

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.  
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.222

АЛГОРИТМ АКУСТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ  
В ПЛОСКОСЛОИСТОЙ ПОДВОДНОЙ СРЕДЕ

© 2015 г. Л. П. Барабанова

*Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева*

*601910 Ковров, ул. Маяковского 19*

*E-mail: lpbarabanova@yandex.ru*

*Поступила в редакцию 02.04.2014 г.*

Представлен новый алгоритм пассивной (беззапросной) навигации в водном слое в рамках лучевой теории в плоскослоистой среде, когда зависимость скорости звука от глубины в водном слое известна. Этот алгоритм является композицией метода Декарта для начального приближения и последующего итерационного метода Ньютона в случае четырех синхронных маяков или итерационного метода Гаусса–Ньютона в случае более четырех синхронных маяков. Находятся три декартовы координаты подводного объекта и момент синхронного излучения акустического сигнала маяками. Демонстрируется работа соответствующей программы при данных, близких к реальным. Компьютерное моделирование прогнозирует улучшение точности на десятки метров.

*Ключевые слова:* боковой параметр, профиль скорости звука, средняя гармоническая, метод Декарта, система 8 на 8, метод Ньютона.

**DOI:** 10.7868/S032079191503003X

ВВЕДЕНИЕ

Ниже для краткости термин “водный слой” используется для обозначения плоского глубоководного слоя, в котором зависимость скорости звука от глубины предполагается известной. Используется также то, что значение скорости звука в водном слое колеблется около 1500 м/с, а возможный диапазон ее изменения составляет 1400–1600 м/с. Такой диапазон значений заставляет учитывать зависимость скорости звука от глубины при решении различных подводных задач. Игнорирование изменчивости скорости звука в водном слое может приводить в решениях задач навигации и обнаружения к отклонениям в десятки метров.

Если бы толщина водного слоя была однородной, то беззапросная навигация в его глубинах могла быть осуществлена по схеме, родственной спутниковой системе GNSS (Global Navigation Satellites System) при условии замены радиосигнала на акустический сигнал. Получилась бы разностно-дальномерная задача (РДЗ). Этот термин и его аббревиатура были введены в [1]. В англоязычной литературе этому термину соответствует аббревиатура TDOA (Time Difference of Arrival), возникшая примерно тогда же.

“Дальномерные гидроакустические навигационные системы во многих случаях являются экономически оправданными средствами обеспечения необходимой точности” [2]. Известные к настоя-

щему моменту методы подводной акустической дальномерной навигации делятся на три класса:

1. 2-D метод: скорость звука постоянна и известна, глубина игнорируется [3–7].
2. 3-D метод: скорость звука постоянна и известна, глубина учитывается [8–10].
3. 3-D метод: скорость звука исчисляется как константа (эффективная скорость звука), глубина учитывается [11].

Как видим, эти методы если и используют профиль скорости звука, то только на предварительной стадии усреднения. В целом эти методы профиль скорости звука (рефракцию) не используют. Существенная неоднородность водного слоя заставляет искать способы местоопределения и обнаружения, которые бы учитывали весь профиль скорости звука в рабочей зоне.

Целью настоящей статьи является учет рефракции звуковых лучей в задаче местоопределения. В настоящей статье представлен новый алгоритм пассивной (беззапросной) навигации в водном слое в рамках лучевой теории в плоскослоистой среде, когда зависимость скорости звука от глубины в водном слое известна. Этот алгоритм является композицией метода Декарта [12] для начального приближения и последующего итерационного метода Ньютона в случае четырех синхронных маяков или итерационного метода Гаусса–Ньютона в случае более четырех синхронных маяков. Находятся три декартовы координаты подводного объекта и момент синхронного излучения аку-

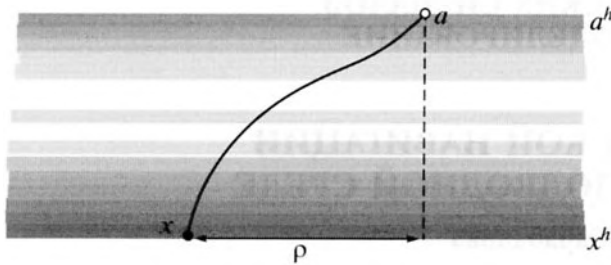


Рис. 1. Луч между маяком и приемником.

