

МУЛЬТИСТАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА В РЕЖИМЕ ГИДРОЛОКАЦИИ

П.А. Молчанов, А.Е. Малашенко

Современные технические решения, применяемые в автономных быстро разворачиваемых гидроакустических станциях, позволяют оперативно создавать контролируемые морские зоны и рубежи в сложных гидролого-акустических условиях с применением группы станций с совместной обработкой гидроакустической информации в мультистатистическом режиме. Выигрыш от применения мультистатистической системы обычно рассматривают в режиме шумопеленгования, а в режиме гидролокации рассматривается только выигрыш от бистатистической локации. Однако применение мультистатистической обработки в режиме гидролокации дает выигрыш как в увеличении вероятности обнаружения и распознавания объекта наблюдения, так и в точности определения его комплексных параметров движения. В статье рассматривается этот эффект на примере автономных (или кабельных) гидроакустических станций со звукопрозрачными приемными антеннами цилиндрического типа. Достижимое при мультистатистической обработке информации увеличение вероятности обнаружения и точности определения комплексных параметров движения объекта наблюдения в контролируемой зоне может быть использовано как для снижения требований к эффективности гидроакустических станций (за счет уменьшения числа элементов приемной антенны), так и для уменьшения потребляемой мощности станции за счет сокращения времени накопления при обработке первичной гидроакустической информации.

Ключевые слова: автономная гидроакустическая станция, система контроля морской зоны, вертикальное распределение скорости звука, вероятность обнаружения, аномалия распространения звука в море, вертикальный разрез скорости звука.

Введение

Быстро разворачиваемые автономные (или кабельные) гидроакустические станции (ГАС) со звукопрозрачными приемными антеннами [1] позволяют решать широкий круг задач по контролю морских акваторий, в том числе и акустическому контролю состояния подводных нефте- и газодобывающих комплексов [1–7].

Использование системы таких ГАС в режиме гидролокации (ГЛ) в мультистатистическом режиме позволяет получать большую вероятность обнаружения и классификации объекта наблюдения (зоны засветки), а также повышает точность определения его координат. Увеличение зоны засветки достигается, естественно, за счет бистатистической локации. Максимизация общей зоны засветки системы в целом требует в условиях сложного рельефа и переменной гидрологии оптимизации расположения ГАС с использованием системы трехмерных гидрологических расчетов [2].

Достижимое при мультистатистической обработке увеличение вероятности обнаружения и точности определения комплексных параметров движения объекта наблюдения может быть использовано для уменьшения числа приемных элементов ГАС или уменьшения времени накопления при обработке первичной гидроакустической информации.

■ Мультистатистический режим ГЛ

Мультистатистический режим ГЛ — это режим, при котором ГАС обнаруживает цель как по сигналу, излученному другими ГАС (бистатика), так и по собственному излучению. Отметки от ближайших разверток комплексируются. Реализация возможна как по организации общего расписания работы ГЛ, так и при реализации разночастотных ортогональных сигналов в разных ГАС. Увеличение зоны засветки достигается за счет бистатистической локации. Увеличение вероятности обнаружения в мультистатистической зоне

(совместной зоне) обнаружения достигается просто за счет одновременного обнаружения объекта наблюдения несколькими ГАС. Возможно увеличение и времени работы автономной системы за счет поочередного использования разных ГАС для излучения в системе. Точность определения координат возрастает за счет комплексирования координат и параметров движения объекта наблюдения от разных станций. При заданной вероятности правильного обнаружения в районе при проектировании расположения ГАС возможно уменьшение количества их приемных элементов при достижении такой же вероятности правильного обнаружения за счет мультистатической обработки. Вероятность правильного обнаружения для мультистатической системы гидроакустических станций в режиме ГЛ определяется следующим выражением [8]:

$$P_{M0}(\bar{r}) = 1 - \prod_v \prod_\mu \{1 - P_0(q_{\mu v}(\bar{r}))\}, \quad (1)$$

где производится перебор по всем ситуациям излучения μ -й позицией и приема ν -й позицией, q – отношение сигнал/шум на выходе линейной части тракта, имеющее место при нахождении объекта наблюдения в точке пространства с радиус-вектором r в случае изучения μ -й и приемом ν -й позиций.

