

П.М. Гусак, С.С. Михайловский

ДВУХВОЛНОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В АТМОСФЕРЕ

В экспериментальной работе развивается сравнительная методика двухволнового зондирования трассы для исследования флуктуаций лазерного излучения, длина волны которого частично поглощается водяным паром в турбулентной атмосфере.

Обнаружено явление периодической модуляции спектральной мощности флуктуации принятого лазерного излучения, обусловленное особенностями переноса водяных паров в турбулентной атмосфере.

1. В подвижной атмосфере с развитыми флуктуациями локальных температур и плотности существует пространственно-временная изменчивость диэлектрической проницаемости ϵ . При этом в случайном поле показателя преломления для распространяющихся электромагнитных излучений возникают стохастические модуляции параметров, глубина и спектр которых также определяются условиями распространения. Эта сложная и важная в прикладном значении динамическая система, зависящая от многих факторов, широко изучается теоретически и экспериментально.

Водяной пар является наиболее массовым и нестационарным компонентом земной атмосферы. Помимо изменчивости концентрации водяного пара в атмосфере возможны условия, при которых частицы или образования частиц пара переносятся по разному с различными масштабами турбулентности в ветровых потоках. Флуктуации концентрации, а также конечное время корреляции процессов переноса водяного пара с флуктуациями скорости ветровых потоков могут оказывать особое влияние на характеристики распространения пучков оптического и субмиллиметрового диапазонов.

Согласно результатам теоретических работ [1, 2, 3] электромагнитные волны с частичным резонансным поглощением испытывают изменения флуктуаций интенсивности и фазы, коррелированные с флуктуациями действительной и мнимой компоненты показателя преломления среды. При этом дисперсию флуктуаций логарифма амплитуды волны можно представить в виде

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 (1 \pm \Delta),$$

где σ_0^2 — дисперсия флуктуаций при распространении в прозрачной среде; Δ — добавка, обусловленная флуктуациями коэффициента поглощения, величина и знак которой зависят от природы и вероятностного закона распределения флуктуаций концентрации поглощающей компоненты, а также определяется параметрами пучков.

Далее в работе [4] анализировалась взаимная корреляция частотно-разнесенных электромагнитных волн, распространяющихся в турбулентной поглощающей среде, в предположении кармановского спектра микронеоднородностей как для действительной, так и для мнимой частей показателя преломления. Получено, что в асимптотическом приближении коэффициент взаимной корреляции двух волн является функцией взаимной корреляции двух турбулентных микроспектров при наличии даже слабого поглощения одной из волн.

Очевидно, представляет интерес экспериментальное развитие данных представлений [1, 2, 3] и подхода [4] как методики и средства исследования турбулентной атмосферы.

В предлагаемой работе описываются результаты зондирования трассы совместно двумя пучками монохроматического лазерного излучения. При этом атмосфера на исследуемой трассе прозрачна для излучения с λ_1 одного пучка, тогда как другой пучок с λ_2 частично поглощается водяным паром. Регистрировались и сравнивались Фурье-спектры автокорреляционных функций флуктуаций интенсивности принятых пучков для каждой длины волны одновременно.

2. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался модифицированный He—Ne-лазер ЛГ-126 [5]—1. Его устройство позволяет осуществить следующие режимы зондирования:

- а) режим непрерывного генерирования одновременно двух длин волн $\lambda_1 = 0,63$ и $\lambda_2 = 1,15$ мкм;
- б) режим попеременно $\lambda_1 = 1,084$ и $\lambda_2 = 1,15$ мкм с частотой переключения порядка 10^3 Гц.
- в) режим непрерывной генерации с $\lambda_1 = 1,084$ либо $\lambda_2 = 1,15$ мкм.

Излучение с $\lambda_2 = 1,15$ мкм испытывает частичное поглощение в атмосфере водяным паром, $\lambda_1 = 1,084$ мкм поглощается на несколько порядков слабее, чем λ_2 , а $\lambda_1 = 0,63$ мкм находится в окне прозрачности атмосферы.

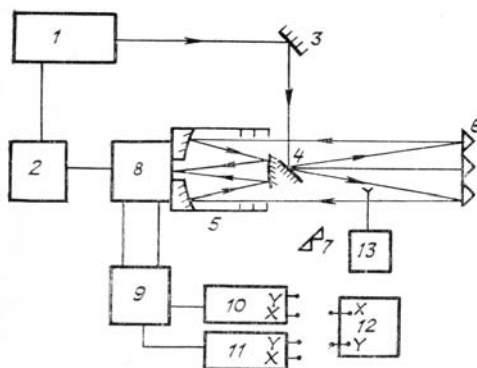


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки

Выбор указанных режимов осуществляется механически и при помощи электронного блока управления 2. Оптическое шарнирное устройство, состоящее из зеркал 3 и 4 используется для совмещения оптических осей лазера — источника и приемного телескопа 5. Трассовый пассивный отражатель 6 составлен из набора трипель-призм полного внутреннего отражения с точностью изготовления не хуже $20''$. Ближний отражатель 7 использовался для оптической настройки и калибровки электронных трактов. Отраженный лазерный пучок принимался телескопом типа Кассегрена с зеркалом диаметра 0,25 м и фокусировался на диафрагму оптико-электронного блока преобразователей 8. Для регистрации излучения инфракрасного диапазона использовался фотоумножитель ФЭУ-83, перед которым размещали светофильтры: оптически полированную кремниевую пластинку толщиной порядка 20 мкм и интерференционный оптический фильтр с максимумом пропускания в области 1,15 мкм. Отраженный от кремниевой пластинки видимый свет использовался для канала регистрации $\lambda_1 = 0,63$ мкм.

