

Локализация источника звука в отсутствие информации о передаточной функции волновода

С. А. Пересёлков^{1,*}, В. М. Кузькин^{2,†}, Г. Н. Кузнецов^{2,‡}, Г. А. Ляхов^{2,‡}, Е. С. Казначеева^{1,‡}

¹Воронежский госуниверситет, 394006, Воронеж, Университетская пл. 1

²Институт общей физики РАН, 119991, Москва, ул. Вавилова 38

(Статья поступила 10.11.2019; Подписана в печать 11.11.2019)

Проанализирована разрешающая способность голографического метода локализации источника звука по его шумовому полю. Представлены два варианта реализации метода, которые для определения координат источника не требуют знания характеристик среды распространения.

PACS: 92.10.Vz УДК: 534.44

Ключевые слова: гидроакустика, голография, интерференционная структура, звуковое поле, широкополосный источник шума, гидролокация.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–8] изложены математические принципы и результаты апробации голографического метода обнаружения, идентификации (определение параметров) и разрешения нескольких шумовых источников звука с применением одиночных векторно-скалярных приемников (ВСП). В основе метода лежит обработка данных посредством частотно-временной фильтрации, осуществляемой двукратным преобразованием Фурье интерференционной картины (интерферограммы), формируемой источником,

$$F(v, \tau) = \int_0^{\Delta t} \int_{\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2}}^{\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}} I(\omega, t) \exp[i(vt - \omega\tau)] \omega dt d\omega, \quad (1)$$

где $F(v, \tau)$ и $I(\omega, t)$ — голограмма и интерферограмма одной из компонент векторно-скалярного поля; v , τ и $\omega = 2\pi f$, t — циклическая частота, время голограммы и интерферограммы соответственно; ω — радиальная скорость источника (по направлению к приемнику); Δt и $\Delta\omega$ — время наблюдения и ширина спектра, ω_0 — средняя частота спектра.

1. ПОЛОЖЕНИЕ ФОКАЛЬНЫХ ПЯТЕН ГОЛОГРАММЫ

Положения максимумов фокальных пятен пропорциональны радиальной скорости и начальному удалению источника от приемника:

$$\dot{w} = -\kappa_{v\mu} v_\mu, \quad \dot{r}_0 + \dot{w}t_* = \kappa_{r\mu} \tau_\mu, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \kappa_{v\mu} &= \left[\overline{h_{m(m+\mu)}(\omega_0)} \right]^{-1}, \\ \kappa_{r\mu} &= \left[\overline{dh_{m(m+\mu)}(\omega_0)/d\omega} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

— коэффициенты, определяющие пространственные и частотные масштабы изменчивости передаточной функции волновода $h_{mn} = h_m - h_n$, h_l — горизонтальное волновое число l -й моды, r_0 — начальное удаление источника от приемника в момент времени $t = 0$, $\mu = 1, 2, \dots, M-1$ — номер фокального пятна, M — число мод, формирующих поле. Оценки параметров источника, получаемые в результате анализа наблюдаемого процесса, в отличие от их истинных значений, обозначены точкой сверху. Черта сверху означает усреднение по номерам мод. Компонента $\dot{w}t_*$ является неконтролируемой систематической ошибкой. В соотношения (2) входят непосредственно измеряемые по голограмме величины (τ_μ, v_μ) и неизвестные величины (3) которые могут быть определены по данным акустической калибровки района исследований [9] или по результатам моделирования на основе априорной информации о характеристиках волновода. Для того чтобы голографический метод стал применимым везде, необходимо описывать коэффициенты (3) посредством наблюдаемых величин, т.е. величин, которые могут быть непосредственно измерены при малом отношении сигнал/помеха (с/п), не требующих знания о параметрах среды распространения. В настоящей работе рассмотрен вопрос о разрешении фокальных пятен. Изложены два варианта измерения величин (3). Получена оценка максимальной удаленности шумового источника, на которой еще сохраняется работоспособность метода.

