

Применение спектрограммы к локализации шумового источника в мелком море

Г.Н. Кузнецов^{1,*}, В.М. Кузькин^{1,†}, С.А. Переселков^{1,2,‡}, И.В. Казначеев²

¹Научный центр волновых исследований Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, д. 38

²Воронежский государственный университет. Россия, 394018 Воронеж, Университетская пл. д. 1
(Статья поступила 27.06.2017; Подписана в печать 13.09.2017)

Обсуждены условия, накладываемые на спектр шумового движущегося источника звука, когда возможно использование спектрограммы для задачи локализации. Изложен алгоритм локализации и оценена его помехоустойчивость. Приведены результаты численного и натурного экспериментов.

PACS: 43.30.Pc

УДК: 534.21

Ключевые слова: шумовой источник, спектрограмма, помехоустойчивость.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задачи локализации источника звука в мелком море наряду с методами обработки сигналов, согласованных со средой [1], также развивается интерферометрический метод [2], основанный на когерентном накоплении частотных смещений интерференционных максимумов (частотных смещений) волнового поля. Многочисленные исследования, выясняя ряд интересных особенностей формирования интерференционной картины при изменении расстояния между источником и приемником, не затрагивают, однако, вопроса о влиянии шумового сигнала на характер частотных смещений. В работе сформулированы условия к шумовому сигналу движущегося источника, когда формируемая им интерференционная картина, определяется волноводной дисперсией. Приведены результаты численного и натурного экспериментов, демонстрирующие эффективность метода, основанного на применении спектрограммы. Выполнен анализ помехоустойчивости метода.

1. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ КАРТИНА ДВИЖУЩЕГОСЯ ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА

Волновод полагается горизонтально-однородным. Динамический спектр источника в точке приема, ограничиваясь модами дискретного спектра, запишем в виде

$$G(\omega, r) = S(\omega) P(\omega, r), \quad (1)$$

где $S(\omega)$ — спектр излучаемого сигнала,

$$P(\omega, r) = \sum_m A_m(\omega, r) \exp[ih_m(\omega) r] \quad (2)$$

— функция Грина (передаточная функция). Здесь A_m и h_m — амплитуда и постоянная распространения m -й моды, $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, r — горизонтальное расстояние между источником и приемником. Цилиндрическое расхождение поля и модальное затухание формально учитываются амплитудной зависимостью мод.

Положим, что на удалении r_1 источника от приемника положение интерференционного максимума приходилось на значение ω_1 . Частотный сдвиг $\delta\omega$, вызванный изменением расстояния δr между источником и приемником, согласно (1), (2), определяется условием [3]

$$\frac{\delta\omega}{\delta r} = - \frac{B(\omega_1) \left(\partial |P(\omega_1, r_1)|^2 / \partial r \right)}{\partial \left(B(\omega_1) |P(\omega_1, r_1)|^2 \right) / \partial \omega}, \quad (3)$$

Здесь $B(\omega) = |S(\omega)|^2$. При выполнении условия

$$\frac{B(\omega_1)}{\partial B(\omega_1) / \partial \omega} \gg \frac{|P(\omega_1, r_1)|^2}{\partial |P(\omega_1, r_1)|^2 / \partial \omega} \quad (4)$$

угловой коэффициент (3) интерференционных полос принимает традиционную форму, определяемую волноводной дисперсией для равномерного спектра [3].

Спектр шумового источника запишем в виде

$$B(\omega) = \overline{B}(\omega) + \tilde{B}(\omega),$$

где $\overline{B}(\omega)$ — среднее значение, $\tilde{B}(\omega)$ — флуктуационная компонента. Будем считать, что в пределах полосы спектра $\Delta\omega$, $-(\Delta\omega/2) + \omega_0 \leq \omega \leq \omega_0 + (\Delta\omega/2)$, величина $\overline{B}(\omega)$ удовлетворяет условию (4). В этом случае можно положить $\overline{B}(\omega) \approx B(\omega_0)$ и рассматривать шумовой сигнал как полезный сигнал с равномерным спектром $B(\omega_0) |P(\omega, r)|^2$ и присоединенной (внутренней) помехой $\tilde{B}(\omega) |P(\omega, r)|^2$. Тогда эффективное отношение сигнал/помеха (с/п) q_{ef} на входе одиночного приемника

$$q_{\text{ef}} = \overline{E} / (\sigma^2 + \sigma_1^2),$$

*E-mail: skbmortex@mail.ru

†E-mail: kumiov@yandex.ru

‡E-mail: pereselkov@yandex.ru

где $\overline{E}$ — средняя мощность полезного сигнала, σ^2 и $\sigma_1^2 \approx 0.5\overline{E}$ — средние мощности внешней и внутренней помех соответственно.

