

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 621.375.826:551.578.4

А.Ф. Жуков

ОБ УРОВНЕ ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ УЗКОГО РАСХОДЯЩЕГОСЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА В СНЕГОПАДЕ

Приведены результаты измерений флуктуации интенсивности узкого расходящегося лазерного пучка в снегопаде. Установлено, что уровень флуктуации интенсивности вначале растет, насыщается, а затем уменьшается с увеличением оптической толщи снегопада. Флуктуации увеличиваются с ростом максимального размера снежных частиц.

1. Экспериментальные данные [1] показывают, что в узком расходящемся пучке при выпадении снега уровень флуктуации интенсивности σ_s с увеличением оптической толщи τ вначале растет, а затем стремится к насыщению на уровне $\sigma_{сн}$, зависящему от максимального размера частиц (D_m). Это качественно согласуется с предположениями теоретической работы [2], в которой более того предсказывается также уменьшение флуктуации интенсивности с дальнейшим ростом τ . Однако в [2] зависимость $\sigma_s = f(\tau)$ аналитически не определена. В [1] предложены эмпирические соотношения между σ_s и τ в двух диапазонах изменений D_m . Они получены путем аппроксимации кривых, полученных на отдельных трассах различной длины.

В последнее время нами были проведены дополнительные измерения по той же методике и с той же аппаратурой, что и в [1], на трассах длиной 964 и (2×964) м. На трассе (2×964) м измерения проводились по схеме с отражением пучка от плоского зеркала диаметром 40 см. В отличие от [1] для установления зависимости $\sigma_s = f(\tau)$ осреднение по τ при выбранных D_m проведено по всей совокупности данных (т.е. без разделения по длине трассы).

Результаты такого анализа составляют предмет данной статьи. Анализ проводился по трем тысячам пар значений σ_s и τ . На рис. 1 приведены усредненные, по всем трассам значения ($\bar{\sigma}_s$) уровня флуктуации в двух диапазонах изменения максимального размера частиц $D_m = (1-3)$ мм и $D_m > 3$ мм. Во второй диапазон были также включены случаи выпадения отдельных хлопьев. На этом же рисунке для сравнения приведены ранее опубликованные в [1] данные, полученные на трассе 650 м при выпадении «сплошных» хлопьев. В таблице показаны результаты расчета $\bar{\sigma}_s$ и τ , среднеквадратического отклонения ($\Delta\sigma_s$) для σ_s , а также число осредненных значений (n) в каждом интервале по τ . Осреднение по τ проводилось с шагом 0,1.

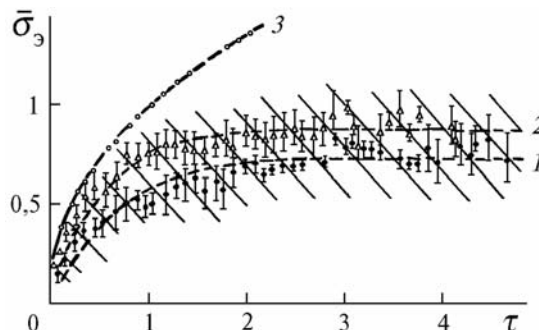


Рис. 1. Усредненные по всем трассам значения уровня флуктуации $\bar{\sigma}_s$ для различных значений оптической толщи τ при трех значениях максимального размера снежных частиц D_m , 1 — $D_m = (1-3)$ мм; 2 — $D_m > 3$ мм; 3 — $D_m = 7$ мм на трассе длиной 650 м

Средние значения σ , по всем трассам для УРП в снегопаде: τ – оптическая толщина, n – количество точек, $\Delta\sigma_3$ – среднеквадратическое значение для σ_3

