

**Т.И. Арсеньян, П.В. Короленко, Е.А. Кулягина, А.Н. Ляш,
С.М. Першин, А.И. Одинцов, Н.Н. Федотов**

ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРОПОСФЕРНЫХ КАНАЛАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приводятся результаты экспериментального анализа условий возникновения и особенностей проявления структурной перемежаемости оптических пучков на приземных трассах и ее связи с динамическими процессами в турбулентной атмосфере. Приведены результаты систематических комплексных исследований на горизонтальной трассе локационного типа, позволяющие установить, что в весьма широком диапазоне метеопараметров на трассе проявляется квазипериодическое чередование двух качественно различающихся структурных состояний волнового фронта пучка (перемежаемость структурных состояний пучка). Одно из них характеризуется относительно небольшими изменениями в амплитудно-фазовом профиле лазерного пучка. Второе имеет спеклоподобную форму распределения интенсивности и сильно возмущенную структуру волнового фронта. Переход от одного состояния к другому осуществляется скачкообразно. Анализируются факторы, характеризующие динамическое состояние трассы и стимулирующие проявление эффектов структурной перемежаемости.

Детальный анализ амплитудно-фазовых флуктуаций излучения на тропосферных трассах [1, 2] оставляет слабо изученным явление перемежаемости флуктуационных процессов в атмосфере и его проявление в характеристиках электромагнитного пучка [3–6]. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию условий возникновения и особенностей проявления связи динамических процессов в турбулентной атмосфере и перемежаемости атмосферной турбулентности со структурной перемежаемостью пучка оптического излучения на приземных трассах.

Приведенные ниже результаты получены на приземной горизонтальной трассе локационного типа. Использовалось излучение, генерируемое одномодовым He–Ne-лазером на длине волны $\lambda_{\text{He-Ne}} = 0,63$ мкм. Высота трассы над Землей составляла $h = 25$ м, длина в одном направлении $L = 285$ м. Приемопередающая и регистрирующая аппаратура позволяла оценивать распределение интенсивности и фазы светового пучка на входной апертуре и его изменения во времени. Для этого использовалось устройство ввода изображений структуры пучка и его сдвиговых интерферограмм в ПЭВМ и соответствующее программное обеспечение. Параллельно с регистрацией характеристик излучения проводились контроль метеопараметров и лидарное зондирование атмосферы вдоль трассы с помощью Ga–As импульсного лидара с длиной волны $\lambda_{\text{Ga-As}} = 0,85$ мкм.

Эксперименты, проводившиеся в течение 1994–1996 гг., показали, что в весьма широком диапазоне метеопараметров на трассе проявляется характерная для светового пучка перемежаемость его структурных состояний. Она заключается в квазипериодическом чередовании двух качественно различающихся состояний пучка. Одно из этих состояний (I) характеризуется относительно небольшими изменениями амплитудно-фазового профиля лазерного пучка. Для второго состояния (II) типичны спеклоподобная форма распределения интенсивности и сильно возмущенная структура волнового фронта, определяемая формированием многочисленных винтовых дислокаций. Количество и положение дислокаций на волновом фронте определяются точками ветвления интерференционных полос на интерферограммах сдвига. Качественная иллюстрация трансформации структуры волнового пучка и интерферограмм при переходе от квазирегулярного состояния I к стохастическому состоянию II представлена на рис. 1. Важная особенность наблюдаемого явления состоит в скачкообразности указанного перехода. Этот переход сопровождается резким снижением радиуса пространственной когерентности.

Особый интерес представляет определение физических факторов, стимулирующих проявление эффектов структурной перемежаемости. Сведения о длительности состояний I и II, относящиеся к различным периодам регистрации, представлены в табл. 1. Анализ полученных данных не позволяет описать простой зависимостью связь между метеопараметрами и харак-

тером проявления структурной перемежаемости. Четко просматривается лишь эффект увеличения длительности состояния II в периоды резкого похолодания (см., например, данные на 25.11 и 26.11.1994 г. и на 31.10 и 1.11.1995 г.).

