

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДИСТАНЦИОННОЙ ОЦЕНКИ КООРДИНАТ СРАБАТЫВАНИЯ ПОДВОДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Ю.С. Крюков, Е.О. Черепанов

*ФГУП «НИИ прикладной акустики», Дубна, 141981, Россия
e-mail: kryukov@niipa.ru, evgeny.cherepanov@niipa.ru*

Статья поступила в редакцию 05.05.2018, одобрена к печати 18.06.2018

Рассмотрена задача моделирования и дистанционной оценки координат срабатывания подводного импульсного источника на основе определения моментов времени прихода сигналов на гидрофоны радиобуев в пространственно-разнесенных точках с известными координатами. Приведены формулы расчета координат подводных импульсных источников для аналитического способа и метода минимизации функционала. Описаны алгоритмы встроенного программного обеспечения радиобуев для автоматической обработки гидроакустических сигналов и передачи данных на пульт управления. Представлены реализованные в программном обеспечении пульта управления алгоритмы автоматизированной оценки координат срабатывания одиночных и групповых подводных импульсных источников с учетом требований работы в реальном масштабе времени. Дано описание программных средств и алгоритмов моделирования распространения сигнала от импульсного источника с целью определения параметров и допустимой дальности расположения измерительного оборудования в ходе подготовки эксперимента. Рассмотрены вопросы оптимального размещения точек приема для снижения влияния погрешностей определения собственных координат радиобуев на результаты расчетов. Приведены результаты гидрологических измерений и натуральных экспериментов по оценке координат и глубин срабатывания подводных импульсных источников в условиях акваторий Ладожского озера и Черного моря.

Ключевые слова: программные средства, обработка гидроакустических сигналов, моделирование, дистанционная оценка координат, подводный импульсный источник, результаты натуральных экспериментов

Введение

Настоящая работа является продолжением исследований по дистанционной оценке координат срабатывания подводных импульсных источников, выполненных авторами в работах (Крюков Ю.С. и др., 2014; Костенко К. В., Крюков Ю.С., 2016).

В ряде прикладных задач, связанных с позиционированием и навигацией подводных объектов, а также при натуральных испытаниях образцов подводных взрывных источников на водной акватории, вопросы дистанционной оценки координат в реальном масштабе времени наблюдения сигналов являются весьма актуальными.

Методы и методология исследования

Для оценки координат источников применен акустический метод триангуляции с использованием относительных задержек сигналов, зарегистрированных

датчиками в пространственно-разнесенных точках приема с известными координатами (Крюков Ю.С. и др., 2014; Крюков Ю.С., 2010).

Для выбранных четырех точек приема сигналов с известными координатами: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) задача оценки координат срабатывания подводного источника (x_s, y_s) и определения времени распространения сигнала t_1 до точки приема 1 сводится к решению матричного уравнения:

$$A \cdot X = D, \text{ где } A = \begin{bmatrix} a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ t_1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a_{21} = x_2 - x_1 \quad b_{21} = y_2 - y_1 \quad c_{21} = \Delta t_{21} c_0^2 \quad a_{31} = x_3 - x_1 \quad b_{31} = y_3 - y_1 \quad c_{31} = \Delta t_{31} c_0^2$$

$$a_{41} = x_4 - x_1 \quad b_{41} = y_4 - y_1 \quad c_{41} = \Delta t_{41} c_0^2$$

$$d_{21} = \frac{[x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{21}^2]}{2}, \quad d_{31} = \frac{[x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{31}^2]}{2}, \quad d_{41} = \frac{[x_4^2 - x_1^2 + y_4^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{41}^2]}{2},$$

Δt_{21} ; Δt_{31} ; Δt_{41} – задержки времени прихода сигналов в точки приема сигналов 2, 3, 4 соответственно относительно точки приема 1; c_0 – среднее значение скорости звука в среде для глубин расположения источника и приемника сигналов.

