

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУМОВОГО ПОЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Ю.А. Хворостов, Ю.В. Матвиенко, В.М. Кузькин,
С.А. Пересёлков, С.А. Ткаченко

Представлены результаты оценки спектра шумоизлучения малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата в частотном диапазоне от 50 до 1000 Гц в дальней зоне акустического поля, выполненные в мелководной акватории Тихоокеанского побережья. Спектральные уровни звукового давления шумоизлучения получены при различных режимах и условиях движения аппарата. Спектральные характеристики в дальней зоне позволяют получать реалистические оценки дальности обнаружения аппарата в широком диапазоне частот при разных режимах работы и скоростях движения и, как следствие, оценивать размер контролируемой зоны исследуемой акватории.

Ключевые слова: системы контроля подводной обстановки, шумоизлучение автономного необитаемого подводного аппарата, спектральные характеристики, ближняя и дальняя зоны.

Введение

В настоящее время с применением малогабаритных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) решается широкий круг задач подводных исследований: патрулирование и охрана морских акваторий [1, 2], отслеживание перемещения морских животных [3], поисковые и инспекционные операции [4, 5] и т.д. Вместе с тем малогабаритные АНПА, обладающие низким уровнем шумоизлучения, могут быть использованы в целях доступа на охраняемые акватории для нанесения ущерба объектам морской инфраструктуры. Контроль подводной обстановки охраняемых территорий предполагает информацию о дальности обнаружения подводных аппаратов. Как следствие этого, для получения реалистической оценки размера контролируемой акватории необходимы данные о спектральных характеристиках шумоизлучения источника в дальней зоне акустического поля, где отсутствует реактивная составляющая энергии поля, и о фоновом шуме моря в различных частотных диапазонах. В рамках голографической обработки [6] частный аспект этой задачи рассмотрен в [7].

В качестве объекта исследования выбран малогабаритный АНПА «ММТ-3000», разработанный и изготовленный ИПМТ ДВО РАН [8], который способен

функционировать как в режиме АНПА с включенными двигателями, так и в режиме глайдера (подводного планера) с выключенными двигателями. Цель данной работы – оценить спектры шумоизлучения АНПА «ММТ-3000» в диапазоне частот 50–1000 Гц на расстоянии 200 м от него (дальняя зона поля) при различных режимах и скоростях движения 1.2, 1.7 и 2 м/с. Работа является продолжением [9], где представлены результаты экспериментальных исследований уровня собственного шума аппарата, формирующегося в ближней зоне поля.

1. Спектральные характеристики АНПА в ближней зоне акустического поля

Натурные эксперименты по оценке шумоизлучения в ближней зоне (расстояние 15 см от днища корпуса) АНПА «ММТ-3000» на глубине 10 м при разных режимах работы и условиях движения были проведены в акватории с глубиной места 20 м при низком уровне шумов моря и наличии ближнего маломерного судоходства [9]. Основной вклад в шум аппарата вносит кавитационный шум винтов, вращающихся с большой скоростью. Другой весомой причиной шума движущегося АНПА является обтекание водой его корпуса. При этом турбулентными пото-

ками воды создается гидродинамический широкополосный акустический шум и возбуждаются шумы вибрационного типа. Собственное шумоизлучение у корпуса АНПА содержит как активную составляющую поля, так и значительную реактивную составляющую, не участвующую в формировании распространяющейся волны от аппарата, что обуславливает высокий уровень звукового давления.

На рис. 1 приведены экспериментальные усредненные спектры звукового давления шумоизлучения АНПА в частотном диапазоне 50–1000 Гц у корпуса аппарата при включенных движителях (скорости 1.2, 1.7, 2 м/с при прямолинейном движении) и свободно всплывающего со скоростью около 7 см/с при отключенных движителях. Спектры получены с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ), окна Ханнинга и осреднения по 20 спектрам. При включенных движителях использовалось частотное разрешение 0.977 Гц; при отключенных движителях – 3.906 Гц [9].