Вероятность обнаружения подводного объекта (например, АНПА) P_0 в режиме ГЛ по одной посылке (по одному циклу обзора), входящая в формулу для мультистатической вероятности (1), при заданном отношении сигнал/шум на выходе линейной части тракта (согласованного фильтра) q_n (в данном разделе индексация номеров ячеек области расчета для простоты опущена) и количестве импульсов в пакке N_n определяются как:

$$P_0(q_n) = \exp\left(-\frac{\Pi}{1+q_n}\right) \sum_{k=0}^{N_n-1} \frac{\left(\frac{\Pi}{1+q_n}\right)^k}{k!}, \quad (2)$$

где Π — порог обнаружения, определяемый из заданного (желаемого) уровня вероятности ложной тревоги:

$$P_{\pi} = \exp(-\Pi) \sum_{k=0}^{N_n-1} \frac{(\Pi)^k}{k!}. \quad (3)$$

Оптимизация расстановки системы ГАС в контролируемом районе основана на расчете с помощью уравнения дальности и системы гидрологических расчетов отношения сигнал/шум на выходе линейной части тракта q и вероятности обнаружения [9, 10]. Критерии оптимизации могут быть различными.

Рассмотрим простой пример: для одной ГАС и $P_0 = 0.5$, $P_{M0} = 0.5$, для двух ГАС и $P_0 = 0.5$, $P_{M0} = 0.75$, для трех ГАС и $P_0 = 0.5$, $P_{M0} = 0.875$ и т.д. Если $P_0 = 0.9$, то для двух ГАС $P_{M0} = 0.99$, т.е. чем выше P_0 тем меньше прирост P_{M0} , т.е. при использовании нескольких ГАС в мультистатическом режиме ГЛ можно либо несколько снизить требования к самим ГАС и сделать их более дешевыми (с меньшим коэффициентом концентрации) при получении требуемой вероятности обнаружения в зоне совместной работы, либо несколько увеличить площадь засветки. Ошибка определения комплексных параметров движения объекта наблюдения (КПДЦ) при мультистатической обработке уменьшается в $N^{0.5}$ раз, где N – количество ГАС в системе. Таким образом, при использовании нескольких ГАС в мультистатическом режиме ГЛ можно получить ряд преимуществ.

Проиллюстрируем это на примерах ГАС с цилиндрическими звукопрозрачными приемными антеннами (рис. 1).

При вероятности правильного обнаружения более 0,9 увеличение зоны обзора в зависимости от радиуса зоны одной ГАС составляет $\sim 10\%$ в основном в зонах между ГАС (рис. 2–4).



Рис. 1. Технический облик ГАС с приемной звукопрозрачной антенной цилиндрического типа с числом элементов 400 (10 по вертикали и 40 по окружности), расчетная зона обзора которых показана на рисунках 2–5

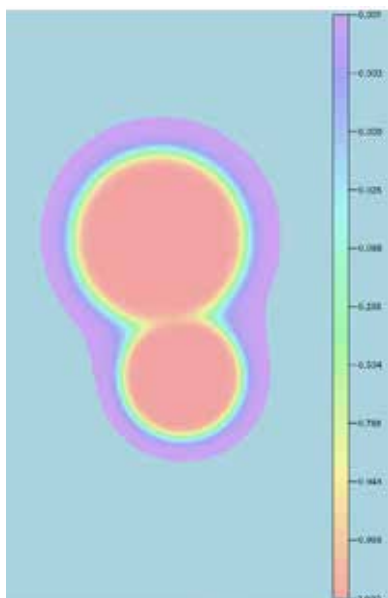


Рис. 2. Зона обзора системы из двух ГАС с разным числом элементов, рассчитанная для мультистатистического режима ГЛ и объекта наблюдения типа АНПА. Увеличение зоны обзора (относительно независимо работающих ГАС) по линии соединения ~ 2 км

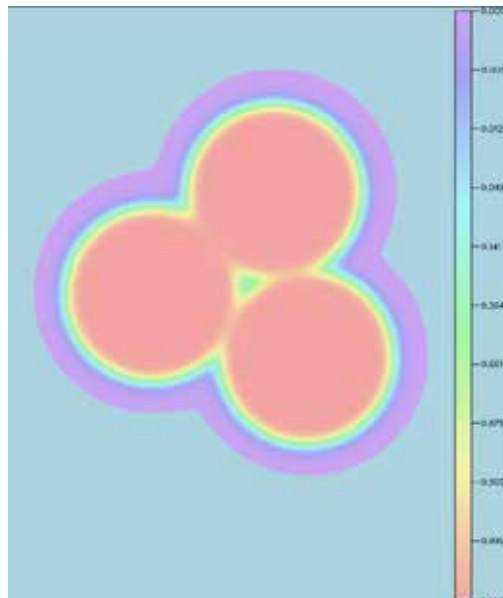


Рис. 3. Зона обзора системы из трех ГАС в мультистатистическом режиме ГЛ, рассчитанная для объекта наблюдения типа АНПА. Зона обзора имеет увеличение по желтой и зеленой зонам в центре и ~ 4 км по краям

