Пхалагов Ю.А., Щелканов Н.Н. Исследования аэрозольного ослабления оптического излучения в зимних условиях // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1067–1076.
- Зуев В.Е., Кабанов М.В. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере (в условиях помех). М.: Сов. радио, 1977. 358 с.
- Гурвич А.С., Покасов В.В. О спектре флуктуаций лазерного излучения в турбулентной атмосфере в атмосферных осадках // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1972. Т. 8. № 8. С. 878–879.

5. *Ting-i Wang, Clifford S.F.* Use of rainfall-induced optical scintillations to measure averaged rain parameters // *J. Opt. Soc. Amer.* 1975. V. 65. № 8. P. 927–937.
6. *Галахов В.Н., Ефремов А.В., Жуков А.Ф., Рейно В.В., Цвык Р.Ш.* Экспериментальное исследование флуктуаций интенсивности оптического излучения, распространяющегося в приземном слое атмосферы при осадках // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1976. Т. 12. № 13. С. 1251–1260.
7. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Кабанов М.В., Цвык Р.Ш.* Спектры флуктуаций интенсивности лазерных пучков в атмосферных осадках // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1984. Т. 20. № 7. С. 581–588.
8. *Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Кабанов М.В., Цвык Р.Ш.* Статистические характеристики флуктуаций интенсивности лазерного пучка в снегопаде. Препр. / Институт оптики атмосферы (Томск). 1982. № 13. 50 с.
9. *Жуков А.Ф., Цвык Р.Ш.* Флуктуации интенсивности лазерного пучка в снегопаде // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1980. Т. 16. № 2. С. 164–171.
10. *Боровой А.Г.* Распространение света в осадках // *Изв. вузов СССР. Радиофиз.* 1982. Т. 25. № 4. С. 391–400.
11. *Borovoi A.G., Patrushev G.Ya., Petrov A.I.* Laser beam propagation through the turbulent atmosphere with precipitation // *Appl. Opt.* 1988. V. 27. № 17. P. 3704–3714.
12. *Боровой А.Г., Вострецов Н.А., Жуков А.Ф., Карзин Б.А., Пригарин С.М.* Затухание флуктуаций при распространении лазерных пучков в снегопадах // *Оптика атмосфер. и океана.* 1997. Т. 10. № 3. С. 227–233.
13. *Consortini A., Cochetti F., Churnside S.H., Hill R.J.* Inner scale effect on irradiance variance measured for weak – to-strong atmospheric scintillation // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1993. V. 10. № 11. P. 2354–2362.
14. *Hill R.J., Ochs G.R.* Inner-scale dependence of scintillation variances measured in weak scintillation // *J. Opt. Soc. Amer. A.* 1992. V. 9. № 8. P. 1406–1411.
15. *Жуков А.Ф.* Об уровне флуктуаций интенсивности узкого расходящегося лазерного пучка в снегопаде // *Оптика атмосфер. и океана.* 1993. Т. 6. № 1. С. 33–36.
16. *Жуков А.Ф., Вострецов Н.А.* Влияние диаметра приемника на флуктуации светового потока при распространении узкого расходящегося лазерного пучка в снегопаде. 1. Уровень флуктуаций // *Оптика атмосфер. и океана.* 1996. Т. 9. № 8. С. 1058–1068.
17. *Зуев В.Е.* Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. радио, 1966. 318 с.

N.A. Vostretsov, A.F. Zhukov. **On scintillations of laser signal in atmospheric precipitation.**

The scintillation index of laser radiation of a narrow divergent beam in snowfall is analyzed depending on the scattering coefficient at paths from 14 to 1928 m long. It is shown that the character of influence of the scattering coefficient on the scintillation index depends on the path length and the maximal size of snow particles.