стического сигнала маяками. Демонстрируется работа соответствующей программы при данных, близких к реальным. Компьютерное моделирование прогнозирует улучшение точности на десятки метров.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходная базовая система уравнений для РДЗ в случае однородного водного слоя имеет простой физический смысл – “расстояние равно произведению скорости на время”:

$$\begin{cases} |x - a_j| = c(t_j - \tau), \\ j = 0 \dots N - 1, \end{cases}$$

где  $|x - a_j|$  – расстояние от положения *известного* гидроакустического маяка  $a_j$  до положения подводного потребителя (приемника)  $x$ ,  $c$  – некая средняя *назначенная* постоянная скорость звука в рабочей зоне водного слоя,  $\tau$  – *неизвестный* момент синхронного излучения акустического сигнала маяками по часам приемника,  $t_j$  – *измеренный* момент приема акустического сигнала от маяка  $a_j$  приемником  $x$  по часам приемника,  $N$  – число маяков.

Неизвестными здесь являются трехмерный вектор (в арифметическом выражении – столбец из трех компонент)  $x$  и момент  $\tau$  синхронного излучения акустического сигнала маяками (по часам приемника). Число неизвестных равно 4. Поэтому, как и в случае спутниковой навигации, требуются, как минимум, четыре маяка ( $N \geq 4$ ).

Это *грубая* базовая система уравнений для РДЗ в водном слое. Ее особенности и конечный алгоритм для нее, восходящий к Декарту [12], сначала были представлены в работе [1], затем исследовались в [13]. Свое название разностно-дальномерная задача получила благодаря приему исключения  $\tau$  из первоначальной системы через вычитание одного из уравнений из всех других [1, 12, 13]. Тогда получается собственно разностно-дальномерная задача: найти трехмерный столбец  $x$ , таковой, что

$$\begin{cases} |x - a_j| - |x - a_0| = c(t_j - t_0), \\ j = 1 \dots (N - 1). \end{cases}$$

Теперь требуется:

1. Построить алгоритм разностно-дальномерного местоопределения, который бы учитывал изменчивость скорости звука от глубины в водном слое.
2. Подтвердить этот алгоритм непосредственным компьютерным моделированием.

### НОВАЯ БАЗОВАЯ СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ ДЛЯ НАВИГАЦИИ В ПЛОСКОСЛОИСТОЙ СРЕДЕ

Новую базовую систему уравнений получаем, опираясь на [14, с. 12–15]. Экстремальным выражением лучевой теории является принцип Ферма: звуковой луч бежит так, чтобы набрать наименьшее время пробега. Непосредственно из этого следует, что траектория луча лежит в вертикальной плоскости, проходящей через гидроакустический маяк  $a$  и приемник  $x$  (рис. 1), которые находятся на уровнях  $a^h$  и  $x^h$  соответственно. Отметим, что дискретным эквивалентом принципа Ферма является закон Снеллиуса.

Рассуждая по образцу [14, с. 12–15], в вертикальной плоскости, проходящей через  $a$ ,  $x$ , введем произвольные декартовы координаты, соблюдающие горизонталь и вертикаль. В этих координатах получим расстояние в горизонтальной плоскости между маяком и приемником (расстояние между проекциями на эту плоскость):

$$|x^p - a^p| = \int_{|a^h, x^h|} \frac{qc(h)}{\sqrt{1 - q^2 c^2(h)}} dh, \quad (1)$$

где  $q$  – некоторый положительный параметр, и по теореме Пифагора для точек на горизонтальной плоскости  $x^p$  и  $a^p$  с декартовыми координатами  $x^p = (x_1^p \ x_2^p)^T$ ,  $a^p = (a_1^p \ a_2^p)^T$  (буква  $T$  означает транспонирование) расстояние между ними есть

$$|x^p - a^p| = \sqrt{(x_1^p - a_1^p)^2 + (x_2^p - a_2^p)^2}.$$

Уравнение (1) есть первое уравнение для луча между маяком и приемником. Это уравнение в несколько иной форме представлено в [14, с. 15].

Если  $q = 0$ , то, как следует из (1),  $|x^p - a^p| = 0$ , т.е. маяк  $a$  находится в зените по отношению к приемнику  $x$ . Очевидно также, что подынтегральное выражение в (1) возрастает с увеличением  $q$ . Поэтому возрастает с увеличением  $q$  и горизонтальное расстояние  $|x^p - a^p|$ . Сказанное позволяет назвать параметр  $q$  *боковым параметром* луча. В книге [15, р. 169]  $q$  называется просто лучевым параметром (raypath parameter). Упомянем геометрический смысл бокового параметра:

$$q = \frac{\sin \gamma(h)}{c(h)},$$

где  $\gamma$  – угол между касательной к лучу и вертикалью, что еще раз подчеркивает обнуление  $q$  при  $\gamma = 0$ .

