А.А. Данилов¹, В.Н. Корниенко²

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕПРОЗРАЧНОГО БЕСШУМНОГО ОБЪЕКТА В ВОЛНОВОДЕ МЕТОДОМ ВРЕМЕННОГО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛН

¹*Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева*

Россия, 117036, Москва, ул. Шверника, д. 4

Тел.: (499) 723-6300; E-mail: dalex46@mail.ru

²*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН*

Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, 11

Тел.: (495) 629-3491; E-mail: korn@cplire.ru

Представлены результаты восстановления звукового поля в волноводе, содержащем неоднородность с абсолютно жесткой границей, численным методом обращения времени. Показано, что при наличии широкополосного импульсного источника, расположенного дальше от звукопрозрачной антенны, чем сама неоднородность, использование указанного метода позволяет восстановить ее пространственные координаты.

Ключевые слова: волновод, акустический сигнал, акустика обращенного времени, акустические методы, звуковое поле

Методы акустики обращенного времени (time reversed acoustic) развиваются уже на протяжении многих лет [1, 2]. В частности, при их помощи решаются задачи фокусировки излучения в гидроакустике, сейсмологии, электродинамике (см., например, [3–5]). Они также используются для восстановления координат источника звука по данным, которые известны на замкнутых и незамкнутых поверхностях (т.н. полостях и зеркалах обращения времени [6]).

Реализующий подход зеркал обращения времени – параллельный вычислительный алгоритм, основанный на уравнениях акустики в пространственно-временном представлении, был предложен в [7].

Целью данной работы было исследование возможности использования указанных методов для выявления в волноводе неоднородности с абсолютно упругой поверхностью при его возбуждении широкополосным импульсным источником. Отметим, что линейный размер неоднородности существенно меньше размеров рассматриваемой области, а положение точечного источника звука заранее неизвестно.

Была рассмотрена следующая двумерная задача (рис. 1.). Прямоугольный водный слой, глубина которого $h = 100$ м, ограничен сверху

свободной поверхностью, а снизу – абсолютно жесткой. В этом волноводе расположена вертикальная звукопрозрачная антенна, расстояние между элементами которой равно 1 м. Элементами являются приемники акустического давления. На некотором расстоянии L от антенны находится неоднородность в виде круга диаметром 12 м. Точечный источник 5, расстояние до которого от антенны больше L , излучает импульс, имеющий вид одного периода синусоиды с частотой 500 Гц. В проведенных вычислительных экспериментах $L = 300$ м, расстояние до источника было равно 1300 м.

Рис. 1. Схема рассматриваемой области с выбранной системой координат: свободная (1) и абсолютно жесткая (2) поверхность, 3 – приемная антенна, 4 – неоднородность, 5 – источник.

Зеркало обращения времени в нашем случае совпадает с приемной антенной. Восстановление акустического поля происходит в предположении, что волновод не содержит никаких неоднородностей. Характерный вид распределения восстановленного давления $p(x, y, t=t_1)$ представлен на рис. 2. Как следует из рисунка, зависимость $p(x, y, t)$ является слабо информативной с точки зрения определения наличия искомой неоднородности в водном слое.

Рис. 2. Пространственное распределение акустического давления в волноводе в фиксированный момент времени.

Рассмотрим теперь следующую функцию:

$$F(x, y, t) = \int_0^t |p(x, y, t')| dt'.$$

Вид $F(x, y, t_1)$ в тот же самый момент времени, что и распределение давления (рис. 2), показан на рис. 3. В распределении присутствует локальный минимум, который хорошо различим на рисунке (указан стрелкой). Его положение совпадает с положением неоднородности.

Рис. 3. Пространственное распределение функции $F(x, y, t)$ в фиксированный момент времени.

Нами был проведен ряд вычислительных экспериментов, в которых изменялись как координаты источника, так и координаты неоднородности. Во всех случаях положение минимума функции $F(x, y, t)$ совпадало с положением неоднородности.

