**С.А. Переселков¹, В.М. Кузькин², Е.С. Казначеева¹,
С.А. Ткаченко¹**

ОБНАРУЖЕНИЕ ШУМОВОГО ИСТОЧНИКА

*¹Воронежский государственный университет
Россия, 394006, Воронеж, Университетская пл., 1,
Тел.: 8 (8950) 770-86-79, E-mail: pereselkov@yandex.ru
²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38,
Тел.: (499) 503-8726, E-mail: kumiov@yandex.ru*

Оценена помехоустойчивость интерферометрической обработки. На основе критерия Неймана–Пирсона рассмотрено обнаружение сигнала шумового источника.

Ключевые слова: акустическая интерферометрия, обнаружение, шумовой источник, правильное обнаружение, ложная тревога

Интерферометрический метод локализации шумового источника основан на двукратном преобразовании Фурье формируемой им интерферограммы [1]. На выходе интегрального преобразования спектральная плотность, которую условно можно назвать голограммой Фурье, концентрируется в пределах узкой полосы в форме фокальных пятен, обусловленных интерференцией мод различных номеров.

В интерферометрической обработке на статистических характеристиках реконструированных параметров источника можно выделить сигнальную область входных отношений сигнал/помеха (с/п) $q_0 \geq q_{\text{lim}}$, когда реализуется когерентное накопление спектральных максимумов поля вдоль локализованных полос, что обеспечивает устойчивое обнаружение и оценки пеленга, радиальной скорости, удаления и глубины, близки реальным. Для шумового сигнала, если внешняя помеха изотропная, $q_{\text{lim}} \approx 1.5/J^2$ [1], где $J = \Delta t / (T + \delta T)$ – число временных интервалов (отсчетов). Здесь Δt – время наблюдения, T – длительность шумовой реализации; δT – интервал между отсчетами. Решение задачи обнаружения рассмотрим применительно к сигнальной области значений q_0 , представляющей практический интерес.

Пусть спектры шумового сигнала и помехи сосредоточены в полосе $\Delta\omega_1$. Сигнал и помеха являются взаимонезависимыми гауссовскими

случайными процессами с нулевыми математическими ожиданиями. Положим, что ширина локализованных полос $\Delta\omega_2$ и контрастность интерферограммы равна единице. Под отношением с/п q_0 на входе одноканального приемника в начальный момент времени $t = 0$ понимается величина:

$$q_0 = \overline{E_s}(0) / \overline{E_n}(0), \quad (1)$$

где $\overline{E_s}(0)$ и $\overline{E_n}(0)$ – средние энергии сигнала и помехи. Черта сверху означает усреднение по ансамблю реализаций. На выходе траекторного когерентного накопления на J интервалах времени за время Δt отношение с/п $q_1 = \overline{E_s}(\Delta t) / \overline{E_n}(\Delta t)$, согласно [2], равно:

$$q_1 = J q_0. \quad (2)$$

Двукратное преобразование Фурье интерферограммы локализует двумерную спектральную плотность шумового сигнала в пределах узкой полосы голограммы, площадь которой можно оценить как:

$$S_s = \tau_1 / \Delta t, \quad (3)$$

Здесь τ_1 – положение главного максимума фокального пятна на оси времени, обусловленного интерференцией между крайними модами [1]. Вне этой полосы спектральная плотность практически подавлена. Спектральная плотность помехи распределена во всей области голограммы, площадь которой равна:

$$S_n = |v_1| \tau_1, \quad (4)$$

где $v_1 = -w h_{1M}(\omega_1)$ – положение главного максимума фокального пятна на оси частоты [1]. Здесь $h_{1M} = h_1 - h_M$, h_m – горизонтальное волновое число m -ой моды, M – число мод; ω_1 – средняя частота полосы $\Delta\omega_1$; w – радиальная скорость источника. Если мощность помехи равномерна распределена в области голограммы, то выходное отношение с/п q_2 на выходе интерферометрической обработки составит:

$$q_2 = J \gamma q_0, \quad (5)$$

где коэффициент $\gamma = |v_{M-1}| \Delta t$. При неподвижном источнике величина $|v_{M-1}|$ заменяется шириной спектра Δv в области голограммы.

Для мелководных акваторий в низкочастотном диапазоне (несколько сот герц) и скоростей источника $w \approx 1 - 10$ м/с величина $|v_1| \approx 0.07 - 0.7$ Гц [1]. Задавая время накопления $\Delta t = 100$ с, получаем оценку $\gamma = 7 - 70$.

