

Исследование влияния когерентности гидроакустических полей на эффективность подводного наблюдения

А. И. Хилько^{1,*}, И. П. Смирнов^{1,†}, А. И. Машошин^{2,‡}, А. В. Шафранюк^{2,§}

¹Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

²АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

(Статья поступила 05.07.2017; Подписана в печать 11.09.2017)

Разработана модель когерентности высокочастотных гидроакустических полей в случайно неоднородных океанических волноводах. Анализируются причины разрушения когерентности. Приведены результаты расчётов когерентности шумовых источников в зависимости от взаимного положения источника и приемной системы, типа волновода, а также параметров случайных неоднородностей океанического волновода. Обсуждается эффективность частично когерентного подводного наблюдения.

PACS: 43.30.+m УДК:534.23

Ключевые слова: случайно-неоднородные океанические волноводы, когерентность высокочастотных гидроакустических полей, подводное наблюдение.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность подводного гидроакустического (ГА) наблюдения зависит от пространственной, частотной и временной когерентности ГА сигналов. На когерентность звукового поля одновременно влияет целый ряд факторов: гидроакустические условия, ветровые и внутренние волны, взаимное расположение источника и приемника, рабочий диапазон частот, структура случайных неоднородностей морской среды [1–3]. Несмотря на большой практический интерес когерентность высокочастотного (ВЧ) акустического поля шумовых источников остается к настоящему времени недостаточно исследованной [3, 4]. В настоящей работе детально анализируются структура когерентности ВЧ ГА поля в условиях формирования лучевого хаоса [5, 6], возникающего из-за влияния случайных неоднородностей океана.

1. МОДЕЛЬ И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КОГЕРЕНТНОСТИ ВЧ ГА СИГНАЛОВ

Реальные природные волноводы в типичных условиях их наблюдения обычно являются нерегулярными. В таких волноводах стандартная схема нахождения ВЧ поля в лучевом приближении становится малоприменимой, поскольку невозможно найти все собственные лучи, а параметры приносимых ими полей определяются с большими погрешностями. Для учета указанных явлений необходимо модифицировать лучевой метод, используя при расчетах полей лишь такие характери-

стики лучей, которые устойчивы по отношению к возникающим возмущениям волноводных параметров. Практические наблюдения и теоретические расчеты (см., например, [4–6]) показывают, что такие характеристики существуют. В частности остаются устойчивыми времена прихода лучей. При этом происходит т. н. кластеризация лучей по временам прихода — их группировка в устойчивые группы. Входящие в один кластер лучи имеют одинаковые идентификаторы I_d — числа точек поворота, взятые со знаками углов выхода лучей из источника. Начальные углы выхода и сами траектории этих лучей в волноводе могут сильно различаться между собой, но их времена и углы прихода в приемник остаются близкими. Причиной этого является следующая особенность океанических волноводов (отражаемая обычно в их математических моделях): относительно большие флуктуации параметров волновода наблюдаются в основном в ограниченных по глубинам областях: вблизи оси канала, поверхности и дна. Остальная часть волновода характеризуется стабильностью параметров. Поскольку существенная часть периодических траекторий лучей приходится как раз на стабильные области волновода, время прихода лучей определяется главным образом числом периодов, укладывающихся на трассе распространения. Приходящие по лучам одного кластера волны близки по временам распространения и потому для суммарного поля в кластере наблюдается интерференционное усиление поля. Для исследования когерентности ВЧ гидроакустического поля в случайно-неоднородном волноводе был разработан модель и алгоритм, основанные на использовании представления ВЧ поля в виде лучевых кластеров. При этом взаимный корреляционный момент поля определяется как

$$K(R_1, R_2; \tau) = \langle V(r_1, z_1, t) V^*(r_2, z_2, t + \tau) \rangle = \sum_{j_1, j_2} a^{(j_1)}(r_1, z_1) \left(a^{(j_2)}(r_2, z_2) \right)^* k_{j_1 j_2}(\tau), \quad (1)$$

