

РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

Н.Н. Бочкарев^{1,2}, А.М. Кабанов^{1,2}, В.А. Погодаев²

Оптоакустика канала распространения мощного импульсного лазерного излучения в атмосфере

¹ Томский государственный университет

² Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 19.07.2003 г.

Представлена иллюстрация возможностей обработки оптоакустических сигналов с использованием разработанного программного обеспечения «Атмосферная оптоакустика», позволяющего в реальном времени компенсировать искажающее влияние атмосферы на качество регистрируемой оптоакустической информации о характере распространения импульсного мощного лазерного излучения в атмосфере.

В исследованиях распространения мощного лазерного излучения (МЛИ) в атмосфере как среде, содержащей аэрозольные компоненты, успешно используется оптико-акустический (ОА) эффект — возбуждение акустических волн при поглощении в среде модулированного по интенсивности МЛИ [1]. Параметры генерируемых в канале МЛИ ОА-сигналов, регистрируемых удаленным приемником, обусловлены как характеристиками поглощенного излучения, так и оптическими, теплофизическими и акустическими свойствами атмосферы.

Всесторонний анализ результатов экспериментов по распространению МЛИ в атмосфере несомненно актуален, поскольку является, во-первых, проверкой результатов лабораторных экспериментов и соответствующих теоретических моделей, во-вторых, ставит новые задачи в проблеме взаимодействия МЛИ с атмосферой. Причем, учитывая величину финансовых затрат, требуемых на проведение полевых измерений, важным является обсуждение результатов с точки зрения как можно более широкого круга задач. К таким задачам, с одной стороны, можно отнести применение акустического канала для оперативной диагностики влияния атмосферы на формирование в заданной области трассы длинной лазерной искры (ДЛИ) или высокоионизованного канала для направленного стока молниевых разряда [2], а с другой — решение практически противоположной задачи — транспортировки лазерной энергии через атмосферу [1], когда возникновение плазменных очагов (ПО) является наименее благоприятным фактором, влияющим на эффективность передачи МЛИ.

При разработке метода акустической оперативной диагностики возможного влияния состояния атмосферы на прохождение через нее оптического излучения в момент лазерного пуска, с какой бы из перечисленных целей он ни проводился, важным являются не только определение наиболее информативных характеристик принимаемого акустиче-

ского отклика на взаимодействие МЛИ с веществом атмосферы, но и методологическая проработка вопроса адекватности расшифровки «звуковых дорожек» с учетом как знания физики взаимодействия МЛИ с атмосферой при реализации различных нелинейно-оптических эффектов, так и физики формирования и распространения ОА-сигналов.

Для решения этой задачи необходимы работающий в реальном масштабе времени способ диагностики оптического состояния атмосферы и методика прогнозирования эффективности тех или иных геометрических и энергетических параметров МЛИ для конкретного оптико-метеорологического состояния атмосферы. Об эффективности образования канала ионизации типа ДЛИ в этом случае судят по принимаемому акустическому сигналу, генерируемому ПО, возникающими при распространении импульса излучения СО₂-лазера в атмосфере [3].

Физические основы акустического метода как индикатора процесса взаимодействия МЛИ с частицами аэрозоля изложены в [1]. Методика приема, записи и расшифровки «звуковых дорожек», формируемых ПО при распространении мощного излучения СО₂-лазера микросекундной длительности на протяженных атмосферных трассах, обсуждалась в [4], где представлены данные по акустической диагностике ДЛИ в атмосфере. В работе анализируются результаты измерений ряда параметров акустического отклика атмосферы.

Отмечено, что наиболее успешно образование ПО происходит при низких значениях относительной влажности атмосферного воздуха (*RH*). Повышенное содержание влаги в атмосфере приводит к обводнению твердофазного аэрозоля. Водная оболочка такого аэрозоля увеличивает время задержки образования ПО относительно начала импульса лазерного излучения. Осадки ускоряют вывод грубодисперсной фракции твердофазного аэрозоля.