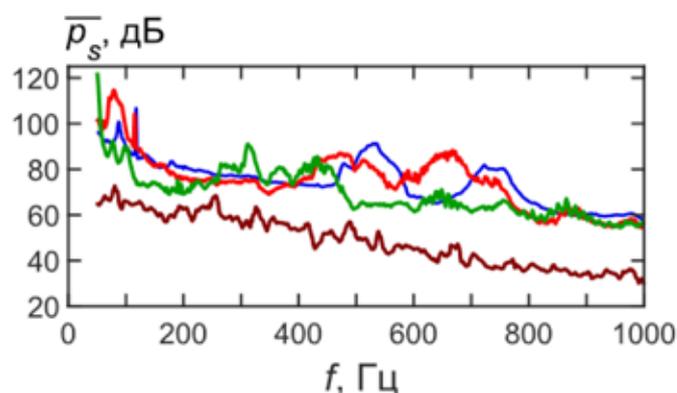


Рис. 1. Спектр звукового давления в ближней зоне. Зеленая кривая – скорость движения 1.2 м/с; красная кривая – скорость 1.7 м/с; синяя кривая – скорость 2 м/с; коричневая кривая – зависание без работы движителей [9]

Спектр шума содержит частотные области с повышенной величиной спектральных уровней, центральные частоты которых различны для разных скоростей движения. Это приводит к тому, что отсутствует монотонный спад уровней спектра с увеличением частоты и, как следствие, с уменьшением скорости аппарата. Тем не менее спектральные зависимости на рис. 1 показывают, что уровни спектра спадают на 4–5 и 9–10 дБ со снижением скорости движения аппарата от 2 до 1.7 и 1.2 м/с соответственно. Уровень спектральной плотности в области частот 0.8–1 кГц составляет ≈ 60 дБ, обнаруживая весьма слабую чувствительность к скорости движения. При изменении условий измерения, например близости аппарата к отражающим границам волновода (поверхности, дну), полученные спектральные кривые могут несколько отличаться от представленных на рис. 1.

При свободном всплытии уровень шума на 20–30 дБ меньше, чем при движении аппарата с включенными движителями. Шумы обусловлены как гидродинамическим обтеканием низкоскоростным потоком воды поднимающегося на поверхность аппарата, так и вибрациями его корпуса.

2. Спектральные характеристики АНПА в дальней зоне акустического поля

Эксперимент по определению спектра излучения АНПА «ММТ-3000» в дальней зоне проводился в мелководной акватории с глубиной места 44 м. Шумоизлучение регистрировалось приемными модулями, размещенными на глубине 22 м в вершинах равностороннего треугольника со сторонами около 300 м. Точное местоположение модулей определялось GPS навигацией в момент их установки. Аппарат на глубине 20 м двигался со скоростью 2 м/с по прямолинейным траекториям, проходящим вблизи каждой точки приема. Свои текущие координаты аппарат определял по числению, корректируя после всплытий на поверхность по GPS навигации начало следующего галса. Шумовой фон практически штилевого моря оценивался осреднением синхронных по времени спектров сигналов трех модулей на временных интервалах, когда аппарат с отключенными движителями был максимально удален от модулей. После анализа всех проходов АНПА у приемных модулей были получены средние спектры шумоизлучения аппарата на различных фиксированных удалениях от точек приема. Средний спектр на удалении 200 м приведен на рис. 2. При обработке экспериментальных данных шумоизлучения аппарата применялось осреднение спектров на временном интервале 2 с, за который аппарат изменял свое местоположение на 4 метра, что являлось допустимым.

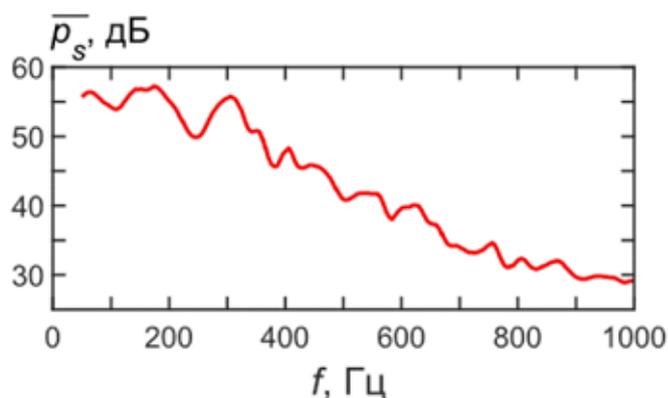


Рис. 2. Спектр звукового давления аппарата в дальней зоне, скорость 2 м/с

Спектральный анализ проводился БПФ с частотным разрешением 15.6 Гц, что позволяло несколько сгладить осцилляции спектральной плотности, обусловленные интерференцией мод звукового поля. При этом частотные области повышенного/пониженного шумоизлучения аппарата сохранялись. В анализе применялось частотное окно Ханнинга и линейное осреднение по 30 спектрам.