Аналогично получим второе уравнение для луча между маяком и приемником:

$$t - \tau = \int_{|a^h, x^h|} \frac{dh}{c(h)\sqrt{1 - q^2 c^2(h)}}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – момент времени излучения акустического сигнала маяком  $a$  по часам приемника, а  $t$  – момент приема этого сигнала приемником. Это уравнение в несколько иной форме представлено в [13, с. 253, формула (7)], а также в [16, с. 357, формула (16.25)] и в [17, с. 260, формула (43.13)]. Отметим также, что уравнения (1), (2) были получены ранее в [15, р. 168] непосредственно из закона Снеллиуса. Эти же уравнения были получены в [18, р. 197–198] исходя из принципа Ферма. Однако в одну систему уравнений для навигации эти уравнения не были объединены.

При синхронизации излучателей момент излучения  $\tau$  (по часам приемника) становится одной общей неизвестной величиной.

Следовательно, при синхронизации излучателей каждому маяку  $j = 0, \dots, N - 1$  будут соответствовать два уравнения (1), (2), и все вместе они будут представлять систему  $2N$  уравнений при  $4 + N$  неизвестных  $\tau, x_1^p, x_2^p, x^h, q_0, q_1, \dots, q_{N-1}$ . Отсюда ясно, что должно быть  $2N \geq 4 + N$  или, что то же самое, должно быть  $N \geq 4$  маяков. Тогда получается новая базовая система  $2N$  уравнений для восьми неизвестных  $\tau, x_1^p, x_2^p, x^h, q_1, q_2, q_3, q_4$ , из которых нас, в первую очередь, интересуют  $x_1^p, x_2^p, x^h$ :

$$\begin{cases} |x^p - a_j^p| - \int_{|a_j^h, x^h|} \frac{q_j c(h)}{\sqrt{1 - q_j^2 c^2(h)}} dh = 0, \\ t_j - \tau - \int_{|a_j^h, x^h|} \frac{dh}{c(h)\sqrt{1 - q_j^2 c^2(h)}} = 0, \\ j = 0, \dots, N - 1. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, предлагаемый метод при минимальном числе  $N = 4$  маяков приводит к системе (3) из 8 уравнений с 8 неизвестными  $\tau, x_1^p, x_2^p, x^h, q_0, q_1, q_2, q_3$ .

Во многих случаях используют кусочно-линейную аппроксимацию зависимости  $c(r)$  от  $r$ , см. например [19, с. 69–70], [20], где профиль скорости звука состоит из шести звеньев ломаной на отрезке глубин  $[0, 2.3 \text{ км}]$ , см. также [21, р. 161]. Тогда на каждом участке линейности получаются интегралы в элементарных функциях [14, с. 15]. Это обстоятельство имеет два важных проявления. Первое состоит в понимании геометрии реализованного луча – это сплайн (степень сплайна

равна 2, дефект равен 1), образованный из гладкосклеенных дуг окружностей, см. [14, с. 15]. Второе – в том, что можно существенно повысить точность и быстроту вычислений.

Для осуществления представленной идеи был разработан алгоритм и соответствующая программа.

### АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ НОВОЙ БАЗОВОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

При  $N = 4$  эта система может решаться итерационным алгоритмом Ньютона, а при  $N > 4$  – итерационным алгоритмом Гаусса–Ньютона в смысле метода наименьших квадратов. Ниже мы ограничиваемся случаем  $N = 4$ .

Важнейшим фактором успеха предлагаемого алгоритма является выбор начального приближения. В данном случае начальное приближение для  $\tau, x_1^p, x_2^p, x^h$  может быть результатом любого известного способа позиционирования приемника при постоянной (некоторой средней) скорости звука.

