

О точности измерения углов прихода звуковых импульсов с помощью вертикальной антенны

Д. В. Макаров,^{*} Л. Е. Коньков

Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева ДВО РАН

Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

(Статья поступила 27.06.2017; Подписана в печать 12.09.2017)

Рассматривается алгоритм расчета угловой структуры акустических импульсов в подводном звуковом канале. В основе алгоритма лежит преобразование Хусими, позволяющее приближенно установить связь между волновым полем и соответствующими лучевыми приходами. Важным преимуществом алгоритма является возможность его реализации с помощью вертикальной антенны, перекрывающей малую часть толщи океана. Вводятся понятия фундаментальной и алгоритмической погрешностей измерения углового спектра. Первая соответствует фундаментальным ограничениям, устанавливаемым соотношением неопределенностей. Вторая связана со способностью антенны обеспечивать точное вычисление функции Хусими. Приводится оценка минимально возможной фундаментальной погрешности для антенны длиной 300 м.

PACS: 43.30.+m.

УДК: 534.2

Ключевые слова: подводный звуковой канал, акустическая антенна, преобразование Хусими.

ВВЕДЕНИЕ

Организация акустических измерений в глубоком океане с помощью протяженных гирлянд гидрофонов практически всегда сопряжена с техническими трудностями. В связи с этим возникает потребность в методах обработки акустических данных, с помощью которых достаточный объем информации обеспечивается относительно компактными приемными антеннами. Для гидроакустической томографии сокращение длины гирлянды приводит к уменьшению количества извлекаемой информации и увеличению неопределенности в реконструкции параметров среды. Потерю информации можно частично компенсировать с помощью анализа углового спектра поля, сопровождая его лучевой интерпретацией полученных результатов. В работах [1, 2] предложен метод анализа углов прихода с помощью вертикальной антенны, состоящей из ненаправленных гидрофонов. Алгоритм расчета углов прихода основан на проецировании волнового поля на лучевое фазовое пространство, тем самым связывая интерференционную структуру с соответствующей геометрией распространения. В данной работе мы демонстрируем возможности этого метода на примере модели подводного звукового канала в Японском море.

1. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХУСИМИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА

Траектории звуковых лучей в подводном звуковом канале удовлетворяют системе уравнений Гамильтона:

$$\frac{dz}{dr} = p \simeq \operatorname{tg} \chi, \quad \frac{dp}{dr} = -\frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial z} [\Delta c(z) + \delta c(r, z)],$$

где χ — угол скольжения луча, $\Delta c(z)$ и $\delta c(r, z)$ — горизонтально-однородная и горизонтально-неоднородная составляющие пространственной изменчивости скорости звука, c_0 — скорость звука на оси волновода. Образ волнового поля в пространстве лучевых переменных z и p может быть вычислен с помощью преобразования Вигнера

$$W(p, z, k_0) = \frac{k_0}{2\pi} \int d\zeta \Psi(z - \zeta/2, k_0) \Psi^*(z + \zeta/2, k_0) e^{ik_0 p \zeta},$$

где $k_0 = 2\pi f/c_0$, f — частота звука. Анализ функции Вигнера несколько затрудняется присутствием быстрых осцилляций, обусловленных интерференцией. По этой причине для решения практических задач более удобно использовать сглаженную функцию Вигнера [3]

$$W_{\text{sm}}(p, z, k_0) = \frac{1}{2\pi} \int dz' dp' e^{\left[-\frac{(z-z')^2}{2\Delta_z^2} - \frac{(p-p')^2}{2\Delta_p^2}\right]} W(z', p').$$

При определении масштабов сглаживания нам необходимо учитывать ограничения, устанавливаемые волновым аналогом соотношения неопределенностей Гейзенберга

$$\Delta_z \Delta_p \geq \frac{1}{2k_0}.$$

Случай наименьшей неопределенности

$$\Delta_z \Delta_p = \frac{1}{2k_0} \quad (1)$$

соответствует так называемой функции (или преобразованию) Хусими [4, 5]

$$W_H(p, z, k_0) = |Y(p, z, k_0)|^2,$$

где $Y(p, z, k_0)$ — это свертка акустического поля с гауссовым волновым пакетом, распространяющимся под уг-

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

лом $\chi = \arctg p$ к оси волновода, т. е.

$$Y(p, z, k_0) = (2\pi\Delta_z^2 A^2)^{-1/4} \int \Psi^*(z', k_0) \times \\ \times e^{[ik_0 p(z' - z) - \frac{(z' - z)^2}{4\Delta_z^2}]} dz'.$$

