

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 534.345:621.371

Т.И. Арсеньян, П.В. Короленко, Г.В. Петрова, С.В. Эмбаухов

КОРРЕЛЯЦИЯ ПЕРЕМЕЖАЕМОСТИ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ВОЛНОВЫХ ПУЧКОВ НА РАЗНЕСЕННЫХ ТРАССАХ И ЗОНДИРОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Приводятся экспериментальные данные о перемежаемости структурных состояний лазерных пучков на разнесенных трассах различных направлений в условиях города. Эти результаты сопоставлены с характеристиками устойчивости атмосферы на трассе. Показано, что причиной перемежаемости может явиться развитие мелкомасштабных неустойчивостей в воздушной среде на оптической трассе. Установлено, что стохастизация на наклонной трассе выражена слабее, чем на горизонтальной, что связано с существованием высокого хода метеопараметров.

Установление прямой связи между перемежаемостью турбулентности и перемежаемостью структурных состояний лазерных пучков дает основание использовать методику просвечивания атмосферы лазерным излучением с применением разнесенных трасс для диагностики структуры мелкомасштабной турбулентности в приземном слое.

Анализ параметров волновых пучков, распространяющихся по приземным тропосферным трассам, проводится, как правило, в предположении, что статистические свойства воздушной массы в пределах трассы можно считать статистически однородными и изотропными.

Такая оценка условий распространения является достаточно грубой и недостаточной для целей практики. В действительности же распределение турбулентности в приземном слое атмосферы во времени и пространстве крайне неравномерно и имеет ярко выраженный перемежающийся характер. Такого рода перемежаемость турбулентных движений оказывает существенное влияние на поведение пучка. Особенно значительно влияние эффектов, вызывающих смещение спектра неоднородностей в высокочастотную область. Формирование на трассах областей с мелкомасштабной турбулентностью приводит к стохастизации излучения и отрицательно сказывается на объеме и качестве передаваемой информации.

Особое внимание исследователей должны привлечь разработка теоретических моделей, относящихся к развитию в приземном слое мелкомасштабной турбулентности, и накопление экспериментального материала. Обобщая результаты целого ряда исследований [1], можно утверждать, что в широком диапазоне метеопараметров отчетливо проявляется процесс перехода к пространственной организации мелкомасштабной турбулентности в виде отдельных струй, глобул, нитей и т.д. Своеобразные «пятна» областей с мелкомасштабной турбулентностью в приземном слое могут перемежаться областями с почти ламинарным движением воздуха.

Данная статья посвящена рассмотрению вопроса о том, в какой степени указанная модель мелкомасштабной турбулентности переносима на приземные трассы, работающие в условиях городской застройки, и как сказывается развитие тонкой структуры

турбулентности на эволюции характеристик пучков оптического излучения.

Приведенные ниже результаты получены на приземных горизонтальной и наклонной трассах локационного типа. Использовалось излучение, генерируемое одномодовым гелий-неоновым лазером на длине волны 0,63 мкм. Приемопередающие устройства горизонтальной и наклонной трасс располагались на высоте 25 м, отражательное зеркало наклонной трассы – на высоте 165 м. Длина горизонтальной трассы составляла 285 м, наклонной – 320 м в одном направлении. Угол наклона к горизонту для наклонной трассы составлял 30°. В процессе эксперимента фиксировались распределения интенсивности и фазы светового пучка на входной апертуре и их изменения во времени. Для ввода изображений структуры пучка и его сдвиговых интерферограмм в ПЭВМ использовались ПЗС-матрица и соответствующее программное обеспечение. Параллельно с регистрацией характеристик излучения проводился контроль метеопараметров трассы.

В результате экспериментов, проведенных в течение 1994–1996 гг., была обнаружена перемежаемость квазирегулярного (слабо возмущенного) и стохастического (сильно возмущенного) структурных состояний пучка. Переход из одного состояния в другое осуществлялся скачкообразно и сопровождался резким снижением радиуса пространственной когерентности. Возникающее спеклоподобное распределение интенсивности световых пучков формировалось на относительно небольших расстояниях, на которых традиционно еще можно ожидать выполнения законов геометрической оптики.

В табл. 1 приведены результаты анализа средних метеоусловий на наклонной трассе в сопоставлении с преобладающим структурным состоянием лазерного пучка для условий отрицательных температур. По метеоданным рассчитаны значения

параметров, используемых для оценки степени устойчивости трассы (разности температур в точках расположения приемопередающих устройств и зеркал, градиенты температуры по высоте, отношения разности температур на трассе к разности скоростей в ее верхней и нижней точках, коэффициенты устойчивости трасс, числа Ричардсона). Результаты анализа позволяют утверждать, что перемежаемость структурных состояний лазерных пучков является необходимым атрибутом как устойчивых (включая инверсные), так и неустойчивых состояний атмосферы. Исключения составляют лишь случаи присутствия на трассе интенсивного водного аэрозоля.