Аналоговые сигналы в виде напряжений поступали на электронный блок обработки 9. Проводилась оценка средних величин принятых сигналов, выделение и усиление переменной флуктуирующей во времени составляющей принятых сигналов параллельно по двум каналам, соответствующих излучениям с λ_1 и λ_2 . Далее сигналы подвергались спектральному анализу в реальном масштабе времени по двум каналам 10 и 11 в аналого-цифровых анализаторах типа СК4-72. В цифровых интеграторах производилось усреднение случайных спектров мощности флуктуаций для числа реализаций $N = 1024$, что составляет полное время измерения порядка 20 мин и в диапазоне Фурье анализа Δf (0–500) Гц. Таким образом, время накопления выбиралось достаточно большим, чтобы выполнялось условие стационарности при наличии в реальной атмосфере порывистых ветровых потоков. Фурье-спектры мощности в аналоговой форме выводились на двухкоординатный самописец 12 в виде спектрограмм, где по оси X развертка пропорциональна частоте анализа — f .

На трассе были установлены датчики метеопараметров 13. При помощи прибора ТАИК-3 локально измерялась средняя величина скорости ветрового потока \bar{v} , его дисперсия σ_v^2 , средняя локальная температура \bar{t} и ее дисперсия σ_t^2 , а также градиенты данных величин по высоте и вдоль трассы. Оценка средней величины влагосодержания производилась аспирационным методом по локальным измерениям с точностью $\pm 5\%$. Исследования проводились на естественных трассах протяженностью до $2L = 600$ м, расположенных горизонтально, либо с перепадом высот между передатчиком и отражателем до 30 м. С учетом выбранных длин волн излучения условия на трассе соответствовали критерию слабой турбулентности.

Одновременная запись Фурье-спектрограмм для двух зондирующих пучков позволяет повысить точность сравнительного анализа флуктуаций при наличии в реальной атмосфере кратковременных порывистых составляющих скорости ветровых потоков.

3. Анализ частотной зависимости экспериментально полученных спектров флуктуации $W_1(f)$ и $W_2(f)$ непоглощающихся λ_1 и поглощающихся λ_2 пучков показывает следующее. Общий частотный ход $W(f)$ соответствует модели инерционного спектра турбулентности с известной асимптотикой $W(f) \sim f^{-8/3}$ [6]. Однако при сравнительном анализе зависимостей $W_1(f)$ и $W_2(f)$, в области малых частот ~ 100 Гц обнаруживаются принципиальные отличия.

На рис. 2 представлено экспериментально полученное соотношение $\lg W_{1,2} = \lg W_1(f) - \lg W_2(f)$, взятое для удобства сравнения $W_1(f)$ и $W_2(f)$. Особенностью зависимости $\lg W_{1,2}$ является наблюдаемая немонотонность.

Кривые 1 и 2 рис. 2 получены при одинаковых метеопараметрах трассы, но для различной угловой расходимости Ω двух пучков $\lambda_1 = 0,63$ мкм и $\lambda_2 = 1,15$ мкм, создаваемой со стороны передатчика: 1 — $\Omega_1 \approx \Omega_2$; 2 — $\Omega_1 < \Omega_2$. Очевидно, отличающиеся по диаметру зондирующие пучки будут обладать разным временным параметром взаимодействия с одними и теми же неоднородностями. Чем меньше диаметр пучка, тем больший удельный вклад меньших масштабов неоднородностей показателя пре-

ломления в общую картину флуктуаций принятого сигнала. Поэтому с уменьшением диаметра пучка зависимость типа $f^{-8/3}$ смещается в область больших частот.