*E-mail: a.khil@ipfran.ru

†E-mail: smip@ipfran.ru

‡E-mail: aimashoshin@mail.ru

§E-mail: andval@hotmail.ru

где $k_{j_1 j_2}(\tau) \equiv \left\langle \sum_{i_1=1}^{I_{j_1}} \sum_{i_2=1}^{I_{j_2}} k\left(\tau + \Delta\tau_0^{(j_1 j_2)} + \Delta\tau_{i_1 i_2}^{(j_1 j_2)}\right) \right\rangle$,
 $k(\tau) = \langle v(t) v^*(t + \tau) \rangle$ — автокорреляционная функция стационарного излучаемого сигнала с несущей частотой ω_0 и временем корреляции $\tau_v = \int_0^\infty |r(\tau)| d\tau$,

$$\begin{aligned} r(\tau) &\equiv k(\tau) / k(0), \\ \Delta\tau_0^{(j_1 j_2)} &\equiv \tau_0^{(j_1)}(r_1, z_1) - \tau_0^{(j_2)}(r_2, z_2), \\ \Delta\tau_{i_1 i_2}^{(j_1 j_2)} &\equiv \tau_{i_1}^{(j_1)}(r_1, z_1) - \tau_{i_2}^{(j_2)}(r_2, z_2), \\ a^{(j)}(r, z) &\equiv \left\langle a_i^{(j)}(r, z) \right\rangle, \end{aligned}$$

$a^{(j)}(r, z)$ — средняя комплексная амплитуда лучей j -го кластера в точке (r, z) , $\Delta\tau_0^{(j_1 j_2)}$ — разность времен прихода кластеров j_1 и j_2 , $\Delta\tau_{i_1 i_2}^{(j_1 j_2)}$ — приращение случайных смещений времен прихода лучей из данных кластеров. При увеличении расстояния между точками R_1, R_2 число одинаковых кластеров лучей,

приходящих в них, убывает. Соответственно, убывает и число коррелирующих между собой импульсов, так как распространяющиеся по лучам различных кластеров импульсы приходят в указанные точки с сильно различающимися временами. Меняя задержку τ , можно менять корреляцию импульсов из различных кластеров, приходящих в корреспондирующие точки. Поэтому корреляционный момент $K(R_1, R_2; \tau)$ будет иметь набор локальных максимумов и минимумов на оси τ . Коэффициент когерентности импульсного сигнала между точками волновода R_1, R_2 определим выражением

$$\mathfrak{K}(R_1, R_2) = \frac{|K(r_1, z_1, r_2, z_2; 0)|}{k(0) \sum_{j_1, j_2} |a^{(j_1)}(r_1, z_1) a^{(j_2)}(r_2, z_2)|}.$$

Для случая, когда корреляционная функция сигнала $k(\tau)$ имеет гауссову форму, имеем

$$k_{j_1 j_2}(\tau) \cong k\left(\tau + \Delta\tau_0^{(j_1 j_2)}\right) \langle I_{j_1} \rangle \langle I_{j_2} \rangle \exp\left(-i\omega_0 (\langle m_{j_1} \rangle - \langle m_{j_2} \rangle) - \frac{1}{2}\omega_0^2 (\sigma_{j_1}^2 + \sigma_{j_2}^2)\right),$$

где среднее время прихода луча m_j и его дисперсия σ_j^2 зависят от кластера и точек R_1, R_2 , определяясь статистикой флуктуаций показателя преломления, волнением поверхности и пр. Для водных лучей дисперсии σ_j^2 обычно малы, а для отражаемых от границ зависят от флуктуаций последних и могут принимать большие значения, что приводит к уменьшению вклада таких лучей в интерференционную картину. При моделировании примем $\sigma_j^2 = \sigma_{\tau w}^2 + \sigma_{\tau s}^2 k_j^{(s)} + \sigma_{\tau b}^2 k_j^{(b)}$, где $\sigma_{\tau w}^2$ — дисперсия времени запаздывания луча в толще жидкости, $k_j^{(s)}, k_j^{(b)}$ — числа столкновений луча с поверхностью и дном, соответственно, $\sigma_{\tau s, \tau b}^2$ — дисперсии времен запаздывания, возникающие при однократных актах отражения от соответствующих границ волновода. Для оценок указанных дисперсий используются приближения малоразмерных объемных вариаций толщи морской среды, однократного рассеяния от взволнованной поверхности океана, и шероховатого дна [5]. Анализ структуры когерентности ВЧ ГА поля в океане был выполнен на основе расчетов зависимостей функции когерентности (1) от несущей частоты, дисперсии флуктуаций времен запаздывания, глубины источника, времени когерентности поля источника для условий глубокого и мелкого морей.