2. АДАПТАЦИЯ МЕТОДА

Под адаптацией голографического метода понимается возможность определения коэффициентов (3) посредством измерения связанных с ними величин

*E-mail: pereselkov@yandex.ru

†E-mail: kumiov@yandex.ru

‡E-mail:

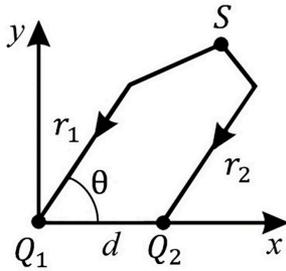


Рис. 1: Схема расположения источника S и ВСП $Q_{1,2}$

на фоне малого входного отношения с/п в отсутствие знания передаточной функции волновода. Такими измеряемыми величинами являются пеленг и частотный сдвиг интерференционных максимумов волнового поля. Ниже описаны два варианта определения $\kappa_{v\mu}$ и $\kappa_{r\mu}$, реализуемые с использованием двух ВСП Q_1 и Q_2 , разнесенных на горизонтальное расстояние d (рис. 1).

2.1. Первый вариант

Данный вариант, назовем его амплитудным, основан на представлении модулей голограмм ВСП, чувствительных к удалению источника. Разность расстояний источника до приемников, если $r_1, r_2 \gg d$, равна $\Delta r = d \cos \theta$, где θ — пеленг, тогда

$$d \cos \theta = \kappa_{r\mu} \Delta \tau_{\mu}, \quad (4)$$

где $\Delta \tau_{\mu} = \tau_{\mu 1} - \tau_{\mu 2}$ — разность положений основного максимума μ -го фокального пятна в точках наблюдения. Соотношение (4) позволяет определить $\kappa_{r\mu}$ по измеренным величинам θ и $\Delta \tau_{\mu}$, и тем самым оценить расстояния r_1 и r_2 . Частотный сдвиг интерференционного максимума в момент времени $t = 0$ между точками наблюдения равен

$$\Omega_0 = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \cos \theta}{r_1} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{v\mu}}, \quad (5)$$

Отсюда

$$\kappa_{v\mu} = -\frac{d \cos \theta}{\Omega_0 \tau_{\mu 1}}. \quad (6)$$

Таким образом, соотношения (4), (6) дают возможность определить коэффициенты $\kappa_{r\mu}$ и $\kappa_{v\mu}$, если величины θ , $\Delta \tau_{\mu}$, Ω_0 и $\tau_{\mu 1}$ известны.

Для применимости амплитудного метода необходимо, чтобы в точках наблюдения μ -е фокальные пятна разрешались, а частотный сдвиг не превышал ширины спектра, $|\Omega_0| \leq \Delta f$. В соответствии с критерием Рэлея условие разрешения фокальных пятен записывается в виде:

$$d \cos \theta \geq \frac{\kappa_{r\mu}}{\Delta f}. \quad (7)$$

Пусть ширина полосы $\Delta f = 40$ Гц, расстояние $r_1 = 10$ км. Тогда, согласно (7), фокальные пятна номеров $\mu = 1$ и $\mu = 6$ разрешаются, если $d \cos \theta \geq 2.1$ км ($\mu = 1$) и $d \cos \theta \geq 0.4$ км ($\mu = 6$). В соответствии с (5) частотный сдвиг $|\Omega_0| \geq 19.6$ Гц ($\mu = 1$) и $|\Omega_0| \geq 3.7$ Гц ($\mu = 6$). Применимость амплитудного варианта облегчается с увеличением номера фокального пятна.

2.2. Второй вариант

Другой вариант определения коэффициентов (2), (3) основан на фазовом представлении голограммы, которая, наоборот, чувствительна к радиальной скорости источника. Этот вариант назовем фазовым.