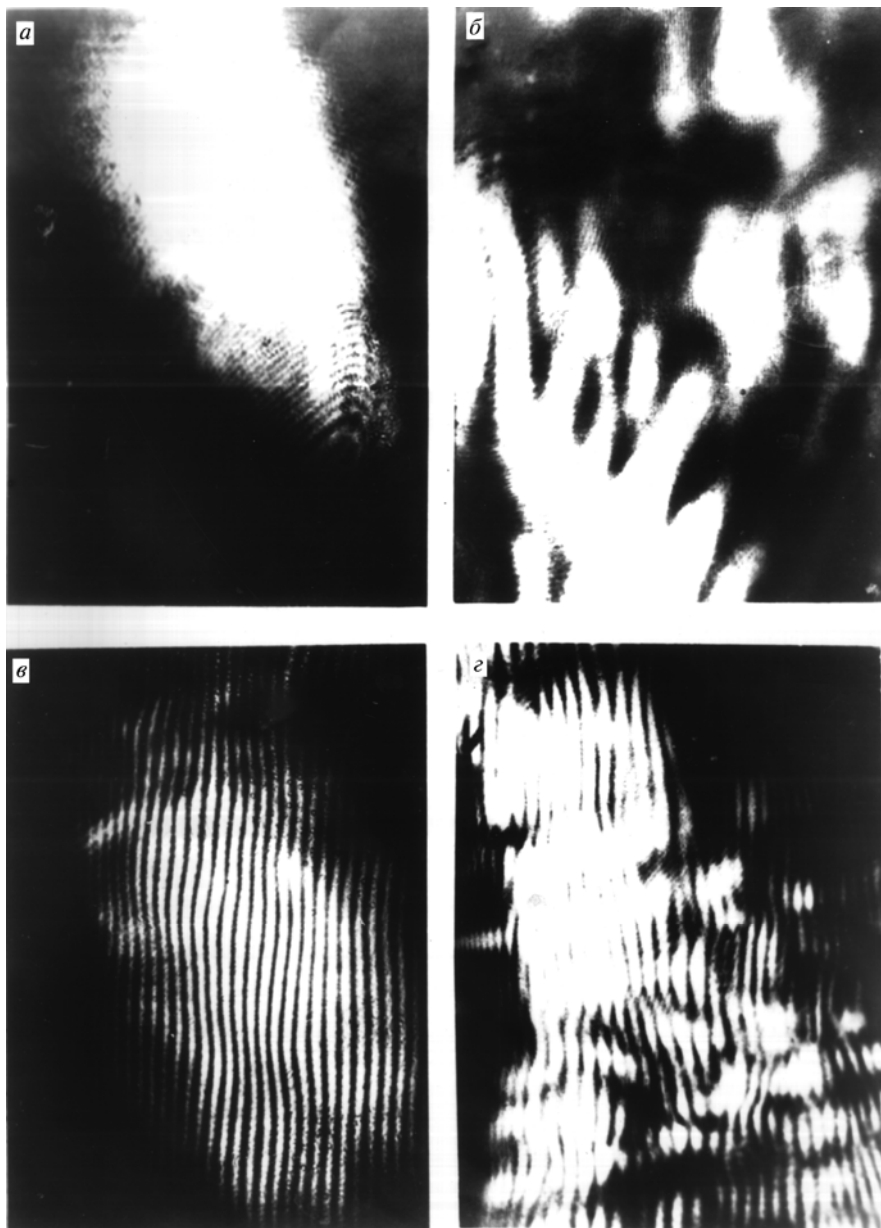


Рис. 1. Распределение интенсивности (*a, б*) и интерферограммы сдвига (*в, г*) для двух состояний лазерного пучка: *a, в* – квазирегулярное состояние I; *б, г* – стохастическое состояние II

Дополнительный анализ высотных профилей температуры показал, что температурная инверсия также стимулирует проявление структурной перемежаемости. Особенность анализируемого явления состоит в том, что перемежаемость квазирегулярного I и стохастического II состояний наблюдается как при практически полном отсутствии ветра, так и в условиях, когда скорость ветра значительна или имеет место дисперсия ее по величине и направлению.

В летний период, при высоких значениях температуры, явление структурной перемежаемости наблюдается лишь эпизодически. Для этих условий более вероятно состояние I с большими амплитудами смещения центра тяжести в дневное время и малыми амплитудами этого смещения в вечернее и ночное время.