Поскольку стохастизация структуры лазерных пучков связана с образованием мелких неоднородностей, размеры которых сопоставимы с размерами первой зоны Френеля, исходя из приведенных в табл. 1 данных справедливо предположить, что мелкомасштабная турбулентность может развиваться как при неустойчивых, так и при устойчивых состояниях атмосферы. В первом случае основным фактором, приводящим к возникновению областей с мелкомасштабными турбулентными образованиями, является формирование в турбулентном слое конвективных турбулентных струй. Во втором случае такой причиной могут стать сдвиговые эффекты, обусловленные трением о подстилающую поверхность [1–3].

Таблица 1

Структурное состояние лазерного пучка в сопоставлении с параметрами устойчивости наклонной трассы

Дата проведения эксперимента	Градиент температуры по высоте $\Delta T/\Delta h, ^\circ\text{C}/\text{м}$	Изменение температуры в слое Земля-трасса $ \Delta T , ^\circ\text{C}$	Отношение изменений температуры и скорости ветра в слое Земля-трасса $ \Delta T/\Delta v , ^\circ\text{C}/(\text{м}\cdot\text{с}^{-1})$	Параметр устойчивости слоя B	Число Ричардсона $ Ri $	Преобладающая структура пучка
31.10.95	0,024	0,6	0,6	0,032	0,555	стохастическое
01.11.95	устойчивое – 0,076 неустойчивое	устойчивое 1,9 неустойчивое	устойчивое 0,95 умеренно неустойчивое	устойчивое – 0,916 сильно неустойчивое	– 0,441	«
01.11.95	– 0,036 неустойчивое	0,9 неустойчивое	0,9 сильно неустойчивое	– 0,43 сильно неустойчивое	– 0,835	«
02.11.95	– 0,152 неустойчивое	3,8 неустойчивое	0,9 сильно неустойчивое	– 0,203 сильно неустойчивое	– 0,878	квазирегулярное, сильный снегопад
09.11.95	– 0,012 неустойчивое	0,3 неустойчивое	0,3 безразличное	– 0,016 неустойчивое	– 0,278	стохастическое
13.11.95	– 0,008 неустойчивое	0,2 неустойчивое	0,2 безразличное	– 0,011 неустойчивое	– 0,187	«
13.11.95	– 0,06 неустойчивое	1,5 неустойчивое	1,5 сильно неустойчивое	– 0,08 неустойчивое	– 1,40	равновероятно любое
14.11.95	– 0,044 неустойчивое	1,1 неустойчивое	0,44 слабо неустойчивое	0,033 сильно неустойчивое	– 0,161	стохастическое

Длительности характерных периодов стохастизации, как показывает эксперимент [4], не связаны прямой зависимостью со скоростью ветра. Следовательно, появление турбулентных пятен в области трассы не обязательно определяется ветровым сносом. Их формирование может явиться следствием развития неустойчивостей в воздушной среде оптической трассы. Это сочетается с данными, полученными ранее в измерениях на аэростатах и с использованием рефрактометров [5, 6], а также с данными наблюдений флуктуаций температуры при слабом ветре в условиях выхолаживания [7].

Более полное описание изучаемого явления требует сведений о размерах объема воздушной массы, изменение состояния турбулентности в котором приводит к стохастизации пучков. С целью получения этих сведений измерения на основной горизонтальной трассе были дополнены измерениями на вспомогательных трассах. На вспомога-

тельную локационную трассу подавалось излучение от независимого лазерного источника с той же длиной волны. В процессе экспериментов геометрия оптического тракта вспомогательной трассы допускала изменения, что позволяло в широких пределах варьировать расстояние между трассами.

Эксперименты позволили установить:

1. Синхронность явления стохастизации пучка на параллельных оптических трассах при расстояниях между ними в несколько десятков сантиметров, независимо от длительности периодов стохастизации.

2. Синхронность структурной перемежаемости только по длительным стадиям стохастизации и ее отсутствие по коротким стадиям при дальнейшем увеличении расстояния между трассами. Просматривается тенденция к запаздыванию длительных стадий стохастизации на вспомогательной трассе, смещенной относительно основной по направлению ветра.

3. Полное отсутствие корреляции между процессами структурной перемежаемости в пучках на трассах, если расстояние между трассами увеличено до нескольких десятков метров.

Результаты вышеописанных экспериментов полностью соответствуют результатам, полученным в сантиметровом диапазоне длин волн [4], что говорит об общности физической природы флуктуаций излучения в сантиметровом и оптическом диапазонах. Это позволяет использовать явление стохастизации пучка для диагностики перемежаемости тропосферной турбулентности.

