

УДК 534, 621.373

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ АТМОСФЕРНО-ВОЛОКОННОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИНФРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЗАДАЧАХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© А. В. Бритвин<sup>1</sup>, С. И. Коняев<sup>1</sup>, Б. В. Поллер<sup>1,3</sup>, А. Б. Поллер<sup>1</sup>,  
М. С. Хайретдинов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт лазерной физики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б*

<sup>2</sup>*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6*

<sup>3</sup>*Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20*

*E-mail: lablis@mail.ru*

Рассматривается задача измерения пространственно-временных и энергетических параметров акустических инфразвуковых колебаний в атмосфере на базе размещения лазерных и волоконных линий в зонах геоэкологического мониторинга. В основе измерений лежит явление акустооптического преобразования на инфранизких частотах, связанного с влиянием внешнего акустического волнового поля на характеристики распространения в этом поле лазерных импульсных пучков. В качестве внешних источников поля используются фоновые и антропогенные атмосферные акустические процессы. Измеряемым параметром является флуктуация фазы (частоты) атмосферного оптического сигнала относительно опорного оптического волоконного сигнала. Приводятся характеристики лазерной атмосферно-волоконной системы и некоторые результаты экспериментов по оценке статистики флуктуаций фазы атмосферных лазерных импульсов и параметры инфразвуковых полей в заданной атмосферной зоне мониторинга.

*Ключевые слова:* лазерный мониторинг природных и антропогенных процессов, лазерные атмосферные линии, стандарт частоты, инфразвуковые колебания в атмосфере, флуктуации фазы.

DOI: 10.15372/AUT20230608

EDN: NRCTZP

**Введение.** В связи с решением проблемы прогнозирования и определения координат опасных проявлений природных и антропогенных процессов важным является развитие методов регистрации инфразвуковых акустических сигналов. Цель данной работы — представление первичных данных исследования возможности обнаружения инфранизких акустических сигналов предлагаемым методом за счёт сравнительного анализа параметров потоков лазерных импульсов от лазера со стандартом частоты, прошедших одновременно атмосферную трассу и волоконный кабель. Предлагается метод построения лазерных систем для оценки пространственно-временных и энергетических параметров акустических инфразвуковых колебаний в атмосфере на базе размещения лазерных и волоконных линий в зонах экологического мониторинга [1, 2]. В основе измерений лежит явление акустооптического преобразования на инфранизких частотах, связанного с влиянием внешнего акустического волнового поля на характеристики распространения в этом поле лазерных импульсных пучков из-за изменения текущего коэффициента преломления атмосферы [1].

Лазерная атмосферно-волоконная система (ЛАВС) представляет собой две линии распространения лазерного сигнала от одного источника излучения, частота импульсов ла-

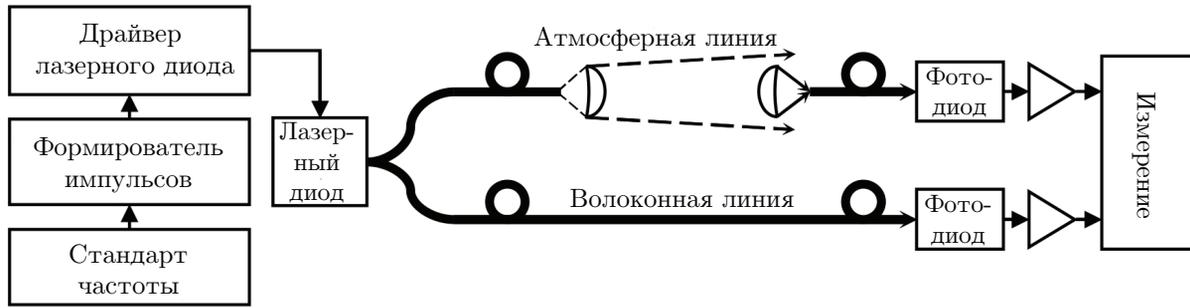


Рис. 1. Схема лазерной атмосферно-волоконной системы

зера задаётся стандартом частоты (рис. 1). Один канал распространения лазерного импульсного сигнала проходит по оптическому волокну, а второй — по атмосфере. С учётом экранирования воздействия внешних факторов на лазерный сигнал, распространяющийся по волоконному каналу, он принимается в качестве опорного по отношению к лазерному сигналу, передаваемому по атмосферному каналу, на чём базируется измерительная система. Параметры внешних акустических процессов в атмосфере определяются по разности фазовых (частотных) характеристик синхронно приходящих сигналов по волоконному и атмосферному каналам [1, 2].