Помехоустойчивость алгоритма, основанного на когерентном сложении частотных смещений максимумов волнового поля, удобно характеризовать предельным входным отношением с/п q_{lim} , при котором для значений $q \geq q_{\text{lim}}$ обеспечивается устойчивое обнаружение и оценки радиальной скорости и начального удаления близки реальным. В случае детерминированного сигнала с равномерным спектром $q_{\text{lim}} = 1/J^2$, для шумового источника $q_{\text{ef(lim)}} \approx 1.5/J^2$. Здесь J — число временных отсчетов при регистрации спектрограммы интерференционной картины.

2. АЛГОРИТМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА

Пусть шумовой источник в горизонтальной плоскости (x, y) перемещается по прямолинейной траектории с постоянной скоростью u . В интерферограмме $|G(\omega, r)|^2$ от пространственной переменной r перейдем к временной переменной t и применим к ней двукратное преобразование Фурье

$$F(\zeta, \tau) = \int_0^T \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} |G(\omega, t)|^2(\omega, t)(\omega, t) \times \exp[i(\tilde{\nu}t - \omega\tau)] u_r dt d\omega. \quad (5)$$

Здесь $\tilde{\nu} = 2\pi\nu = u_r$, κ и τ — циклическая частота, пространственная частота и время спектрограммы соответственно; $u_r = u \cos\varphi$ — радиальная скорость источника, φ — угол между направлением на приемник и движением источника в горизонтальной плоскости; T — время наблюдения. Спектральная плотность (5) расположена в первом и третьем квадратах плоскости (τ, ζ) , если $u_r < 0$, и во втором и четвертом квадратах, если $u_r > 0$. Она состоит из $(M-1)$ главных максимумов с координатами $(\tau_\mu, \tilde{\nu}_\mu)$, расположенными на прямой с угловым коэффициентом $\tilde{\varepsilon} = \tilde{\nu}_\mu/\tau_\mu$. Здесь M — число конструктивно интерферирующих мод, $\mu = \overline{1, M-1}$. Максимальный пик расположен в точке $(\tau_1, \tilde{\nu}_1)$, где складываются $(M-\mu)$ главных максимумов, обусловленных интерференцией соседних мод [2]. В качестве критерия обнаружения источника рассматривается наличие одиночного пика сигнала, преобладающего над помеховыми пиками, функционала

$$[\varepsilon_*(q)] = \int_0^{\tau_{\text{max}}} |F[\tau(q), \nu(\tau(q))]| \sqrt{1 + \varepsilon_*^2(q)} d\tau, \quad (6)$$

определяющего угловой коэффициент ε прямой $\nu = \varepsilon\tau$ расположения главных максимумов спектральной плотности при входном отношении с/п q . Здесь $\tau_{\text{max}} \geq$

τ_{M-1} — положение максимума, обусловленного интерференцией крайних мод, ε_* — варьируемое значение углового коэффициента. За оценку $\hat{\varepsilon}(q)$ принимается положение главного максимума функционала (6). Оценки величин обозначаются точкой сверху.

На прямой $\nu = \varepsilon\tau$ определяются координаты $(\dot{\tau}_1, \dot{\nu}_1)$ основного максимума спектральной плотности и оцениваются радиальная скорость u_r и начальное удаление r_0 источника

$$\dot{u}_r(q) = -2\pi \frac{M-1}{\dot{h}_1(f_0) - \dot{h}_M(f_0)} \dot{\nu}_1(q), \quad (7)$$

$$\dot{r}_0(q) = 2\pi\beta f_1 \frac{M-1}{\dot{h}_1(f_0) - \dot{h}_M(f_0)} \dot{\tau}_1(q). \quad (8)$$