Из сравнения спектральных характеристик шумоизлучения в ближней и дальней зонах, измеренных при скорости движения 2 м/с, можно установить передаточную характеристику переноса спектра звукового давления из ближней зоны, $\overline{p_{sn}}(f)$, в дальнюю зону, $\overline{p_{sf}}(f)$, в виде зависимости

$$\Delta p_s(f) = \overline{p_{sn}}(f) - \overline{p_{sf}}(f). \quad (1)$$

Передаточная характеристика (1) определяется гидрологическими и гидроакустическими характеристиками акватории и размером дальней зоны, в которой сформирована модовая структура звукового поля, она приведена на рис. 3. Кривая на рис. 3 показывает, что уровень спектральной плотности шумоизлучения аппарата в дальней зоне, по сравнению с ближней зоной, снижается на 29–43 дБ. Такое значительное падение уровня спектра на дистанции 200 м объясняется, в пренебрежении модального затухания, сферическим и цилиндрическим расхождением поля с расстоянием.

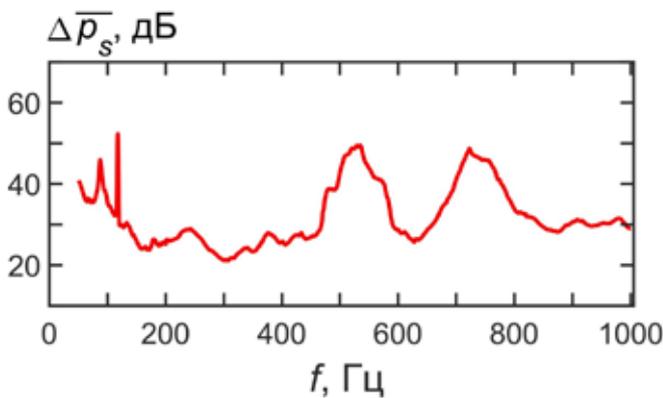


Рис. 3. Передаточная характеристика $\Delta p_s(f)$, измеренная на скорости 2 м/с

Очевидно, что перенос спектра звукового давления из ближней зоны, $\overline{p_{sn}}(f)$, в дальнюю зону, $\overline{p_{sf}}(f)$, не зависит от режима работы и скорости движения аппарата. На рис. 4 приведены средние спектры для АНПА «ММТ-3000» в дальней зоне на расстоянии 200 м для скоростей движения 1.2, 1.7 м/с и режима зависания, рассчитанные с использованием передаточной характеристики (1).

На рис. 4 представлена также усредненная спектральная плотность звукового давления фона моря в

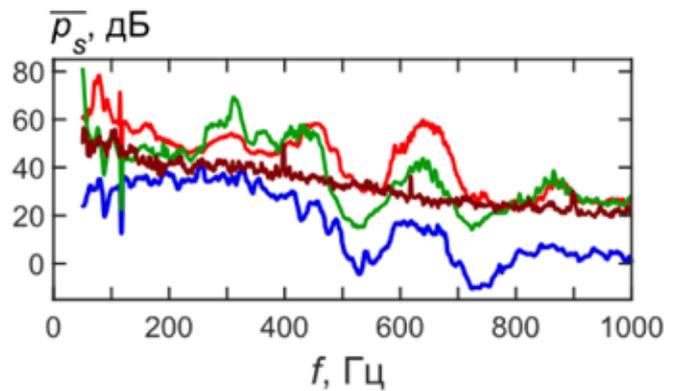


Рис. 4. Спектр звукового давления аппарата в дальней зоне: зеленая кривая – скорость движения 1.2 м/с; красная кривая – скорость 1.7 м/с; синяя кривая – зависание без работы двигателей. Средний спектр шумового фона акватории – коричневая кривая