В зависимости от задач идентификации акустических инфразвуковых колебаний методы построения лазерной атмосферно-волоконной системы могут подразделяться на многоканальные и одноканальные. Многоканальные системы могут быть ориентированы на определение координат и параметров источников акустических колебаний и состоять из рассредоточенных по площади разнонаправленных сегментов. В нашем случае методы построения базируются на использовании разнесённых атмосферных лазерных и волоконных линий на трассах  $\Sigma L_i$ , (где  $L_i$  — протяжённость каждой из трасс) с использованием стандартов частоты  $F_0$ , которая при прохождении атмосферной трассы меняется на флуктуирующую частоту  $F_i$  из-за воздействия инфразвуковых колебаний на время распространения лазерных импульсов по атмосферной трассе.

Оператор преобразования (флуктуации)  $\Psi\{F_i\}$  связан с особенностями распространения акустических инфразвуковых волн в анизотропной флуктуирующей атмосфере [3] и с оптико-физическими характеристиками трасс распространения лазерных импульсов в атмосфере [4, 5].

**Теоретическая часть.** Вопросы построения аналитической модели ЛАВС рассмотрены в работах [1, 2]. Базовая структура модели основывается на оценках изменения времени распространения лазерных импульсов  $\Delta t_i$  на трассе  $L_i$ :

$$\Delta t_i = \frac{L_1}{V_0} = \frac{L_i n_i}{V_0},$$

где  $V_0$  — начальная скорость света при нормальных условиях;  $n_i$  — текущий коэффициент преломления воздуха на трассе  $L_i$ . Если длина атмосферной трассы  $L_i = 100$  м, то время прохождения такой трассы первым коротким лазерным импульсом с малой мощностью  $P_{\text{имп}}$  составит

$$\Delta t_1 = \frac{1}{V_0} L_i n(r, t = \tau)$$

и  $\Delta t_1$  приближенно равно  $333,4245 \cdot 10^{-9}$  с при длине волны  $\lambda = 800$  нм ( $n_0 = 1,0002746$ ); второй импульс через интервал  $\tau = 1/f_0$  пройдёт эту же трассу за время  $\Delta t_2$ , где  $f_0$  — частота импульсов.

Вероятность  $P(\Delta t_1 \rightarrow \Delta t_2)$  того, что времена прохождения окажутся близкими, т. е.  $\Delta t_1 \approx \Delta t_2$ , будет увеличиваться при уменьшении  $\tau$  в условиях, когда оптико-физические параметры трассы ( $S_M$  — метеорологическая дальность видимости (МДВ),  $V_{\text{ветр}}$  — скорость ветра,  $T_i$  — температура воздуха) не меняются на заданном промежутке времени. Существует так называемый интервал стационарности (замороженности) атмосферы —  $\tau_{\text{мороз}}$ , на котором параметры атмосферы не изменяются.

Обнаружение акустического инфразвукового колебания от удалённых природных и антропогенных источников зависит от времени прохода начала плоской волны инфразвука с частотой  $f_{\text{инфз}}$  поперёк лазерной трассы с сечением  $\Delta S$ , которое может составлять ориентировочно величину от единиц до десятков миллисекунд. Зависит обнаружение также от частоты следования лазерных импульсов, определяющих  $N_{\text{изм}}$ , — количество возможных измерений времени прохода трассы длиной  $L_i$ . Так, например, для трассы протяжённостью 100 м  $N_{\text{изм}}$  будет равно:

$$N_{\text{изм}} = \frac{t_{\text{сеч}}}{\Delta t_1} \approx \frac{1 \cdot 10^{-3}}{3,334245 \cdot 10^{-7}} \approx 2,99917 \cdot 10^3.$$

Вероятность обнаружения инфразвука  $P_{\text{обн.инфз}}$  от антропогенных источников (АПИ), генерирующих периодические колебания с основной частотой  $f_{\text{АПИ}}$ , будет зависеть от соотношения  $\rho$  спектральных плотностей мощности полезного сигнала  $P_{\text{пол}}(f)$  и фоновой помехи  $P_{\text{фп}}(f)$ :

$$\rho = \int_{\Delta f} P_{\text{пол}}(f) df / \int_{\Delta f} P_{\text{фп}}(f) df$$

и флуктуации параметров атмосферы в области  $f_{\text{АПИ}}$ , влияющей на параметр  $\rho$ .