Из представленных на рис.1, 2 и других расчетов следует, что размеры областей и уровень когерентности шумовых ВЧ ГА сигналов спадают как при уменьшении времени когерентности шума ВЧ ГА источника, так и при росте скорости ветра (рис. 1). Кроме того

структура областей высокой когерентности ВЧ ГА поля зависит от положения как источника, так и области наблюдения. Общей закономерностью, которая наблюдается в океаническом волноводе, является спадание когерентности ВЧ ГА поля с ростом частоты и дистанции наблюдения. Масштаб пространственной когерентности ВЧ ГА поля шумового источника зависит от его глубины (рис. 2).

Заглубленный источник при прочих равных условиях характеризуется большей пространственной когерентностью, что можно объяснить тем, что при заглублении источника относительный энергетический вклад лучевых компонент водного типа, слабо взаимодействующих со случайными, в частности, поверхностными неоднородностями, существенно больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в настоящей работе анализ показывает, что когерентность ВЧ ГА полей шумовых источников в случайно неоднородных океанических волноводах имеет сложную структуру и формируется в результате влияния целого ряда факторов. Так, из-за шумовой структуры источника имеет место лишь частично когерентная интерференция лучевых компонент. Кроме того, когерентность ВЧ ГА падает и за счет рассеяния лучевых компонент случайными неоднородностями морской среды. Выполненные в настоящем исследовании расчёты позволили оценить зависимости мас-