Уменьшение входного отношения с/п q_0 влечет за собой увеличение отсчетов J , которое при фиксированном времени наблюдения Δt сверху ограничено минимальной длительностью $T_{\min}$ шумовой реализации. Минимальная длительность шумового сигнала оценивается как [2]:

$$T_{\min} = 4r \left| dh_{1M}(\omega_1) / d\omega \right|, \quad (6)$$

так что с увеличением расстояния r между источником и приемником и средней частоты ω_1 минимальное время регистрации шумового сигнала возрастает и уменьшается соответственно. В результате максимальное число отсчетов, согласно (6), полагая $\delta T \ll T$, равно:

$$J_{\max} = \Delta t / 4r \left| dh_{1M}(\omega_1) / d\omega \right|, \quad (7)$$

при этом минимальное предельное входное отношение с/п оценивается как:

$$q_{\lim(\min)} = 24r^2 \left| dh_{1M}(\omega_1) / d\omega \right|^2 / (\Delta t)^2, \quad (8)$$

По критерию Неймана–Пирсона при большом числе слагаемых J вероятности ложной тревоги p_2 (вероятность превышения помехой порогового уровня g) и правильного обнаружения p_1 (превышение порога при наличии сигнала), согласно [2], равны:

$$p_2 = 1 - 0.5 \left[\Phi(\kappa_n - 0.5) + \Phi(\kappa_n + 0.5) \right], \quad (9)$$

$$p_1 = 1 - 0.5 \left[\Phi(\eta_1) + \Phi(\eta_2) \right], \quad (10)$$

$$\text{Здесь} \quad \Phi(x) = \left(2/\sqrt{\pi} \right) \int_0^x \exp(-t^2) dt, \quad (11)$$

$$\kappa_n = g / 2 M_n(\Delta t), \quad M_n(\Delta t) = \pi J \overline{E_n}(0) / \Delta \omega_2, \quad (12)$$

$$\eta_1 = (2\kappa_n - 1 - q_2) / 2(1 + q_2), \quad \eta_2 = (2\kappa_n + 1 + q_2) / 2(1 + q_2), \quad (13)$$

По заданной вероятности ложной тревоги p_2 однозначно определяется уровень g , а зная его, вычисляется вероятность правильного обнаружения p_1 . Таким образом, можно рассчитать кривые обнаружения шумового сигнала, представляющие собой зависимость вероятности

Рис. 1. Зависимость вероятности правильного обнаружения p_1 от входного отношения с/п q_0 для разных значений вероятности ложной тревоги p_2 : (а) $J = 10$; (б) $J = 20$. Кривая 1 – $p_2 = 10^{-1}$, кривая 2 – $p_2 = 10^{-2}$, кривая 3 – $p_2 = 10^{-3}$.

правильного обнаружения от выходного (или входного) отношения с/п при фиксированной вероятности ложной тревоги.

На рис. 1 приведены кривые обнаружения шумового сигнала в зависимости от входного отношения с/п q_0 для коэффициента концентрации $\gamma = 7$.

Вероятность ложной тревоги $p_2 = 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$. Отсчетам $J = 10, 20$, соответствуют предельные входные отношения $q_{\text{lim}} = 0.015, 0.00375$. С уменьшением вероятности ложной тревоги при заданном входном отношении с/п, вероятность правильного обнаружения уменьшается. С увеличением отсчетов эффективность обнаружения источника возрастает.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты № 19-08-00941, № 19-29-06075). Научно-исследовательская работа Казначеевой Е.С. поддержана грантом РФФИ №19-38-90326.

Литература

1. Казначеев И.В., Кузнецов Г.Н., Кузькин В.М., Переселков С.А. Интерферометрический метод обнаружения движущегося источника звука векторно-скалярным приемником // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 1. С. 33–45.
2. Кузькин В.М., Переселков С.А., Матвиенко Ю.В., Ткаченко С.А. Обнаружение источника в диспергирующих средах // РЭНСИТ. 2019. Т. 11. № 3. С. 337–344.

**S.A. Pereselkov¹, V.M. Kuzkin², E.S. Kaznacheeva¹,
S.A. Tkachenko¹**

NOISE SOURCE DETECTING

¹*Voronezh State University*

*Universitetskaya pl., 1, Voronezh, Russia, 394006,
Tel.: 8 (8950) 770-86-79, E-mail: pereselkov@yandex.ru*

²*General Physics Institute A.M. Prokhorov RAS
ul. Vavilova, 38, Moscow, Russia, 119991,
Tel.: 8 (499) 503-8726, E-mail: kumiov@yandex.ru*

Noise immunity of interferometric processing is analyzed. Based on the Neumann–Pearson criterion, the detection of a noise source signal is considered.

Keywords: acoustic interferometry, detection, noise source, true detection, false alarm

Acknowledgment: The work was supported by grants from the Russian Foundation for Basic Research (projects No. 19-08-00941, No. 19-29-06075). Scientific research work of E.S. Kaznacheeva supported by the RFBR grant No. 19-38-90326.

References

1. Kaznacheev I.V., Kuznetsov G.N., Kuzkin V.M., and Pereselkov S.A. Interferometric method for detecting a moving sound source by a vector-scalar receiver. *Akust. Zhurn.*, 2018, Vol. 64, No. 1, pp. 33–45.
2. Kuz'kin V.M., Pereselkov S.A., Matvienko Yu.V., and Tkachenko S.A. Source Detection in dispersive media. *RENSIT*, 2019, Vol. 11, No. 3, pp. 337–344.