В разрабатываемой лазерной схеме измерений параметров инфразвуковой волны при стабилизации частоты лазерных импульсов за счёт стандарта частоты с относительной нестабильностью  $10^{-12}$  с можно считать, что влияние флуктуации частоты стандарта на точность оценки параметров инфразвука будет незначительна.

Если акустическая волна имеет периодический характер, то при увеличении микродавления  $P_{\text{инф}}$  относительно среднего нормального уровня давления в атмосфере будет наблюдаться увеличение давления в первом полупериоде волны и уменьшение давления во втором. При этом произойдёт увеличение скорости импульсов и соответственно уменьшение суммарной задержки лазерных импульсов пропорционально изменению давления.

**Экспериментальная часть.** Средства измерительного стенда ЛАВС размещены в пятиэтажном здании лабораторного корпуса ИЛФ СО РАН: в помещении пятого этажа, в пристройке на 6 этаже и на крыше здания. В комнате на пятом этаже размещается передающая аппаратура со стандартом частоты 10 мГц и с делителем частоты, подключённым к лазерному драйверу с лазером АТС-С8000-200 с длиной волны 808 нм. Лазер с помощью юстировочных устройств стыкуется с двумя оптическими волокнами, первое волокно затем подключается к передающему линзовому модулю на стойке на крыше пятого этажа на расстоянии 90 м от приёмного линзового модуля. Второе волокно из оптического кабеля длиной 130 м, проложенного по потолку коридора пятого этажа, подключается к фотоусилителю приёмной аппаратуры в комнате в пристройке на 6 этаже на противоположном торце здания. Приёмная аппаратура содержит два фотоусилителя, ко входам которых подключается оптический кабель от передающей аппаратуры и оптическое волокно длиной 13 м от приёмного линзового модуля на стойке на крыше пятиэтажного здания. Выходы фотоусилителей подключаются к многоканальному осциллографу АКПП-4119/4 либо

к фазовому детектору. Для контроля акустических сигналов на крыше здания используются пьезодатчики ПДС-7 с чувствительностью 240 мкВ/Па и усилителем с полосой до 10 Гц, размещённые на стойках с лазерными модулями. При разnose датчиков на длину атмосферной трассы 90 м время прохода фронта атмосферного продольного инфразвукового импульса составит около 0,27 с и на приёмной аппаратуре будет регистрироваться сдвоенный импульс с разномом около 0,27 с, что увеличивает вероятность правильной идентификации принятых импульсов. Следует отметить, что из-за флуктуации параметров атмосферы изменяется скорость звука. Так, например, на трассе 2,6 км в течение 80 мин скорость звука изменялась в пределах 340–343 м/с, атмосферное давление — в пределах 320–450 Па [3].

Здание в Академгородке, где расположен измерительный стенд, находится примерно в 150 м от автодороги, рядом со зданием располагается подстанция ЛЭП 110 кВ. Здание окружает берёзовый лес, атмосферная лазерная трасса длиной около 90 м на крыше здания ориентирована с юга на север.

Фоновые акустические сигналы в зоне измерительного стенда будут определяться как близкими источниками (автомобили, ЛЭП), производственными шумами в собственном и в соседних зданиях, так и другими внешними сейсмическими и инфразвуковыми шумами.

Анализ параметров инфразвуковых фоновых сигналов при измерениях датчиками ПДС-7 в различные дни и разных зонах мониторинга (на крыше здания, вне территории стенда) показал, что значительно меняется интенсивность выбросов амплитуд инфразвуковых колебаний длительностью от десятков до сотен миллисекунд, что выше текущего среднего на интервалах 60 с. Так, на стенде интенсивность наблюдалась 0,36 выбросов в секунду, рядом с ЛЭП — около 0,53 выбросов в секунду. Вдали от ЛЭП в лесной местности интенсивность выбросов значительно уменьшалась и составила менее 0,1 выбросов в секунду. При сильном ветре сквозь кроны деревьев наблюдались пакеты шумовых инфразвуковых импульсов синхронно с порывами ветра с длительностью пакетов до 10–15 секунд.