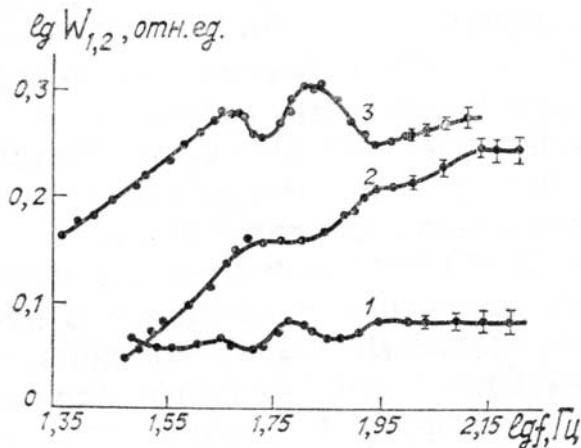


Рис. 2. Зависимость отношения двух спектров мощности флуктуаций от частоты при следующих условиях зондирования: 1 — $\lambda_1 = 0,63$ мкм, $\lambda_2 = 1,15$ мкм, $\Omega_1 = \Omega_2 = 10^{-3}$ рад, $\bar{v} = 0,5$ м/с, $\sigma_v^2 = 0,35$ (м/с)², $e = 8,7$ мбар, $\bar{t} = 9,7^\circ\text{C}$; 2 — $\lambda_1 = 0,63$ мкм, $\lambda_2 = 1,15$ мкм, $\Omega_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ рад, $\Omega_2 = 6 \cdot 10^{-3}$ рад, $2L = 520$ м, $\bar{v} = 0,5$ м/с, $\sigma_v^2 = 0,35$ (м/с)², $e = 8,7$ мбар, $\bar{t} = 9,7^\circ\text{C}$; 3 — $\lambda_1 = 1,084$ мкм, $\lambda_2 = 1,15$ мкм, $2L = 520$ м, $\bar{v} = 0,8$ м/с, $\Omega_1 = \Omega_2 = 10^{-3}$ рад, $\sigma_v^2 = 0,5$ (м/с)², $e = 8,1$ мбар, $\bar{t} = 8,2^\circ\text{C}$

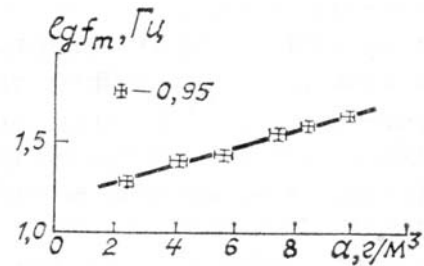


Рис. 3. Зависимость f_m от средней величины влагосодержания на трассе $2L = 200$ м. Экспериментальные точки получены усреднением при различных значениях метеопараметров трассы: $\bar{v}, \sigma_v^2, \bar{t}$

Таким образом разные пространственные характеристики пучков с λ_1 и λ_2 вызывают изменение общего наклона кривых $\lg W_{1,2}$, но мало влияют на характер тонкой структуры. В результате может произойти лишь ухудшение ее разрешимости, (см. кривую 2 рис. 2).

Представленная на рис. 2 кривая 3 получена при распространении пучков с длиной волны $\lambda_1 = 1,084$ мкм и $\lambda_2 = 1,15$ мкм в режиме работы излучателя (см. выше п. «В»). Метеопараметры трассы отличались повышенным содержанием водяного пара в атмосфере, при всех остальных параметрах, одинаковых с предыдущими измерениями. Экспериментально было установлено, что данное отклонение параметров не вызывает наблюдаемое на кривой 3 рис. 2 усиление тонкой структуры. По-видимому, эффект усиления объясняется меньшим различием зондирующих длин волн λ_1 и λ_2 по сравнению с предыдущим (кривая 1 рис. 2).

В результате исследований, проведенных на трассах при различных метеоусловиях, в широком диапазоне изменения температуры, скорости ветра и влажности от эксперимента к эксперименту, установлено, что положение экстремумов наблюдаемой тонкой структуры рис. 2 изменяется и коррелирует с влагосодержанием атмосферы. На рис. 3 представлена полученная зависимость значения $\lg f_m$, взятого для минимума впадины между двумя максимумами кривых $\lg W_{1,2}$, от средней величины влагосодержания атмосферы a , измеренной на трассе.

4. Исходя из вышеизложенного можно сделать следующий вывод. В турбулентной атмосфере при распространении двух волн, одна из которых частично поглощается водяным паром, корреляционные соотношения стохастических составляющих прошедших волн будут носить более сложный характер, чем следует из работ [1—4]. Влияние флуктуаций поглощения водяного пара на спектральную мощность носит селективный характер, который можно объяснить наличием характерного времени взаимодействия между флуктуациями скорости и концентрации водяного пара. По-видимому, различные масштабы турбулентного потока по разному взаимодействуют со случайным полем концентрации водяного пара.

1. Гурвич А. С. // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 13. № 11. С. 1923.
2. Арманд Н. А., Изюмов А. О., Соколов А. В. // Радиотехника и электроника. 1971. Т. 16. № 8. С. 1333.
3. Курбатова Р. И., Фукс И. М., Шарапов Л. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 2. С. 237.
4. Милютин Е. Р., Самельсон Г. М. // Радиотехника. 1986. № 12. С. 72.

5. Гусак П. М., Михайловский С. С. // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 5. С. 162.
6. Татарский В. И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. // М.: Наука. 1967. С. 548.
7. Сигналы и помехи в лазерной локации / Под редакцией В.Е. Зуева. М.: Радио и связь. 1985. С. 264.

Одесский гидрометеорологический
институт

Поступила в редакцию
24 мая 1988 г.

P. M. Gusack, S. S. Michailovsky. Two Wave Investigation of Laser a Beam Fluctuations in the Atmosphere.

A comparative method of two wave probing for laser beam fluctuations investigation has been developed experimentally. One of the waves has been partly absorbed by water steam in a turbulent atmosphere. It has been found that laser beam fluctuations spectral power was periodically modulated. The data obtained have been explained by transportation peculiarities of water steam in a turbulent atmosphere.