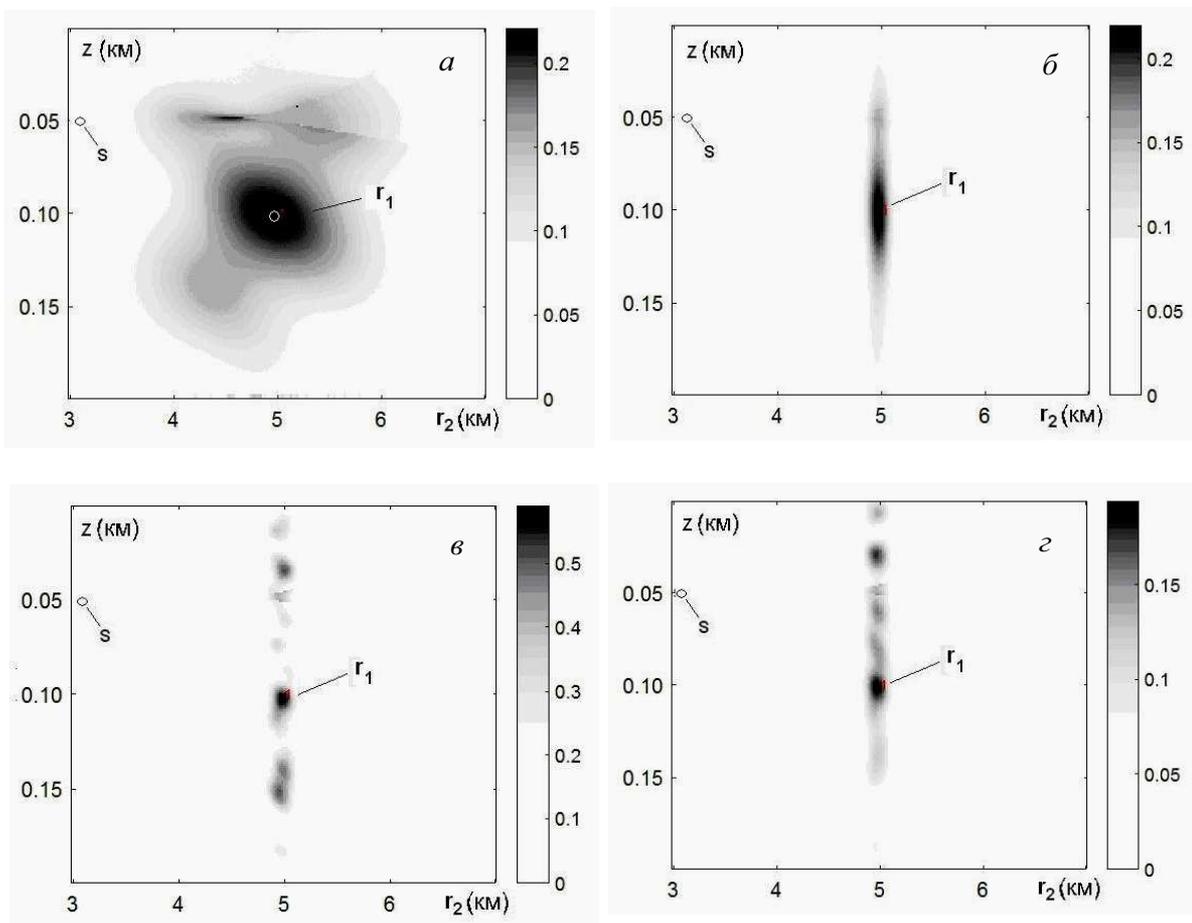


Рис. 1: Пространственная когерентность ВЧ ГА поля шумового источника в условиях Баренцева моря при летней гидрологии для различных величин времени корреляции сигналов источника: *a* – $\tau_0 = 1$ с, *б* – $\tau_0 = 0.1$ с, (частота 1 кГц и $\sigma_0 = 10^{-2}$ с), и различных значений дисперсии флуктуаций времен запаздывания лучевых компонент: *в* – $\sigma_0 = 0$ с, *г* – 10^{-2} с, (частота 4 кГц, $\tau_0 = 0.1$ с)

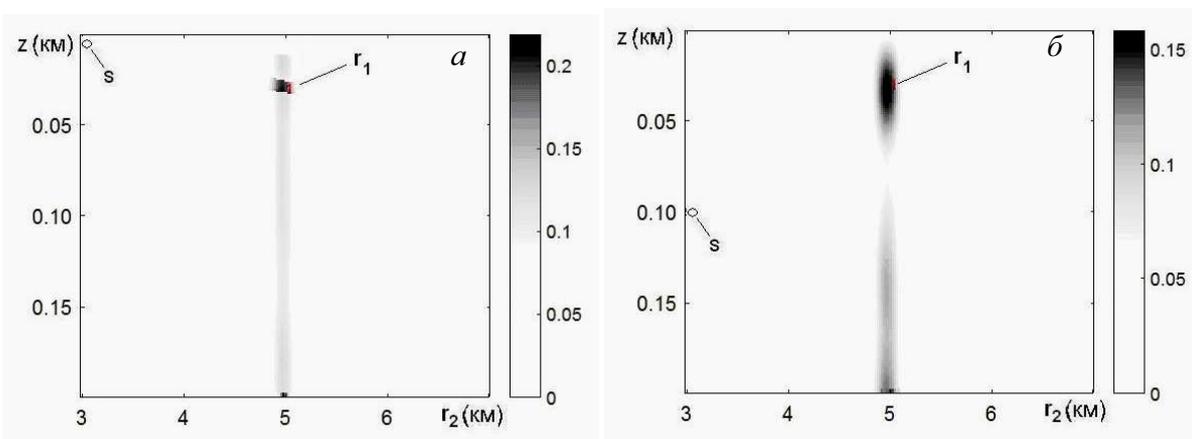


Рис. 2: Пространственная когерентность ВЧ ГА поля шумового источника в условиях Баренцева моря при зимней гидрологии для различных глубин источника: *a* – $z_S = 1$ м, *б* – $z_S = 100$ м, (частота 1 кГц, $\tau_0 = 0.01$ с, $\sigma_0 = 10^{-2}$ с)