Показано, что взаимосвязь среднего давления в термоакустическом сигнале от средней плотности

энергии лазерного излучения или пикового давления фазы сжатия от плотности энергии в пучке можно уверенно аппроксимировать линейной зависимостью только с учетом энергетической неоднородности лазерного пучка. Под термоакустическим сигналом подразумевается акустический импульс, генерируемый за счет расширения вещества атмосферы при ее нагреве поглощенным МЛИ без реализации фазовых переходов.

Таким образом, акустические измерения позволяют проводить интерпретацию результатов с учетом энергетической структуры лазерного пучка.

Начало систематическому изучению спектральных и энергетических характеристик акустических волн, генерируемых совокупностью ПО, было положено в работах [5, 6].

Регистрация разрешенных по времени акустических сигналов от отдельных ПО [3, 6, 7] позволила связать их длительность и амплитуду с размером ПО для микросекундных лазерных импульсов.

Следует отметить, что для энергетических характеристик лазерного источника, используемого в натуральных экспериментах, была реализована четочная структура ДЛИ, обусловленная возникновением ПО на частицах твердого аэрозоля. При этом для акустического метода индикации возникновения ДЛИ не имеет принципиального значения механизм инициации ПО. Из данных ОА-измерений удалось восстановить критические размеры частиц аэрозоля, инициирующих ПО в зависимости от плотности энергии МЛИ, что представляет интерес в прогнозе распространения высокоэнергетических пучков на атмосферных трассах.

В ранее опубликованных работах [1, 3–7, 9] не проводилась обработка акустических свойств ДЛИ в реальном времени. В данной работе приводятся примеры такой обработки ОА-сигналов, генерируемых ДЛИ, с помощью разработанного программного обеспечения «Атмосферная оптоакустика», описание алгоритма и физическое обоснование заложенных в программный комплекс моделей.

На рис. 1 показан типичный вид временной развертки акустического отклика от отдельного квазисферического ПО, полученный цифровой обработкой с частотой дискретизации 34,7 кГц.

Акустический отклик ПО (кривая 1 на рис. 1,а) в основной своей части имеет характерный вид, который хорошо повторяет модельный профиль (кривая 2 на рис. 1,а), рассчитанный с использованием разработанного программного обеспечения. Программа содержит модуль, позволяющий имитировать импульсное воздействие на передаточную функцию излучателя нулевого порядка (модель пульсирующей сферы), имеющую вид

$$K(\omega) = \frac{P_0 a}{dc(1+iX)} \exp(iX) \exp[i\omega(\tau - d/c)],$$

где $X = \omega a/c$, $\omega = 2\pi f$; d – дальность от акустического приемника до ПО; τ – временная задержка между моментом послышки МЛИ и моментом приема акустического сигнала; f – частота звуковой волны;

a – радиус ОА-излучателя; P_0 – давление на его поверхности; c – скорость звука.

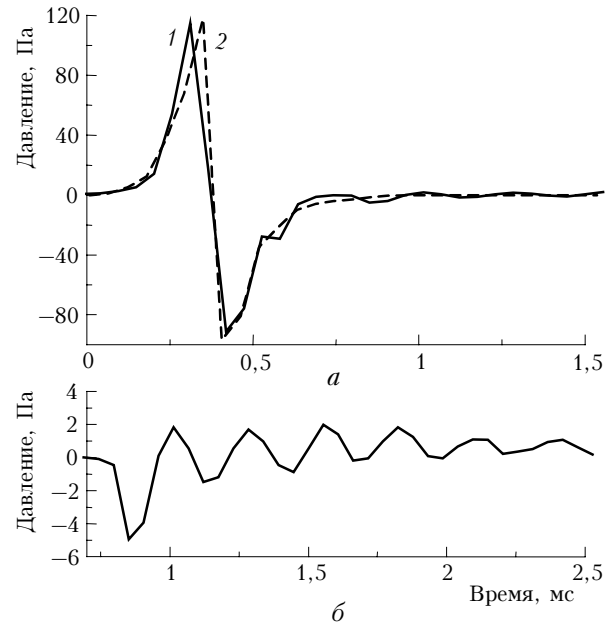


Рис. 1. Акустический отклик квазисферического ПО: $d = 16$ см, $T = 291$ К, $RH = 78\%$; а – эксперимент (1), модель (2); б – пульсации ПО (увеличено в 10 раз относительно а)

Однако в отличие от модели истинный ОА-отклик имеет слабозаметный и достаточно протяженный «хвост» (рис. 1,б). ПО не «схлопывается» сразу после возникновения, а продолжает существовать достаточно долгое время и как излучатель звука является резонатором с собственной конечной добротностью.