В ряде случаев для уточнения результатов оценок координат применялся метод минимизации функционала, составленного из полученных относительных задержек времени прихода сигналов. Вычисление координат источника x_s, y_s выполняется путем минимизации функции следующего вида:

$$f(x_s, y_s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \left(t_i - t_j - \frac{1}{c_0} \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} + \frac{1}{c_0} \sqrt{(x_j - x_s)^2 + (y_j - y_s)^2} \right)^2, \quad (2)$$

где x_i, y_i, x_j, y_j координаты датчиков i и j , t_i, t_j – времена прихода волны на датчики i и j , c_0 – средняя скорость звука.

Глубина срабатывания подводного источника взрыва z_s оценивалась на основе измерения периода времени T_1 между приходом импульса от ударной волны и импульса от пульсации газового пузыря при известной мощности заряда в тротиловом эквиваленте W по следующей формуле (Коул Р., 1950; Громашева О.С., Захаров В.А., 2002).

$$T_1 = 2.08 W^{1/3} / (z_s + 10.07)^{5/6}. \quad (3)$$

Остановимся подробнее на программно-аппаратных средствах и алгоритмах работы радиогидроакустических буев, используемых в измерениях и результатах натуральных экспериментов.

В качестве аппаратных средств измерения и регистрации сигналов использовались радиогидроакустические буи, разработанные и изготовленные ФГУП «НИИПА», включающие:

- измерительный блок в составе: гидрофон, кабельная линия связи, одноплатный компьютер Helios HLV 1000-256AV со встроенным АЦП (16 бит), навигационный блок ГЛОНАСС/GPS;

- блок радиосвязи для передачи результатов обработки на удаленный пульт управления (ПУ) в составе: радиомодем СМАРТ-160/2400-03 и модуль связи Wi-Fi ASUS WL-330N.

Пульт управления в составе радиомодема и защищенного ноутбука Panasonic CF-31 располагался на судне обеспечения, находившемся на удалении.

Алгоритмы обработки сигналов гидроакустических буев

Обработка гидроакустических сигналов при определении координат подводного источника заключается в:

- выделении импульсов, вызванных срабатыванием источника на фоне окружающего шума и реверберации;
- определении моментов времени прихода сигнала на гидрофоны радиобуев, разнесенных по водной акватории;
- передаче результатов обработки на пульт управления.

Особенностью алгоритмов, применяемых для решения данной задачи, является необходимость их непрерывного выполнения в реальном масштабе времени во встроенном ПО радиобуя в полностью автоматическом режиме. В связи с этим нерационально применение ресурсоемких алгоритмов корреляционного анализа и алгоритмов фильтрации на основе FFT.

При высоком отношении сигнал/шум для обнаружения импульса достаточно применения порогового алгоритма, приведенного на блок-схеме (рис. 1), с усреднением низкочастотных колебаний, вызванных волнением.

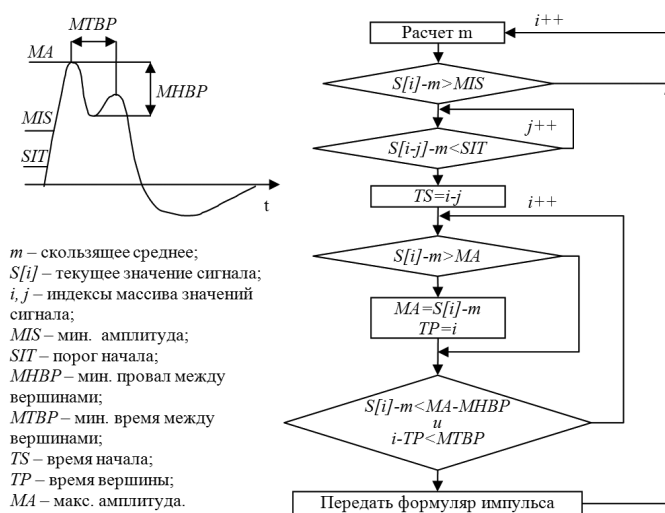


Рис. 1. Блок-схема порогового алгоритма обнаружения импульсов

Однако на больших расстояниях от источника прямой сигнал от взрыва поступает значительно ослабленным, с уровнем, сопоставимым с шумом, и существенно

ниже уровня реверберации. Для обнаружения подобных импульсов применяется алгоритм на основе метода зеркальной производной (Костенко К. В., Крюков Ю.С., 2016), который позволяет выделять сигналы малой амплитуды, но с острым фронтом (рис. 2).