Разность фаз между точками наблюдения в окрестности максимума μ -го фокального пятна равна:

$$\Delta \varphi_{\mu}(v) = d \cos \theta \left[\overline{h_{m(m+\mu)}(\omega_0)} + (v/w) \right]. \quad (8)$$

Разность фаз линейно зависит от частоты ν и в точке положения максимума фокального пятна, $v = v_{\mu}$, как и следовало ожидать, равна нулю. Это дает возможность определять положения максимумов фокальных пятен v_{μ} по нулевым значениям разности фаз. При этом координаты τ_{μ} максимумов фокальных пятен определяются как $\tau_{\mu} = v_{\mu}/\varepsilon$. По сравнению с непосредственным определением координат максимумов фокальных пятен, если они размыты, на практике этот метод может оказаться более удобным и точным. Дифференцируя выражение (8), для радиальной скорости получаем оценку:

$$\dot{w} = \frac{d \cos \theta}{d(\Delta \varphi_{\mu})/d v}, \quad (9)$$

что позволяет, используя соотношение (2) и (3), определить коэффициент $\kappa_{v\mu}$.

3. ОЦЕНКА УДАЛЕННОСТИ ИСТОЧНИКА

Оценки удаленности r_1 и значения коэффициента $\kappa_{r\mu}$ можно получить, наблюдая за частотным сдвигом интерференционного максимума волнового поля. При этом возможны два подхода.

3.1. Первый подход

В приближении $r_1 \gg w \Delta t$ для момента времени Δt частотный сдвиг между точками наблюдения равен:

$$\Omega_{\Delta t} = -\frac{1}{2\pi} \frac{d \cos \theta}{(r_1 - w \Delta t)} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{v\mu}} \approx \Omega_0 \left(1 + \frac{w \Delta t}{r_1} \right), \quad (10)$$

где Ω_0 — частотный сдвиг в момент времени $t = 0$. Тогда

$$\Delta \Omega = \Omega_0 - \Omega_{\Delta t} = \Omega_0 \frac{w \Delta t}{r_1}, \quad (11)$$

так что начальное удаление оценивается как

$$\dot{r}_1 = \left| \frac{\Omega_0}{\Delta\Omega} \dot{w} \Delta t \right|. \quad (12)$$

3.2. Второй подход

Частотные сдвиги за время наблюдения в точках наблюдения Q_1 и Q_2 равны:

$$\Omega_1 = -\frac{1}{2\pi} \frac{w \Delta t}{r_1} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{v\mu}}, \quad (13)$$

$$\Omega_2 = -\frac{1}{2\pi} \frac{w \Delta t}{(r_1 - d \cos \theta)} \frac{\kappa_{r\mu}}{\kappa_{v\mu}}. \quad (14)$$

В результате получаем соотношение для разности частотных сдвигов между точками наблюдения:

$$\Delta\Omega_{\Delta t} = \Omega_1 - \Omega_2 \approx \Omega_1 \frac{d \cos \theta}{r_1}, \quad (15)$$

позволяющее оценить начальное удаление:

$$\dot{r}_1 = \left| \frac{\Omega_1}{\Delta\Omega_{\Delta t}} d \cos \theta \right|. \quad (16)$$

Выражения (12), (16) дают возможность определять коэффициенты $\kappa_{r\mu}$. В отличие от амплитудного варианта в фазовом варианте ограничения на величину $d \cos \theta$ отсутствуют. Фазовый вариант позволяет непосредственно оценивать радиальную скорость и удаление, не прибегая к определению коэффициентов $\kappa_{v\mu}$ и $\kappa_{r\mu}$.

Пусть $d = 150$ м, $r_1 = 10$ км, $\Delta t = 90$ с, $w = 2$ м/с. В соответствии с амплитудным подходом получаем $\max(\Omega_0) = 1.4$ Гц, $\Delta\Omega = 2.5 \times 10^{-2}$ Гц. Применительно к фазовому подходу $\Omega_1 = 1.7$ Гц, $\max(\Delta\Omega_{\Delta t}) = 2.6 \times 10^{-2}$ Гц. Под максимальными значениями частотного сдвига Ω_0 и разности частотных сдвигов $\Delta\Omega_{\Delta t}$ понимаются их абсолютные значения, регистрируемые при пеленгах $\theta = 0$ или $\theta = 180^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы и обсуждены возможности реализации голографического метода локализации источника звука. Предложены два варианта реализации метода, не требующих информации о передаточной функции волновода, которые реализуются на основе измерений пеленга и частотных сдвигов интерференционных максимумов между двумя разнесенными ВСП. Эти измерения, на этапе обнаружения, позволяют определять характеристики передаточной функции волновода, связывающие положения максимумов фокальных пятен с радиальной скоростью и удаленностью источника. В зависимости от времени наблюдения и определяемой характеристики передаточной функции среды получена оценка максимальной удаленности источника, при которой сохраняется работоспособность метода. Результаты анализа проиллюстрированы числовыми оценками для низкочастотной области шумового источника, которые позволяют сформулировать требования к практическим схемам реализации предлагаемого метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 19-29-06075 и № 19-38-90326).

