АКУСТООПТИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НА ИНФРАНИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Марат Саматович Хайретдинов

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, главный научный сотрудник, тел. (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Борис Викторович Поллер

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, зав. лабораторией, тел. (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Александр Викторович Бритвин

Институт лазерной физики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, старший научный сотрудник, тел. (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru

Дмитрий Яковлевич Машников

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, аспирант, тел. (383)330-87-43, e-mail: mashnikovdmitriy@gmail.com

Изучаются процессы акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах с применением сейсмических вибраторов в качестве источников низкочастотных акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере, и лазерных измерительных линий как оптических приемников колебаний. Предложенные тип источника и приемника в интересах изучения акустооптического взаимодействия определяют новизну и оригинальность предлагаемого подхода. Приводятся результаты экспериментов по оцениванию характеристик акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие, инфранизкие частоты, сейсмический вибратор, лазерная измерительная линия, оптический стенд, экспериментальные исследования.

ACOUSTOOPTIC INTERACTION ON LOW FREQUENCIES

Marat S. Khairetdinov

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Chief Researcher, phone: (383)330-87-43, e-mail: marat@opg.sscc.ru; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia

Boris V. Poller

Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru

Aleksander V. Britvin

Institute of Laser Physic SB RAS, 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (383)306-28-20, e-mail: lablis@mail.ru

Dmitriy Y. Mashnikov

Institute of the Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D. Student, phone: (383)330-87-43, e-mail: mashnikovdmitriy@gmail.com

Processes acoustooptic interactions on low frequencies with application of seismic vibrators as sources of the low-frequency acoustic fluctuations, extending in atmosphere, and laser measuring lines as optical receivers of fluctuations are studied. Offered source and receiver type in interests of studying acoustooptic interactions define novelty and originality of the offered approach. Results of experiments on evaluation characteristics interactions on low frequencies are resulted.

Key words: acoustooptic interaction, low frequencies, seismic vibrator, laser measuring line, optical stand, experimental researches.

Введение

Вопросы акустооптического взаимодействия имеют давнюю историю и связаны они в основном с изучением дифракции света в ультразвуковом и радиочастотном диапазонах [1-3]. При этом практически неисследованными остаются вопросы акустооптического взаимодействия в области инфранизких частот. Это обусловлено отсутствием специальных акустических излучателей в этом диапазоне частот. В тоже время авторами данной работы и другими исследователями показано, что альтернативой указанным источникам являются сейсмические вибраторы, которые способны наряду с сейсмическим волнами в земле излучать акустические колебания в атмосфере [4,5]. К ним, в частности, относятся центробежные вибраторы ЦВ-100 и ЦВ-40 [6]. Благодаря высокой синхронности излучения акустических колебаний сигналы от таких источников могут регистрироваться на больших удалениях за счет использования методов корреляционно-спектрального накопления. При этом благодаря ограниченной мощности излучения решается одновременно проблема экологической безопасности использования данного класса источников в отличие от мощных взрывных источников. Все это вместе взятое открывает возможности проведения экспериментальных исследований по изучению закономерностей процессов акустооптического взаимодействия, результаты которых представляют интерес для создания комбинированных сейсмо-акусто-оптических информационных технологий.

Актуальность темы исследований, наряду с ее фундаментальной компонентой, определяется необходимостью решения задач акустического обнаружения и локации различных техногенных и природных объектов и событий с помощью световых измерительных колебаний наряду с использованием колебаний иной природы, например, сейсмических. Если для регистрации последних используется группирование датчиков с определенной пространственной расстановкой, то измерительный луч по отношению к низкочастотным акустическим колебаниям представляет собой непрерывную когерентную антенну, позволяющую определять с высокой точностью углы прихода низкочастотных акустических волн от внешних источников.

Предложенный подход к изучению акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах определяют новизну и оригинальность методической части проводимых исследований.

В основе рассматриваемого типа акустооптического взаимодействия лежат процессы, связанные с волновым возмущением лазерных световых колебаний внешним акустическим полем, сквозь которое в атмосфере распространяется световой луч. Возмущенная атмосфера в локальных точках пространства обуславливает изменение параметров распространения лазерного излучения, включая его характеристики преломления, поглощения и рассеяния. Следствием этого могут быть вариации амплитудных уровней и скоростей распространения измерительных волн, их фазо-частотные преобразования, определяющие возможности «лучевого приема» акустических колебаний. Постановка задачи. Рассматривается взаимодействие волновых колебаний разной природыакустический волновой процесс

$$\nabla^2 x - \frac{1}{v^2} \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 \tag{1}$$

и процесс в измерительном луче

$$\nabla^2 y - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 y}{dt^2} = 0$$
 (2)

где υ , c – скорости распространения акустической и измерительных волн соответственно, ∇^2 – оператор Лапласа. Уравнение (1) допускает решение в виде плоской гармонической волны с амплитудой A: $x(t) = A \sin \left(\omega t - \overline{k} \ \overline{r}\right)$, где \overline{r} – радиус-вектор, \overline{k} – волновой вектор, причем $|\overline{k}| = k = \omega/\upsilon$.

