

© Стародубцев П.А., Мироненко М.В., Василенко А.М., Стародубцев Е.П.
Starodubcev P., Mironenko M., Vasilenko A., Starodubcev E.

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОГО ТЕМНОГО ПОЛЯ В РАЗРАБОТКАХ СИСТЕМ ДАЛЬНЕЙ ГИДРОЛОКАЦИИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ МОРСКОЙ СРЕДЫ

METHOD OF THE ACOUSTIC DARK FIELD IN SYSTEM DEVELOPMENT TO DISTANT SONAR BY HYDROPHYSICAL FLAP OF THE SEA AMBIENCE

Аннотация. В работе рассматриваются теоретические основы и практические пути совместной реализации в системах мониторинга гидрофизических полей, формируемых естественными и искусственными источниками, «метода просветной гидролокации» (МПГЛ) и «метода темного акустического поля» (МТАП). Показано, что возможность совместной реализации рассматриваемых методов в широкомасштабных системах контроля и комплексного мониторинга полей протяженных морских акваторий обусловлена объединяющей их низкочастотной акустической подсветкой среды, которая в условиях протяженного океанического канала проявляется как пространственно развитая многолучевость распространения просветных волн. Приведены примеры морских испытаний низкочастотных просветных систем мониторинга морских акваторий, основанных на совместной реализации МПГЛ и МТАП.

Annotation. In work are considered theoretical bases and practical ways to joint realization in system of the monitoring by hydrophysical flap, formed natural and artificial source, "method bright spot to sonar" (MPGL) and "method of the dark acoustic field" (MTAP). It is shown that possibility to joint realization of the considered methods in checking system broadly scale and complex monitoring by flap протяженных sea area of water is conditioned uniting their low-frequency acoustic подсветкой ambiances, which in condition long an океанического of the channel reveals itself as space developed much lines spreading просветных waves. Cite an instance sea test an low frequency bright spot of the systems of the monitoring sea area of water, founded on joint realization MPGL and MTAP.

Ключевые слова. Метод просветной гидролокации, метод темного акустического поля, низкочастотные просветные системы мониторинга морских акваторий.

Key words. Method bright spot to sonar, method of the dark acoustic field, low-frequency bright spot of the system of the monitoring sea area of water.

Различие «метода просветной гидролокации» (МПГЛ) и «метода темного акустического поля» (МТАП) заключается в следующем. Так, если в просветном методе преимущественно реализуется низкочастотная подсветка среды в основном по определенным (просветным) линиям, то в МТАП эта подсветка в идеале представляет многоканальное, многопозиционное рассеяние просветных волн, обеспечивающее полную равномерную засветку широкомасштабных акваторий. Разработка и анализ

рассмотренных положений для создания просветных систем мониторинга гидрофизических полей среды основаны на реализации закономерностей и технических решений, изложенных в работах [1–4].

Реализация идеи и закономерностей темного акустического поля пространственно разнесенными просветными системами является предметом обоснования и представленных в настоящей статье технологических разработок.

Стародубцев Павел Анатольевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидроакустики ТОВМИ ВУНЦ ВМФ ВМА, тел. 8-4232 -41-93-79.

Мироненко Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории ТОВМИ ВУНЦ ВМФ ВМА;

Василенко Анна Михайловна – кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории ТОВМИ ВУНЦ ВМФ ВМА;

Стародубцев Евгений Павлович – преподаватель кафедры гидроакустики ТОВМИ ВУНЦ ВМФ ВМА.

Starodubcev Pavel – doctor of the technical sciences, professor, professor of the pulpit of the Hydroacoustics TOVMI VUNC VMF VMA, tel. 8-4232 -41-93-79.

Mironenko Mikhail – doctor of the technical sciences, professor, senior scientific employee of the research laboratory TOVMI VUNC VMF VMA;

Vasilenko Anna – candidate of the technical sciences, younger scientific employee of the research laboratory TOVMI VUNC VMF VMA;

Starodubcev Evgeniy – teacher of the pulpit of the Hydroacoustics TOVMI VUNC VMF VMA.