- [1] Кузнецов Г. Н., Кузькин В. М., Пересёлков С. А. // Акуст. журн. 2017. **63**, № 4. С. 406.
- [2] Kuznetsov G. N., Kuz'kin V. M., Pereselkov S. A., Kaznachheev I. V. // J. Phys. Wave Phenom. 2017. **25**, N 2. P. 156.
- [3] Kuznetsov G. N., Kuz'kin V. M., Pereselkov S. A., Kaznachheev I. V., Grigor'ev V. A. // Phys. Wave Phenom. 2017. **25**, N 4. P. 299.
- [4] Kuz'kin V. M., Pereselkov S. A., Kuznetsov G. N., Kaznachheev I. A. // Phys. Wave Phenom. 2018. **26**, N 1. P. 63.
- [5] Kuz'kin V. M., Kuznetsov G. N., Pereselkov S. A., Grigor'ev V. A., Prosovetskiy D. Yu. // Phys. Wave

Phenom. 2018. **26**, N 2. P. 150.

- [6] Кузькин В. М., Пересёлков С. А., Казначеев И. В., Ткаченко С. А. // Вестн. ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2018, N 2. С. 53.
- [7] Казначеев И. В., Кузнецов Г. Н., Кузькин В. М., Пересёлков С. А. // Акуст. журн. 2018. **64**, N 1. С. 33.
- [8] Kuznetsov G. N., Kuz'kin V. M., Pereselkov S. A., Prosovetskiy D. Yu. // Phys. Wave Phenom. 2016. **24**, N 4. P. 310.
- [9] Белов А. И., Кузнецов Г. Н. // Акуст. журн. 2014. **60**, № 2. С. 190.

Localization of sound source at the absence of information about transfer function of the waveguide.

S. A. Pereselkov^{1,a}, V. M. Kuz'kin^{2,b}, G. N. Kuznetsov², G. A. Lyakhov², E. S. Kaznacheeva¹.

¹Voronezh State University, Voronezh 394006, Russia

²General Physics Institute RAS, Moscow 119991, Russia

E-mail: ^apereselkov@yandex.ru, ^bkumiov@yandex.ru

The resolution of the holographic method of sound source localization by source noise field is analyzed. Two variants of the method implementation are presented. Presented method implementations do not require data about propagation environment characteristics to determine the source coordinates.

PACS: 92.10.Vz

Keywords: hydroacoustics, holography, interference structure, sound field, broadband noise source, sonar.

Received 10 November 2019.

Сведения об авторах

1. Переселков Сергей Алексеевич — доктор физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой математической физики и информационных технологий; тел.: (950) 770-86-79, e-mail: pereselkov@yandex.ru.
2. Кузькин Венедикт Михайлович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник Института общей физики РАН; тел.: (503) 83-84, e-mail: kumiov@yandex.ru.
3. Кузнецов Геннадий Николаевич — канд. физ.-мат. наук, руководитель отдела Морские технологии Института общей физики РАН; тел.: (256)-17-90, e-mail: skbmortex@mail.ru.
4. Ляхов Геннадий Александрович — доктор физ.-мат. наук, зам. директора по науке НЦВИ Института общей физики РАН; тел.: (503) 87-77, e-mail: gen.lyakhov@gmail.com.
5. Казначеева Елена Сергеевна — аспирант; тел.: (950) 770-86-79, e-mail: el.kaznacheeva@gmail.com.