штабов пространственной когерентности ВЧ ГА шумовых источников от взаимного положения источника и приемной системы, типа волновода, параметров

случайных неоднородностей океанического волновода. Из результатов расчетов можно сделать вывод, что, во-первых, размеры областей высокой когерентности

можно для типичных условий наблюдения оценивать как многие десятки метров. Во-вторых, для заглубленных шумовых источников когерентность существенно больше, чем для источников, расположенных вблизи

поверхности. Это позволяет использовать эту закономерность при классификации подводных ВЧ ГА источников при пассивном наблюдении [10].

-
- [1] *Collis J. M., Duda T. F., Lynch J. F., DeFerrari H. A. J.* Acoust. Soc. Am. 2008. **124**, N 3. P. 2.
[2] *Lynch J. F., Duda T. F., Siegmann W. L., Holmesc J., Newhall A. E.* 1-st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. 2013. P. 1149.
[3] *Хилько А. И., Смирнов И. П., Машошин А. И., Шафранюк А. В.* Труды XV научной школы–семинара академика Л. М. Бреховских «Акустика океана», совмещенной с XXII сессией Российского акустического общества. GEOS. Москва, 2016. С. 96.
[4] *Бурдуковская В. Г., Смирнов И. П., Хилько А. И.* Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2011. **54**, № 7. С. 474.
[5] *Смирнов И. П., Хилько А. А.* Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2007. **50**, № 3. С. 196.
[6] *Smirnov I. P., Virovlyansky A. L., Zaslavsky G. M.* JASA. 2005. **177**, N 3. P. 1595.
[7] *Baggeroer A. B.* Proceedings of the 1st Underwater Acoustics Conference and Exhibition. 2013. Corfu island. Greece. P. 41.
[8] *Смирнов И. П., Хилько А. И., Романова Т. В.* Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2008. **51**, № 1. С. 50.
[9] *Хилько А. И., Смирнов И. П., Бурдуковская В. Г.* Акуст. журн. 2016. **62**, № 6. С. 712.
[10] *Машошин А. И.* Акуст. журн. 2017. **63** (статья принята к печати).
-

Investigation of influence of hydroacoustic fields coherence and on underwater vision efficiency

A. I. Khil'ko^{1,a}, I. P. Smirnov^{1,b}, A. I. Mashoshin^{2,c}, A. V. Shafranyuk^{2,d}

¹Federal research center Institute of Applied Physics. Nizhny Novgorod, 603950 Russia.

²JSC «Concern NII «Electropribor». St. Petersburg, 197046 Russia

E-mail: ^aa.khil@ipfran.ru, ^bsmip@ipfran.ru, ^caimashoshin@mail.ru, ^dandval@hotmail.ru

Model of high frequency hydro acoustic fields in randomly inhomogeneous oceanic waveguides is developed. Calculation results of noise sources coherence depending from source and receiver displacement, waveguide characteristics, as well as waveguide random inhomogeneities parameters are presented. Underwater partially coherence vision efficiency is discussed.

PACS: 43.30.+m

Keywords: randomly inhomogeneous oceanic waveguides, coherence of high frequency hydro acoustic fields, underwater vision.
Received 05 July 2017.

Сведения об авторах

1. Хилько Александр Иванович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (831) 436-84-90, e-mail: a.khil@hydro.appl.sci-nnov.ru.
 2. Смирнов Иван Паисьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (831) 416-06-29, e-mail: smip@ipfran.ru.
 3. Машошин Андрей Иванович — доктор техн. наук, зав. отделением; тел.: (812) 499-78-71, e-mail: aimashoshin@mail.ru.
 4. Шафранюк Андрей Валерьевич — канд. техн. наук, зав. сектором; тел. (812) 499-78-71, e-mail: andval@hotmail.ru.
-