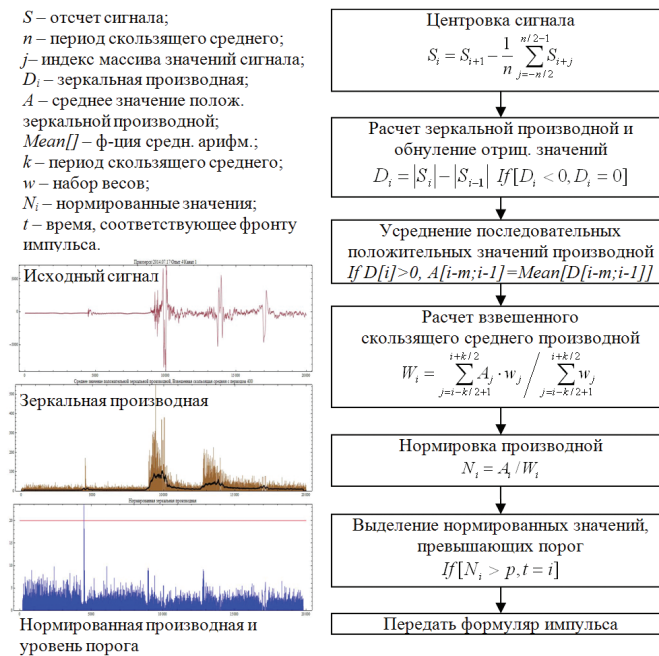


Рис. 2. Блок-схема алгоритма зеркальной производной

Недостатком данного алгоритма является ложное выделение слабых импульсов, вызванных высокочастотными помехами, например, от работы радиоканала. Данный недостаток устраняется путем комбинированного применения указанных алгоритмов. В этом случае импульс, обнаруженный с помощью метода зеркальной производной, считается полезным, если он сопровождается высокоамплитудными импульсами реверберации, превышающими заданный порог.

Определение абсолютного момента времени прихода импульса производится на основе данных GPS/ГЛОНАСС приемника, поступающих на дополнительный канал АЦП в виде ежесекундной метки PPS и цифрового кода с соответствующим ей временем. Точность синхронизации сигналов между автономно работающими радиобуями составляет 10 мкс (1 такт АЦП). В результате обнаружения импульса каждый радиобуй формирует короткий пакет с параметрами сигнала и передает по радиоканалу на пульт управления. Данный подход позволяет использовать низко-скоростной радиоканал (4800 бод) и достигать высокой дальности связи (до 20 км).

Алгоритмы автоматизированной оценки координат источников и моделирования распространения сигналов на пульте управления

При поступлении формуляров с обнаруженными импульсами от радиобуев в СПО пульта управления производится их анализ и предварительная сортировка с целью определения их принадлежности к одному событию (рис. 3).



Рис. 3. Блок-схема алгоритма предварительной сортировки

При срабатывании одиночного источника основные трудности отнесения формуляра к событию вызваны ошибками 1-го и 2-го рода (пропуск/ложный) в ходе обнаружения импульсов. При групповых срабатываниях, разнесенных в пространстве, возникают дополнительные сложности, связанные с нарушением последовательности прихода импульсов на гидрофоны радиобуев. А поскольку поступление формуляров по радиоканалу может также происходить в произвольной последовательности и с определенной задержкой, то предварительная автоматическая сортировка импульсов по принадлежности к событиям имеет высокий процент ошибки, что приводит к неверной оценке координат источника. В связи с этим по окончании поступления формуляров по команде оператора производится повторная сортировка (рис. 4).

i – индекс списка событий;
 n_i – число импульсов в событии;
 N – число импульсов, необходимых для расчета координат;
 C_n^N – количество комбинаций буев, достаточных для расчета;
 R_j – результат расчета координат по j -й комбинации.