σ	τ	n	$\Delta\sigma_3$	σ	τ	n	$\Delta\sigma_3$
При $D_m = 1-3$ мм				При $D_m > 3$ мм			
0,14	0,08	10	0,04	0,26	0,09	1	–
0,19	0,14	30	0,06	0,35	0,17	21	0,04
0,31	0,25	50	0,05	0,44	0,23	50	0,05
0,37	0,34	69	0,03	0,54	0,34	134	0,09
0,38	0,44	85	0,05	0,59	0,44	72	0,07
0,40	0,53	62	0,08	0,57	0,55	243	0,08
0,46	0,66	77	0,09	0,64	0,65	75	0,10
0,51	0,75	134	0,08	0,76	0,75	44	0,06
0,52	0,86	31	0,05	0,75	0,86	66	0,06
0,49	0,95	25	0,06	0,76	0,97	72	0,07
0,51	1,05	51	0,07	0,77	1,06	51	0,10
0,55	1,16	49	0,09	0,81	1,16	51	0,08
0,60	1,26	43	0,07	0,82	1,25	46	0,08
0,61	1,35	46	0,08	0,79	1,34	21	0,11
0,64	1,45	43	0,08	0,78	1,44	43	0,09
0,57	1,53	51	0,08	0,78	1,55	35	0,08
0,62	1,66	60	0,10	0,82	1,66	29	0,07
0,59	1,74	46	0,06	0,84	1,75	56	0,09
0,67	1,84	10	0,09	0,80	1,84	14	0,09
0,70	1,96	29	0,04	0,86	1,97	32	0,07
0,71	2,08	47	0,07	0,86	2,07	48	0,09
0,55	2,15	10	0,02	0,84	2,16	43	0,08
0,68	2,22	24	0,03	0,87	2,25	53	0,09
0,71	2,34	18	0,03	0,89	2,33	84	0,09
0,71	2,45	23	0,01	0,91	2,46	37	0,08
0,71	2,54	15	0,03	0,86	2,52	40	0,08
0,73	2,62	1	–	0,87	2,64	17	0,13
0,74	2,79	5	0,01	0,93	2,75	22	0,09
0,86	2,87	6	0,07	0,96	2,87	13	0,13
0,81	2,96	25	0,06	1,06	2,96	12	0,02
0,84	3,04	15	0,06	0,93	3,05	13	0,07
0,80	3,14	18	0,05	0,83	3,14	19	0,12
0,80	3,24	13	0,06	0,89	3,33	19	0,08
0,78	3,33	24	0,07	0,95	3,43	18	0,04
0,87	3,43	2	–	1,01	3,53	12	0,08
0,76	3,53	5	0,08	0,98	3,63	3	0,01
0,68	3,63	3	0,02	0,98	3,73	5	0,01
0,74	3,72	3	0,14	0,87	3,82	2	–
0,82	3,83	7	0,14	0,88	4,00	3	–
0,75	3,92	4	0,12	0,81	4,17	21	0,05
0,93	4,06	9	0,10	0,92	4,76	2	–
0,84	4,15	4	0,12	0,80	4,30	19	0,05
0,79	4,25	6	0,13	0,83	4,92	2	–
0,86	4,30	3	0,08	0,81	5,08	2	–
0,77	4,41	6	0,13				
0,98	4,53	4	0,04				
0,73	4,62	16	0,14				
0,93	4,78	3	0,06				

Как видно из таблицы, число пар σ_3 и τ явно не одинаково для разных τ , но все-таки при $\tau < 3,5$ их вполне достаточно для полноценного осреднения. Подбор аппроксимационных зависимостей при разных D_m проведен по их наилучшему совпадению с экспериментальными точками. При этом цель состояла еще и в том, чтобы найти зависимости единого вида для разных D_m .

Из рис. 1 видно, что при $\tau = 0,6 \div 4,0$ уровень флуктуации при таком разбиении D_m неплохо аппроксимируется довольно простой по структуре зависимостью

$$\sigma_3 = \sigma_H [1 - \exp(-2\sigma_H \tau)].$$

При $D_m > 3$ мм а равно 0,9, а при $D_m = (1-3)$ мм σ_n равно 0,75. Кривая 3 на рис. 1 хорошо описывается зависимостью $\sigma_3 = \sqrt{\tau}$. Таков главный итог этой работы.

2. В одном из снегопадов нам представилась возможность провести измерения в диапазоне τ от 3,5 до 7. С целью увеличения отношения сигнал/шум мы преднамеренно увеличили диаметр приемника с 0,3 мм до 0,5 мм. Во время этих измерений также проводились измерения на трассе (2×130) м в таком же узком расходящемся пучке при диаметре приемника $D_{пр} = 0,3$ мм. Такое небольшое увеличение приемника на трассе 964 м не привело к заметному осреднению флуктуации. Это следует из сравнения спектров флуктуации на трассе 964 м при двух диаметрах приемника. Более того, уровень флуктуации при $\tau = 3,5-5$ в другом снегопаде с близким значением $D_m (D_m = (1-3)$ мм) находился в том же диапазоне значений, хотя измерения в нем проводились при $D_{пр} = 0,3$ мм.

