

Обнаружение подводных утечек газа с помощью обращенных во времени акустических сигналов

Ю. А. Половинка,^{*} А. О. Максимов[†]

Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43

(Статья поступила 24.06.2017; Подписана в печать 26.06.2017)

В докладе описан метод обнаружения подводных утечек газа, основанный на использовании фокусирующих свойств обращающих волновой фронт акустических антенн. При возникновении утечки рождаются газовые пузырьки, излучающие звук на частотах, непосредственно связанных с их геометрическими размерами. Два фактора — локальный характер генерации акустических сигналов, обусловленных утечкой, и резонансная природа излучения пузырьков при их рождении — позволяют использовать для локации обращенные во времени эмиссионные сигналы с целью получения мощного сигнала рассеяния. Описание распространения эмиссионных и обращенных во времени сигналов выполнено с помощью функции Грина для волновода Пекериса. Настоящее исследование расширяет круг приложений, использующих механизм фокусировки обращенных сигналов, и включает в него регистрацию утечек в специфических условиях — окрестности добывающих платформ на морском шельфе.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Ft, 43.30.Nb, 43.30.Wi.

УДК: 534.2.

Ключевые слова: пузырьки, обращенные во времени сигналы, сипы, подводные утечки.

ВВЕДЕНИЕ

В новом направлении *time-reversal acoustics* которое сформировалось в течение последних 20 лет [1–3], сигнал, излученный локализованным источником, регистрируется преобразователями антенной решетки, обращается во времени и излучается в среду. Поскольку волновое уравнение, описывающее распространение акустических сигналов, инвариантно относительно обращения времени, излученный обращенный сигнал фокусируется на источнике. Для обнаружения сипов и подводных утечек газа традиционными являются активные и пассивные методы диагностики, использующие, соответственно, гидролокаторы, регистрирующие сигналы обратного рассеяния, и гидрофоны для обнаружения звуков, сопровождающих утечку.

В недавних работах [4, 5] были развиты теоретические представления для описания обращения сигналов акустической эмиссии подводных сипов и их использования для повышения эффективности обнаружения подводных утечек газа. В настоящем докладе приводятся результаты, уточняющие и обобщающие эту методику.

1. МОДЕЛЬ

При выборе модели мы ориентировались на условия, реализуемые в окрестности буровых платформ на шельфе Сахалина. Приближение плоской слоистой среды является адекватным для расстояния

в 100–300 м от основания платформы. Звуки подводных утечек на начальной стадии не очень интенсивные, и указанное расстояние является предельным для их обнаружения. Рис. 1 иллюстрирует геометрию используемой модели.

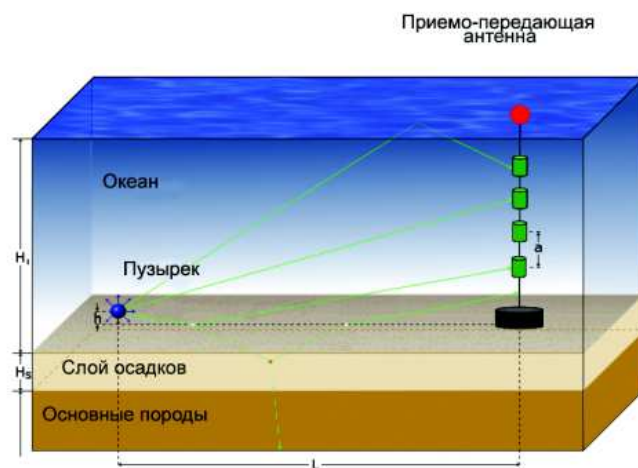


Рис. 1: Иллюстрация геометрии волновода и относительно расположения источника и приемника. L — Горизонтальное расстояние между пузырьком и вертикальной антенной, a — расстояние между отдельными приемнопередающими элементами антенны. В течение времени излучения, составляющего около 30 циклов собственных колебаний, пузырек всплывает на относительно небольшие расстояния h (около 3 радиусов). Водная толща глубиной H_1 ограничена сверху свободной поверхностью, а снизу — океаническим дном, для описания которого используется двухслойная модель: верхний слой осадков толщиной H_s с постоянной скоростью звука и плотностью и нижний полубесконечный слой основных пород, также с постоянной плотностью и скоростью звука

^{*}E-mail: yrivlad@poi.dvo.ru

[†]E-mail: maksimov@poi.dvo.ru

При возникновении утечки рождаются газовые пузырьки, которые излучают акустические сигналы, имеющие форму экспоненциально затухающей синусоиды. Экспериментальное применение обращающих зеркал (*an acoustic time-reversal mirror* — TRM) в настоящее время является достаточно широко распространенной методикой в подводной акустике. В типичном TRM эксперименте источник излучает импульс, который принимается антенной решеткой, обращается во времени и переизлучается. После этого обращенный сигнал фокусируется в месте расположения источника. Два фактора: локальный характер излучения, обу-

словленный утечкой, и резонансная природа излучения пузырька при его рождении приводят к чрезвычайно эффективному рассеянию обращенной волны.

2. ОБРАЩЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПУЗЫРЬКОВ

Интегральное представление для обращенного сигнала дается следующей формулой [3]:

$$p^{tr}(\rho_{tr}, z, t_1) = \sum_{j=1}^N \int G_{\omega}(\rho_{tr}; z, z_j) G_{\omega}^*(\rho; z_j, z_0) \times \exp^{i\omega T} g S^*(\omega) e^{-i\omega t_1} d\omega. \quad (1)$$

Функция Грина G , удовлетворяющая уравнению Гельмгольца, описывает распространение сигнала между точками А (\mathbf{r}_0) и В (\mathbf{r}), здесь $\rho = (x, y)$ — продольные координаты, а z — глубина. Множитель g описывает усиление излученного обращенного сигнала, а Фурье-преобразование импульса, генерируемого источником — пузырьком, — имеет следующий вид

$$S(\omega) = \frac{p_m R_0 \Omega_*}{\omega^2 - \Omega_*^2 - \beta_{tot}^2 + 2i\omega\beta_{tot}}, \quad (2)$$

где Ω_* и β_{tot} — собственная частота и затухание пузырька радиуса R_0 , располагающегося на расстоянии h выше слоя осадков; p_m — амплитуда импульса.

Интегральное представление поля точечного источника в слоистой среде определяется следующей формулой:

$$G_{\omega}(\rho; z, z_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(k_z z) \{ \exp[-ik_z(H_l + z_0)] + V(\xi) \exp[ik_z(H_l + z_0)] \}}{k_z \exp(-ik_z H_l) [1 + V(\xi) \exp(2ik_z H_l)]} H_0^{(1)}(\xi \rho) \xi d\xi, \quad (3)$$

при $z > z_0$ (и аналогичной, в силу симметрии функции Грина, при $z < z_0$), здесь $k_z = (\omega^2/c_w^2 - \xi^2)^{1/2}$, и для обозначения параметров жидкости, осадков и основных пород используются индексы w, s, b , соответственно. Коэффициент отражения $V(\xi)$ от среды, состоящей из слоя осадков и основных пород, описывается следующей формулой

$$V = \frac{(Z_b + Z_s)(Z_s - Z_w) \exp(-2i\varphi) + (Z_b - Z_s)(Z_s + Z_w)}{(Z_b + Z_s)(Z_s + Z_w) \exp(-2i\varphi) + (Z_b - Z_s)(Z_s - Z_w)},$$

$$Z_w = \frac{\rho_w \omega}{k_z}, \quad Z_s = \rho_s \omega (k_s^2 - \xi^2)^{-1/2}, \quad k_s = \omega/c_s, \quad Z_b = \rho_b \omega / (k_b^2 - \xi^2)^{-1/2}, \quad k_b = \omega/c_b, \quad \varphi = \sqrt{k_s^2 - \xi^2} H_s.$$

Подставляя формулы (2), (3) в уравнение (1), мы получим интегральное представление для искомой величины — поля обращенной волны вблизи источника

$$p^{tr}(\rho_{tr}, z; t_1) = g p_m \sum_{j=1}^N \int d\omega e^{i\omega T - i\omega t} S^*(\omega) \times \\ \times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(k'_z z_j) \{ \exp[ik'_z(H_l + z_0)] + V^*(\xi') \exp[-ik'_z(H_l + z_0)] \}}{q_z^* \exp(ik'_z H_l) [1 + V^*(\xi') \exp(-2ik'_z H_l)]} H_0^{(1)*}(\xi' \rho) \xi' d\xi' \times$$