Суть данных разработок заключается в следующем. Разнообразие таких подходов достаточно велико, однако основная идея сводится к следующему. Прежде всего, это пространственно-временная фильтрация, ослабляющая поле подсветки, как основную помеху. При этом максимально ослабляется некогерентное поле среды с минимальным ослаблением (или полным сохранением) рассеянного объектом или излучаемого им при движении гидрофизического поля. Затем данное гидрофизическое поле выделяется и регистрируется в приемном тракте системы мониторинга, как модуляционная составляющая.

В основу проведенного анализа взяты основные положения работы В.А. Зверева и Р.И. Коротина «Метод акустического темного поля» [5]. В дальнейшем для обоснования практических путей реализации этой идеи в просветном методе гидролокации перейдем к непосредственной фазовой обработке сигналов в просветных гидроакустических системах контроля морских акваторий. Совместная реализация рассматриваемых методов в условиях многолучевого океанического волновода обуславливает необходимость учета дополнительных требований при формировании многоэлементных антенн и создании трактов обработки принимаемых суммарных сигналов [1,2]. Несмотря на кажущийся многолучевой хаос распространения сигналов в реальном волноводе, экспериментально отмечена закономерность компоновки лучей в отдельные пространственно-угловые группы, в пределах которых они характеризуются достаточно стабильной скоростью распространения и временем прихода на приемные антенны [6-7]. Рассматриваемые группы лучей получили название «кластеров». В рамках этой теории будем рассматривать более простой, но достаточно характерный для практики случай распространения сигналов и их приход на приемную антенну в виде двух основных «кластеров», которые соответствуют двум основным приходом лучей сверху и снизу.

Итак, будем считать, что сигнал на антенне в вертикальной плоскости формируется двумя «кластерами», которые приходят в точку приема сверху, снизу и имеют вид

$$P \exp(j\omega_0 t) = S(t). \quad (1)$$

В соответствии с принципом суперпозиции на антенне формируется сигнал

$$U(t) = S_1(t) + S_2(t), \quad (2)$$

где $S_1(t)$ и $S_2(t)$ – колебания первого и второго кластеров, соответственно.

Примем, что $S_1(t)$, как опорный сигнал, имеющий наименьшее время распространения. Представите-

ли «кластеров» $S_1(t)$ и $S_2(t)$ и отличаются углами падения на антенну и, кроме того, относительным временем прихода к антенне. С учетом этого выражение (2) представим в виде

$$\begin{aligned} U(t, z) &= a_1 P \exp[j\omega_0(t - \frac{z}{c} \sin \theta_1)] + \\ &+ a_2 P \exp[j\omega_0(t - \frac{z}{c} \sin \theta_2 - \tau)] = \\ &= P_1 \exp[j\omega_0(t - \frac{z}{c} \sin \theta_1)] + \\ &+ P_2 \exp[j\omega_0(t - \frac{z}{c} \sin \theta_2 - \tau)], \end{aligned} \quad (3)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты затухания «кластеров»;

θ_1, θ_2 – углы прихода «кластеров» на антенну;

τ – относительная временная задержка второго «кластера» относительно первого;

z – пространственная вертикальная составляющая акустического поля.

Возьмем преобразование Фурье по t от выражения (3)

$$\begin{aligned} V(\omega, z) &= P \frac{\sin[(\omega - \omega_0)0, 5T]}{[0, 5T(\omega - \omega_0)]} \times \\ &\times \{a_1 \exp(-j\omega_0 \frac{z}{c} \sin \theta_1) + a_2 \exp[-j\omega_0(\frac{z}{c} \sin \theta_2 + \tau)]\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение (4) можно представить в виде

$$V(\omega, z) = S(\omega) \cdot H(\omega, z), \quad (5)$$

где $S(\omega) = F\{P \exp(j\omega_0 t)\}$ – преобразование Фурье от $S(t)$;

$$S(\omega) = P \cdot \frac{\sin[0, 5T(\omega - \omega_0)]}{0, 5T(\omega - \omega_0)}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} H(\omega, z) &= a_1 \exp(-j\omega_0 \frac{z}{c} \sin \theta_1) + \\ &+ a_2 \exp[-j\omega_0(\frac{z}{c} \sin \theta_2 + \tau)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) является частотно-пространственной характеристикой канала распространения.