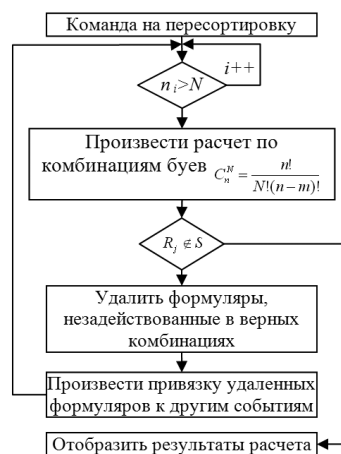


Рис. 4. Блок-схема алгоритма пересортировки

Эффективность алгоритма сортировки и качество последующих расчетов существенно повышаются при использовании в ходе измерений избыточного количества радиобуев.

В ходе подготовки к эксперименту производится моделирование распространения сигнала на основе ранее проведенных гидрологических исследований для

данной водной акватории и времени года, либо прямых измерений глубин и вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ). На основе этих данных с помощью алгоритмов СПО пульта управления производится предварительное формирование точек установки и группировки радиобуев вокруг предполагаемого расположения источника и моделируются траектории распространения звуковых лучей, согласно закону Снеллиуса, (Бреховских Л.М., Годин О.А., 1989) с целью оценки времени, дальности распространения и степени затухания прямого сигнала для каждой измерительной точки (рис. 5).

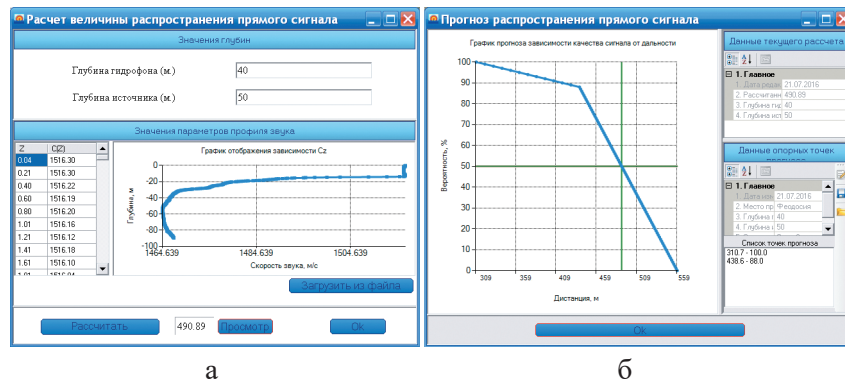


Рис. 5. Расчет дальности распространения прямого сигнала для заданных глубин и ВРСЗ

По результатам моделирования корректируется положение радиобуев, подбирается глубина размещения гидрофонов и определяются параметры настройки регистрирующей аппаратуры для предстоящих измерений.

При расчете координат источника на точность результата оказывают существенное влияние следующие параметры: ошибки в измерениях собственных координат радиобуев; ошибки в определении абсолютного времени прихода импульса от источника и выбор конфигурации расположения радиобуев на акватории. В СПО пульта управления реализован алгоритм моделирования карты ошибок при расчете координат источника (Крюков Ю.С. и др., 2014) для выбранной конфигурации группировки радиобуев (рис. 6).

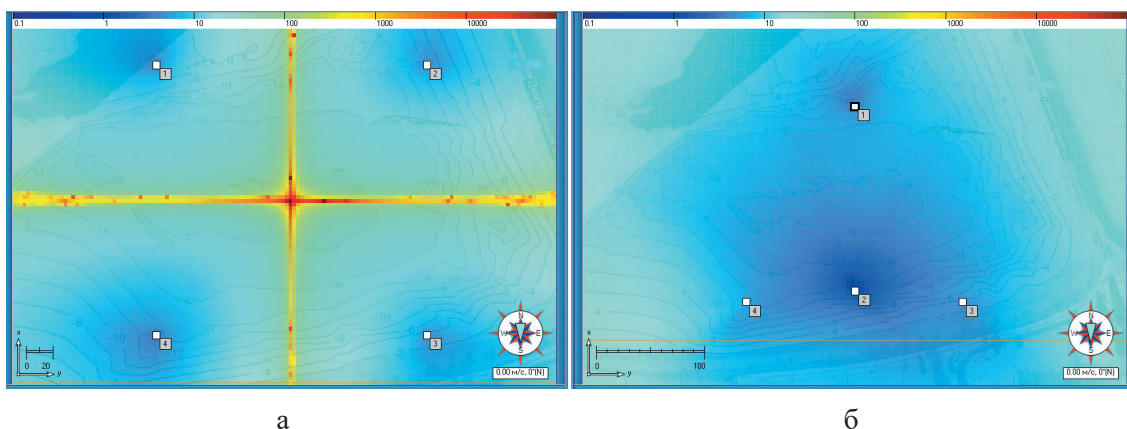


Рис. 6. Карты ошибок для неоптимальной (а) и оптимальной (б) конфигурации расположения системы радиобуев