Взаимодействие обоих волновых процессов основывается на том, акустический волновой фронт, характеризуемый в точках среды значениями акустических давлений, обуславливает возникновение в среде механических деформаций a_j . Вследствие этого каждая акустическая волна сопровождается изменением показателя преломления среды *n*. С учетом этого для плоской монохроматической акустической волны, распространяющейся вдоль заданного направления z, меняющийся показатель преломления может быть представлен в виде

$$n(z,t) = n + \Delta n \cos(2\pi f t - kz) . \tag{3}$$

Здесь *n*- невозмущенный показатель преломления, f и k –частота и волновое число, Δn -амплитуда изменения показателя преломления под действием акустической волны. Для падающего света среда с показателем преломления (3) представляет собой дифракционную решетку, движущуюся со скоростью звука υ . Проходя через такую среду, свет дифрагирует на неоднородностях показателя преломления в зависимости от частоты колебаний акустической волны. Условия осуществимости лучевого приема, основанные на соотношениях параметров внешнего акустического поля и измерительных колебаний, определяются следующими соотношениями:

 $v/\omega >> c_0/\upsilon, \ L/r l >> 1, \ \lambda/d > 0.82$ $L/\lambda << \begin{cases} c_0^2/c_m \upsilon \ npu \ c_0/\upsilon >> 1\\ c_0^2/c_m \upsilon, \ c_0/(\upsilon - c_0) \ npu \ c_0/\upsilon < 1 \end{cases}$

Здесь V, C_0, C_m^{\neg} – угловая частота, средняя скорость и амплитуда параметрического изменения скорости распространения колебаний в измерительном луче; L, d – длина и диаметр измерительного луча; $\omega, \lambda, \upsilon$ – угловая частота, длина волны и скорость распространения внешних акустических колебаний; rl – радиус пространственной корреляции неоднородностей среды.

Приведенные соотношения определяют требования к выбору условий регистрации акустических колебаний с помощью лазерной измерительной линии. В реальных условиях на процессы регистрации влияют ряд факторов: неоднородность атмосферы, внешние шумы и освещенность и др. Полнота учета всех внешних факторов достигается в условиях проведения экспериментальных исследований.

Для проведения исследований авторами создан макет акусто-оптической информационной системы (рис. 1) в составе сейсмического вибратора ЦВ-40 (акустического излучателя), оптического стенда в составе лазерного излучателя, оптического приемника. Для прямой регистрации акустических колебаний используются автономные регистрирующие цифровые станции, располагаемые вдоль измерительного луча. Метеостанция предназначена для регистрации метеоусловий в окружающей атмосфере. Схема оптического стенда представлена на рис. 2. На представленных схемах вибратор ЦВ-40 играет роль внешнего низкочастотного генератора акустических колебаний, распространяющихся в атмосфере в диапазоне частот 6.25-11.23 Гц. Роль оптического стенда состоит в формировании импульсов накачки длительностью 50 мкс с частотой следования 1-10 кгц с помощью генератора импульсов (ГИ) и модуля регулировки частоты (РЧ), передачи – приема их по оптической линии связи с последующим выделением огибающей импульсов с применением интегратора (ИНТ), как это показано на рис. 3. Выделяемая огибающая несет в себе информацию о внешних воздействиях на измерительный лазерный луч в виде фазо-частотновременных характеристик. Измерения их проводились в условиях лаборатории и открытой атмосферы с использованием отражателей.



a)



б)

Рис. 1. Компоненты акустооптической системы: *а*) сейсмический вибратор ЦВ-40; *б*) акусто-оптический стенд



Рис. 2. *а*) функциональная схема модуля излучателя оптических импульсов; б) фун-кциональная схема оптического приемника. Здесь ИП – источник питания, ГИ-генератор импульсов, РЧ-регулятор частоты, УС-усилитель, М-модулятор, МЧ-модулирующая частота, ЛД-лазерный полупроводниковый детектор, ОС-оптическая система, ФД-фазовый детектор, ПФ-полосовой фильтр, Д-детектор, ИНТ-интегратор



Рис. 3. Запись оптического сигнала с несущей 1 кГц, модулированного по амплитуде акустическим сигналом и внешним шумом

В экспериментах выполнено оценивание предельно низкого уровня глубины амплитудной модуляции измерительного луча, характеризующего чувствительность акустооптического взаимодействия. Идея измерений в лабораторных условиях основывается на принципах амплитудной модуляции (AM) импульсов накачки лазерного излучения до задаваемой глубины модуляции от модулятора М прецезионными гармоническими сигналами в диапазоне частот 2-20 Гц (рис. 2а) с последующей передачей – приемом по оптической линии длиною 80 м. В частности, примеры осциллограмм передачи АМ модулированных сигналов и приема демодулированных, представлены на рис. 4, 5.