Оценим спектральную плотность мощности $U(\omega, z)$, которая находится, как известно, из выражения

$$|U(\omega, z)|^2 = |S(\omega)|^2 \cdot |H(\omega, z)|^2. \quad (8)$$

Как видно из выражения (6)

$$|S(\omega)|^2 = P^2 \cdot \frac{\sin^2[0, 5T \cdot (\omega - \omega_0)]}{[0, 5T(\omega - \omega_0)]^2}.$$

Легко показать, что

$$|H(\omega, z)|^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \varphi, \quad (9)$$

где

$$\varphi = \frac{\omega_0}{c} [z(\sin \theta_1 - \sin \theta_2) - \tau c]. \quad (10)$$

В зависимости от величины φ $|H(\omega, z)|^2$ может принимать различные значения. Если $\varphi = 0, 2\pi$, то $|H(\omega, z)|^2_{\min} = (a_1 - a_2)^2$. В общем случае значение $V(\omega, z)$ в выражении (4) можно считать случайной величиной, равномерно распределенной в интервале от 0 до 2π . Поэтому

му, усредняя (9) по φ , получим $|H(\omega, z)|^2 = a_1^2 + a_2^2$. Из приведенных рассуждений видно, что спектральная плотность мощности на выходе антенной системы имеет нестабильный характер, зависящий от a_1 , a_2 , $\sin \theta_1$, $\sin \theta_2$ и τ , вследствие чего и мощность выходного сигнала также будет флюктуировать, так как

$$P_{\text{вых}} = \int_{-\infty}^{\infty} |V(\omega, z)|^2 d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 \cdot |H(\omega, z)|^2 d\omega. \quad (11)$$

Представим спектральную плотность сигнала от $V(\omega, z)$ по переменной z , т.е. частотно-волновой спектр сигнала $U(\omega, z)$, в результате чего получим

$$\begin{aligned} V(\omega, z) &= S(\omega) \left\{ a_1 \frac{\sin[0,5L(K_s \sin \theta_1 - \mathcal{G})]}{0,5L(K_s \sin \theta_1 - \mathcal{G})} + \right. \\ &+ a_2 \frac{\sin[0,5L(K_s \sin \theta_2 - \mathcal{G})]}{0,5L(K_s \sin \theta_2 - \mathcal{G})} \exp(-j\omega_s \tau) \left. \right\} = \\ &= S(\omega) \cdot H(\omega, \mathcal{G}), \end{aligned} \quad (12)$$

где \mathcal{G} – пространственная частота;

L – размеры решетки в вертикальной плоскости.

Из выражения (12) видно, что на плоскости (ω, z) пространственные и временные частоты связаны линейной зависимостью с углами наклона луча к плоскости антенны, определяемыми выражениями $K_s \sin \theta_1$ и $K_s \sin \theta_2$. Спектр сигнала на выходе антенны будет представлять собой сумму спектров сигналов «кластеров» с одинаковой по времени частотой ω_0 и разными фазовыми членами $\mathcal{G}_1 = \frac{\beta \omega_0}{c} \sin \theta_1$ и $\mathcal{G}_2 = \frac{\omega_0}{c} \sin \theta_2$. Вследствие этого, можно оценить $\sin \theta_1$ и $\sin \theta_2$. Поэтому, рассчитывая τ по методике, изложенной в работе [3–4], можно оценить $\tilde{H}(\omega, z)$ и затем найти $|\tilde{H}(\omega, z)|^2$. Разделив выражение (6) на $|\tilde{H}(\omega, z)|^2$, находим

$$\frac{|V(\omega, z)|^2}{|\tilde{H}(\omega, z)|^2} = |S(\omega)|^2 \cdot \frac{|H(\omega, z)|^2}{|\tilde{H}(\omega, z)|^2}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (11) получим, что мощность сигнала на выходе антенны определяется интегральным значением спектральной плотности принимаемых сигналов и частотно-пространственными параметрами волновода, как канала распространения

$$P_{\text{вых}} = \int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 \cdot \frac{|H(\omega, z)|^2}{|\tilde{H}(\omega, z)|^2} d\omega. \quad (14)$$