В ходе подготовки к проведению измерений производится выбор оптимального размещения точек приема с целью получения максимального размера зоны расчета с допустимой погрешностью в районе предполагаемого местонахождения источника.

Результаты натуральных экспериментов

Разработанные алгоритмы и методы, реализованные во встроенном ПО радиобуев и СПО пульта управления, применялись в ходе измерений, проводившихся на акватории Ладожского озера летом 2015 г. и акватории Черного моря летом 2016 г. В измерениях использовалась группа из 6–8 радиобуев. Пульт управления находился на судне обеспечения, удаленном на 3–5 км от источника. Оценка координат подводных взрывов источников массами 1, 5, 23 кг проводилась в реальном масштабе времени прихода сигналов на пульт управления. В ходе выполнения работ производились гидрологические измерения ВРСЗ, приведенные на рис. 7.

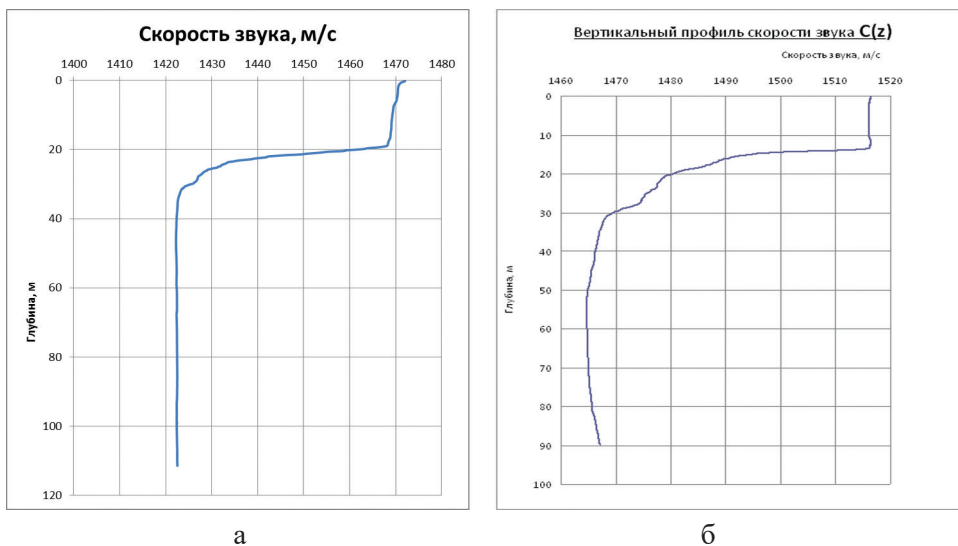


Рис. 7. ВРСЗ в Ладожском озере 08.2015 (а) и Черном море 07.2016 (б)

Синхронизированные временные реализации сигналов, принимаемых радиобуями в разных точках удаления от источника массой 1 кг, приведены на рис. 8.

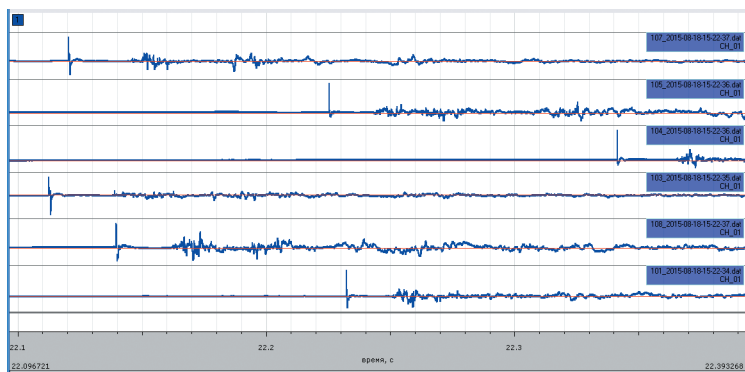


Рис. 8. Синхронизированные сигналы от источника массой 1 кг, поступившие на радиобуй № (на графике сверху вниз) 7(442 м), 5(587 м), 4(768 м), 3(437 м), 8(467 м), 1(645 м)

Результаты оценки координат на водной акватории и глубин срабатывания одиночных и групповых подводных импульсных источников отражены в виде красных звездочек с идентификаторами событий на рис. 9 и в численном виде в таблице 1.