Тогда прикрепленный к основным неизвестным  $\tau, x_1^p, x_2^p, x^h$  набор боковых параметров  $q_0, q_1, \dots, q_{N-1}$  можно получить из уравнений новой базовой системы, полагая  $c = \bar{c} = \text{const}$ , где  $\bar{c}$  – некоторая средняя скорость звука. Тогда, сначала выделив интегралы (3) в правые части, затем поделив уравнения одно на другое, получим

$$q_j = \frac{|x^p - a_j^p|}{\bar{c}^2(t_j - \tau)}, \quad j = 0, \dots, N - 1, \quad (4)$$

где начальные приближения для  $\tau, x_1^p, x_2^p$  вычислены, как сказано ранее.

Затем, вероятно, потребуется не более трех итераций для высокоточного вычисления вектора  $z = (\tau, x_1^p, x_2^p, x^h, q_0, q_1, q_2, q_3)^T$ .

Для прямой реализации итерационного алгоритма Ньютона требуется вычисление матрицы, обратной к матрице Якоби системы (3), но непосредственное вычисление матрицы Якоби для системы (3) очень громоздко. Именно, если обозначить левую часть системы (3) через

$$F(z)^T :=$$

$$:= (F_1(z), F_2(z), F_3(z), F_4(z), F_5(z), F_6(z), F_7(z), F_8(z)),$$

то матрица Якоби примет вид

$$F(z) = (\partial F_i / \partial z_j), \quad 1 \leq i \leq 8, \quad 1 \leq j \leq 8,$$

где  $i$  – номер строки,  $j$  – номер столбца:

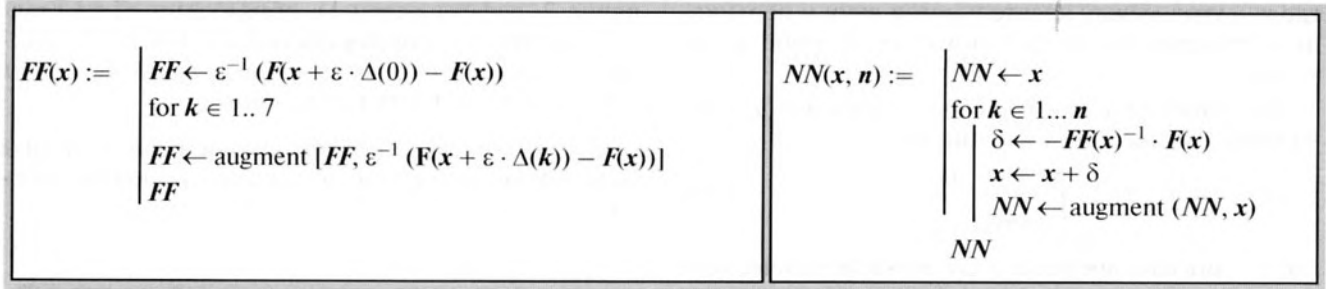


Рис. 2. Универсальные модули для применения метода Ньютона к квадратной нелинейной системе уравнений.

$$F'(z) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial z_1} & \frac{\partial F_1}{\partial z_2} & \frac{\partial F_1}{\partial z_3} & \frac{\partial F_1}{\partial z_4} & \frac{\partial F_1}{\partial z_5} & \frac{\partial F_1}{\partial z_6} & \frac{\partial F_1}{\partial z_7} & \frac{\partial F_1}{\partial z_8} \\ \frac{\partial F_2}{\partial z_1} & \frac{\partial F_2}{\partial z_2} & \frac{\partial F_2}{\partial z_3} & \frac{\partial F_2}{\partial z_4} & \frac{\partial F_2}{\partial z_5} & \frac{\partial F_2}{\partial z_6} & \frac{\partial F_2}{\partial z_7} & \frac{\partial F_2}{\partial z_8} \\ \frac{\partial F_3}{\partial z_1} & \frac{\partial F_3}{\partial z_2} & \frac{\partial F_3}{\partial z_3} & \frac{\partial F_3}{\partial z_4} & \frac{\partial F_3}{\partial z_5} & \frac{\partial F_3}{\partial z_6} & \frac{\partial F_3}{\partial z_7} & \frac{\partial F_3}{\partial z_8} \\ \frac{\partial F_4}{\partial z_1} & \frac{\partial F_4}{\partial z_2} & \frac{\partial F_4}{\partial z_3} & \frac{\partial F_4}{\partial z_4} & \frac{\partial F_4}{\partial z_5} & \frac{\partial F_4}{\partial z_6} & \frac{\partial F_4}{\partial z_7} & \frac{\partial F_4}{\partial z_8} \\ \frac{\partial F_5}{\partial z_1} & \frac{\partial F_5}{\partial z_2} & \frac{\partial F_5}{\partial z_3} & \frac{\partial F_5}{\partial z_4} & \frac{\partial F_5}{\partial z_5} & \frac{\partial F_5}{\partial z_6} & \frac{\partial F_5}{\partial z_7} & \frac{\partial F_5}{\partial z_8} \\ \frac{\partial F_6}{\partial z_1} & \frac{\partial F_6}{\partial z_2} & \frac{\partial F_6}{\partial z_3} & \frac{\partial F_6}{\partial z_4} & \frac{\partial F_6}{\partial z_5} & \frac{\partial F_6}{\partial z_6} & \frac{\partial F_6}{\partial z_7} & \frac{\partial F_6}{\partial z_8} \\ \frac{\partial F_7}{\partial z_1} & \frac{\partial F_7}{\partial z_2} & \frac{\partial F_7}{\partial z_3} & \frac{\partial F_7}{\partial z_4} & \frac{\partial F_7}{\partial z_5} & \frac{\partial F_7}{\partial z_6} & \frac{\partial F_7}{\partial z_7} & \frac{\partial F_7}{\partial z_8} \\ \frac{\partial F_8}{\partial z_1} & \frac{\partial F_8}{\partial z_2} & \frac{\partial F_8}{\partial z_3} & \frac{\partial F_8}{\partial z_4} & \frac{\partial F_8}{\partial z_5} & \frac{\partial F_8}{\partial z_6} & \frac{\partial F_8}{\partial z_7} & \frac{\partial F_8}{\partial z_8} \end{pmatrix},$$