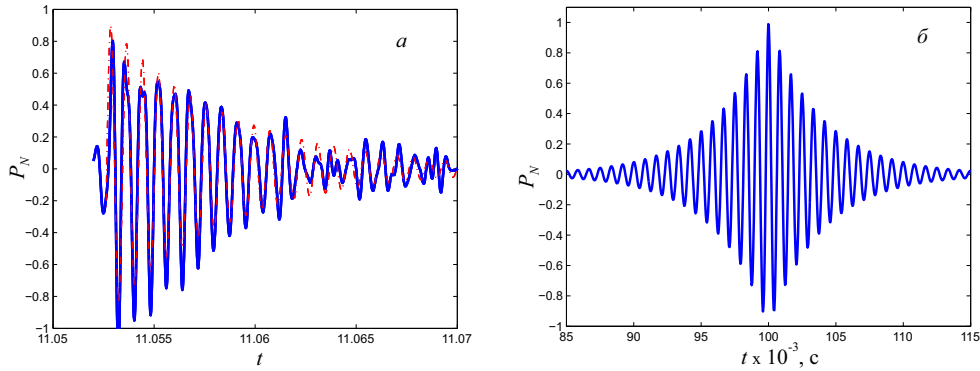


Рис. 2: *a* — Нормированное на максимальное значение давление, измеренное на расстоянии 10 см от источника в ходе проведения натурального эксперимента. Штрихованная линия описывает аппроксимацию регистрируемого сигнала экспоненциально затухающей экспонентой. *б* — Нормированные (на максимальное значение) вариации давления в рассеянной волне, возбуждаемой обращенным во времени сигналом. Обращенная волна прибывает в место расположения пузырька через $L/c = 66.7$ мс после излучения, частота собственных колебаний пузырька — 1200 Гц, добротность $Q = 15$, длительность записи исходного сигнала на антенне $T = 100$ мс

$$\times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(k_z z_j) \{ \exp[-ik_z(H_l + z)] + V(\xi) \exp[ik_z(H_l + z)] \}}{k_z \exp(-ik_z H_l) [1 + V(\xi) \exp(2ik_z H_l)]} H_0^{(1)}(\xi \rho_{tr}) \xi d\xi, \tag{4}$$

где $k'_z = (\omega^2/c_w^2 - \xi'^2)^{1/2}$, звездочка означает комплексное сопряжение, и суммирование ведется по элементам антенны. В докладе представлен анализ выражения (4) для моделей жесткого дна, волновода Пекериса и прогниваемого дна.

Результатом расчета является форма обращенного сигнала в месте расположения пузырька, в частности структура и величина искажений, возникающих на переднем и заднем фронтах импульса. Была исследована пространственная дифракционная структура обращенного поля в окрестности пузырька. Помимо пространственной, для модели Пекериса была проанализирована временная фокусировка обращенной волны.

3. РАССЕЯНИЕ ОБРАЩЕННОЙ ВОЛНЫ НА ПУЗЫРЬКЕ

После определения структуры обращенного поля в окрестности источника становится возможным решить задачу рассеяния обращенной волны одиночным пузырьком. Поскольку частота заполнения этого поля — собственная частота пузырька, радиус включения много меньше длины волны ($R_0/\lambda_* = R_0\Omega_*/c \ll 1$). Спецификой этой задачи является то, что пузырек нельзя считать свободным, а следует учитывать влияние расположенной на близком (сопоставимом с размерами пузырька) расстоянии межфазной поверхности. Аналитическое решение этой проблемы получено в недавних работах [6, 7]. При утечке возникают

пузырьки разных размеров, но обращенная волна всегда испытывает резонансное рассеяние — это обстоятельство определяет эффективность использования обращенных сигналов. Рис. 2 иллюстрирует форму исходного и рассеянного сигналов. На панели *a* представлен сигнал, регистрируемый гидрофоном на расстоянии 10 см от источника в ходе натуральных экспериментов на стенде «Искусственный газовый факел», проведенных в прибрежной акватории Японского моря [8]. Штрихпунктирная линия описывает форму сигнала, отвечающего экспоненциально затухающей синусоиде: $P_h(t) = P_m \exp[-\gamma(t - t_0)] \cos[\Omega_*(t - t_0 + \phi)]$. Параметры этой модели: P_m — амплитуда, Ω_* — циклическая частота, γ — затухание, ϕ — фаза являются подгоночными при нанесении этой зависимости на экспериментальную кривую, t_0 — начальный момент времени. Панель *б* иллюстрирует форму рассеянного сигнала обращенной волны. Вычисления выполнены для следующих значений параметров: $\Omega_*/2\pi = 1200$ Гц, $Q = 15$, $T = 100$ мс, $a = 30$ м, $L = 100$ м.