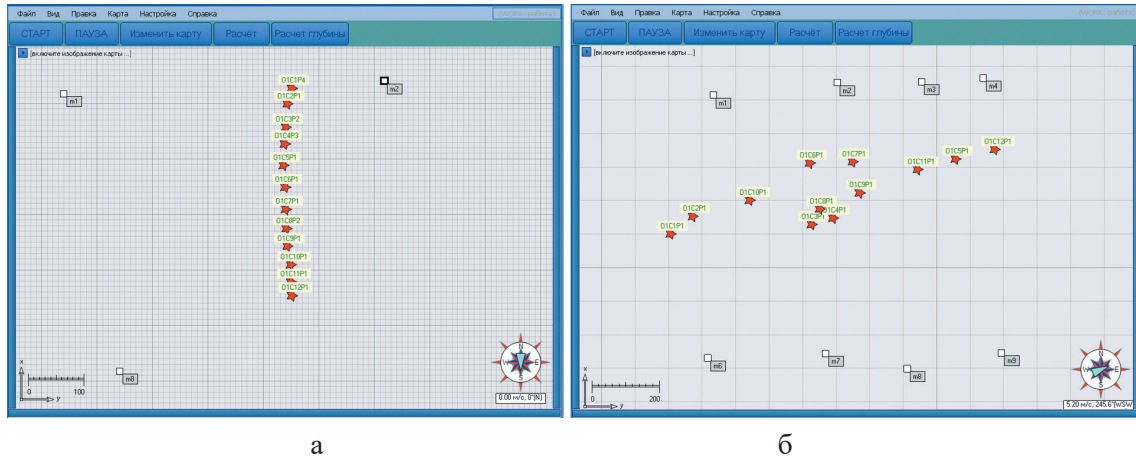


Рис. 9. Результаты расчета координат группы импульсных источников в Ладожском озере 08.2015 (а) и Черном море 07.2016 (б)

Точность дистанционных измерений контролировалась с помощью навигационных приемников NV08C-CSM-DR (ГПСИ №52614-13), размещаемых над источниками. Глубина контролировалась инструментальным способом при разметке подвеса источника.

Таблица 1. Результаты оценки координат в ходе натуральных экспериментов

Дата	Место	Число опытов	Средняя ошибка по (x; y), м	Средняя ошибка по (z), м
18.08.2015	Ладожское озеро, г. Приозерск	10 (одиночные)	5,28	2,21
19.08.2015		27 (групповые)	4,86	2,32
21.06.2016	Черное море, г. Феодосия	9 (одиночные)	7,35	1,77
22.06.2016		26 (групповые)	без контроля	3,6

Погрешность расчета координат источников не превысила $\pm 7,35$ м при размерах испытательной морской акватории размещения радиобуев до 1 км².

Выводы: Разработанные и реализованные в виде СПО в радиобуях и пульте управления алгоритмы позволяют выполнять оценку координат и глубин срабатывания подводных импульсных источников на морской акватории площадью до 1 км² в реальном масштабе времени поступления сигналов с погрешностью не превышающей $\pm 7,35$ м.

Литература

Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
Громашева О.С., Захаров В.А. Оценка глубины подводного взрыва методом модифицированного кепстрального анализа морской реверберации, обусловленного этим взрывом // Акуст. ж. 2002. Т. 48. № 3. С. 319–324.

