

Дистанционная оценка координат срабатывания импульсного источника в водной среде в условиях интервальной неопределенности измерений координат точек приема сигнала

Ю. С. Крюков,* А. В. Агейкин,† Ю. В. Коротаев,‡ Е. О. Черепанов§
 ФГУП «НИИ прикладной акустики», Россия, 141981, Московская обл., г. Дубна, ул. 9 мая, д. 7а
 (Статья поступила 28.10.2014; Подписана в печать 28.11.2014)

Рассмотрена задача дистанционной оценки координат импульсного источника по относительным задержкам сигналов, принятых гидрофонами радиобуев в пространственно разнесенных точках. Координаты местоположения радиобуев определяются с помощью средств GPS/ГЛОНАСС навигации с некоторой известной погрешностью. Для уменьшения погрешности оценки координат по относительным задержкам рассмотрена переопределенная система интервальных уравнений для четырех разнесенных точек приема. Выведены расчетные соотношения. С помощью математического моделирования определены оптимальные конфигурации размещения точек приема сигнала, при которых погрешности оценок минимальны. Приведены результаты моделирования и результаты экспериментов в мелководной акватории по дистанционной оценке координат.

PACS: 43.58.Gn УДК:534-143

Ключевые слова: триангуляция, импульсный источник, метод Монте–Карло.

Задача оценки координат срабатывания подводных импульсных источников акустических сигналов актуальна для многих прикладных задач, связанных с позиционированием подводных объектов, при проведении поиска установленного под водой оборудования, навигации объектов, а также при натурных испытаниях на морских полигонах образцов подводных взрывных источников. Одним из наиболее известных и часто реализуемых в практических задачах для локализации импульсных источников, является акустический метод триангуляции с использованием относительных задержек акустических сигналов, зарегистрированных датчиками в пространственно разнесенных точках приема с известными координатами [1–5].

Для воздушной нестационарной среды авторами был разработан эффективный акустический метод дистанционной оценки координат импульсных источников в движущейся среде с использованием оптического датчика для определения начального момента вспышки источника [6–8]. Однако, для подводного источника его применение затруднено особенностями поглощения волн оптического диапазона при распространении в водной среде.

Если водная среда однородна и стационарна, известны в водной среде скорость звука c_0 , известны точно координаты трех точек приема сигналов в плоскости O_{xy} : (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , а искомым источник излучает акустический сигнал, то можно определить точно координаты источника по относительным задержкам сигналов, принятых в пространственно разнесенных точках приема. Однако, из-за того, что координаты самих измерительных буев, расположенных

на поверхности воды могут быть определены с некоторой погрешностью, из-за волнения и морских течений нарушается стационарность, а время прихода сигналов в точку приема фиксируется также с некоторой погрешностью, связанной с распространением сигнала в неоднородной морской среде волновода, то точность оценок сильно снижается.

В этой связи, в общем случае задача дистанционной оценки координат срабатывания импульсных источников по измерениям задержек принятых сигналов датчиками, установленными на измерительных радиобуях, сводится к решению системы алгебраических уравнений при интервальной неопределенности коэффициентов интервальных уравнений.

Для получения оценок координат с заданной точностью рассмотрим переопределенную систему уравнений для 4 точек приема. Пусть (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) — средние значения координат приемных элементов, оценка которых выполняется с помощью средств GPS/ГЛОНАСС навигации. Пусть t_1, t_2, t_3, t_4 — соответственно времена пробега импульсного сигнала от источника до точки приема. $c_0 = C(T)$ — локальная скорость звука в водной среде, где T — температура водной среды.