Функции Вигнера и Хусими обеспечивают лучевую интерпретацию акустических полей, создаваемых тональными сигналами. Однако в акустических экспериментах, как правило, используются широкополосные импульсные сигналы. В этом случае расчет углового спектра можно провести с помощью Фурье-образа функции $Y(p, z, k_0)$

$$\tilde{Y}(p, z, t) = \int S(f) Y(p, z, k_0) e^{i(k_0 R - 2\pi f t)} df,$$

где $S(f)$ — временной спектр сигнала, R — расстояние от источника. Таким образом, мы получаем функцию Хусими для импульсного сигнала

$$\tilde{W}_H(p, z, t) = |\tilde{Y}(p, z, t)|^2, \quad (2)$$

лежащую в основе рассматриваемого нами алгоритма. Формула (2) описывает угловую структуру акустических импульсов попадающих в момент времени t в окрестность точки с глубиной z . Преобразование (2) основано на свертке с гауссовым пакетом, достаточно хорошо локализованным по глубине. Поэтому, если мы поставим цель вычислить угловой спектр в окрестности некоторого значения опорной глубины $z = Z$, нам будет достаточно антенны длиной $6\Delta_z$, т. е. занимающей интервал глубин от $Z - 3\Delta_z$ до $Z + 3\Delta_z$, это позволит достаточно точно воссоздать функцию Хусими. Вместе с тем, если мы хотим существенно снизить угловую неопределенность, величина Δ_z должна быть достаточно большой. Соответственно, антенна может оказаться слишком длинной. В связи с этим резонно возникает вопрос: насколько корректно будет работать алгоритм, если антенна будет короче? Для ответа на этот вопрос целесообразно ввести меру соответствия между результатами измерений угловой структуры, полученными с помощью некоторой «идеальной» антенны и ее «укороченного» аналога. В качестве такой меры можно ввести функцию воспроизводимости

$$F = \frac{|\int dt \int dp \Upsilon_0(p, t) \Upsilon_\Delta^*(p, t)|^2}{\left(\int dt \int dp |\Upsilon_0(p, t)|^2\right) \left(\int dt \int dp |\Upsilon_\Delta(p, t)|^2\right)}, \\ \Upsilon_{0,\Delta}(p, t) = \frac{\tilde{Y}_{0,\Delta}(p, t)}{\rho_{0,\Delta}(t)}, \quad (3) \\ \rho_{0,\Delta}(t) = \int \tilde{Y}_{0,\Delta}(p, t) \tilde{Y}_{0,\Delta}^*(p, t) dp,$$

где $\tilde{Y}_0(p, t)$ — точная функция $\tilde{Y}(p, t)$, а $\tilde{Y}_\Delta(p, t)$ — функция $\tilde{Y}(p, t)$, полученная с помощью тем или иным образом упрощенной антенны. Согласно определению

(3), значение воспроизводимости равно 1, если идеальная $\Upsilon_0(p, t)$ и измеренная $\Upsilon_\Delta(p, t)$ функции совпадают, и уменьшается по мере нарастания различий между $\Upsilon_0(p, t)$ и $\Upsilon_\Delta(p, t)$, достигая минимального значения, равного 0, при полном отсутствии перекрытия между этими функциями.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим глубоководный акустический волновод в Японском море, в котором опорный профиль скорости звука описывается формулой [6, 7]

$$c_b(z) = \begin{cases} c_0 + c_1 e^{-z/B}, & z \leq z_0, \\ c_0 + c_1 e^{-z_0/B} + g(z - z_0), & z > z_0, \end{cases}$$

где $A_0 = 1455$ м/с, $A_1 = 70$ м/с, $z_0 = 200$ м — глубина оси подводного звукового канала, $B = 30$ м — глубина термоклина, $g = 0.017$ А⁻¹. Дно океана предполагается плоским и расположено на глубине 3 км. Модель волновода также включает в себя случайные вариации скорости звука, обусловленные внутренними волнами. Получаемая функция Хусими усреднялась по 10 реализациям поля внутренних волн. В качестве сигнала использован импульс со спектром гауссовой формы. Центральная частота импульса — 240 Гц, полуширина спектра — 120 Гц. В качестве начального состояния взят волновой пакет, тоже гауссовой формы, с центром на оси волновода. Полуширина этого гауссиана по глубине равна 50 м. При расчетах приемная антенна перекрывает верхний слой океана толщиной $L = 300$ м, при этом расстояние между соседними гидрофонами равно 10 м.

На рис. 1 представлена зависимость воспроизводимости от параметра Хусими Δ_z , который определяет фундаментальную угловую неопределенность по формуле

$$\Delta\chi = \arctg \frac{1}{2k_0\Delta_z},$$

где значение k_0 соответствует центральной частоте импульса. Для определенности мы будем считать, что воссоздание функции Хусими является достаточно точным, если $F \geq 0.9$. Тем самым мы фиксируем предел допустимой алгоритмической погрешности. Уровень $F = 0.9$ изображен на рисунках горизонтальной прерывистой линией. Таким образом, мы можем считать, что оптимальные значения параметров соответствуют точкам пересечения кривой $F(\Delta_z)$ с этой линией при условии, что Δ_z значительно превышает расстояние между соседними гидрофонами. Согласно представленным на рисунке данным, максимально допустимое значение составляет около $0.3L$, что соответствует угловой погрешности около 0.3° .