Оценка влияния метеорологической дальности видимости на атмосферной трассе стенда на амплитуду принимаемых лазерных импульсов при периодических наблюдениях в течение 8 месяцев с начала 2023 г. показала стабильное значение амплитуд принимаемых лазерных импульсов при МДВ более 3 км. Заметное снижение амплитуды импульсов на 50 % наблюдалось в январе 2023 г. при интенсивном снегопаде, что соответствует расчётному МДВ при дальности 0,5 км.

Оценки статистических параметров флуктуации фазы (задержек) атмосферных потоков лазерных импульсов относительно потока лазерных импульсов на выходе оптического волоконного кабеля производились двумя методами.

В первом методе принятые импульсы регистрировались на осциллографе в режиме измерения времён задержки между соседними импульсами двух потоков импульсов от стандарта частоты: первый поток проходил по атмосферной трассе, второй — по оптическому кабелю.

При последовательном считывании времён задержки на интервале времени около 200 с образовывался массив данных не менее 100 значений, который обрабатывался для получения экспериментального распределения плотности вероятности.

Гистограмма задержек времени для полученного массива данных приведена на рис. 2. Данные сгруппированы по 7 интервалам в области от 70 до 74 нс.

Статистическая проверка по критерию  $\chi^2$  показала, что гистограмма близка к гауссовому (нормальному) распределению с уровнем значимости 5 %. Как известно, инфразвуковые фоновые шумы имеют также нормальное распределение [3].

Во втором методе при измерениях стабильности частоты импульсов на выходе лазерного модулятора, на выходе фотоусилителей атмосферной трассы и оптического кабеля с

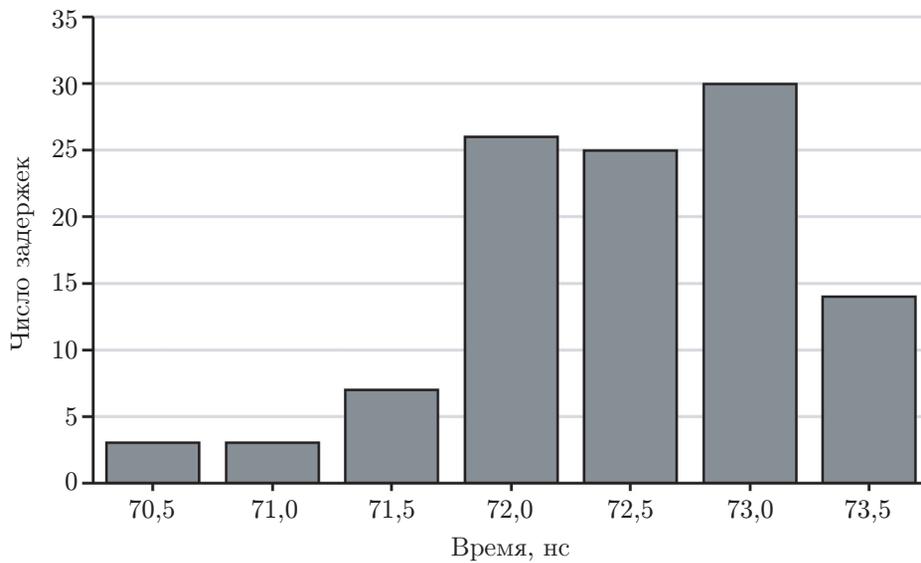


Рис. 2. Гистограмма задержек времени

помощью частотомера восьми разрядов, на выходе лазерного драйвера флуктуаций частоты не отмечалось. На выходе фотоусилителя импульсов с оптического кабеля отмечались редкие флуктуации (1 флуктуация в интервалах 30–50 с) в восьмом знаке частоты импульсов.

На выходе фотоусилителей атмосферной трассы отмечалась более интенсивная флуктуация частоты (1 флуктуация в интервалах 10–20 с или средняя частота флуктуаций  $0,066 \text{ с}^{-1}$ ).