Локальная скорость звука c_0 , может быть измерена или рассчитана по измерениям температуры воды. В водной среде ударная волна от взрывного источника быстро переходит в акустическую стадию, и в качестве средней скорости распространения сигнала можно использовать среднюю скорость звука на горизонтах расположения источника ($C_{snd.src.}$) и в точке приема ($C_{snd.res.}$):

$$c_0 = \frac{C_{snd.src.} + C_{snd.res.}}{2}$$

Скорость течений в морской среде, как правило, пренебрежимо мала по сравнению со скоростью звука в воде, поэтому движением среды в задаче оценки координат можно пренебречь.

*E-mail: yuri.kryukov@niipa.ru

†E-mail: andrey.agejkin@niipa.ru

‡E-mail: yury.korotaev@niipa.ru

§E-mail: evgeny.cherepanov@niipa.ru

Тогда система уравнений, описывающая распространение импульсного сигнала от источника до каждой из точек приема для водной среды, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} (x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2 = c_0^2 \cdot t_1^2 \\ (x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2 = A_0^2 \cdot t_2^2 \\ (x_3 - x_s)^2 + (y_3 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2 = c_0^2 \cdot t_3^2 \\ (x_4 - x_s)^2 + (y_4 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2 = c_0^2 \cdot t_4^2, \end{cases} \quad (1)$$

где z_1 — глубина расположения от поверхности воды датчика, принимающего сигнал, для всех точек приема одинаковая.

Пусть $\Delta t_{21} = t_2 - t_1$; $\Delta t_{31} = t_3 - t_1$; $\Delta t_{41} = t_4 - t_1$ — относительные задержки сигналов. Необходимо определить неизвестные параметры: x_s, y_s, z_s и t_1 — время распространения сигнала до точки приема 1. Остальные параметры t_2, t_3 и t_4 можно вычислить: $t_2 = t_1 + \Delta t_{21}$; $t_3 = t_1 + \Delta t_{31}$; $t_4 = t_1 + \Delta t_{41}$.

Вычтем последовательно 1-е уравнение из каждого из уравнений системы и приведем систему уравнений к следующему матричному виду относительно искомых параметров x_s, y_s, t_1 :

$$A \cdot X = D, \quad (2)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} a_{21} & b_{21} & c_{21} \\ a_{31} & b_{31} & c_{31} \\ a_{41} & b_{41} & c_{41} \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ t_1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \end{bmatrix},$$

где

$$a_{21} = x_2 - x_1, b_{21} = y_2 - y_1, c_{21} = \Delta t_{21} c_0^2,$$

$$a_{31} = x_3 - x_1, b_{31} = y_3 - y_1, c_{31} = \Delta t_{31} c_0^2,$$

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

$$d_{21} = \frac{[x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{21}^2]}{2},$$

$$d_{31} = \frac{[x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{31}^2]}{2},$$

$$d_{41} = \frac{[x_4^2 - x_1^2 + y_4^2 - y_1^2 - c_0^2 \Delta t_{41}^2]}{2}.$$

Система (2) является неоднородной системой линейных уравнений размера 3×3 , причем матрица A не является вырожденной. Система (2) имеет единственное решение:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ t_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{21} \\ d_{31} \\ d_{41} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где A_{ij} — алгебраическое дополнение соответствующего элемента матрицы A .

Опуская промежуточные выкладки, запишем решение в следующем виде:

$$x_s = \frac{d_{41} - \frac{c_{41} \cdot d_{21}}{c_{21}} - \frac{(d_{31} - \frac{c_{31} \cdot d_{21}}{c_{21}})(b_{41} \cdot c_{21} - c_{41} \cdot b_{21})}{b_{31} \cdot c_{21} - c_{31} \cdot b_{21}}}{a_{41} - \frac{c_{41} \cdot a_{21}}{c_{21}} - \frac{(a_{31} - \frac{c_{31} \cdot a_{21}}{c_{21}}) \cdot (b_{41} \cdot c_{21} - c_{41} \cdot b_{21})}{b_{31} \cdot c_{21} - c_{31} \cdot b_{21}}}, \quad (4)$$