Здесь β — интерференционный инвариант [3], f_1 — значение частоты в начальный момент времени $t_0 = 0$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Глубина волновода 53 м, постоянный профиль скорости звука 1470 м/с, жидкое поглощающее дно: комплексный показатель преломления $0.89(1 + i0.01)$, плотность грунта 1.8 г/см^3 . На глубине 20 м шумовой источник со скоростью $u = 2 \text{ м/с}$ приближался к одностороннему приемнику, расположенному на глубине 52 м. Ширина спектра $\Delta f = 100 - 140 \text{ Гц}$. Использовался дельта-коррелированный шумовой сигнал. Начальное удаление источника от приемника $r_0 = 10 \text{ км}$. Время накопления $T = 10 \text{ мин}$, временной интервал между точками отсчета $\Delta t = 0.5 \text{ мин}$, число точек отсчета $J = 20$. Длительность случайной реализации $\delta t = 10 \text{ с}$.

Результаты моделирования приведены на рис. 1.

Нормированные величины обозначаются сверху знаком «крышка». Входное отношение с/п $q = 4 \times 10^{-3}$. На рассматриваемом расстоянии, согласно рис. 1, поле формируется тремя модами. На частоте $f_0 = 120 \text{ Гц}$: $\dot{h}_1 = 0.5095$, $\dot{h}_2 = 0.5052$, $\dot{h}_3 = 0.4960 \text{ м}^{-1}$, $\beta = 0.92$.

С целью повышения контрастности и информативности на интерферограмме и спектрограмме отфильтрованы постоянные составляющие. На спектрограмме (рис. 1, в) пунктиром и квадратики показаны прямая, на которой расположены основные пики спектральной плотности сигнала и прямые, ограничивающие полосу, в которой она практически сосредоточена. Координаты главного максимума: $\dot{\tau}_1 = 0.1000 \text{ с}$, $\dot{\nu}_1 = 0.0019 \text{ Гц}$. Согласно (7), (8) получаем: скорость $\dot{u}_r = -1.8 \text{ м/с}$, начальное удаление $\dot{r}_0 = 10.3 \text{ км}$. Величина $q = 4 \times 10^{-3}$ примерно равна предельному входному отношению с/п $q_{\text{lim}} = 3.75 \times 10^{-3}$. Для значений $q < 4 \times 10^{-3}$ источник не обнаруживается и оценки его параметров становятся неадекватными.

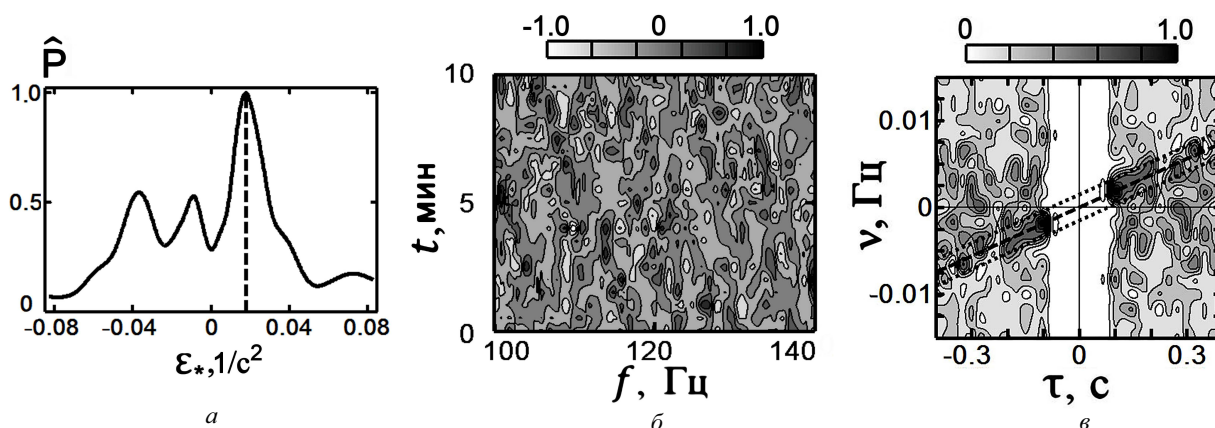
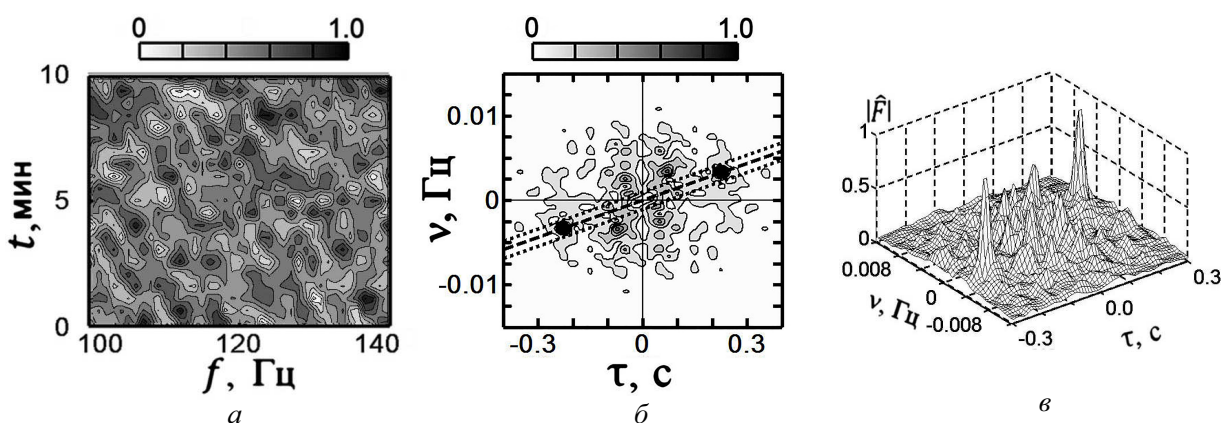