Это простые примеры, иллюстрирующие увеличение эффективности по зоне обзора примерно на 10% и увеличение вероятности обнаружения не менее 0,9 в собственных зонах обнаружения ГАС в области перекрытия (значения вероятности обнаружения от 0.9 до 1.0 отображаются на рис. 2, 3 одним цветом).

Приведем примеры использования принципа мультистатистической обработки в режиме ГЛ для условий работы ГАС в области шельфа со сложным рельефом и при высокой изменчивости значения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). В таких условиях, как правило, возникает зональная структура поля обнаружения, которая не позволяет непрерывно отслеживать объект наблюдения, усложняет его обнаружение. При таких условиях необходимо использовать такую расстановку ГАС, при которой зоны обзора ГАС накладываются друг на друга, как показано на рис. 4 и 5.

На рис. 4. представлена зона обзора одной ГАС в Охотском море в реальных гидрологических условиях, рассчитанная для АНПА с $R_z=5$ м в районе размерами примерно 7×10 км по уровню вероятности обнаружения $P_d > 0.9$. Видна зональная структура с большим провалом в зоне обнаружения слева. Провал устраняется при использовании мультистатистического режима в ГЛ за счет края зон двух других ГАС со спадающей вероятностью обнаружения (рис. 5). На рис. 5 отображена зона обнаружения для трех ГАС в режиме мультистатистической ГЛ для такого же АНПА, но в районе размером примерно 20×20 км. Видно, что провал в зоне обнаружения скомпенсирован, а вероятность правильного обнаружения в зоне обзора при мультистатистическом режиме ГЛ увеличивается.



Рис. 4. Зона обзора одной ГАС, рассчитанная для АНПА с $R_z=5$ м, в районе с размерами 7–10 км со сложным рельефом дна. Видна зональная структура с большим провалом в зоне обнаружения

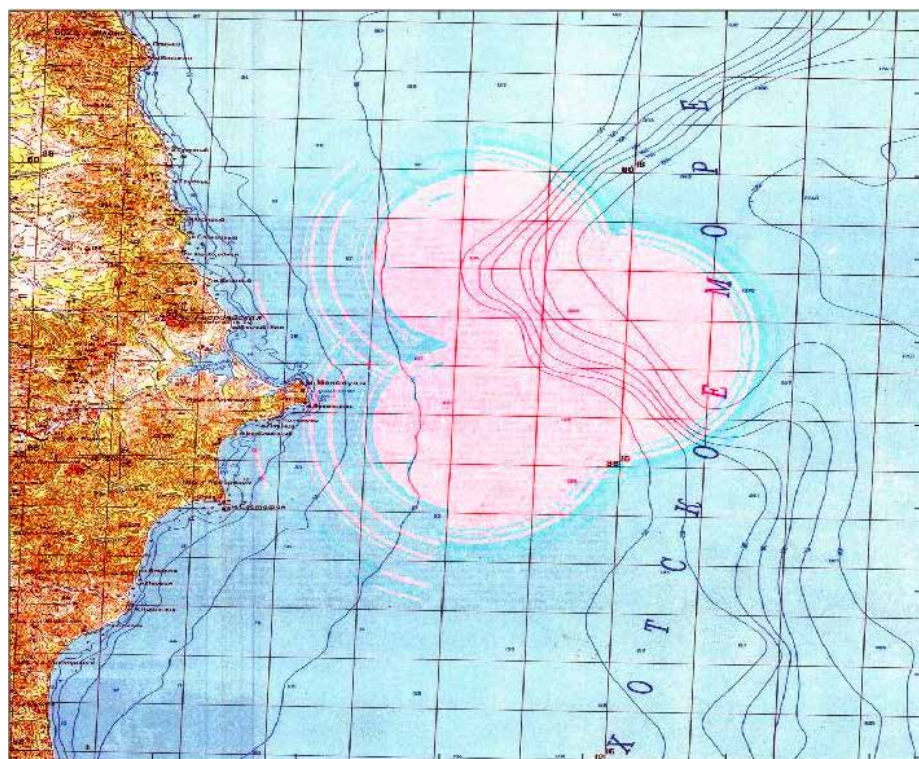


Рис. 5. Зона обзора для трех ГАС в мультистатическом режиме ГЛ, рассчитанная для АНПА с $R_3=5$ м, в том же районе размером примерно 20×20 км. Видно, что провал в зоне обнаружения скомпенсирован