$$y_s = \frac{d_{31} - \frac{c_{31} \cdot d_{21}}{c_{21}} - x_s \left(a_{31} - \frac{c_{31} \cdot a_{21}}{c_{21}} \right)}{b_{31} - \frac{c_{31} \cdot b_{21}}{c_{21}}}, \quad (5)$$

$$t_1 = \frac{d_{21} - x_s \cdot a_{21} - y_s \cdot b_{21}}{c_{21}}. \quad (6)$$

В общем случае, решения системы уравнений (3) при интервальной неопределенности координат точек приема (x_i, y_i) , где $i = 1, \dots, 4$, представляют собой некую область решений (интервалы решений).

А оптимальное решение в соответствии с теорией решения интервальных уравнений [9,10] должно быть выбрано как некое среднее значение из области допустимых значений интервальных параметров. В данном случае необходимо выбирать только решения, удовлетворяющие физическому смыслу решаемой задачи:

$$0 < t_1 \leq t_1^*, \quad x_s \min \leq x_s \leq x_s \max, \quad (7)$$

$$y_s \min \leq y_s \leq y_s \max.$$

Область решения может быть получена с помощью статистического моделирования методом Монте-Карло при использовании интервалов допустимых значений координат приемных элементов, оптимальное решение вычисляется как среднее значение решений при выполнении условий (7).

После того, как найдено оптимальное решение

$$\begin{aligned} \bar{x}_s &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N (x_{sk}), & \bar{y}_s &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N (y_{sk}), \\ \bar{t}_{1k} &= \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N (t_{1k}), & k &= 1, \dots, N, \end{aligned} \quad (8)$$

а также вычислена погрешность оценок координат, из 1-го уравнения системы (1) можно оценить глубину расположения взрывного источника.

В связи с тем, что решение системы уравнений (1) представляет собой некоторое множество значений, в зависимости от ошибок определения координат точек приема сигнала, то представляет интерес вычисление функции ошибок решения на основе имитационного моделирования в зависимости от выбранной конфигурации расположения точек приема сигнала.

Функция ошибок представляет собой действительную функцию от двух переменных (x_s, y_s) , представляющих собой координаты исследуемой точки на геодезической поверхности в районе проведения измерений в некоторой выбранной локальной системе координат:

$$err(x_s, y_s) = f(x_s, y_s). \quad (9)$$

Функция ошибок представляет собой величину отклонения координат источника, рассчитанных с помощью данного метода при задании в расчетной формуле координат приемных элементов случайным образом в области их допустимых значений для выбранной конфигурации расположения с учетом погрешностей (метод Монте-Карло) от точных значений координат источника для каждой точки расчетной области:

$$err(x_s, y_s) = \sqrt{(x'_s - x_s)^2 + (y'_s - y_s)^2}, \quad (10)$$

где (x_s, y_s) — точные значения координат источника;

(x'_s, y'_s) — расчетные значения координат источника по формулам (4-6) при случайном задании координат точек приема из области вероятных значений с учетом погрешностей их определения для выбранной конфигурации расположения (для современных плат GPS погрешность оценки координат составляет величину $|\sigma| \leq 3$).

Значения величин относительных времен распространения сигнала от точки (x_s, y_s) до точек приема, вычисленные для заданной конфигурации точек приема (x_j, y_j) , где $j=1, \dots, 4$, определялись по формулам:

$$t_j = r_j/c_0; \quad \Delta t_{j1} = t_j - t_1. \quad (11)$$

Карта ошибок представляет собой визуальное отображение функции ошибок в окне программы обработки на карте водной акватории в виде матрицы закрашенных точек (пикселей), цвет которых однозначно соответствует определенным значениям функции ошибок. Вверху окна отображается используемая цветовая палитра с подписанными значениями величины функции ошибок. Синяя зона характеризует область расчетов с величиной ошибок ≤ 1 м; голубая зона — с величиной ошибок ≤ 10 м; зеленая зона — с величиной ошибок ≤ 100 м. На рис. 1, 2 приведены карты ошибок, рассчитанные методом математического моделирования для двух вариантов конфигураций расположения приемников гидроакустических сигналов, приведенных в таблице 1.