Прямая зависимость этих характеристик от параметров гидроакустического канала практически отсутствует, она учтена в его модуляционных пространственно-частотных характеристиках, которые можно назвать так же, как пространственно-волновые параметры канала распространения. Эта характеристика мощности принимаемых сигналов на выходе многоканальной антенны предполагает особенность ее формирования и последующую обработку принимаемых сиг-

налов для упрощенного случая приема двух основных энергонесущих групп (кластеров) симметричных лучей, проходящих сверху и снизу [3,4]. Более строгое теоретическое обоснование рассмотренных методов МПГЛ и МТАП, а также примеры их проверки в морских условиях рассмотрены в публикациях различного уровня по этому направлению исследований [1, 2, 8, 9]. Прием и обработка просветных волн в условиях многолучевого распространения и интенсивных помех среды осуществлялись методом фазовой обработки сигналов, принимаемых пространственно разнесенными донными блоками и последующим выделением из них узкополосных спектров разности фаз [1,9].

На рис. 1, 2 приведены примеры реализации закономерностей темного акустического поля с использованием сигналов стабильной акустической подсветки среды на частоте 400 Гц. Рис.1 соответствует спектру разности фаз просветного и опорного сигналов. Из него видно, что помеха среды не компенсируется. На рис.2 представлен спектр разности фаз горизонтально разнесенных приемников донной антенны. В этом случае поме-

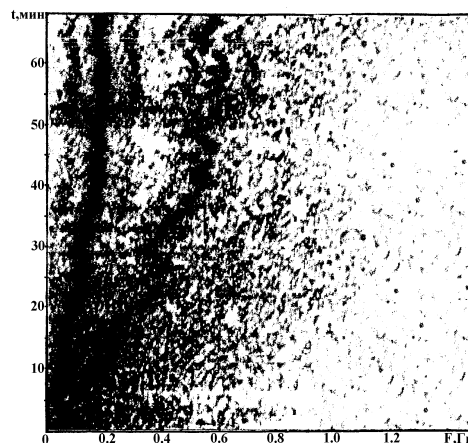


Рис. 1. Спектрограмма разности фаз просветного сигнала (при наличии помех среды и флуктуаций)

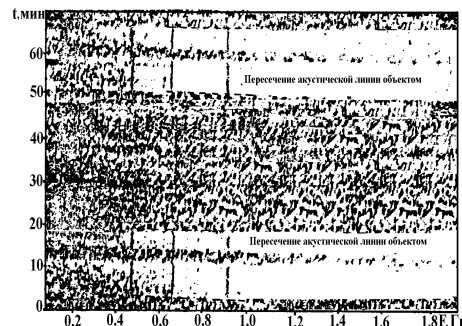


Рис. 2. Спектрограмма разности фаз просветных сигналов (помехи среды скомпенсированы)

ха среды, как случайный процесс, взаимно компенсируется, полезная информация (модуляция фазы проходящим объектом) сохраняется как его устойчивый признак

(темного акустического поля).

Примеры испытаний протяженных гидроакустических систем контроля морских акваторий и мониторинга

технологий при решении задач дальнего приема информационных волн в звуковом, инфразвуковом и дробном диапазонах частот. Многофункциональность такой си-

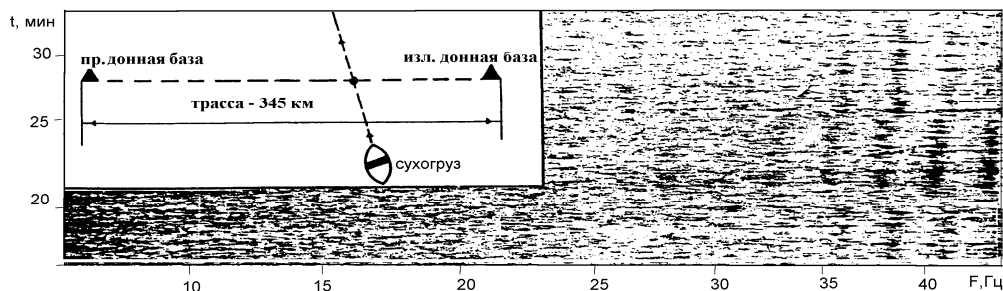


Рис. 3. Спектрограмма шумоизлучения морского судна. Параметрические измерения на трассе 345 км, подсветка – 400Гц

