

2. Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической физики. Ч.2. М.; Л., 1937. С. 15-20.
3. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М., 1980. С.7-26.
4. Гусев В.Д., Власова О.К. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1969. 9, №5. С. 828.

Поступила в редакцию  
22.01.96

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.371:551.510

# ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ НА ПРИЗЕМНЫХ ТРАССАХ

Т.И.Арсеньян, Л.С.Корниенко, П.В.Короленко,  
Е.А.Кулягина, Г.В.Петрова, Н.Н.Федотов  
(кафедра оптики и спектроскопии; кафедра радиофизики)

**Рассмотрено явление перемежаемости структурных состояний лазерных пучков — квазипериодических скачкообразных переходов между двумя структурными состояниями пучка: бездислокационным и стохастическим. Экспериментально исследованы условия возникновения и особенности проявления структурной перемежаемости на приземных наклонной и горизонтальной трассах. Обсуждается связь изучаемых оптических эффектов с изменениями турбулентных свойств атмосферы.**

В настоящее время в литературе (см., напр., [1-3]) содержится обширный теоретический и экспериментальный материал по исследованию как слабых, так и сильных флуктуаций лазерного излучения на атмосферных оптических трассах. Вместе с тем отчетливо проявляется дефицит сведений об устойчивости отдельных режимов флуктуаций и условиях их сменяемости. В данной работе приведены результаты исследования малоизученного явления перемежаемости структурных состояний лазерного пучка на приземных атмосферных трассах [4,5] — квазипериодической скачкообразной сменяемости двух состояний пучка. Одно из состояний характеризуется малыми и, как правило, плавными возмущениями профиля распределения интенсивности и бездислокационной структурой волнового фронта. Второе состояние имеет ярко выраженный стохастический спеклоподобный характер амплитудно-фазового распределения с многочисленными случайно расположенными на волновом фронте винтовыми дислокациями, что характерно для режима сильных флуктуаций.

Экспериментальный стенд, на котором проводились исследования, включал комплекс приемо-передающей и измерительной аппаратуры, а также две приземные трассы, работающие в локационном режиме. Одна из них была горизонтальной, другая — наклонной.

Приемо-передающие устройства располагались на высоте 25 м. В качестве излучателя использовался одномодовый гелий-неоновый лазер на длине волны 0,63 мкм. Его выходной пучок, пройдя светоделительную пластину и формирующие телескопы, направлялся на атмосферные трассы. Длина горизонтальной трассы в одном направлении (от выходной апертуры до поворотного плоского зеркала) составляла 285 м, соответствующая длина наклонной трассы с углом наклона  $30^\circ$  — 320 м. Для того, чтобы избежать проявления эффектов усиления флуктуаций излучения, входная и выходная апертуры на каждой из трасс были разведены на 0,5 м.

Регистрация фазовых характеристик лазерного пучка, прошедшего трассу, проводилась с помощью интерферометра сдвига, построенного по схеме Маха-Цендера [6]. Сформированная в нем интерференционная картина фиксировалась либо (при короткой экспозиции) на неподвижную, либо (при длительной экспозиции) на движущуюся фотопленку. В последнем случае на выходе интерферометра перпендикулярно интерференционным полосам устанавливалась узкая щель. Таким образом, фиксируемая интерферометрическая картина позволяла определять как пространственные, так и пространственно-временные возмущения фазового распределения. Была предусмотрена также возможность

вводить структуру интерферограмм и распределение интенсивности в сечении пучка в оцифрованном виде в персональный компьютер для последующей обработки. Для ввода структуры интерферограмм использовалось устройство ввода изображений на основе ПЗС-матрицы, включающей 580×620 элементов. Параллельно с вводом структуры интерферограмм в ПЭВМ вводились распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка (это достигалось периодическим закрытием одного из плеч интерферометра). Специально разработанное для данных экспериментов программное обеспечение позволяло определять профили распределения фазы и интенсивности лазерного пучка. Кроме того, автоматически проводился расчет дисперсии пространственных флуктуаций и контрастности распределения интенсивности, положения "центра тяжести" пучка, радиуса зоны корреляции интенсивности, а также фурье-спектров пространственной структуры пучка и интерферограмм. Машинная обработка световых структур велась по квадратному полю, сторона которого равнялась удвоенному дифракционному диаметру пучка.

Переменяемость структурных состояний проявлялась как на горизонтальной, так и на наклонной трассах, однако наиболее устойчиво и отчетливо — на горизонтальной трассе. Рисунки 1 и 2 иллюстрируют применительно к горизонтальной трассе трансформацию характеристик структуры пучка и интерферограмм при скачкообразном переходе от первого (бездислокационного) состояния ко второму (стохастическому). Помимо пространственных характеристик излучения можно было регистрировать временные флуктуации интенсивности на малой входной диафрагме фотодиода, а также временные спектры смещения полос на интерферограммах сдвига.