На рис. 1 для конфигурации 1 (оптимальная конфигурация) даже при погрешностях определения координат приемных элементов с $|\sigma| \leq 3 <$ существует компактная связная область с погрешностями оценок координат источников, не превышающими значения 1 м.

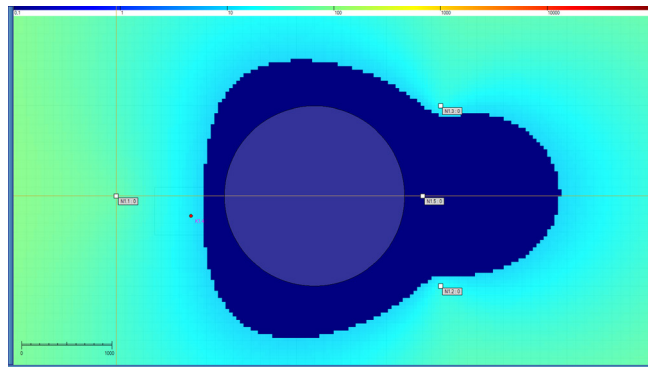


Рис. 1: Карта ошибок при расположении приемников в конфигурации 1

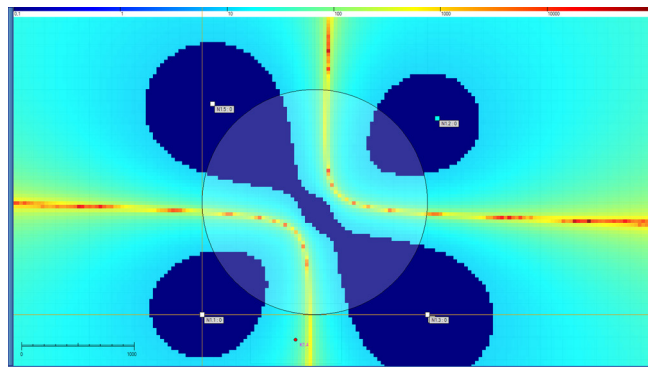


Рис. 2: Карта ошибок при расположении приемников в конфигурации 2

На рис. 2 для конфигурации 2 (неоптимальная конфигурация) внутри области расчетов наряду с областями малых значений ошибок существуют области (гиперболы желто-красного цвета) с большими значениями погрешностей. Расположение источника в таких зонах может приводить к большим ошибкам при дистанционной оценке его координат.

Таким образом, для получения дистанционной оценки координат с минимальными погрешностями необходимо предварительно на основе численного моделирования определить оптимальное расположение точек приема сигналов для планируемого эксперимента.

Для проверки точности разработанного метода оценки координат срабатывания импульсных источников были проведены экспериментальные работы на акватории Ивановского водохранилища в районе старого русла р. Волга в ноябре 2013 года. В качестве приемников-регистраторов гидроакустических сигналов использовались радиобуи, включающие: одноплатный компьютер Helios HLV 1000-256AV; радиомодем

Таблица I: Координаты точек приема для двух конфигураций приемников

Вариант конфигурации	№ точки приема	Локальная координата X, м	Локальная координата Y, м
Конфигурация 1	1	0,00	0,00
	2	-1000,00	3600,00
	3	1000,00	3600,00
	4	0,00	3400,00
Конфигурация 2	1	0,00	0,00
	2	1740,00	2080,00
	3	0,00	2000,00
	4	1870,00	90,00