Объяснение этого явления теоретически было предсказано в [3] и заключается в следующем. В разогревающемся ПО зона генерации акустических волн удалена от поверхности частицы и возникающие здесь акустические волны разогрева бегут из зоны разогрева не только наружу, но и внутрь. Их «схлопыванию» к частице препятствует встречный сверхзвуковой поток газа во внутренней конвективной области ПО. Результатом взаимодействия акустической волны разогрева с потоком являются сжатие конвективной области, быстрый рост давления на ее границе с теплопроводностной областью и своеобразное отражение (реверберация) акустической волны разогрева, увеличивающее время ее существования при внешнем приеме.

Как правило, при удаленном приеме ОА-сигнала в атмосфере «хвост» акустического отклика от ПО не регистрируется вследствие влияния внешних акустических шумов, существенно снижающих отношение сигнал-шум на входе приемного оборудования.

Акустические приемники, размещаемые вблизи поверхности Земли на некоторой высоте, могут быть удалены от наклонного канала МЛИ на сотни и более метров, а регистрируемые ими ОА-сигналы искажаются из-за ослабления в атмосфере [8]. Поэтому дистанционные ОА-измерения в атмосфере

требуют восстановления исходных амплитудно-частотных характеристик ОА-сигналов для получения достоверной информации о процессе распространения МЛИ в атмосфере.

Программное обеспечение «Атмосферная оптоакустика» в реальном времени позволяет учесть влияние диссипативных, дифракционных и нелинейных искажений на форму ОА-сигналов. В основе алгоритмов программы заложены методы узкополосного спектрального анализа. Все преобразования с сигналами проводятся в спектральном диапазоне. Программа ориентирована на работу с различными типами акустических приемников, имеет встроенную амплитудную калибровку, перестраиваемые цифровые фильтры (ФНЧ, ФВЧ, узкополосные и режекторные), позволяющие проводить оптимальную частотную фильтрацию ОА-сигналов на фоне атмосферных шумов и аппаратурных помех, и развитый многооконный интерфейс, включающий диалоговые пользовательские меню.

Поскольку в аналоговых цепях приемного акустического оборудования содержатся дифференцирующие и интегрирующие цепи, то амплитудно-частотные и фазочастотные искажения измеряемых сигналов, вносимые этими цепями, должны быть учтены при дальнейшей программной обработке. Это достигается путем программного включения цифровых перестраиваемых дедифференцирующих и деинтегрирующих цепей в каждом из четырех одновременно обрабатываемых каналов для восстановления исходных ОА-сигналов и компенсации аппаратурных искажений.

Вводя исходные данные о геометрии проведения измерений (взаимное размещение канала МЛИ, ОА-приемников и подстилающей поверхности), можно свести до минимума влияние акустических помех в виде отраженных импульсов одновременно для четырех разнесенных в пространстве акустических датчиков. Алгоритм программы компенсирует сферическую и цилиндрическую расходимость акустических волн, классическое (вязкие и термические потери) и молекулярное (вращательная и колебательная релаксация) поглощения звука на основе исходных метеоданных, турбулентное ослабление и ослабление за счет поверхности Земли [8]. Абсолютные значения звукового давления приводятся к единому расстоянию — 1 м.

Местоположение отдельных ПО в области пробы определяется по формуле

$$d = 20,067 K_{RH} \sqrt{T} \tau,$$

где T — температура воздуха, К; K_{RH} — поправочный коэффициент для влажного воздуха. Локализация ПО при работе на приземной трассе распространения МЛИ определяется вычислением перекрестных корреляционных функций, что позволяет выбрать произвольное размещение ОА-приемников относительно канала МЛИ.