Столь малая угловая неопределенность делает вполне возможным выделение отдельных лучевых приходов. Это наглядно продемонстрировано на рис. 2, где

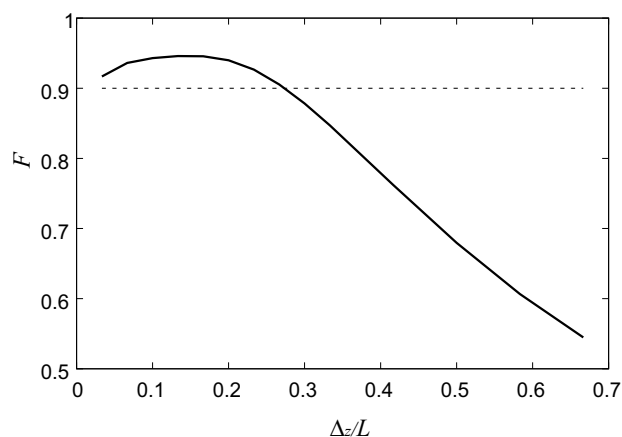


Рис. 1: Зависимость воспроизводимости (3) от параметра преобразования Хусими Δ_z , деленного на длину антенны L . Горизонтальная прерывистая линия обозначает уровень $F = 0.9$

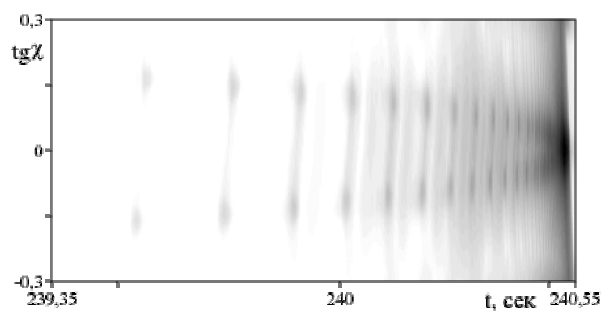


Рис. 2: Натуральный логарифм функции Хусими, соответствующей $\Delta_z = 80$ м, в подводном звуковом канале в Японском море

с помощью цветовой модуляции изображен логарифм функции Хусими рассматриваемого импульса. Мы видим, что пики, соответствующие отдельным приходам, являются хорошо различимыми вплоть до самой поздней части принимаемого сигнала, где их плотность становится слишком большой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная работа посвящена анализу углового спектра акустических импульсов с помощью преобразования Хусими. Основное внимание уделено во-

просу минимизации угловой неопределенности, связанной с волновым аналогом соотношения неопределенностей. Показано, вертикальная антенна длиной 300 м позволяет идентифицировать вертикальные углы прихода с точностью менее полградуса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках проектов 16-35-60040-мол_а_дк и 16-05-01074-а. Часть работы выполнена в рамках госбюджетной тематики ТОИ ДВО РАН «Математической моделирование и анализ динамических процессов в океане» (№ 117030110034).

-
- [1] Артельный П. В., Вировлянский А. Л., Казарова А. Ю., Коротин П. В., Стуленков А. В. Акустика океана. Доклады XV школы-семинара им. акад. Л. М. Бреховских, совмещенной с XXIX сессией Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2016, С. 13.
 - [2] Макаров Д. В., Коньков Л. Е. электронный журнал «Техническая акустика». www.ejta.org. 2016. № 3.
 - [3] Вировлянский А. Л., Окомелькова И. А. Изв. ВУЗ. Радиофизика. 1997. **40**, № 12. С. 1542.
 - [4] Smirnov I. P., Virovlyansky A. L., Zaslavsky G. M. Chaos. 2004. **14**, N 2. P. 317.
 - [5] Kon'kov L. E., Makarov D. V., Sosedko E. V., Uleysky M. Yu. Phys. Rev. E. 2007. **76**, N 5. 056212.
 - [6] Макаров Д. В., Коньков Л. Е., Петров П. С. Изв. ВУЗ. Радиофизика. 2016. **59**, № 7. С. 638.
 - [7] Makarov D. V., Kon'kov L. E., Uleysky M. Yu., Petrov P. S. Phys. Rev. E. 2013. **87**, N 1. 012911.

On the accuracy of measurements of sound pulse arrival angles with vertical antenna

D. V. Makarov^a, L. E. Kon'kov

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS, Vladivostok 490041, Russia.

E-mail: ^amakarov@poi.dvo.ru

An algorithm for calculation of angular pulse structure in an underwater sound channel is considered. The algorithm is based upon the Husimi transform that allows one to link a wavefield with corresponding ray arrivals. An important advantage of the algorithm is the possibility of its realization with a relatively short vertical antenna. The notions of fundamental and algorithmic inaccuracies of angular spectrum measurements are introduced. The first one corresponds to fundamental limitations imposed by

the uncertainty relation. The second one is related to the antenna's ability to provide exact calculation of the Husimi transform. We estimate the minimal fundamental inaccuracy for an antenna with length of 300 m.

PACS: 43.30.+m

Keywords: underwater sound channel, acoustical antenna, Husimi transform.

Received 26 June 2017.

Сведения об авторах

1. Макаров Денис Владимирович — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: 950-283-92-93, e-mail: makarov@poi.dvo.ru.
 2. Коньков Леонид Евгеньевич — науч. сотрудник, тел.: (423) 231-30-81, e-mail: lkonkov@poi.dvo.ru.
-