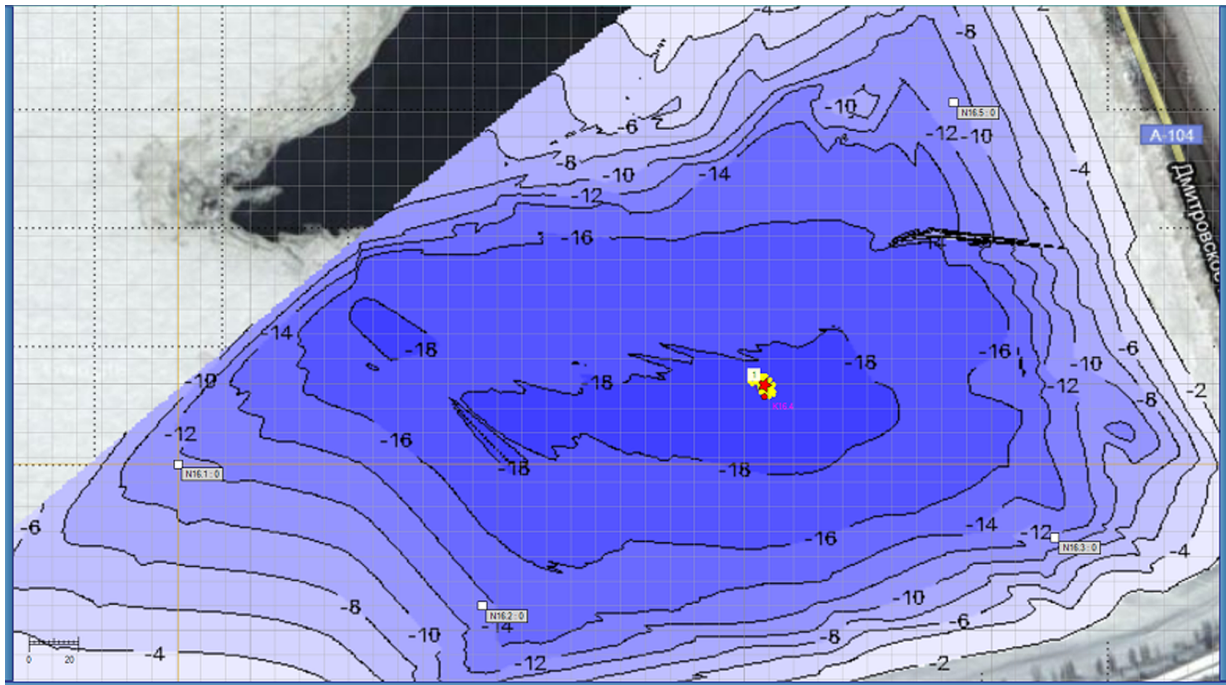


Рис. 3: Эксперименты от 08.11.2013 г.: опыт №21 — оптимальная конфигурация расположения приемников и результат расчета (звездочка)

СМАРТ-160/2400-03; модуль связи Wi-Fi ASUS WL-330N; GPS/ГЛОНАСС приемник НАВИА GL8088s и гидрофон ТС4013 (RESON). В качестве источников импульсного сигнала использовались специально подготовленные для использования в водной среде петарды типа «Корсар-8», срабатывавшие от электроимпульса в заданный момент времени. В эксперименте использовалось 5 радиобуев. Четыре радиобуя располагались в виде оптимальной конфигурации, заранее рассчитанной для условий данного эксперимента. Записи сигналов с этих радиобуев использовались для дистанционной оценки координат. Один радиобуй находился на катамаране, с которого проводилось инициирование петард, а запись сигнала с гидрофона, расположенного на расстоянии 1 м от источника, служила для

контроля излучаемого сигнала. На каждом из радиобуев выполнялась 2 канальная запись сигналов на 16 разрядный АЦП с частотой дискретизации 100 кГц на 1 канал (1 канал — сигнал с гидрофона, 2 канал — метки PPS с канала данных GPS/ГЛОНАСС приемника). Глубина расположения источников импульсных сигналов в экспериментах составляла 4–8 метров. Глубина гидрофонов при приеме сигналов составляла 1 м. Синхронизация записей с разнесенных радиобуев в едином времени проводилась по меткам PPS. Команды на выполнение записи передавались на радиобуи по радиоканалу. На рис. 3, 4 приведены результаты дистанционной оценки координат для условий Ивановского водохранилища (Московская область), эксперимент от 08.11.2013 г. (опыт № 21).