При регистрации звуковой дорожки, содержащей акустические сигналы от отдельных ПО, регистрируются также сигналы, отраженные от подсти-

лающей поверхности. Амплитуда отраженных сигналов меньше соответствующих прямых импульсов, а их задержка относительно основных импульсов зависит от разности хода между прямой и отраженной звуковыми волнами. Поскольку скорость звука в воздухе меньше скорости звука в грунте, то коэффициент отражения ОА-сигналов по звуковому давлению R_p меняется от 1 при угле полного внутреннего отражения до значения

$$R_p = (\sin \varphi - z_1 / z_2) / (\sin \varphi + z_1 / z_2)$$

при нормальном падении звуковой волны на поверхность, где φ — угол отражения; $z_1 = \rho c$ — акустический импеданс воздуха; ρ — плотность воздуха; z_2 — акустический импеданс подстилающей поверхности (комплексная величина) [8]. Суммарное звуковое поле в точке приема представляется в виде

$$\Phi = \frac{e^{ikr_1}}{r_1} + \frac{e^{ikr_2}}{r_2} R_p + \frac{e^{ikr_2}}{r_2} (1 - R_p) F,$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина звуковой волны; $r_1 = d$, r_2 — расстояния от источника до приемника и от мнимого источника до приемника соответственно. Первый член этого уравнения описывает волну, распространяющуюся от источника к приемнику. Второй член относится к отраженной волне. Параметр F третьего члена уравнения — коэффициент поверхностных потерь, который определяется в виде

$$F = 1 + 2i\sqrt{\theta} e^{-\theta} \int_{-i\sqrt{\theta}}^{\infty} e^{-u^2} du$$

где θ — «численное расстояние», задается в виде

$$\theta = \frac{2ik_1 r_2}{(1 - R_p)^2 \cos^2 \varphi} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2 \left(1 - \frac{k_1^2 \cos^2 \varphi}{k_2^2} \right).$$

Здесь k_1 , k_2 — волновое число для воздуха и грунта соответственно.

Акустический импеданс грунта вычисляется в программе с использованием известной параметрической модели Делани—Безли

$$z_2 / z_1 = 1 + 9,08(\sigma/f)^{0,75} - i11,9(\sigma/f)^{0,73},$$

где σ — удельное сопротивление потока на единицу толщины поверхности.

На рис. 2 представлены результаты натуральных измерений коэффициента отражения ОА-откликов от подстилающей поверхности. В данном случае канал распространения МЛИ был направлен горизонтально на высоте около 5 м над поверхностью Земли.

Область, заполненная ПО, имела достаточную протяженность, чтобы охватить интервал измеряемых углов от 4 до 46°. Данные получены усреднением по нескольким пускам МЛИ над одним и тем же участком подстилающей поверхности. Заметное

изменение зависимости $R_p(\varphi)$ после дождя вызвано увеличением импеданса подстилающей поверхности. Кривые на графике – расчет по указанной выше формуле при $\text{Re}(z_2/z_1) = \text{Im}(z_2/z_1) = 1$ (кривая 1) и 1,2 (кривая 2). Разброс точек при углах отражения более 15° обусловлен неоднородностью подстилающей поверхности.

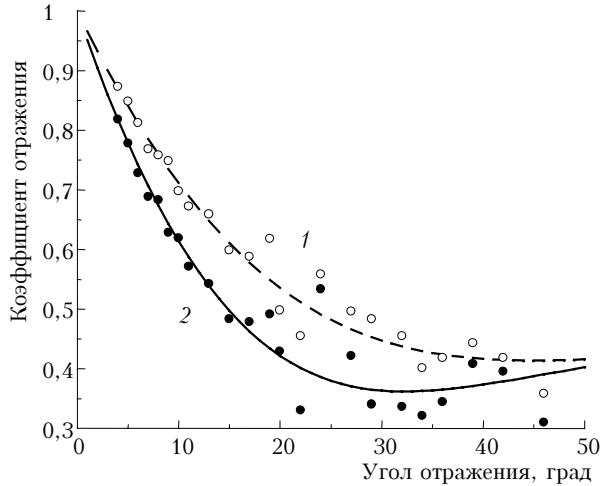


Рис. 2. Коэффициент отражения акустических откликов ПО подстилающей поверхностью по звуковому давлению: 1 – сухая почва; 2 – тот же участок после дождя. Точки – натурные измерения, линии – теоретическая аппроксимация