Рис. 1: Нормированные функция (6) (а), интерферограмма (б) и модуль спектрограммы (5) (в)

Рис. 2: Нормированные интерферограмма (а) и модули спектрограммы (б), (в) Входное отношение с/п $q=0.1$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился в акватории Тихоокеанского шельфа. Скорость звука 1480 м/с. Начальное удаление шумового источника $r_0 = 12$ км. В месте расположения приемника глубина волновода 31 м, на начальном удалении — 44 м, по окончании времени наблюдения $T = 10$ мин — 40 м. Источник на глубине 30 м со скоростью $u = 1.3$ м/с приближался к приемнику. Время буксировки было разбито на блоки длительностью 30 с. В каждой такой посылке бралась длительность 2 с шумового сигнала, и по ней строился случайный спектр с разрешением менее 1 Гц. С периодом 8 с эта операция повторялась и по трем реализациям находился усредненный спектр в каждом блоке. Далее эти усредненные спектры с периодом 30 с использовались при построении интерферограммы. Число временных точек отсчета $J = 20$. Во время эксперимента входное отношение с/п $q = 0.1$. Результаты обработки при различных уровнях помехи приведены на рис. 2, 3. С целью проверки помехоустойчивости алгоритма добавлялась помеха (рис. 3). Значение $q = 5 \times 10^{-3}$ близко предельному отношению с/п $q_{\text{lim}} = 3.75 \times 10^{-3}$.

Как видно из рис. 2, б, в, звуковое поле формируется двумя модами. Параметры дна не определялись.

В обоих случаях угловой коэффициент положения главного максимума оценивается как $\dot{\epsilon} = 0.0146 \text{ с}^{-2}$. Для условий эксперимента (рис. 2) оценки координат максимума $\dot{\tau}_1 = 0.2055 \text{ с}$, $\dot{\nu}_1 = 0.0030 \text{ Гц}$, при добавлении уровня помехи (рис. 3) — $\dot{\tau}_1 = 0.2123 \text{ с}$, $\dot{\nu}_1 = 0.0031 \text{ Гц}$. Для получения оценок характеристик шумового источника мелководная акватория была заменена волноводом со средней глубиной 37.5 м и жестким дном. Для такой модели волновода на частоте $f_0 = 120 \text{ Гц}$ постоянные распространения оцениваются как $\dot{h}_1 = 0.5075 \text{ м}^{-1}$, $\dot{h}_2 = 0.4935 \text{ м}^{-1}$. Тогда, согласно (7), (8), получаем $\dot{u}_r = -1.3 \text{ м/с}$, $\dot{r}_0 = 12.9 \text{ км}$ ($q = 12.5$) и $\dot{u}_r = -1.4 \text{ м/с}$, $\dot{r}_0 = 13.3 \text{ км}$ ($q = 5 \times 10^{-3}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обосновано применение подхода, основанного на использовании спектрограммы конструктивно интерферирующих мод, для обнаружения, оценки скорости и удаления шумового источника звука. Поле источни-