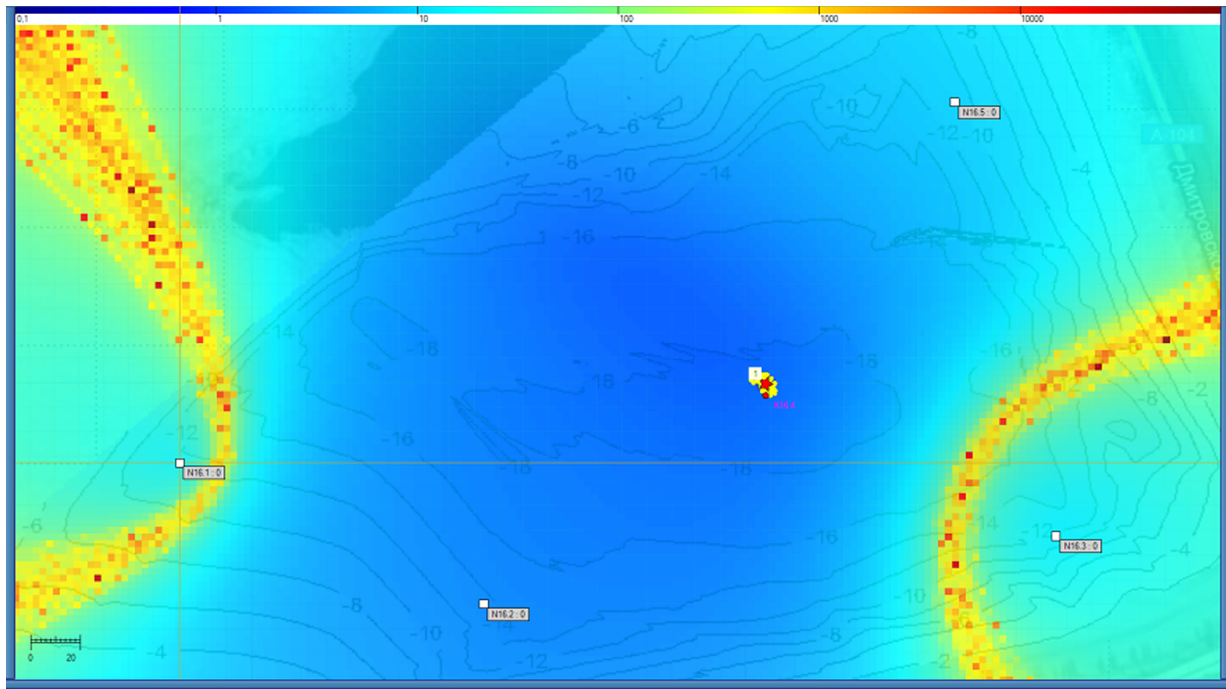


Рис. 4: Эксперименты от 08.11.2013г.: опыт № 21 — карта функции ошибок и результат расчета (звездочка)

Осциллограммы сигналов, приведенные к единому времени, на основе обработки которых выполнялась дистанционная оценка координат, приведены на рис. 5. Вторая осциллограмма снизу соответствует контрольному гидрофону на расстоянии 1 м от импульсного источника. Отметим, что в волноводе в точку приема приходит не один импульсный сигнал, а серия сигналов, отраженных от границ волновода при его распространении, а также сигнал от пульсации газового пузыря [11,12].