мелководной акватории, где проводились измерения спектра шумоизлучения аппарата в дальней зоне. Из рисунка видно, что на расстоянии 200 м от АНПА имеются частотные диапазоны, в которых уровень спектра аппарата превышает уровень фонового шума моря. Фактически эти данные определяют отношение сигнал/шум при различных режимах движения и могут служить основой прогнозирования дальности обнаружения при обработке соответствующих алгоритмов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы существенный прогресс достигнут в области обнаружения и локализации малогабаритных АНПА, имеющих низкий уровень шумоизлучения. Ввиду важности данной проблемы большое внимание уделяется и вопросам измерения спектрального уровня подводных аппаратов в мелководных акваториях. Экспериментальные характеристики шума аппарата в дальней зоне позволяют получать реалистические оценки дальности обнаружения подводных аппаратов по их шумовому полю. Анализ спектральных уровней шумоизлучения АНПА в дальней зоне и шумового фона моря показывает возможность получения больших дальностей обнаружения аппарата при различных режимах работы и скоростях движения, опираясь на голографическую обработку гидроакустической информации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 19-29-06075). Работа Ткаченко С.А. поддержана грантом Президента РФ МК-4846.2022.4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Caiti A, Munafo A., Vettori G. A geographical information system (gis)-based simulation tool to assess civilian harbor protection levels // IEEE J. Oceanic Engineering. 2012. No. 1 (37). P. 85–102.
2. Матвиенко Ю.В., Хворостов Ю.А., Каморный А.В., Глушенко М.Ю., Кузькин В.М., Пересёлков С.А. Экспериментальные исследования системы обнаружения малошумных подводных целей в мелководных акваториях // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3 (41). С. 4–14.
3. Lin Y. et al. Multi autonomous underwater vehicle system for autonomous tracking of marine life // J. Field Robotics. 2017. No. 4 (34). P. 757–774.
4. Inzartsev A., Pavin A., Panin M., Tolstonogov A., Eliseenko G. Detection and inspection of local bottom objects with the help of a group of special-purpose AUVs // Proc. OCEANS 2018 MTS/IEEE Conference. Kobe, Japan, 2018.
5. Inzartsev A., Pavin A. AUV behavior algorithm while inspecting of partly visible pipeline // Proc. OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference. Boston, MA, USA, 2006.
6. Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Пересёлков С.А. Применение интерферометрической обработки для локализации малошумных источников звука // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 49–57.
7. Казначеева Е.С., Кузькин В.М., Матвиенко Ю.В., Пересёлков С.А., Хворостов Ю.А. Оценка дальности обнаружения малогабаритного подводного аппарата по его шумовому полю // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 4 (38). С. 80–85.
8. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1 (32). С. 12–20.
9. Хворостов Ю.А., Матвиенко Ю.В. Характеристики собственного шумоизлучения малогабаритного АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 4 (30). С. 58–63.

Об авторах

ХВОРОСТОВ Юрий Анатольевич, ведущий конструктор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: Акустика океана, прикладная гидроакустика, векторно-скалярные гидроакустические системы, локация и обнаружение источников звука.

E-mail: oss.dvfu@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4805-3051

МАТВИЕНКО Юрий Викторович, д.т.н., главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес: 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а

Область научных интересов: акустика океана, прикладная гидроакустика, векторно-скалярные гидроакустические системы, локация и обнаружение источников звука.

E-mail: ymat@marine.febras.ru

ORCID: 0000-0002-4133-9073

КУЗЬКИН Венедикт Михайлович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральное исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Адрес: 119991 ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, 38

Область научных интересов: прямые и обратные задачи, распространение и рассеяние звука, гидроакустические волны, интерференция звуковых волн, акустическая голография

E-mail: kumiov@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4136-3081

ПЕРЕСЁЛКОВ Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой математической физики и информационных технологий, профессор

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Адрес: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Область научных интересов: прямые и обратные задачи, распространение и рассеяние звука, гидроакустические волны, интерференция звуковых волн, акустическая голография.

E-mail: pereselkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4083-8046

ТКАЧЕНКО Сергей Александрович, аспирант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

Адрес: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Область научных интересов: акустика океана, моделирование распространения звуковых волн, нерегулярные и нестационарные волноводы, интерференция, голографическая обработка сигналов

E-mail: tkachenko.edu@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8597-0959



SPECTRAL CHARACTERISTICS OF NOISE FIELD OF A SMALL-SIZED AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE IN FAR ZONE

Yu.A. Khvorostov, Yu.V. Matvienko, V.M. Kuz'kin, S. A. Pereselkov, S.A. Tkachenko

The estimation results of noise spectrum of a small-sized autonomous underwater vehicle in the frequency band 50–1000 Hz at far zone are considered. Sound pressure spectral levels were obtained under various modes and conditions of vehicle motion. The spectral characteristics in the far zone allow us to obtain the estimation of detection range at different modes and speeds of the vehicle movement. As a result, the controlled zone ranges are estimated.