На основании исходных данных об импедансе подстилающей поверхности [8] и геометрии измерений рассчитывается коэффициент отражения для всех ПО, возникших на трассе распространения МЛИ, после чего сигналы отраженных помех «вычищаются» из «звуковой дорожки». В качестве примера на рис. 3 показан результат такой работы программы, где сигнал помехи в районе 1,5 мс по амплитуде составлял почти половину от истинного сигнала (кривая 1), а после компенсации – менее 10% (кривая 2).

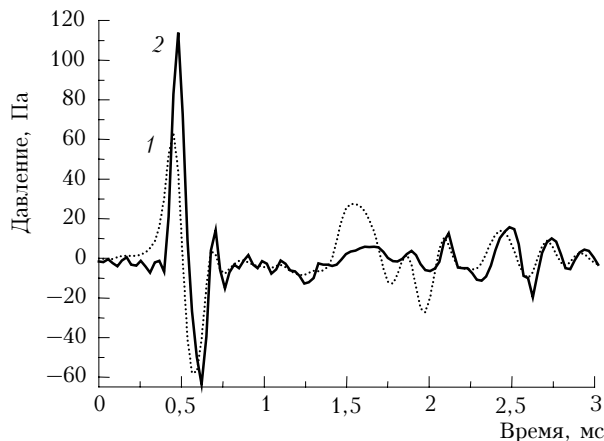


Рис. 3. Результат численного восстановления акустического отклика ПО: $d = 141$ м, $T = 288$ К, $RH = 75\%$; 1 – с компенсацией только сферической расходимости (штриховая кривая); 2 – полная компенсация, включая помеху отражения (сплошная кривая)

В [7] путем многократной одновременной регистрации видимого размера ПО и генерируемого им акустического импульса найдены эмпирические соотношения, связывающие диаметр ПО $d_{\text{ПО}}$ с длительностью τ_+ и амплитудой P_+ генерируемого им акустического импульса сжатия:

$$d_{\text{ПО}} \approx 0,71\tau_+ c; d_{\text{ПО}} \approx P_+ d/2100.$$

Программная реализация второго соотношения значительно проще, поэтому в алгоритме программы диаметр ПО определяется по амплитуде генерируемого им акустического импульса с целью расчета нелинейных потерь энергии МЛИ на трассе распространения. По измерению амплитуд акустических откликов, генерируемых отдельными ПО, определяются размеры всех ПО и их распределение по размерам, после чего строятся гистограммы, иллюстрирующие области нелинейных потерь МЛИ по трассе.

Для эффективной работы этого алгоритма следует с возможно более высокой достоверностью восстанавливать исходные амплитуды ОА-откликов, что доступно лишь при цифровой обработке сигналов.

Из рис. 3 видно, что после программной компенсации ослабления звука восстановленная амплитуда исходного сигнала (кривая 2) стала почти в 2 раза больше (положительная фаза звукового давления), чем до компенсации (кривая 1).

Акустические свойства ДЛИ проявляется на поздних стадиях, когда ПО расширяются в окружающий газ, как правило, по механизму светодетонационной волны. Возникающие при этом в условиях дисперсии и диссипации спектральные характеристики сравнительно низкочастотных слабозатухающих компонент акустических волн разогрева являются основным источником акустической информации о ДЛИ при дистанционном приеме. Область пробы характеризуется несколькими существенно различными пространственными масштабами – размером ПО, средним расстоянием между соседними ПО и общим размером области пробы. Эти пространственные масштабы можно оперативно оценить по спектральным особенностям в частотной области. Чем точнее первичные измерения для определения частотных спектров, тем выше точность измерения пространственных масштабов области пробы.

В качестве иллюстрации эффективности работы программы при восстановлении исходных акустических частотных спектров области пробы на рис. 4 показан результат восстановления частотного спектра акустических сигналов, генерируемых плотно заполненной ПО-областью (кластер ПО).