где каждая составляющая будет иметь свою весьма громоздкую конструкцию. Поэтому вместо матрицы Якоби будем использовать ее разностный аналог.

Для описания модуля матрицы Якоби и модуля алгоритма Ньютона будем использовать псевдокод. Это левый модуль (аналог матрицы Якоби)  $FF$  на рис. 2, где **augment** – встроенная функция сборки матриц слева направо. Вектор-функция  $F$  – это левая часть системы (3),  $\varepsilon$  – достаточно малое число (у нас было  $\varepsilon = 10^{-7}$ ). Вектор-столбец  $\Delta(k)$  – это орт с единицей на месте с номером  $k$ .

Правый модуль  $NN$  на рис. 2 представляет протокол  $n$  итераций Ньютона.

Для практического применения изложенного метода полезным может оказаться учет, исходя из начального приближения, возможных траекторий лучей от разных маяков, что позволит учесть различные условия в толще водного слоя во времени суток. Тогда в соответствующие уравнения новой базовой системы уравнений можно внести свои зависимости  $c_j(h)$ , что может повлиять на точность, но незначительно повлияет на скорость вычислений.

Профиль скорости звука для конкретной акватории может достаточно быстро меняться. Поэтому вместо функции  $c(h)$  следует в представленной системе уравнений иметь функцию  $c(h, t)$ , где  $t$  – время суток [3].

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В силу новизны предлагаемого метода мы подробно излагаем вычислительный эксперимент применительно к одному конкретному случаю, хотя для этого была разработана программа – прототип штатной программы для гидроакустической разностно-дальномерной навигационной системы.

Мы берем конфигурацию, представленную на рис. 3. На этом рисунке изображен профиль скорости звука, взятый из [4, с. 108], и матрица  $A$ , в которой каждый столбец есть излучатель гидроакустической системы (все величины даны в километрах и секундах). Два первых элемента столбцов матрицы  $A$  есть плоские координаты, третий элемент – глубина.

Разбиваем вычислительный эксперимент на части.

**Часть 0. Имитация.** Произвольно назначаем местоположения четырех маяков. Это столбцы матрицы  $A$  на рис. 3. Также произвольно назначаем *фиктивное* местоположение приемника  $X$  и момент  $\tau$  синхронного излучения акустических сигналов маяками, см. рис. 4. Затем вычисляем столбец  $t$  моментов приема акустических сигналов приемником в предположении однородности водного слоя, в котором скорость звука постоянна и равна средней гармонической реальной скорости звука

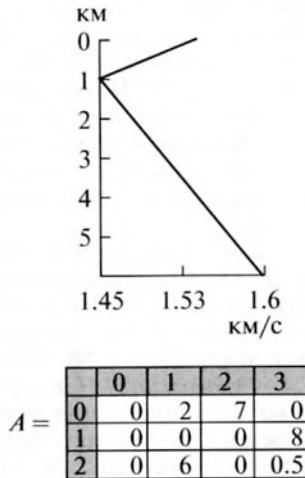


Рис. 3. Исходная конфигурация гидроакустической системы.