Рассеянный сигнал обращенной волны будет превосходить исходный при выполнении следующего неравенства: $g(R_0/L)^2 \arctg(a/L) (\Omega_*/\gamma) > 1$. Таким образом, для того чтобы контролировать окрестность платформы на расстоянии 100 м, необходимо усиление исходного сигнала, по крайней мере на три порядка. Предложенный подход справедлив для регистрации только относительно слабых потоков. В реальных условиях сигналы, излучаемые отдельными пузырьками, перекрываются. Для того чтобы описать структу-

ру обращенного сигнала в этом случае, необходимо учесть взаимодействие между отдельными включениями, по крайней мере между парой наиболее близко расположенных пузырьков. Аналитическое решение этой задачи найдено в [9], в частности, получены формулы, описывающие рассеяние на паре близко расположенных пузырьков. Данное обстоятельство позволяет сделать следующий шаг в диагностике двухфазных потоков с помощью обращенных во времени сигналов — учесть парные корреляции в поведении пузырьков в потоке. В настоящем сообщении приведен только один пример обращающего зеркала — линейная вертикальная антенна, позволяющая определить расстояние до источника. Этого, в принципе, достаточно для идентификации места утечки при расположении вблизи добывающих платформ, когда известна геометрия подводных коммуникаций. Использование двух антенн однозначно решает проблему идентификации утечки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование возможности использования обращенных во времени акустических сигналов для диагностики подводных утечек. При проведении расчетов использовались данные, соответствующие условиям северо-восточного шельфа о-ва Сахалин, — в местах расположения добывающих платформ. Дано описание структуры и фокусирующих свойств обращенных сигналов акустической эмиссии газовых включений для не слишком интенсивных утечек. Вычисления выполнены для абсолютно жесткого дна, волновода Пекериса и проницаемого дна.

Работа выполнена при поддержке ДВО РАН (проект Дальний Восток № 15-I-1-021) и ТОИ ДВО РАН (проект № 117030110034-7).

-
- [1] Fink M. Phys. Today. 1997. **50**. P. 34.
[2] Tanter M., Thomas J. L., Wu F. Rep. Prog. Phys. 2000. **63**, P. 1933.
[3] Kuperman W. A., Hodgkiss W. S., Song H. C., Akai T., Ferla T., Jackson D. J. Acoust. Soc. Am. 1998. **103**. P. 25.
[4] Maksimov A. O., Polovinka Y. A. J. Acoust. Soc. Am. 2015. **137**, N 4. P. 2168.
[5] Polovinka Y. A., Maksimov A. O. ПОМА 2015. **24**, Iss. 1. A. N. 070002.
[6] Maksimov A. O., Burov B. A., Salomatin A. S.,

- Chernykh D. V. J. Acoust. Soc. Am. 2014. **136**, N 3. P. 1065.
[7] Maksimov A. O., Половинка Ю. А. Акуст. журн. 2017. **63**, № 1. С. 30.
[8] Maksimov A. O., Буров Б. А., Саломатин А. С. Подводные исследования и робототехника. 2016. № 22/2. С. 49.
[9] Maksimov A. O., Yusupov V. I. European Journal of Mechanics B/Fluids 2016. **6**, N 6. P. 164.

Detection of underwater gas leaks with time reversal acoustic signals

Yu. A. Polovinka^a, A. O. Maksimov^b

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of RAS
Vladivostok 690041, Russia

E-mail: ^ayriklad@poi.dvo.ru, ^bmaksimov@poi.dvo.ru

In this report, temporal and spatial focusing properties of time-reversal mirrors are studied for leakage detection. The acoustic remote sensing of subsea gas leakage traditionally uses sonars as active acoustic sensors and hydrophones picking up the sounds generated by a leak as passive sensors. When gas leaks occur underwater, bubbles are produced and emit sound at frequencies intimately related to their sizes. Two factors: the local character of the acoustic emission signal caused by the leakage and a resonant nature of the bubble radiation at their birth make particularly effective use, for active location, time-reversed emission signals in order to obtain a powerful scattering signal. The propagation of emission and time-reversed signals is described in terms of Green's function of the Pekeris waveguide. This study expands the range of applications that use the mechanism of time-reversal focusing to specific conditions — the vicinity of drilling platforms located on the sea shelf.

PACS: 43.20.Fn, 43.30.Ft, 43.30.Nb, 43.30.Wi.

Keywords: bubbles, time-reversal acoustics, seeps, underwater gas leakage.

Received 24 June 2017.

Сведения об авторах

1. Половинка Юрий Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, ст. науч. сотрудник; e-mail: yriklad@poi.dvo.ru.
2. Максимов Алексей Олегович — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник; e-mail: maksimov@poi.dvo.ru.