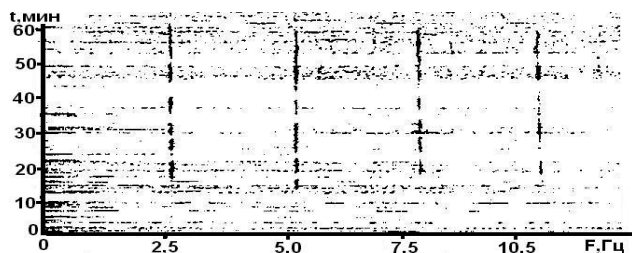


Рис. 4. Спектрограмма шумоизлучения морского судна. Параметрические измерения на трассе 25 км, подсветка-388 Гц

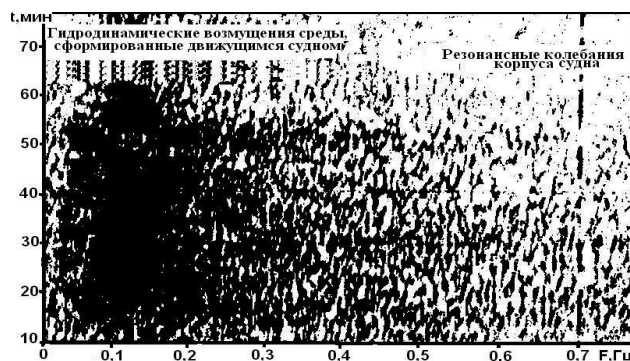


Рис. 5. Спектрограмма шумоизлучения морского судна. Параметрические измерения на трассе 30 км, подсветка – 381 Гц

их гидрофизических полей в звуковом, инфразвуковом и дробном диапазонах частот приведены на рис. 3–5.

Таким образом, просветная параметрическая система контроля и мониторинга гидрофизических полей протяженных морских акваторий, сформированная на основе метода низкочастотной просветной гидролокации и метода темного акустического поля, обеспечивает многофункциональность реализации ее измерительных

стемы обеспечивает решение задач дальнего приема волн, формируемых искусственными и естественными источниками, а также движущимися морскими объектами.

Литература

1. Мироненко М.В., Малащенко А.Е., Карачун Л.Э., Василенко А.М. Просветный метод дальней гидролокации гидрофизических полей морской среды / Монография. Владивосток, СКБ САМИ ДВО РАН, 2006, 172 с.
2. Мироненко М.В., Пономарев В.В., Чудаков А.И. Проблемы гидролокации, перспективы ее развития // Сб. трудов 11 сессии РАО, т.2.-М., ГЕОС., –2001.- с. 11-14.
3. Холдер Д., Норт Р. Теневые методы в аэродинамике. – М.: Мир, 1966. – 179 с.
4. Васильев Л.А. Теневые методы. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
5. Зверев В.А., Коротин Р.И. Акустическое темное поле // Акуст. журнал. – 2000. – Т. 46, № 1. – с.75-83.
6. Вировлянский А.Л. Времена прихода лучей в условиях лучевого хаоса // «Акустика океана»: сб. докладов 12 сессии РАО, М. – 2002.– с.80-83.
7. Вировлянский А.Л., Любавин Л.Я., Стромков С.А. Взаимосвязь междулучевым и модовым представлениями поля в переменном по трассе волноводе // «Акустика океана»: сб. докладов 12 сессии РАО, М.- 2002.- с.84-87.
8. Мироненко М.В., Стародубцев П.А., Василенко А.М. Метод гидроакустической томографии и измерительная система контроля морских акваторий // Сб. трудов 11 сессии РАО, М.: – ГЕОС, Т.2, 2001.– с.7-10.
9. Мироненко М.В., Шостак С.В., Василенко А.М. Параметрическая модель низкочастотного просветного метода гидролокации, особенности его практической реализации в условиях многолучевого океанического волновода // Сб. трудов 14 сессии РАО, М.: ГЕОС, 2004. – с.495-501.

Материал поступил в редакцию 22. 03. 2011 г.