Таблица 1

Длительности двух структурных состояний пучка в различных метеоусловиях

Сеансы регистрации	$t, ^\circ\text{C}$	$V, \text{ м/с}$	Длительность состояний, с	
			I (квазирегулярное)	II (стохастическое)
06.07.94	10,0	6	1-2	17
07.07.94	19,4	1	17	1-2
15.07.94	25,2	2	17	1-2
19.11.94	2,6	0	>100	1-2
21.11.94	0,6	3	12	4
22.11.94	0,8	3	25	1-2
24.11.94	4,4	5	25	1-2
25.11.94	1,2	2	>100	1-2
26.11.94	-6,8	1	1-2	25
28.11.94	-6,4	1	10	1-2
29.11.94	-1,7	1	17	1-2
30.11.94	-9,4	3	>100	5
01.12.94	-6,2	3	90	5
19.10.95	11	6	100	1-2
23.10.95	2,6	4	>100	1-2
25.10.95	7,2	4	100	2-3
	8	2	100	100
26.10.95	9	3,5	10	1-2
30.10.95	3,6	1	1-2	1-2
	2,6	1,5	>100	1-2
	2,2	1,3	>100	1-2
31.10.95	4,6	2	5-8	40
01.11.95	-4	3	1-2	100
	-3	2	5-10	20-30
02.11.95	-5	1	30-40	3-4
03.11.95	0,8	2,5	100	1-2
	1,4	0,6	100	1-2
09.11.95	-2,4	2	100	1-2
13.11.95	-5,6	3	15	30
	-6,3	2	20	20
14.11.95	1,2	1,5	1-5	30-60
	1	2	5	5
	0,4	0,5	>100	1-2

Регистрация структурных неустойчивостей в поле непрерывного лазерного излучения в разных условиях была дополнена данными об изменении сигналов оптического лидара на той же атмосферной трассе. Измерения позволили установить связь характеристик пучка He-Ne-лазера с параметром обратного рассеяния (табл. 2).

Таблица 2

Связь состояний пучка с величиной обратного рассеяния в условиях ярко выраженной аэрозольной компоненты (5.03.1996 г.)

Время наблюдения	Метеоусловия	Обратное рассеяние, $\text{км}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$	Состояние пучка
14 ч 40 мин	снег; $t = -4,0 ^\circ\text{C}$; $V \approx 1 \text{ м/с}$	$4,44 \cdot 10^{-5}$	преобладает I
14 ч 50 мин	снег усилился; $t = -4,0 ^\circ\text{C}$; $V \approx 0,5 \text{ м/с}$	$7,09 \cdot 10^{-5}$	I
15 ч 15 мин	снег крупными хлопьями; $t = -4,6 ^\circ\text{C}$; $V \approx 1 \text{ м/с}$	$8,02 \cdot 10^{-5}$	I
16 ч 10 мин	снег кончился; $t = -4,6 ^\circ\text{C}$; $V \approx 1 \text{ м/с}$	$2,66 \cdot 10^{-5}$	II
16 ч 45 мин	снег; $t = -4,6 ^\circ\text{C}$; $V \approx 2 \text{ м/с}$	$7,27 \cdot 10^{-5}$	равновероятность I и II
17 ч 20 мин	$t = -5,8 ^\circ\text{C}$; $V \approx 2 \text{ м/с}$	$4,79 \cdot 10^{-5}$	равновероятность I и II
17 ч 50 мин	слабый снег; $t = -6,2 ^\circ\text{C}$; $V \approx 1 \text{ м/с}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	преобладает I
18 ч 30 мин	слабый снег; $t = -6,2 ^\circ\text{C}$; $V \approx 1 \text{ м/с}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	преобладает I

Здесь отражены некоторые результаты синхронных измерений, проведенных 5.03.1996 г., когда условия на трассе определялись небольшим южным ветром со средней скоростью $V \approx 1,5 \text{ м/с}$, температурой на высоте расположения трассы $t \approx -4 \div -6,2 ^\circ\text{C}$ и периодическим

снегопадом. Длительность сеанса регистрации составляла примерно 5 мин. Для таких условий в отсутствие снегопада наиболее вероятно состояние II. При появлении снега (при росте величины обратного рассеяния) превалирует состояние I. Отметим, что значительное уменьшение уровня флуктуаций при наличии на трассе интенсивного водного аэрозоля (дождь, туман) наблюдалось и в УКВ-диапазоне [7].

Дальнейший анализ подтвердил, что присутствие на трассе водного аэрозоля в виде тумана, дождя или снега резко снижает вероятность перехода пучка в состояние II. Попытка регистрации эффекта перемежаемости состояний пучка была осуществлена и на прямой трассе длиной $L = 285$ м. Необходимая приемная аппаратура была установлена вблизи поворотного зеркала основной локационной трассы. Для такой вдвое укороченной прямой трассы явление структурной перемежаемости оказалось также характерным. При этом в одинаковых условиях распространения число винтовых дислокаций, наблюдаемых на волновом фронте в стохастической фазе, примерно вдвое уступает числу винтовых дислокаций на приемной апертуре локационной трассы.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что явление структурной перемежаемости лазерных пучков должно быть однозначно связано с перемежаемостью состояний турбулентности атмосферы на трассе распространения излучения. Для более полного описания изучаемого явления необходимо располагать сведениями о размерах объема воздушной массы, изменение состояния турбулентности в котором приводит к стохастизации пучков. С целью получения этих сведений была осуществлена модернизация экспериментального стенда. На небольшом расстоянии от основной локационной горизонтальной трассы была построена вспомогательная локационная трасса с использованием излучения независимого лазерного источника. В процессе экспериментов геометрия вспомогательной трассы изменялась таким образом, чтобы в широких пределах варьировать расстояние между основной и вспомогательной трассами. На рис. 2 приведены экспериментальные оптические схемы.