Приведенные на рис. 1, 2 характеристики, зарегистрированные 13.11.95, соответствуют определенным метеоусловиям (температура  $t = -5,6^\circ\text{C}$ , скорость ветра  $v=3$  м/с). Однако качественный характер этих зависимостей сохраняется в весьма широком диапазоне изменений метеопараметров. Сопоставление рисунков свидетельствует о том, что переход от бездислокационной структуры к стохастической сопровождается кардинальными изменениями свойств излучения. К главным из них следует отнести то, что распределение интенсивности  $I$  приобретает неупорядоченный спеклоподобный характер с многочисленными нулями амплитуды поля (см. рис. 1, б и г). Стохастизация пучка приводит к уширению пространственных спектров излучения. Соответствующие фурье-спектры, усредненные по различным сканам поперечного сечения пучка, приведены на рис. 1, д и е. Уширение спектров сопровождается резким снижением радиуса корреляции интенсивности (он становится много меньше размера пучка). При этом на волновом фронте в точках, соответствующих нулям поля, формируются винтовые дислокации. Появление и расположение последних можно регистрировать на сдвиговых интерферограммах по точкам ветв-

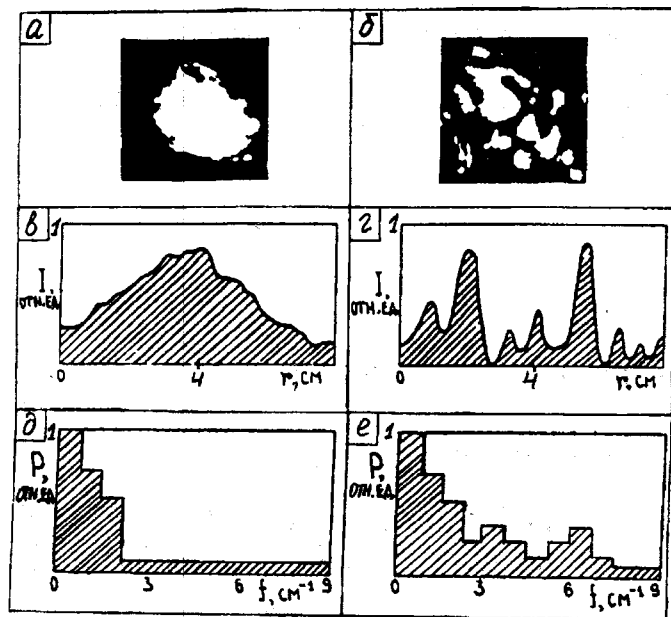


Рис.1 Данные о распределении интенсивности для бездислокационного (а, б, д) и стохастического (б, г, е) состояний: а, б — двумерная структура пучка; б, г — профиль распределения интенсивности  $I$ ,  $r$  — расстояние вдоль диаметра; д, е — мощность  $P$  спектральных компонент,  $f$  — пространственная частота

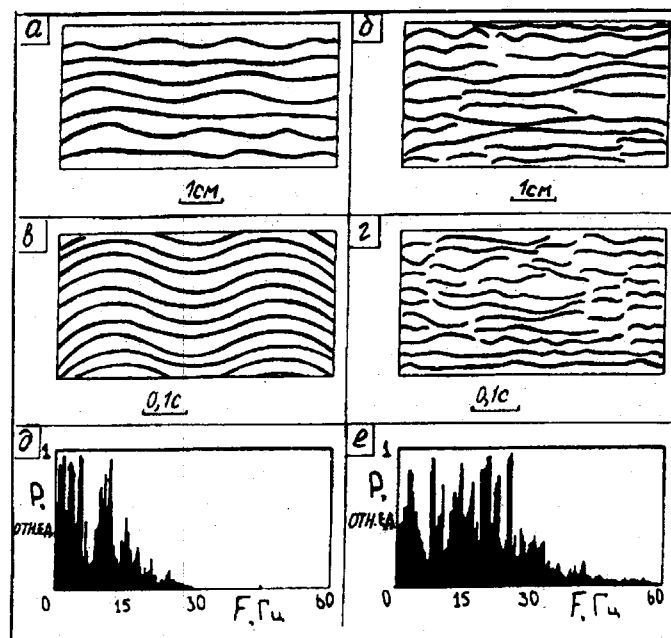


Рис.2 Интерферометрические данные для бездислокационного (а, б, д) и стохастического (б, г, е) состояний: а, б — пространственная структура интерферограмм; б, г — временная структура интерферограмм; д, е — спектры временных флуктуаций расстояний между полосами,  $P$  — мощность спектральных компонент,  $F$  — частота

ления интерференционных полос (см. рис. 2, б и г).