- Костенко К.В., Крюков Ю.С.* Метод детектирования импульса прямого сигнала от подводного взрывного источника в волноводе // Акуст. ж. 2016. Т. 62. № 1. С. 111–116.
- Коул Р.* Подводные взрывы. М.: Иностранная литература, 1950. 418 с.
- Крюков Ю.С., Агейкин А.В., Коротаев Ю.В., Черепанов Е.О.* Дистанционная оценка координат срабатывания импульсного источника в водной среде в условиях интервальной неопределенности измерений координат точек приема сигнала // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2014. № 6 (14). С. 146323-1-146323-7.
- Крюков Ю.С.* Метод определения пространственных координат взрывных источников акустического сигнала в условиях ветровых помех // ЭНЖ Молекулярные технологии НИИПА. 2010. Т. 4. С. 122–137. [электронный ресурс] – Режим доступа. URL: <http://www.niipa.ru/journal/articles/7.pdf> (дата обращения 24.01.2018).

SOFTWARE FOR PROCESSING HYDROACOUSTIC SIGNALS, MODELING AND REMOTE EVALUATION OF THE COORDINATES OF THE TRIGGERING OF UNDERWATER PULSED SOURCES

Yu.S. Kryukov, E.O. Cherepanov

*FSUE «Research Institute of Applied Acoustics». Dubna, Moscow Region, 141981, Russia.
e-mail: kryukov@niipa.ru, evgeny.cherepanov@niipa.ru*

Submitted 01.06.2018, accepted 18.06.2018

The problem of modeling and remote evaluation of the triggering coordinates of an underwater pulse source is considered. It realized on the basis of the determination of the timing of the arrival of signals on the hydrophones of the beacon at spatially separated points with known coordinates. Formulae for calculating the coordinates of underwater pulse sources for the analytical method and the method for minimizing the functional are given.

Algorithms of the embedded software for radio beacons for automatic processing of sonar signals and data transmission to the control panel are described. The algorithms of automated estimation of the coordinates of the operation of single and group underwater pulsed sources are presented in the software of the control panel. The algorithms developed to meet the requirements of real-time operation.

A description of software tools and algorithms for modeling the signal propagation from a pulsed source is given. They designed for the purpose of determining the parameters and permissible range of the measuring equipment during the preparation for the experiment. The questions of the optimal location of reception points for reducing the influence of errors in determining the radio beacon's own coordinates on the results of calculations are considered. The results of hydrological measurements and full-scale experiments on the evaluation of coordinates and depths of operation of underwater pulsed sources in the conditions of the Ladoga Lake and Black Sea waters are presented.

Keywords: software, hydroacoustic signals processing, modeling, remote coordinate estimation, underwater pulse source, results of marine experiments

References

- Brekhovskikh L.M. and Godin O.A.* Akustika sloistykh sred. Moscow: Nauka Gl. red. Fiz-mat. lit., 1989.
- Gromasheva O.S. and Zakharov V.A.* Otsenka glubiny podvodnogo vzryva metodom modifitsirovannogo kepstral'nogo analiza morskoy reverberatsii, obuslovlennogo etim vzryvom. *Akust. zh.*, 2002, Vol. 48, No. 3, pp. 319–324.
- Kostenko K.V. and Kryukov Yu.S.* Metod detektirovaniya impul'sa pryamogo signala ot podvodnogo vzryvnogo istochnika v volnovode. *Akust. Zh.*, 2016, Vol. 62, No. 1, pp. 111–116.
- Koul R.* Podvodnyye vzryvy. M.: Inostrannaya literatura, 1950, 418 p.
- Kryukov Yu.S., Ageykin A.V., Korotayev Yu.V., and Cherepanov E.O.* Distantionnaya otsenka koordinat srabatyvaniya impul'snogo istochnika v vodnoy srede v usloviyakh interval'noy neopredelennosti izmereniy koordinat toчек priyema signala. *Uchenyye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta*, 2014, No. 6(14), pp. 146323-1-146323-7.
- Kryukov YU.S.* Metod opredeleniya prostranstvennykh koordinat vzryvnykh istochnikov akusticheskogo signala v usloviyakh vetrovykh pomekh. *ENZH Molekulyarnyye tekhnologii NIIPA*, 2010, Vol. 4, pp. 122–137, [elektronnyy resurs] Rezhim dostupa. URL: <http://www.niipa.ru/journal/articles/7.pdf> (last accessed in 24.01.2018).