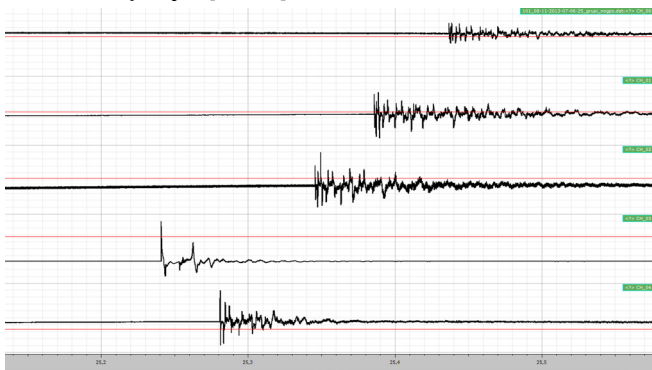


Рис. 5: Эксперименты от 08.11.2013 г.: опыт №21 – осциллограммы сигналов

Однако следуя теории распространения гидроакустических сигналов в условиях мелкого моря [13], будем ориентироваться на первую нормальную волну, кото-

рая в точку приема приходит первой. Групповая скорость первой нормальной волны для импульсного сигнала в диапазоне частот выше частоты фазы Эйри (минимальной групповой скорости) стремится к значению, равному скорости звука в волноводе [14]. На основе анализа временных задержек сигналов в точках приема получены оценки дистанционного определения координат срабатывания подводных импульсных источников. Максимальное разнесение приемников составляло 350 м. В таблице 2 приведены статистические оценки погрешностей дистанционного определения координат для экспериментов от 08.11.2013 г. (опыты 14–22).

В таблице 2 обозначено: (x_s, y_s) — проекции измеренных с помощью приемников GPS/ГЛОНАСС координат источника в локальной системе координат; (x_p, y_p) — проекции рассчитанных по формулам (4)–(6) координат источника; σ — дисперсия при статистической оценке координат источника (N — количество переборов значений местоположения координат точек приема из области их вероятных значений методом Монте-Карло); Δx — погрешность оценки по оси Ox ; Δy — погрешность оценки по оси Oy ;

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}.$$

Таким образом, данный метод позволяет проводить дистанционную оценку координат срабатывания подводных импульсных источников с приемлемой точностью при интервальной неопределенности координат точек приема.

Таблица II: Результаты оценок дистанционного определения координат

№ опыта	N	X_s	Y_s	x_p	y_p	σ	Δx	Δy	Δr
14	1	26,24	237,3	32,57	237,71		5,92	0,45	5,94
	100			32,48	237,74	1,52	5,83	0,48	5,85
15	1	26,84	237,48	31,76	237,97		4,92	0,50	4,94
	100			31,71	237,81	1,6	4,87	0,34	4,88
16	1	27,44	237,35	31,79	237,87		4,35	0,52	4,38
	100			31,95	337,82	1,45	4,51	0,47	4,53
17	1	27,79	237,45	31,53	238,12		3,74	0,67	3,80
	100			31,65	238,00	1,38	3,86	0,55	3,90
18	1	93,52	265,97	94,77	267,21		1,25	1,24	1,76
	100			94,37	266,85	3,96	0,85	0,88	1,23
20	1	93,74	267,66	95,71	270,53		1,97	2,87	3,48
	100			95,47	270,29	3,63	1,73	2,63	3,15
21	1	95,53	268,64	95,32	267,82		-0,21	-0,82	0,85
	100			95,21	267,83	3,84	-0,32	-0,81	0,87
22	1	95,64	268,78	94,97	268,59		-0,67	-0,19	0,70
	100			95,10	268,63	3,93	-0,54	-0,15	0,56