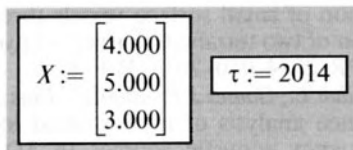


Рис. 4. Фиктивное местоположение приемника.

$$\bar{c} = H \left( \int_0^H \frac{1}{c(h)} dh \right)^{-1}, \quad (5)$$

где  $H$  – глубина рабочей зоны, а функция  $c(h)$  задана на рис. 3. У нас  $H = 6$  км. Соответственно,  $\bar{c} = 1.51882$ .

На выходе этого этапа алгоритма – скорость звука  $\bar{c}$  и моменты приема акустического сигнала приемником от маяков  $t$  (рис. 5).

**Часть 1. Алгоритм Декарта.** По данным  $A, t, \bar{c}$  абсолютно точно вычисляются местоположение приемника  $\tilde{X}$  и момент  $\tilde{\tau}$  излучения сигнала по часам приемника. Этот алгоритм представлен в [1] и отнесен к Декарту в [12]. Разумеется, получится  $\tilde{\tau} = \tau, \tilde{X} = X$ .

**Часть 2. Алгоритм Ньютона.** На входе: матрица  $A$  расположения гидроакустических маяков, профиль скорости звука  $c(h)$ , столбец моментов приема гидроакустических сигналов от маяков  $t$  и начальное приближение  $\tilde{\tau}, \tilde{X}$  и  $\tilde{q}$ . В качестве начального приближения берется  $\tilde{\tau}, \tilde{X}$  и  $\tilde{q}$ , вычисленное согласно (4), а именно,

$$\tilde{q}_j = \frac{|\tilde{x}^p - a_j^p|}{\bar{c}^2 (t_j - \tilde{\tau})}$$

	0
$\bar{c} = 1.51882$	0
$t =$	1
	2
	3

0	1818.65563
1	1818.05868
2	1818.31745
3	1817.6806

Рис. 5. Скорость звука  $\bar{c}$  и столбец  $t$ .

	0	1	2	3	4
0	2014.00000	2014.00641	2013.98888	2013.98838	2013.98837
1	4.00000	3.97960	3.97906	3.97875	3.97875
2	5.00000	4.98529	4.98975	4.98993	4.98993
3	3.00000	2.67895	2.68249	2.68207	2.68207
4	0.59621	0.62467	0.62077	0.62053	0.62053
5	0.57518	0.55215	0.54812	0.54797	0.54797
6	0.58546	0.61558	0.61194	0.61178	0.61178
7	0.58890	0.62643	0.62125	0.62086	0.62086

Рис. 6. На третьей итерации достигается сантиметровая точность.

Затем по схеме рис. 2 реализуются итерации Ньютона, протокол которых представлен на рис. 6.

Подведем итог. При входных данных  $A, t, c(h)$  получен результат, примерно на 50 метров отличающийся от обычного способа, в котором скорость звука назначается постоянной  $\bar{c}$ .

Рисунок соответствующих лучей представлен на рис. 7. Как видим, легкие искривления лучей приводят к серьезным координатным последствиям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный алгоритм является алгоритмом для адекватного вычисления местоопределения приемника в плоскослойной среде, когда приемник получает сигнал от  $N \geq 4$  источников, синхронно испускающих его в плоскослойной среде.

Разумеется, дальность действия предложенного метода и соответствующего алгоритма ограничена. Частично этот вопрос обсуждался в главе 14 книги [13].

Новая базовая система  $2N$  уравнений уступает старой базовой системе по временной сложности в связи с интегрированиями. Однако для многих навигационных и для большинства геодезических задач задержка по времени в миллисекундах значения не имеет.

Достоинством новой базовой системы уравнений является возможность выбора различных моделей зависимости скорости звука от глубины водного слоя с учетом различных физических параметров. Это обещает оптимизацию геодезических и навигационных измерений с применением различных подводных средств.