При стохастизации пучка значительные изменения претерпевают и временные характеристики излучения. Осциллограммы локальных изменений интенсивности

характеризуются в случае стохастизации более быстрыми, а стало быть, происходящими в более широкой полосе частот флуктуациями. Анализ спектров флуктуаций показал, что полоса частот увеличивается при этом с 10-20 до  $\sim 100$  Гц.

На основе поведения интерференционных полос, относящихся к различным состояниям пучка, проводился анализ временных флуктуаций фазы. Природа этих флуктуаций существенным образом различается. Так, при квазирегулярной бездислокационной структуре пучка фазовые флуктуации в основном связаны с наклонами волнового фронта, обусловленными смещениями центра тяжести пучка. В случае стохастического состояния вклад наклонов волнового фронта как целого в флуктуации фазы уменьшается; доминирующее же влияние оказывают локальные возмущения фазовой поверхности, сочетающиеся с появлением винтовых дислокаций. Качественно этот вывод можно подтвердить, непосредственно наблюдая смещения полос во времени (рис. 2, в и г). На левой части рисунка, которая относится к бездислокационной структуре, отчетливо видна высокая степень скоррелированности волнообразного смещения интерференционных полос, обусловленная квазипериодическими наклонами волнового фронта. На правой части рисунка, относящейся к стохастической структуре, смещение полос уже не имеет скоррелированного характера. Указанное поведение интерференционных полос находит отражение в приведенных на рис. 2, д и е усредненных спектрах флуктуаций расстояний между полосами. Видно, что при переходе к стохастическому состоянию наиболее заметно уширяется спектр флуктуаций расстояний между полосами. Так как изменения расстояния между полосами непосредственно связаны с изменениями кривизны волнового фронта, последний экспериментальный факт подтверждает, что при стохастизации пучка локальные флуктуации фазы усиливаются.

Параметры	Состояние	
	бездислокационное	стохастическое
$D_x$ , см	5,5	7,2
$D_y$ , см	8,3	8,4
$\sigma_{D_x}^2$	1,4	0,4
$\sigma_{D_y}^2$	0,3	0,1
$\sqrt{\sigma_{D_x}^2}/D_x$	0,2	0,1
$\sqrt{\sigma_{D_y}^2}/D_y$	0,1	0,04
$\langle I \rangle$	55,8	29,4
$\sigma_I^2$	29,4	25,2
$C$	0,3	0,7
$\sigma_{C_x}^2$	0,02	0,016
$\sigma_{C_y}^2$	0,26	0,3
$\sigma_{C_z}^2$	0,8	0,3

Рисунки 1 и 2 дополняет таблица, где приведены данные, полученные на основе обработки структуры световых полей: средние размеры пучка  $D_x$  и  $D_y$  соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях; дисперсии изменений размеров пучка  $\sigma_{D_x}^2$  и  $\sigma_{D_y}^2$ ; средняя по поперечному сечению пучка интенсивность  $\langle I \rangle$ ; дисперсия пространственных изменений интен-

сивности  $\sigma_I^2$ ; контрастность распределения интенсивности  $C$ ; дисперсии смещений центра тяжести пучка  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$  по горизонтали и по вертикали. Приведенные в таблице параметры получены путем обработки последовательности из 10 кадров. Сопоставление этих параметров показывает, что стохастизация приводит к значительному увеличению контрастности распределения интенсивности, сопровождающемуся заметным снижением средней интенсивности и уменьшением дисперсии смещений центра тяжести пучка по вертикали. Последний результат сочетается с отмеченным выше экспериментальным фактом — уменьшением вклада смещений центра тяжести в фазовые флуктуации при стохастизации пучка. Несмотря на значительное увеличение, контрастность в режиме сильных флуктуаций не достигает единицы. Следовательно, поле излучения в стохастическом случае отличается от классических спекл-полей [7], для которых контрастность равна единице.

Как показали наблюдения, наиболее отчетливо структурная перемежаемость на атмосферных трассах наблюдается в осенний и весенний периоды, когда происходят резкие перепады температуры и в приземном слое формируется температурная инверсия. Было установлено, что в зависимости от метеоусловий длительности бездислокационного и стохастического состояний могут варьироваться в очень широких пределах (примерно от 1 до 100 с); при этом длительности различных состояний могут быть либо сопоставимыми, либо заметным образом различающимися (иногда более чем на порядок). К уменьшению длительности стохастического состояния, а иногда к полному прекращению перемежаемости приводило увеличение содержания в приземном слое водного аэрозоля. Как правило, туман, осадки в виде дождя или снега полностью исключали стохастизацию пучка. Перемежаемость структуры лазерных пучков наблюдалась при самых разных скоростях ветра, при этом появление или смену того или иного структурного состояния нельзя было связать с его порывами или периодами затишья.