- [1] *Schmidt R.* IEEE Aerosp. Electron. Syst. **8**. P. 821. (1972).
- [2] *Blanc-Benon P.* Implication of shallow waters for source localization: Time-delays estimation versus matched-field processing. In OCEANS'95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Conference Proceedings. **2**. P. 826. (1995).
- [3] *Olson J. V., Szuberla C. A. L.* Processing infrasonic array data. In Handbook of Processing in Acoustics. Vol.2. P. 1487. (ed. by Havelock D., Kuwano S., Vorlander M. Springer. New York. 2008).
- [4] *Ferguson B.G. Lo K.W.* JASA. **132**, N 5. P. 2997. (2012).
- [5] *Gebbie J., Siderius M., McCargar R., Allen J.S., Pusey G.* JASA Express Letters. **134**, N 1. P.EL17. (2013).
- [6] *Воробьев В.А., Крюков Ю.С., Щербаков А. А.* Использование оптического датчика для оценки средней скорости распространения импульсного сигнала в задачах локализации взрывных источников. В сб. Трудов 14 сессии РАО, Т.2., С. 13. (М.: ГЕОС. 2005).
- [7] *Крюков Ю.С., Коротав Ю.В.* Программно-аппаратный комплекс для дистанционного определения координат импульсных источников акустических шумов и оценки их энергетических параметров. Доклады 22-й сессии РАО. Т.2. «Акустические измерения и стандартизация». (М.: ГЕОС. 2010). С. 34.
- [8] *Крюков Ю.С.* ЭНЖ «Молекулярные технологии» НИИ-ПА. Т.4. С. 122. (2010). [электронный ресурс] URL: <http://www.niipa.ru/journal/articles/7.pdf> (дата обращения 21.04.2014).
- [9] *Neumaier A.* Interval Methods for Systems of Equations. (Cambridge: Cambridge University Press, 1990).
- [10] *Lakeyev A.V., Kreinovich V.* Optimal Solution of Interval Linear systems is Intractable (NP-Hard) Interval Computing **3**, P.51. (1997).
- [11] *Коул Р.* Подводные взрывы. (М.: Иностранная литература, 1950). С. 418
- [12] *Орленко Л.П.* Физика взрыва и удара. (М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2008).
- [13] *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. (М.: Наука, 1973).
- [14] *Клей К., Медвин Г.* Акустическая океанография. (М.: Мир, 1980).

Remote estimation of pulse source coordinates in the water environment in conditions of interval uncertainty of measurements of coordinates of signal receivers

Yu.S. Kryukov^{1,a}, A.V. Agejkin^{1,b}, Yu.V.Korotaev^{1,c}, E.O.Cherepanov^{1,d}

FSUE «Research Institute of Applied Acoustics». Dubna, Moscow Region, 141981, Russia

E-mail: ^ayuri.kryukov@niipa.ru, ^bandrey.agejkin@niipa.ru, ^cyury.korotaev@niipa.ru, ^devgeny.cherepanov@niipa.ru

The problem of remote estimation of pulse source coordinates using relative delays of the signals accepted by hydrophones of radiobuoys in spaced points is considered. Location coordinates of radiobuoys are defined by GPS/GLONASS navigation with some known error. To decrease the estimation inaccuracy of pulse source coordinates the redefined system of interval equations for four

signal receivers is considered. Settlement ratios are made. Configurations of placement of signal receivers when inaccuracies of coordinates are sufficient are defined by mathematical simulation. Mathematical simulation results and results of experiments in shallow water area by remote estimation of pulse source coordinates are given.

PACS: 43.58.Gn

Keywords: triangulation, pulse source, method Monte–Carlo.

Received 28.10.2014.

Сведения об авторах

1. Крюков Юрий Семенович — доктор техн. наук, начальник управления; e-mail: yuri.kryukov@niipa.ru.
2. Агейкин Андрей Владимирович — ведущий инженер; e-mail: andrey.agejkin@niipa.ru.
3. Коротаяев Юрий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории; e-mail: yury.korotaev@niipa.ru.
4. Черепанов Евгений Олегович — канд. техн. наук, начальник сектора; e-mail: evgeny.cherepanov@niipa.ru.