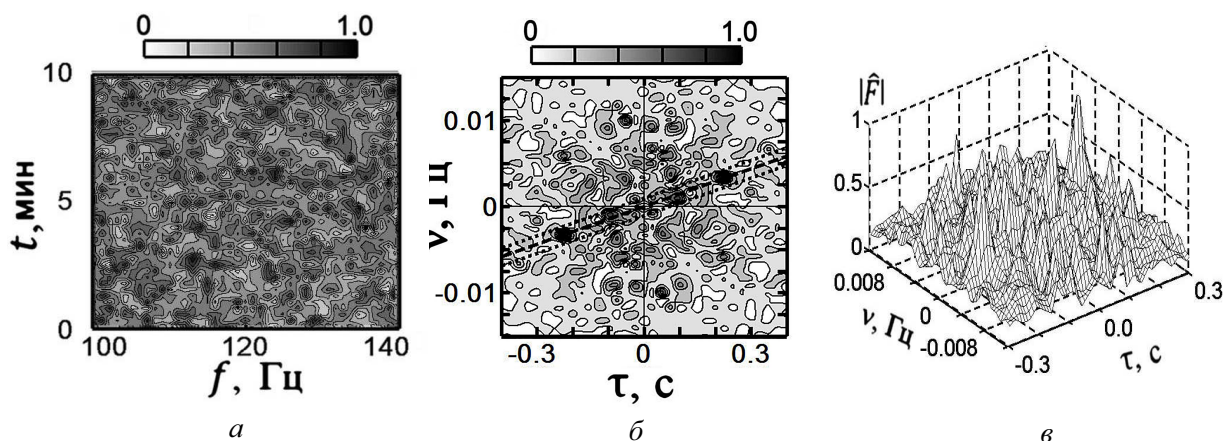


Рис. 3: Нормированные интерферограмма (а) и модули спектрограммы (б), (в). Входное отношение с/п $q = 5 \times 10^{-3}$

ка локализуется в области, линейные размеры которой малы по сравнению со временем наблюдения и шириной спектра источника. Оценка предельного минимального входного отношения с/п, при которой метод сохраняет работоспособность, согласуется с экспериментами. В низкочастотном диапазоне продемонстри-

рована устойчивость подхода к вариациям параметров дна и глубины волновода. Таким образом, предлагаемый подход является потенциальной основой применения интерферометрии в задачах пассивной гидролокации.

- [1] Сазонтов А. Г., Малеханов А. И. Акуст. журн. 2015. **61**, № 2. С. 233.
[2] Kuznetsov G. N., Kuz'kin V. M., Peresl'kov S. A., Prosovetskiy D. Yu. Phys. Wave Phenom. 2017. **25**, N 1.

- Р. 64.
[3] Чупров С. Д. Акустика океана. Современное состояние. М.: Наука, 1982. С. 71.

The using of spectrogram for noise source localization in shallow sea

G. N. Kuznetsov^{1,a}, V. M. Kuz'kin^{1,b}, S. A. Peresl'kov^{1,2,c}, I. V. Kaznacheev²

¹Wave Research Scientific Center of A. M. Prokhorov Institute of General Physics of RAS. Moscow, 119991, Russia

²Voronezh State University. Voronezh, 394018, Russia

E-mail: ^askbmortex@mail.ru, ^bkumiov@yandex.ru, ^cperesl'kov@yandex.ru

The specifications of spectrum of a moving sound noise source when spectrogram is can be used for the localization problem is discussed. The localization algorithm is presented. The noise immunity is estimated. The results of numerical and natural experiments are analyzed.

PACS: 43.30.Pc

Keywords: noise source, spectrogram, noise immunity.

Received 27 June 2017.

Сведения об авторах

1. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, профессор, начальник СКБ «Морские технологии»; тел.: (499) 256-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.
2. Кузькин Венедикт Михайлович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 503-83-84, e-mail: kumiov@yandex.ru.
3. Переселков Сергей Алексеевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (4732) 789-755, e-mail: peresl'kov@yandex.ru.
4. Казначеев Илья Викторович — аспирант ВГУ; тел.: (4732) 789-755, e-mail: kaznacheev.ilya@gmail.com.