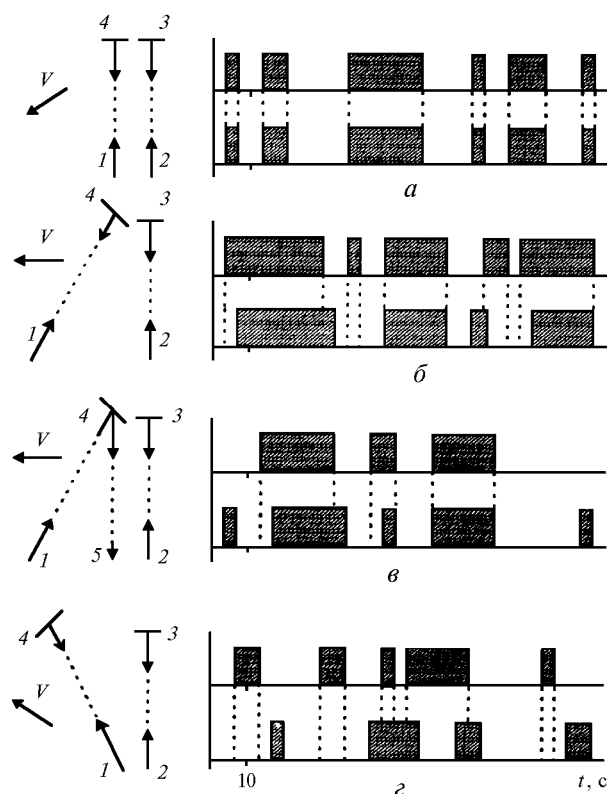


Рис. 2. Корреляция флуктуационных процессов на горизонтальных трассах: слева – геометрия основной и вспомогательной локационных трасс; справа – соотношение длительностей стохастического состояния II пучка (заштрихованные прямоугольники) и квазирегулярного состояния I. Отрезок 2–3 соответствует основной трассе, 1–4 – вспомогательной трассе. Верхняя последовательность временных интервалов относится к основной трассе, нижняя – к вспомогательной

На всех схемах отрезок 2–3 соответствует основной трассе. Отрезки 1–4 характеризуют геометрию вспомогательной трассы, работающей также в локационном режиме (во избежание эффектов усиления абберраций на локационных трассах лучи, распространяющиеся в прямом и обратном направлениях, были слегка разведены). Рис. 2,в соответствует геометрии вспомогательной трассы, когда ее передающая (1) и приемная (5) апертуры располагаются на значительном расстоянии друг от друга. Вектор V на рисунках определяет направление ветра при проведении измерений. Справа от оптических схем на рисунке в виде прямоугольников изображены характерные временные интервалы, соответствующие стохастическому состоянию пучка, для условий, в которых проводились измерения. Верхняя последовательность характеризует основную трассу, нижняя – вспомогательную. Поскольку перестройка геометрии вспомогательной трассы требовала времени, данные, приведенные на рис. 2, относятся к разному времени, но сходным метеоусловиям.

Детальное изучение полученных результатов позволило установить следующие особенности:

Случай 1 (рис. 2,а). Оптические трассы параллельны, расстояние между ними 40 см. Данные получены в сеансе регистрации 12.03.1996 в 19 ч 30 мин – 19 ч 50 мин. Температура на высоте расположения трассы $t_1 = -4$ °С, температура вблизи поверхности земли $t_0 = -5$ °С, средняя скорость ветра $V = 2$ м/с. Характерной особенностью является независимая от длительности синхронность стохастического состояния на основной и вспомогательной трассах.

Случай 2 (рис. 2,б). Поворотные зеркала для двух трасс, как и в случае 1, находятся на расстоянии 40 см, а передающие апертуры разведены на расстояние 6,5 м. Приведены результаты измерений 14.03.1996 г. в период 20 ч 00 мин – 20 ч 30 мин при температуре на высоте 25 м $t_1 = 0$ °С, температуре на уровне Земли $t_0 = -1$ °С, средней скорости ветра $V = 1,5$ м/с. Синхронность структурной перемежаемости наблюдается только по длительным стадиям стохастизации; для мелкомасштабных возмущений корреляция отсутствует. Наблюдается запаздывание длительных стадий стохастизации на вспомогательной трассе, смещенной относительно основной по направлению ветра.