Кластер находился на удалении 160 м от акустического приемника, а значит трансформация частотного спектра искажающим влиянием атмосферы достаточно заметна, особенно на высоких частотах (спектральный пик $f = 6$ кГц).

В предыдущих сообщениях [1, 3, 4, 9] отмечалось, что в акустическом отклике помимо импульсов давления от очагов пробы содержится так

называемый термоакустический сигнал, который несет в себе отпечаток распределения световой энергии по сечению лазерного пучка, т.е. может служить фактором энергетической неоднородности.

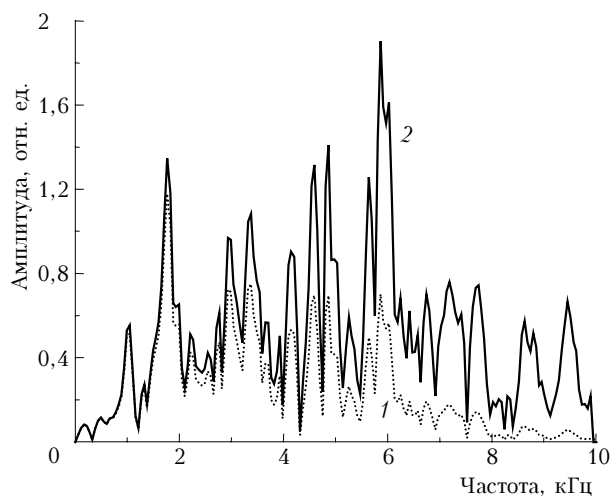


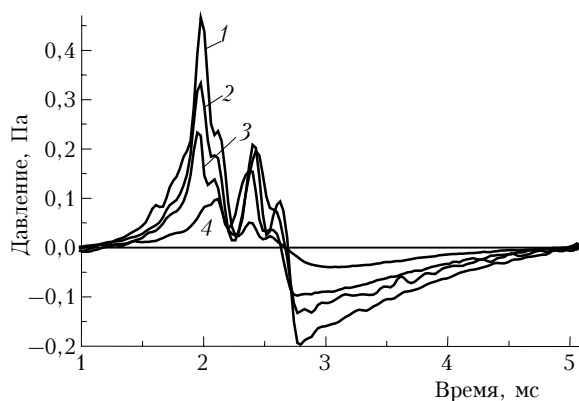
Рис. 4. Результат численного восстановления частотного спектра акустических характеристик кластера ПО: $d = 160$ м, $T = 288$ К, $RH = 75\%$; 1 – без учета, 2 – с учетом частотной трансформации акустических откликов

В атмосферных ОА-исследованиях при работе на наклонной трассе возможна однопозиционная схема измерений, когда ось акустического приема размещенного у поверхности Земли микрофона перпендикулярна каналу распространения МЛИ, а протяженность контролируемой области канала МЛИ составляет первую зону Френеля для основной гармоники генерируемой акустической волны. Учитывая, что большинство пучков МЛИ близки к аксиально симметричным, можно приближенно оценить распределение плотности энергии МЛИ по пучку, не решая строгую обратную задачу вычислительной реконструктивной томографии (рис. 5).

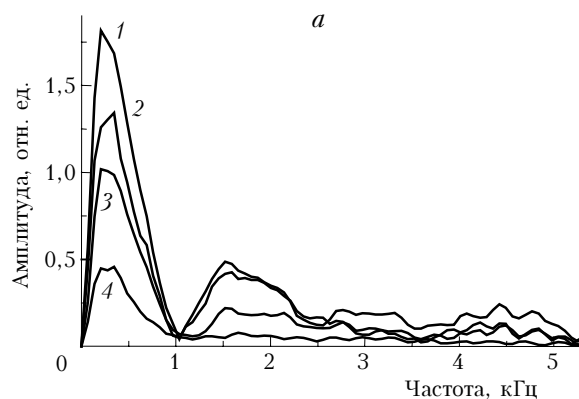
Пучок МЛИ имел кольцеобразную структуру, что заметно на временных развертках. При увеличении плотности энергии МЛИ в частотном спектре основной максимум, соответствующий диаметру пучка, не изменяется, а зависимость акустического давления от плотности энергии оказывается практически линейной. Второй максимум (высокочастотный) соответствует размерам тонкой структуры пучка, а зависимость его амплитуды от плотности энергии имеет явно нелинейный характер. При минимальной плотности энергии этот максимум практически не заметен, т.е. «тонкая структура» пучка практически исчезла. Дистанционные измерения, по которым рассчитывается интегральная по времени акустическая энергия в звуковом диапазоне, дают оценку энергетики пучка МЛИ либо общего содержания аэрозоля в канале МЛИ.