Структурная перемежаемость пучка на атмосферных трассах наблюдалась в течение 1994-1995 гг. в разное время суток, при различных модификациях приемопередающего тракта, включающих замену оптических элементов и типа задающего лазера. Это, а также тот факт, что перемежаемость наблюдалась лишь при определенных метеоусловиях, практически полностью исключает негативное влияние на чистоту эксперимента технических и аппаратурных эффектов. Поэтому наблюдаемое явление должно быть связано с перемежаемостью турбулентности воздушной массы на оптической трассе [8]. Однако явный недостаток сведений о такого рода процессах в приземном слое атмосферы не позволяет поставить в соответствие наблюдаемым эффектам определенные экспериментальные факты или теоретические модели. В этой связи можно упомянуть лишь о регистрации на приземных трассах спорадических изменений величины флуктуаций температуры [3], а также

о результатах теории бифуркаций в турбулентной среде [9]. Тем не менее, учитывая, что структурная перемежаемость проявляется чаще всего в условиях температурной инверсии и быстрой динамики изменения метеопараметров, можно считать весьма вероятным развитие в турбулентной среде различного рода неустойчивостей. В частности, возможны быстрые разрушения крупномасштабных и резкое увеличение числа мелкомасштабных вихрей. Последний же фактор, как известно, нарушает геометрооптические закономерности распространения светового пучка и приводит к его стохастизации. В то же время за счет быстрой диссипации энергии мелкомасштабных вихрей создаются условия обратного эффекта перехода к крупномасштабным структурам. Отметим также, что "резкость" сменяемости состояний светового пучка под влиянием изменений в структуре турбулентности может усугубляться за счет резонансных эффектов, описываемых в рамках нелинейной лучевой динамики [10].

Авторы выражают благодарность Ю.А. Абрамову, В.Г. Ломоносову, Ю.М. Маркову, М.М. Ногачевскому, М.И. Титову за помощь, оказанную при создании и эксплуатации атмосферных трасс.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 95-02-06288-а).

## Литература

1. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М., 1967.
2. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М., 1981.
3. Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л. и др. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М., 1976.
4. Arsenyan T.I., Fedotov N.N., Kornienko L.S. et al. // Proc. SPIE. 1996. 2713. P. 453.
5. Arsenyan T.I., Korolenko P.V., Fedotov N.N. // Ann. Geophys. 1996. 14. Suppl. 2. Pt. 2. P.6638.
6. Арсеньян Т.И., Кауль С.И. и др. // Радиотехн. и электроника. 1992. 37, №10. С.1773.
7. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М., 1985.
8. Гурвич А.С. // Изв. вузов, Радиофизика. 1985. 28, № 2. С. 242.
9. Гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности / Под ред. Х. Суинни, Дж. Голлаба. М., 1984.
10. Абдуллаев С.С., Заславский Г.М. // ЖЭТФ. 1984. 87, №3. С. 763.

Поступила в редакцию  
21.06.96

## АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 531.535

# ИЗБЫТОЧНЫЙ ШУМ В ПОДВЕСАХ КРУТИЛЬНЫХ МАЯТНИКОВ

А.Ю. Агеев, В.П. Митрофанов

(кафедра молекулярной физики и физических измерений)

В крутильных маятниках, подвешенных на тонких вольфрамовых проволоках, наблюдается изменение углового положения равновесия со временем. Исследование статистических закономерностей величины такого изменения за время, равное периоду колебаний, показало, что при малых напряжениях в проволоке (меньших 60-70 % от разрывного) распределение этой величины близко к гауссовскому. При больших напряжениях оно отличается от гауссовского наличием редких относительно больших скачков угла поворота. Их можно рассматривать как проявление скачкообразной деформации в твердых телах, обусловленное дислокационным движением. Скачки деформации являются источником избыточного шума в механических системах, который может дать значительный вклад в флуктуации положения пробных масс лазерных гравитационных антенн.

## Введение

В целом ряде физических экспериментов получение информации связано с измерением малых сил, действу-

ющих на пробное тело. Чувствительность в таких измерениях ограничена тепловым шумом в механическом элементе, воспринимающем воздействие. Так, при разработке в настоящее время лазерных антенн гравитаци-