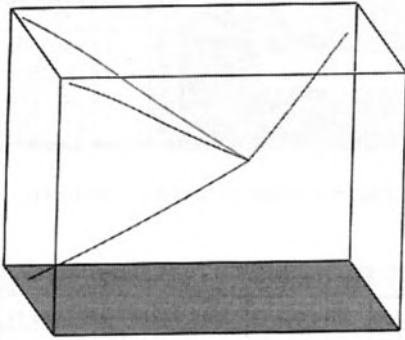


Рис. 7. Искомый приемник в точке пересечения лучей.

Отметим также, что заявленная методика распространяется на широкий класс гидроакустических задач навигации и обнаружения.

Например, в статье [5] подчеркивается необходимость оснащения акватории, на которой выполняются миссии автономных подводных аппаратов, системой акустических стационарных источников навигационных сигналов.

В работе [6] отмечается, что решение актуальных задач звукоподводной связи и навигации для управления подводными объектами во многом зависит от правильного учета гидролого-акустической обстановки в зоне их функционирования. Это означает для нашей методики учет времени и места навигационного обслуживания, т.к. профиль скорости звука для конкретной акватории может достаточно быстро меняться. Очевидно, что это является основным источником погрешности.

Важность постановки вопроса и предъявленного его решения содержится в работе [3]: значительный прогресс в развитии морской робототехники инициировал исследования, направленные на разработку технических решений для перспективных навигационных систем дальнего ресурса. Существенные ошибки при решении задач акустической навигации могут быть вызваны вариационными полями скорости звука, что приводит к ошибке локализации.

Свидетельства [3, 20, 21] дополнительно обеспечивают важность нашей теории.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Универсальный конечный алгоритм для разностно-дальномерной навигационной системы // Известия вузов. Приборостроение. 1989. № 5. С. 42–45.
2. Ляхов Д.Г. Современные задачи подводной робототехники // Подводные исследования и робототехника. 2012. № 1(13). С. 15–23.
3. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Лебедев М.С. Исследование влияния вариаций поля температур на точность измерения дистанций до подводных объектов // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 1. С. 56–64.
4. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др. Под общ. ред. Агеева М.Д. Институт проблем морских технологий. М.: Наука, 2005.
5. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А. Аппаратно-программный измерительный комплекс для исследований в области акустической навигации // Акуст. журн. 2011. Т. 57. № 6. С. 804–808.
6. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Особенности применения акустических псевдослучайных сигналов для измерения импульсных откликов на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 6. С. 141–144.
7. Отческий С.А., Бурдинский И.Н. Коррекция триангуляционного метода определения позиции автономного необитаемого подводного аппарата // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3. С. 96–103.
8. Diamant R., Lampe L. Underwater localization with time-synchronization and propagation speed uncertainties // IEEE Transactions on mobile computing. 2013. V. 12. № 7. P. 1257–1268.
9. Tesei A., Fioravanti S., Grandi V., Guerrini P., Maguer A. Localization of small surface vessels through acoustic data fusion of two tetrahedral arrays of hydrophones // CMRE-PR-2014-010. 2014. P. 1–8.
10. Zamanizadeh E., Gomes J.P., Bioucas-Dias J., Karasalo I. Performance analysis of model-based localization of high-frequency acoustic sources in 3D // Proc. of OCEANS 2013 MTS/IEEE Conference. Bergen, Norway, 2013.
11. Kim E., Lee S., Kim C., Kim K. Floating beacon-assisted 3-D localization for variable sound speed in underwater sensor networks / IEEE SENSORS 2010 Conference. November 1–4, 2010. P. 682–685.
12. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Алгоритмы решения навигационной разностно-дальномерной задачи – от Аполлония до Коши // История науки и техники. 2008. № 11. С. 2–21.
13. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Математические задачи дальномерной навигации. М.: Физматлит, 2007.
14. Лаврентьев М., Люстерник Л. Основы вариационного исчисления. Том I, часть II. М., Л.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1935.
15. Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E., Keys D.A. Applied geophysics. 2-nd Ed. New York: Cambridge Univ. Press, 1990.
16. Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989.
17. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
18. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational ocean acoustics (modern acoustics and signal processing). М.: Springer, 2011.
19. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. М.: Наука, 2007.
20. Галкин О.П. Горизонтальная рефракция звуковых лучей в океане, обусловленная короткопериодными внутренними волнами // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 5. С. 648–654.
21. Tolstoy I., Clay C.S. Ocean acoustic. Theory and experiment in underwater sound. New York: Am. Inst. of Phys., 1987.