Keywords: underwater monitoring systems, autonomous underwater vehicle noise, spectral characteristics, near and far zones.

References

1. Caiti A, Munafo A., Vettori G. A geographical information system (gis)-based simulation tool to assess civilian harbor protection levels. *IEEE J. Oceanic Engineering*. 2012. No. 1 (37). P. 85–102.
2. Matvienko Yu.V., Hovorostov Yu.A., Kamorny A.V., Glushchenko M.Yu., Kuzkin V.M., Pereselkov S.A. Experimental studies of the detection system of low-noise underwater targets in shallow waters. *Underwater research and robotics*. 2022. No. 3 (41). P. 4–14.
3. Lin Y. et al. Multi autonomous underwater vehicle system for autonomous tracking of marine life. *J. Field Robotics*. 2017. No. 4 (34). P. 757–774.
4. Inzartsev A., Pavin A., Panin M., Tolstonogov A., Eliseenko G. Detection and inspection of local bottom objects with the help of a group of special-purpose AUVs. *Proc. OCEANS 2018 MTS/IEEE Conference*. Kobe, Japan, 2018.
5. Inzartsev A., Pavin A. AUV behavior algorithm while inspecting of partly visible pipeline. *Proc. OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference*. Boston, MA, USA, 2006.
6. Kuz'kin V.M., Matvienko Yu.V., Pereselkov S.A. Application of interferometric processing for localization of low-noise sound sources. *Underwater research and robotics*. 2019. No. 4 (30). P. 49–57.
7. Kaznacheeva E.S., Kuzkin V.M., Matvienko Yu.V., Perestokov S.A., Hovorostov Yu.A. Estimation of the detection range of a small-sized underwater vehicle by its noise field. *Underwater research and robotics*. 2021. No. 4 (38). P. 80–85.
8. Gornak V.E., Inzartsev A.V., L'vov O.Yu., Matvienko Yu.V., Shcherbatyuk A.F. MMT-3000 – a new small-sized autonomous uninhabited underwater vehicle IPMT FEB RAS. *Underwater research and robotics*. 2007. No. 1 (32). P. 12–20.
9. Khvorostov Yu.A., Matvienko Yu.V. Characteristics of own noise emission of a small-sized AUV. *Underwater research and robotics*. 2019. No. 4 (30). P. 58–63.

About the authors

KHVOROSTOV Yurii Anatolievich, Leader Engineer-Designer
Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 690091, Vladivostok, st. Sukhanova, 5a

Research field: ocean acoustics, applied hydroacoustics, vector scalar hydroacoustic systems, location and detection of sound sources.

E-mail: oss.dvfu@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4805-3051

MATVIENKO Yurii Viktorovich, Doctor of Physical and Technical Sciences, Chief Researcher

Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Address: 690091, Vladivostok, st. Sukhanova, 5a

Research field: ocean acoustics, applied hydroacoustics, vector scalar hydroacoustic systems, location and detection of sound sources.

E-mail: ymat@marine.febras.ru

ORCID: 0000-0002-4133-9073

KUZ'KIN Venedikt Mikhailovich, PhD, Chief Scientific Officer

Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center "A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences"

Address: 38 Vavilova str., Moscow, Russia, 119991 GSP-1

Research field: direct and inverse problems, propagation and scattering of sound, hydroacoustic waveguides, waves interference, acoustic holography

E-mail: kumiov@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-4136-3081

PERESELKOV Sergey Alekseevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Mathematical Physics and Information Technologies, Professor

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University"

Address: 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya square, 1

Research field: direct and inverse problems, propagation and scattering of sound, hydroacoustic waveguides, interference of sound waves, acoustic holography.

E-mail: pereselkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-4083-8046

TKACHENKO Sergey Alexandrovich, PhD Student

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State University"

Address: 394018, Russia, Voronezh, Universitetskaya Square 1

Research field: ocean acoustics, modeling of sound wave propagation, irregular and non-stationary waveguides, interference, holographic signal processing

E-mail: tkachenko.edu@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-8597-0959