Для компенсации нелинейного поглощения ОА-сигналов в атмосфере по исходным метеоданным в программе предусмотрен отдельный модуль обработки, выполненный по алгоритму, изложенному в [10]. Однако из-за сложности алгоритма, приво-

дящей к медленному расчету, этот модуль используется для обработки ОА-сигналов от одиночных ПО.



a



b

Рис. 5. Результат восстановления акустических импульсов, генерируемых каналом МЛИ и регистрируемых удаленным на расстояние 30 м акустическим приемником (a), и их частотных спектров (b) для различных значений плотности лазерной энергии: 1 – 1,7; 2 – 1,36; 3 – 0,87; 4 – 0,29 Дж/см²; $d = 30$ м, $T = 291$ К, $RH = 71\%$

Алгоритм компенсации нелинейного поглощения ОА-сигналов целесообразно использовать при величине параметра нелинейности (в уравнении Хохлова–Заболотской–Кузнецова) более 1. Расчеты показывают, что для ПО с диаметром порядка 3 см уменьшение амплитуды акустического отклика за счет нелинейного поглощения не превышает нескольких процентов.

Таким образом, разработанное программное обеспечение «Атмосферная оптоакустика» позволяет в реальном времени компенсировать искажающее влияние атмосферы на качество регистрируемой ОА-информации о характере распространения МЛИ в атмосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 03-05-64431.

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Нелинейная оптика атмосферного аэрозоля. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 260 с.
2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 7. С. 753–769.
3. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Сорокин Ю.М. Оптоакустические эффекты в аэрозолях // Оптика атмосфер. 1990. Т. 3. № 6. С. 563–578.

4. Бочкарев Н.Н., Землянов А.А., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Акустическая диагностика очагов пробоя в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. № 12. С. 1141–1144.
5. Беляев Е.Б., Годлевский А.П., Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Муравский В.П., Шаманаева Л.Г. О характере генерации акустического излучения при лазерном пробое газодисперсных сред // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 333–336.
6. Ахтырченко Ю.В., Бочкарев Н.Н., Высоцкий Ю.П., Гарин О.В., Зув В.Е., Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Курагин А.И., Миронов В.Л., Погодаев В.А., Покасов Вл.В., Сидоров Б.Г. Диагностика параметров плазмы оптического пробоя атмосферы по акустическим измерениям // VIII Всесоюз. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Тезисы докл. Томск, 1984. Ч. 2. С. 114–118.
7. Бочкарев Н.Н., Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Миронов В.Л., Погодаев В.А. Исследование плазмы оптического пробоя атмосферы // Матер. VIII Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1986. Ч. 2. С. 194–198.
8. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П. Особенности приземного распространения звуковых волн // Изв. вузов. Физ. Деп. в ВИНТИ. 1986. № 501–В86. 82 с.
9. Бочкарев Н.Н., Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Миронов В.Л., Погодаев В.А. Генерация звука при распространении импульсного лазерного излучения в допробойном режиме // Матер. VIII Всесоюз. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1986. Ч. 2. С. 216–220.
10. Бочкарев Н.Н., Коняев П.А. Численное решение нелинейного уравнения звукового пучка в атмосфере // Оптика атмосф. 1990. Т. 3. № 6. С. 668–670.

N.N. Bochkarev, A.M. Kabanov, V.A. Pogodaev. Photoacoustics of the atmospheric channel of propagation of a high-power laser puls.

The capabilities of the newly developed Atmospheric Photoacoustics software are illustrated as applied to processing of photoacoustic signals. This software allows real-time compensation for the distorting effect of the atmosphere on the quality of recorded photoacoustic information on the character of atmospheric propagation of high-power laser radiation.