Выводы

Быстро разворачиваемые автономные ГАС со звукопрозрачными приемными антеннами имеют возможность решать широкий круг задач по контролю морских акваторий и эффективно работать в мультистатическом режиме ГЛ.

Мультистатический режим ГЛ имеет преимущества перед моностатическим или бистатическим режимами ГЛ в увеличении вероятности правильного обнаружения, повышении точности определения координат объекта наблюдения и в возможности компенсировать дефекты зональной структуры за счет расстановки ГАС.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания СКБ САМИ ДВО РАН (FWWW-2024-0002).

Сведения об авторах

МОЛЧАНОВ Павел Александрович, к. ф.-т. н., с.н.с.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальное конструкторское бюро средств автоматизации
морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук)
Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Алексея Максимовича Горького, 25
Область научных интересов: быстро разворачиваемые автономные гидроакустические станции
Телефон/факс: 8 (4242) 23-69-66, тел. 750-570 доб. 201
E-mail: pashamol@mail.ru

МАЛАШЕНКО Анатолий Емельянович, к.т.н., в.н.с.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальное конструкторское бюро средств автоматизации
морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 693023, г. Южно-Сахалинск, ул. Алексея Максимовича Горького, 25
Область научных интересов: быстро разворачиваемые автономные гидроакустические станции
Телефон/факс: 8 (4242) 23-69-66, тел. 750-570 доб. 201
E-mail: a.malashenko@skbsami.ru
ORCID: 0009-0000-3768-9196

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2423530 Российская Федерация, МПК МПК G01S 7/52 (2006.01), H01Q 9/46 (2006.01) Приёмная цилиндрическая антенна гидроакустической станции кругового обзора: № 2014106036/08: заявл. 18.02.2014; опубл. 10.04.2015 / Калёнов Е.Н., Малащенко А.Е., Емельяненко В.Ф.; заявитель СКБ САМИ ДВО РАН. – 9 с.: ил.
2. Емельяненко В.Ф., Малащенко А.Е. Непрерывный независимый гидроакустический контроль подводного добычного комплекса // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 32–37.
3. Малащенко А.Е., Молчанов П.А., Ким А.И. Мультистатическая система наблюдения на базе автономных гидроакустических станций с автоматической адаптацией по глубине установки // Инженерная физика. 2023. № 5. С. 70–75.
4. Карачун Л.Э., Кондрашова Е.С., Малащенко А.Е. Метод оперативного акустического наблюдения за поведением серых китов в зоне морских нефтегазовых объектов // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 38–43.
5. Емельяненко В.Ф., Ким А.И., Кондрашова Е.С., Малащенко А.Е., Молчанов П.А. Автономная радиогидроакустическая система обеспечения безопасности мореплавания в районах северного морского пути // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 4. С. 16–22.
6. Емельяненко В.Ф., Малащенко А.Е. Непрерывный независимый гидроакустический контроль подводного добычного комплекса // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 32–36.
7. Карачун Л.Э., Кондрашова Е.С., Малащенко А.Е. Метод оперативного пассивного акустического наблюдения за поведением серых китов в зоне морских нефтегазовых объектов // Экологические системы и приборы. 2021. № 11. С. 86–96.
8. Черняк В.С. Обнаружение сигналов в многопозиционных радиолокационных системах // Радиотехника. 1993. № 56.
9. Евтютюв А.П., Митько В.Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике. Ленинград: Судостроение, 1981. 255 с.
10. Емельяненко В.Ф. и др. Результаты моделирования активных многопозиционных стационарных гидроакустических систем обнаружения // Судостроительная промышленность. 1991.
11. Зеликин М.И. Оптимальное управление и вариационное исчисление. М.: Едиториал УРСС, 2004. 160 с.