Данные эксперимента свидетельствуют, что тонкая структура волнового пучка реагирует на приближение метеорологического фронта. Резкое снижение температуры в зимних условиях ведет к полному вы-

рождению устойчивой фазы пучка, и в эксперименте регистрируется только его стохастическое состояние.

Сведения о корреляции периодов стохастизации пучка на разнесенных приземных трассах дают возможность осуществить проверку активно развиваемых в настоящее время моделей пространственно-временной структуры атмосферной турбулентности в приземном слое. В процессе изменения состояния турбулентности в приземном слое формируются зоны относительно небольшого объема, в пределах которых происходит резкое увеличение мощности мелкомасштабной турбулентности. Характерные размеры этих образований могут меняться в интервале от десятков сантиметров до десятков метров, а «времена жизни» – от долей секунды до нескольких десятков секунд.

Таблица 2

Сравнение характеристик пучков при синхронных измерениях на горизонтальной и наклонной трассах

Номер сеанса регистрации	Тип трассы	Средняя интенсивность $\langle I \rangle$	Дисперсия интенсивности σ_I^2	Коэффициент корреляции ρ , см	Ширина пространственного спектра в вертикальном сечении	Ширина пространственного спектра в горизонтальном сечении
1	горизонтальная	57,0	0,22	0,3	1,4	0,7
	наклонная	63,0	0,32	0,5	1,1	1,0
2	горизонтальная	58,9	0,2	0,3	1,1	0,7
	наклонная	63,4	0,32	0,6	0,9	1,1
3	горизонтальная	70,7	0,12	0,4	1,1	0,7
	наклонная	62,8	0,32	0,6	0,8	0,7
4	горизонтальная	69,6	0,16	0,5	0,7	0,6
	наклонная	59,8	0,55	0,8	0,5	0,7
5	горизонтальная	66,1	0,13	0,4	0,5	0,6
	наклонная	64,3	0,35	0,7	0,4	0,5

Было осуществлено сравнение экспериментальных данных о перемежаемости структурных состояний лазерных пучков на горизонтальной и наклонной трассах. В табл. 2 приведены данные о величинах средней интенсивности, дисперсии флуктуаций интенсивности, пространственных радиусах корреляции и ширине пространственных спектров в горизонтальных и вертикальных сечениях для стохастических состояний пучка на обеих трассах. Из данных, относящихся к значениям радиусов корреляции, видно, что эта величина для горизонтальной трассы оказывается значительно меньше, чем для наклонной. Отсюда следует, что процессы стохастизации на горизонтальной трассе проявляются более отчетливо, что может быть связано как с существованием высотной зависимости метеопараметров, так и с меньшей величиной эффективной скорости переноса на наклонной трассе. Следует отметить также заметное различие в ширине спектров пространственных частот на горизонтальной и наклонной трассах при синхронных измерениях.

Наличие прямой связи между перемежаемостью турбулентности и перемежаемостью структурных состояний лазерных пучков дает основание использовать методику просвечивания атмосферы лазерным излучением с применением разнесенных трасс для диагностики структуры мелкомасштабной турбулентности трасс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 97-02-17189).

1. *Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности* / Под ред. Х. Суинни и Дж. Голлаба. М.: Мир, 1984. 344 с.
2. *Ламли Дж., Пановский Г.* Структура атмосферной турбулентности. М.: Мир, 1966. 264 с.
3. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 283 с.
4. *Арсеньян Т.И., Короленко П.В., Федотов Н.Н. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 1. С. 49–55.
5. *Семенов А.А., Арсеньян Т.И.* Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах. М.: Наука, 1978. 272 с.
6. *Обухов А.М., Пинус Н.З., Кречмер С.Н.* // Сб. научн. трудов ЦАО. 1957. Вып. 6. С. 174–184.
7. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 277 с.

T.I. Arsenyan, P.V. Korolenko, G.V. Petrova, S.V. Embaukhov. **Correlation of the Laser Beams States Intermittence on the Spaced Paths and the Possibility of the Turbulence Fine Scale Sounding.**

Experimental facts of the intermittence of structure states of the laser beams propagating along the spaced paths under the city conditions are presented. These results are compared with the characteristics of atmospheric stability of the paths. It is shown that the development of small scale instabilities in the air on the optical paths may be a cause of the intermittence of the beam structure states. It is found that beams stochastization on the slant path is weaker than on the horizontal path. This is connected with the meteoroparameters height dependence.

The revealing of direct connection between the intermittence of laser beam states and the turbulence intermittence allows one to use laser beams propagation along the spaced paths for sounding fine scale turbulence near the ground.