Рис. 4. Осциллограмма 5,1 % АМ сигнала и выходного сигнала на трассе протяженностью 80 м в лаборатории

Рис. 5. Осциллограмма 10 % АМ сигнала и выходного сигнала на атмосферной трассе

Рис. 4 соответствует случаю «передачи-приема» в условиях лаборатории на трассе протяженностью 80 м и глубине модуляции 5.1%, рис. 5 – «передаче-приему» по атмосферной трассе при глубине модуляции 10%. Очевидно, предельные чувствительности в условиях воздействия шумов можно достигать за

счет применения цифровых методов обработки огибающей оптического сигнала. К числу таких методов относятся алгоритмы квадратурного измерения амплитуд и фаз гармонических колебаний [7]. С помощью этих алгоритмов для случая использования внешнего модулирующего колебания с частотой 5 Гц с глубиной модуляции 0.4% на рис.6а и 6б соответственно получены текущие значения оценок амплитуд и фаз огибающей оптического сигнала на каждом шаге m_i (i= 1...N, где N-множество дискретных отсчетов огибающей, укладывающихся на временном интервале анализа Т. В рассматриваемом случае T=60c) итерационного оценивания дискретных значений параметров. Количественные значения шагов представлены на оси абцисс. Конечные результаты оценивания амплитуд и фаз определяются их установившемися значениями начиная с некоторой итерации $m_{yct.}$ Аналогичные результаты для глубины модуляции 16% и частоты 10 Гц представлены соответственно на рис. 7 а,б,с. На рис. 6с и рис. 7с для рассматриваемых случаев представлены результаты спектрального выделения модулирующего сигнала на фоне шумов.



164

В проведенных тестовых экспериментах показано, что наиболее чувствительными к акустооптическому взаимодействию является фазо-частотные характеристики, позволящие обеспечить достижимость определения в оптическом сигнале глубины модуляции до уровня в 0.1%.

Акустооптические взамодействия с использованием акустических колебаний вибрационных источников относятся к числу слабых взаимодействий, которые можно обнаружить лишь методами накопления сигналов в шумах. С учетом этого важно оценить верхние граничные значения по дальности, которые достижимы для выбранного типа вибрационного источника, каковым является вибратор ЦВ-40. Теоретически рассчитанные траектории распространения инфразвуковых волн могут охватывать линейную базу на поверхности земли до 100 км [6]. С учетом такого обоснования выполнен эксперимент по регистрации акустических колебаний от вибратора ЦВ-40 вдоль линейного профиля протяженностью 100 км. Соответственно разработана и успешно опробирована в экспериментах с вибратором ЦВ-40 методика корреляционного накопления зондирующих ЛЧМ-сигналов вида $s(t)=Acos(\omega_0 t+\beta t^2/2)$, где β - скорость нарастания частоты излучения источника в пределах 7.91- 11.23 Гц. Результаты сверток в зависимости от дальности представлены на рис. 8.



Рис. 8. Результаты сверток ЛЧМ-сигналов от вибратора ЦВ-40 в зависимости от дальности

Как следует из полученных сигналов помехоустойчивость результатов накопления во многом определяется зашумленностью пунктов регистрации. На рис. 9 приведены нормированные графики затухания акустических и сейсмических сигналов по расстоянию. Как следует из полученных данных, усредненное ослабление силы звука в пределах 100 км составляет 4 порядка, т.е. 40 дб. Принимая во внимание, что сила звука убывает обратнопропорционально квадрату расстояния от источника, в данном случае в 100² раз (40 дб), приходим к тому, что на инфранизких частотах ослабление звука по расстоянию полностью определяется фактором геометрического расхождения волнового фронта акустической волны. Это означает, что фактором поглощения акустической энергии в атмосфере практически можно пренебречь.



Рис. 9. Графики затухания акустических и сейсмических волн по дальности

В этом несомненное достоинство способа изучения акустооптического взаимодействия на инфранизких частотах.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 17-07-00872-а, 16-07-01052-а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г. Теория и практика современной акустооптики. Изд. Дом МИСиС, Москва. – 2015. – 459 с.

2. Богданов С.В. Акустооптические методы измерения скорости звука. Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 2013. – 142 с.

3. Корпел А. Акустооптика- Acousto-optics – М.: Мир. – 1993.

4. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхдов С.И., Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. – 1996.

5. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами. Геология и геофизика. – 1999. – т. 40. – № 3. – С. 431-441.

6. Гуляев В.Т., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмовибраторов. Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. – 2001. – т.37. – №3. – С.303-312.

7. Хайретдинов М.С., Родионов Ю.И., Дворецкая Л.Г. Программно-технические средства обработки вибросейсмических сигналов и анализа микросейсм. Препринт 969, ВЦ СО РАН, Новосибирск. – 1993. – с.42.

© М. С. Хайретдинов, Б. В. Поллер, А. В. Бритвин, Д. Я. Машников, 2018