MULTISTATIC PROCESSING IN HYDROLOCATION

P.A. Molchanov, A.E. Malashenko

It's usual way in papers to consider gain from multistatic system in noise peleng determine regime and gain from bistatic system in hydrolocation regime. But implementation of multistatic processing could give gain in probability of target detection and precision of determining of coordinate and parameters of target movement. The paper consider this effect on base of speed -growing hydroacoustic stations with sound-transparent cylindric antennas, which could resolve many issues on marine control and control of gas and oils extraction complexes.

Keywords: autonomic hydroacoustic station, marine control, vertical sound speed distribution, probability of target detection, anomaly of sound propagation.

References

1. Patent № 2423530 Rossiiskaya Federatsiya, MPK MPK G01S 7/52 (2006.01), H01Q 9/46 (2006.01) Priyomnaya tsilindricheskaya antena gidroakusticheskoi stantsii krugovogo obzora: № 2014106036/08: zayavl. 18.02.2014: opubl. 10.04.2015 / Kalyonov Ye.N., Malashenko A.E., Yemelyanenko V.F.; zayavitel SKB SAMI DVO RAN. – 9 s.: il
2. Emelianenko V.F., Malashenko A.E. Continuous independent sonar monitoring of an underwater mining complex // Ecological Systems and Devices. 2021. No. 11. P. 32–37.
3. Malashenko A.E., Molchanov P.A., Kim A.I. Multistatic monitoring system based on autonomous sonar stations with automatic depth adjustment. Engineering Physics. 2023. No. 5. P. 70–75.
4. Karachun L.E., Kondrashova E.S., Malashenko A.E. Method of operational acoustic monitoring of gray whale behavior in the area of offshore oil and gas facilities. Ecological systems and devices. 2021. No. 11. P. 38–43.
5. Emelianenko V.F., Kim A.I., Kondrashova E.S., Malashenko A.E., Molchanov P.A. Autonomous radio hydroacoustic navigation safety system in the areas of the Northern Sea Route. Underwater Research and Robotics. 2022. No. 4. P. 16–22.
6. Emelianenko V.F., Malashenko A.E. Continuous independent sonar monitoring of an underwater mining complex. Ecological systems and devices. 2021. No.11. P. 32–36.
7. Karachun L.E., Kondrashova E.S., Malashenko A.E. Method of operational passive acoustic monitoring of gray whale behavior in the area of offshore oil and gas facilities. Ecological systems and devices. 2021. No. 11. P. 86–96.
8. Chernyak V.S. Signal detection in multi-position radar systems // J. Radio engineering. 1993. No. 56.
9. Yevtyutov A.P., Mitko V.B. Examples of engineering calculations in hydroacoustics. Leningrad: Shipbuilding, 1981. 255 p.
10. Emelianenko V.F. and others. Simulation results of active multi-position stationary GPS detection systems // J. Shipbuilding industry. 1991.
11. Zelikin M. I. Optimal Control and Calculus of Variations. Moscow: URSS Editorial, 2004. 160 p.

Information about authors

MOLCHANOV Pavel Aleksandrovich, PhD in Physics and Mathematics, Leading Researcher.

Federal State Budgetary Institution of Science Special Design Bureau for Automation of Marine Research of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (SKB SAMI FEB RAS)

Address: 693023, Yuzhno-Sakhalinsk, st. Alexei Maksimovich Gorky, 25

Research interests: digital signal processing, sound propagation in water area, marine instrumentation, deep-sea autonomous instruments and systems, hydroacoustic systems and complexes, marine robotics

E-mail: pashamol@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1839-9196

MALASHENKO Anatoliy Emelyanovich, PhD in Engineering, Leading Researcher.

Federal State Budgetary Institution of Science Special Design Bureau for Automation of Marine Research of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (SKB SAMI FEB RAS)

Address: 693023, Yuzhno-Sakhalinsk, st. Alexei Maksimovich Gorky, 25

Research interests: marine instrumentation, deep-sea autonomous instruments and systems, hydroacoustic systems and complexes, marine robotics

E-mail: a.malashenko@skbsami.ru

ORCID: 0009-0000-3768-9196

Recommended citation:

Molchanov P.A., Malashenko A.E. MULTISTATIC PROCESSING IN HYDROLOCATION. Underwater investigations and robotics. 2025. No. 4 (54). P. 63–67. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_54_04_06. EDN: MXCMXB.