Случай 3 (рис. 2,в). Единственное по сравнению со случаем 2 изменение в геометрии вспомогательной трассы состоит в том, что ее приемная апертура размещена вблизи (на расстоянии 40 см) от приемопередающей апертуры основной трассы. При аналогичных метеоусловиях существенных по сравнению с предыдущим случаем изменений в характере корреляции структурной перемежаемости пучков на двух трассах не наблюдается.

Случай 4 (рис. 2,г). Направление вспомогательной трассы изменено так, что расстояние между поворотными зеркалами используемых трасс увеличено до 35 м. Данные получены 22.03.1996 г. в период 20 ч 30 мин – 21 ч 00 мин. Значения температуры на высоте 25 м $t_1 = -1$ °С и у поверхности Земли $t_0 = -2$ °С; средняя скорость ветра $V = 2$ м/с. Корреляция между процессами структурной перемежаемости на трассах полностью отсутствует.

Результаты вышеописанных экспериментов позволяют сделать вывод, что в процессе изменения состояний турбулентности в приземном слое атмосферы формируются зоны относительно небольшого объема, в пределах которых происходят резкие изменения параметров турбулентности. Размеры этих образований ограничиваются десятками метров, а «время жизни» может меняться в пределах от долей секунды до нескольких десятков секунд.

Существующие физические представления о быстропротекающих процессах изменения структуры приземной турбулентности не позволяют поставить в соответствие полученным экспериментальным данным определенную теоретическую модель. Однако поскольку появление структурной перемежаемости лазерных пучков должно сопровождать развитие в атмосфере различного рода неустойчивостей, можно предположить, что переход от состояний с низким уровнем флуктуаций к состояниям, характеризующимся режимом «сильных» флуктуаций, обусловлен быстрым разрушением крупномасштабных вихревых образований. Увеличение же на трассе числа мелкомасштабных неоднородностей с размерами меньше размера зоны Френеля $a < \sqrt{\lambda L}$ усиливает флуктуационные процессы и ведет к стохастизации амплитудно-фазового распределения в пучке.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 96-02-18609-а).

2. Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. (Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 5.) Л.: Гидрометеиздат, 1988. 267 с.
3. Гурвич А.С. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1985. Т. 28. N 2. С. 242–244.
4. Arsenyan T.I., Fedotov N.N., Kornienko L.S., Korolenko P.V., Kulyagina E.A., Petrova G.V. The 5th International Conference on Industrial Lasers and Laser Applications, 1995. Proceedings SPIE. 1996. V. 2713. P. 453–459.
5. Arsenyan T.I., Korolenko P.V., Fedotov N.N., Lyash A.N., Pershin S.M. // The 21th General Assembly of EGS, 6–10, May 1996. Hague, Netherlands. Annales Geophysicae. Supplement 2 to Volume 14. Part 2. P. 6638.
6. Arsenyan T.I., Korolenko P.V., Fedotov N.N., Kulyagina E.A. // Progress in Electromagnetic Research Symp. 8–12 July 1996. Proceedings. Univ. of Innsbruck, Austria. P. 373.
7. Арсеньян Т.И., Семенов А.А. Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах. М.: Наука, 1978. 274 с.

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
17 июля 1996 г.

T.I. Arsenyan, P.V. Korolenko, E.A. Kulyagina, A.N. Lyash, S.M. Pershin, A.I. Odintsov, N.N. Fedotov. **Intermittence of Fluctuation Processes in Tropospheric Channels of Laser Radiation Propagation.**

Peculiarities of appearing and manifesting of structural intermittence of optical beams on near-the-ground paths and their connection with dynamic processes in turbulent atmosphere are considered. Results of systematic complex investigations on horizontal paths are presented. They allow one to find out, that in rather wide range of the path meteorological parameters, the intermittence of the structural states of a light beam is observed. It is described by quasiperiodic alternation of two qualitatively distinguishing beam states. One of them is characterized by rather small changes in amplitude-phase structure of a laser beam. The second has speckle-like structure of intensity distribution and strongly disturbed structure of wave front. The transition from one state to another has a jerk-like manner. Factors stimulating the effect of beam structural intermittence and its connection with the dynamic state of the propagation path are analyzed.