Следует отметить, что такая статистика флуктуаций соответствует выполненным измерениям изменения коэффициента преломления атмосферы на лазерной трассе 350 м на длине волны 0,532 мкм на интервалах 118 с [5]. Так, анализ данных измерений показывает, что количество резких изменений (выбросов) турбулентности атмосферы и соответственно текущего коэффициента преломления атмосферы составляет около  $0,04 \text{ с}^{-1}$ , что близко к средней частоте флуктуаций в атмосферной трассе ЛАВС  $0,066 \text{ с}^{-1}$ .

При экспериментах на атмосферной трассе длиной 572 м [6] с фемтосекундным лазером на 0,78 мкм, синхронизированным с рубидиевым стандартом частоты 61 МГц, наблюдались изменения замеров длины трассы на интервале 230 с.

Анализ данных изменений по значительному отклонению от текущих средних значений показал пять резких изменений длительностью от 16 до 30 с. Возможно, одной из причин таких выбросов (изменений) могли быть достаточно мощные инфразвуковые процессы на атмосферных трассах или ветровые воздействия.

Для более полной оценки корреляционной связи характеристик флуктуаций фазы атмосферных импульсов с параметрами случайных инфразвуковых процессов необходимы методы анализа совпадений параметров двух выборок случайных процессов на совпадающих интервалах времени с учётом мешающего действия фоновых процессов. При наличии источника детерминированных инфразвуковых колебаний оценки корреляционной связи могут значительно упроститься.

**Заключение.** В данном исследовании приведены характеристики разработанной лазерной атмосферно-волоконной системы со стандартом частоты, предназначенной для измерения параметра флуктуаций фазы (частоты) атмосферного оптического сигнала относительно опорного оптического волоконного сигнала, также приводятся результаты экспериментов по оценке статистики флуктуаций фазы (задержек) атмосферных импульсов,

которая близка к нормальному закону, характерному для фоновых инфразвуковых шумов. Получены оценки параметров инфразвуковых фонов на измерительном стенде и в заданной атмосферной зоне мониторинга. В отличие от известных методов измерений инфразвуковых полей развиваемый метод позволяет значительно повысить чувствительность измерений и увеличить помехоустойчивость к воздействию электромагнитных естественных и промышленных помех. За счёт большой базы измерений на трассах до нескольких сотен метров с отражателями и увеличения быстродействия передающих и приёмных устройств до долей наносекунд открывается возможность значительного увеличения вероятности обнаружения аномальных инфразвуковых сигналов для прогноза опасных проявлений природных и антропогенных процессов.

**Финансирование.** Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (НИОКТР, регистрационный № 121033100068-7).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайретдинов М. С., Поллер Б. В., Борисов Б. Д., Бритвин А. В. Акустооптическое взаимодействие на инфразвуке в задачах лазерного экологического мониторинга // Автометрия. 2020. **56**, № 6. С. 91–99. DOI: 10.15372/AUT20200610.
2. Britvin A. V., Borisov B. D., Poller B. V. et al. Highly sensitive detection of infrasonic oscillations in the atmosphere using synchronous laser lines with a frequency standard // Proc. of the IX Int. Symposium technical digest of Modern problems of laser physics (MPLP-2021). Novosibirsk: Ofset-TM, 2021. P. 129–130.
3. Чунчузов И. П., Куличков С. Н. Распространение инфразвуковых волн в анизотропной флуктуирующей атмосфере. М.: ГЕОС, 2020. 260 с.
4. Белов В. А., Белов В. В., Землянов А. А. и др. Распространение оптических волн в неоднородных, случайных, нелинейных средах. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 402 с.
5. Борзилов А. Г., Коняев П. А., Лукин В. П., Соин Е. Л. Измерения параметров атмосферы на протяжённой трассе. II. Оптические измерения уровня турбулентности // Оптика атмосферы и океана. 2023. **36**, № 07. С. 557–562. DOI: 10.15372/AOO20230704.
6. Соколов Д. А., Козаченков С. А. Абсолютный дальномер на основе фемтосекундного лазера с возможностью прослеживаемости к эталону времени и частоты // Оптический журнал. 2023. **90**, № 6. С. 25–37. DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-06-25-37.

*Поступила в редакцию 26.09.2023*

*После доработки 07.10.2023*

*Принята к публикации 09.10.2023*