Из рис. 2 хорошо видно предсказываемое в [2] уменьшение σ_3 с ростом τ . По нашим данным, при $\tau = 3,5 \div 6,5$ оно описывается зависимостью $\sigma_3 = 1,13 - 0,11 \tau$.

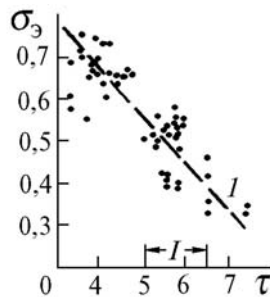


Рис. 2. Зависимость уровня флуктуации σ от (τ) при $\tau > 3,5$, $D_m = (1-3)$ мм на трассе длиной 964 м. Диаметр приемника 0,5 мм. При $\tau = 5,0 \div 6,5$ ($L = 964$ м) проводились измерения также на трассе (2×130) м

Важно и то, что значения σ_3 на трассе 964 и 260 м близки между собой (среднее значение отношения σ_3 (260 м) к σ_3 (964 м) равно 0,96 при $\tau = 5,1 \div 6,5$). Следует учесть еще и то, что спектры флуктуации $U(f)$ мало отличаются между собой, если учесть разные значения перпендикулярной скорости ветра V_{\perp} (рис. 3). Здесь $U(f) = fW(f)/fW(f)df$, где $W(f)$ — спектральная плотность на частоте f .

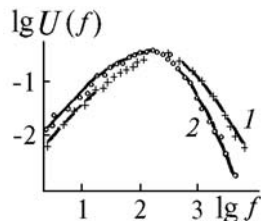


Рис. 3. Спектр флуктуации $U(f)$ в снегопаде при $D_m = (1-3)$ мм. Кривая 1. $\tau = 4,3$; $V = 7,8$ м/с; $V_{\perp} = 2,5$ м/с; $L = 964$ м; 2. $\tau = 1,1$; $V = 7,8$ м/с; $V_{\perp} = 1,3$ м/с; $L = 260$ м

Физическая причина этих двух неожиданных совпадений не совсем ясна. Вместе с тем они в совокупности могут служить совместно с [3] еще одним веским аргументом для подтверждения одних и тех же главных причин флуктуации в узком расходящемся пучке на трассах разной длины. Наиболее очевидными среди них могут быть перекрытие частицами снегопада лазерного пучка у источника, а также экранировка «точечного» приемника частицами, которые находятся в прилегающем к приемнику слое трассы.

В [3] флуктуации интенсивности в узком коллимированном пучке в дожде насыщаются на уровне 1,2. Он примерно в два раза превышает уровень насыщения в мелкодисперсном снегопаде. Эти различия обусловлены тем, что в [3] основной вклад во флуктуации вносила турбулентность атмосферы. В нашем случае флуктуации почти всецело обусловлены частицами снегопада (в спектре отсутствует низкочастотный максимум, который соответствует турбулентности атмосферы).

Благодарю Н.А. Вострецова и Н.П. Кривопалова за участие в некоторых измерениях, Р.Ш. Цвыка и М.В. Кабанова за полезные обсуждения результатов измерений.

1. Жуков А.Ф., Кабанов М.В., Цык Р.Ш., Вострецов Н.Л., Кривопалов Н.П. //Оптика атмосферы. 1991. Т. 3. № 4. С. 347–352.
2. Боровой А.Г. //Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 4. С. 391–400.
3. Borovoy A.G., Patrushev G.Ya., Petrov A.I. //Appl. Opt. 1988. V. 27. № 17. P. 3704–3714.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
20 октября 1992 г.

A.F. Zhukov. On the Level of Intensity Fluctuations of a Narrow Diverging Laser Beam in Snowfall.

Some measurement results on the intensity fluctuations of a narrow diverging laser beam in snowfalls are presented. As was established in this study the intensity fluctuations first increase then reach some saturation level and finally decrease with the increase of the snowfall optical depth. The fluctuations also increase with the growth of the maximum size of snowflakes.