Таким образом, на примере двумерного прямоугольного волновода показано, что методы акустики обращенного времени могут быть использованы для восстановления координат бесшумного объекта с идеально жесткой поверхностью.

Расчеты были выполнены на вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерного центра.

Литература

1. Fink M. Time Reversed Acoustics // Phys.Today. 1997. Vol. 50. No. 3. P. 34–40.
2. Kober J., Dvorakova Z., Prevorovsky Z., Krofta J. Time reversal transfer: Exploring the robustness of time reversed acoustics in media with geometry perturbations // JASA. 2015. Vol. 138. No. 1. P. EL49–EL53.
3. Farin M., Prada C., de Rosny J. Selective remote excitation of complex structures using time reversal in audible frequency range // JASA. 2019. Vol. 146. No. 4. P. 2510–2521.
4. Wapenaar K., Brackenhoff J., Thorbecke J. Green's theorem in seismic imaging across the scales // Solid Earth. 2019. Vol. 10. No. 2. P. 517–536.
5. Hong P., Ojambati O., Lagendijk A., Mosk A., Vos W. Three-dimensional spatially resolved optical energy density enhanced by wave front shaping // Optica. 2018. Vol. 5. No. 7. P. 844–849.
6. Derode A., Roux P., Fink M. Robust Acoustic Time Reversal with High-Order Multiple Scattering // PRL. 1995. Vol. 75. No. 23. P. 4206–4210.
7. Данилов А.А., Корниенко В.Н., Курышев В.Е. Обращение волнового фронта в нестационарных задачах гидроакустики // Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. Т. II. М.: ГЕОС, 2005. С. 14–18.

A.A. Danilov¹, V.N. Kornienko²

DETECTION OF A NON-TRANSPARENT SILENT OBJECT IN A WAVEGUIDE BY THE METHOD OF WAVES TIME REVERSION

¹N.N. Andreyev Acoustic Institute Shvernika Str., 4, Moscow, 117036

Tel.: (499) 126-63-62, E-mail: dalex46@mail.ru

²Institute of radio-engineering and electronics RAS Mokhovaya Str. 11, Moscow, 125009, Tel.: (495) 629-72-79 E-mail: korn@cplire.ru

The results of reconstructing the sound field in a waveguide containing an inhomogeneity with an absolutely rigid boundary by a numerical time reversal method are presented. It is shown that in the presence of a broadband pulsed source located further from the antenna than the inhomogeneity itself, the use of this method allows one to restore its spatial coordinates.

Keywords: an acoustic signal, time reversed acoustic

References

1. Fink M. Time Reversed Acoustics. *Phys. Today*, 1997, Vol. 50, No. 3, pp. 34–40.
2. Kober J., Dvorakova Z., Prevorsevsky Z., and Krofta J. Time reversal transfer: Exploring the robustness of time reversed acoustics in media with geometry perturbations. *JASA*, 2015, Vol. 138, No. 1, pp. EL49–EL53.
3. Farin M., Prada C., and de Rosny J. Selective remote excitation of complex structures using time reversal in audible frequency range. *JASA*, 2019, Vol. 146, No. 4, pp. 2510–2521.
4. Wapenaar K., Brackenhoff J., and Thorbecke J. Green's theorem in seismic imaging across the scales. *Solid Earth*, 2019, Vol. 10, No. 2, pp. 517–536.
5. Hong P., Ojambati O., Lagendijk A., Mosk A., and Vos W. Three-dimensional spatially resolved optical energy density enhanced by wave front shaping. *Optica*, 2018, Vol. 5, No. 7, pp. 844–849.
6. Derode A., Roux P., and Fink M. Robust Acoustic Time Reversal with High-Order Multiple Scattering. *PRL*, 1995, Vol. 75, No. 23, pp. 4206–4210.
7. Danilov A.A., Kornienko V.N., and Kuryshchev V.E. Wavefront reversal in non-stationary problems of hydroacoustics. *Proceedings of the XVI Session of the Russian Acoustic Society*, Vol. 2, Moscow: GEOS, 2005, pp. 14–18.