

УДК 681.883.77

## АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПОДВОДНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ЕГО СИГНАЛА

© 2019 г. А. И. Машошин\*

АО “Концерн “ЦНИИ “Электронприбор”, ул. Малая Посадская 30, Санкт-Петербург, 197046 Россия

\*e-mail: aimashoshin@mail.ru

Поступила в редакцию 26.06.2018 г.

После доработки 13.06.2019 г.

Принята к публикации 09.07.2019 г.

Разработан алгоритм определения координат (дистанции и глубины) источника широкополосного сигнала, использующий в качестве входных данных параметры максимумов в корреляционной функции сигнала на выходе приемной гидроакустической антенны и учитывающий ряд негативных факторов, влияющих на точность алгоритма при работе в реальных условиях. Путем имитационного моделирования показаны условия применимости алгоритма и получены зависимости точности оценки координат источника сигнала от количества обнаруженных максимумов в корреляционной функции, от отношения сигнал/помеха на выходе приемной антенны и от точности измерения вертикального распределения скорости звука в районе наблюдения.

*Ключевые слова:* гидроакустика, многолучевый канал, корреляционная функция, координаты источника сигнала

DOI: 10.1134/S0320791919060091

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных практических задач гидроакустики является определение координат источника звука в пассивном режиме работы шумопеленгаторной станции. Для решения этой задачи предложено большое число методов и алгоритмов.

Один из этих методов базируется на согласованной обработке широкополосного многолучевого акустического сигнала, излученного точечным источником. Существуют две разновидности этого метода. Первая, получившая в зарубежной литературе название “Matched field processing (MFP)” [1–8], основана на выделении отдельных лучей принимаемого сигнала и их когерентном сложении с учетом рассчитанной лучевой структуры сигнала на входе антенны для различных вариантов расположения источника в пространстве “дальность–глубина”. Вторая разновидность данного метода [9–16] оперирует с суммарным сигналом на выходе одной либо нескольких достаточно широких характеристик направленности гидроакустической антенны в вертикальной плоскости. Поскольку первая модификация метода предъявляет жесткие требования к вертикальному волновому размеру приемной антенны и к величине отношения сигнал/помеха (ОСП), она трудно реализуема на практике [7, 8]. Учиты-

вая это, предлагаемая статья посвящена второй разновидности метода, а точнее тому ее варианту, который базируется на сопоставлении измеренных и рассчитанных максимумов в корреляционной функции (КФ) принимаемого широкополосного сигнала, обусловленных интерференцией коррелированных сигналов источника, пришедших на вход приемной антенны по различным лучам [9–13]. Для краткости изложения эти максимумы в дальнейшем будем называть корреляционными максимумами (КМ).

Определение координат источника сигнала (ИС) рассматриваемым методом состоит в поиске такого положения источника сигнала по дальности и глубине, для которого расчет по лучевой программе показывает наличие в КФ на выходе антенны КМ, количество и расположение на оси абсцисс которых максимально близко количеству и расположению КМ в измеренной КФ.

Проведенные исследования [9–13] показали, что имеется ряд факторов, приводящих в конкретных случаях к большим ошибкам определения координат ИС либо вообще к невозможности применения рассматриваемого метода. Этими факторами являются:

1) низкая когерентность лучей, имеющая место в гидроакустических условиях, характеризующихся многократным их отражением от границ

волновода, в результате чего в КФ обнаруживаются единичные КМ либо не обнаруживаются вовсе;

2) неоднозначность местоположения источника сигнала, определяемого рассматриваемым методом, в ряде гидроакустических условий;

3) недостаточно высокая точность расчета параметров лучей вследствие неточного знания параметров гидроакустических условий в районе работы, а также вследствие их случайных флуктуаций.

Целью работы является исследование алгоритма, реализующего рассматриваемый метод с учетом названных факторов.

### ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА

Алгоритм определения координат источника рассматриваемым методом, синтезированный по критерию максимального правдоподобия, имеет вид

$$(R_{\text{opt}}, H_{\text{opt}}) = \arg \min_{R, H} \sum_{k=1}^K |\hat{t}_k - T_{(i,j)_k}(R, H)|, \quad (1)$$

где  $R_{\text{opt}}, H_{\text{opt}}$  – оптимальные оценки дистанции и глубины ИС соответственно;  $K$  – количество КМ, обнаруженных в КФ на выходе приемной антенны;  $\hat{t}_k$  – оценка абсциссы (задержки)  $k$ -го КМ, обнаруженного в КФ;  $T_{(i,j)_k}(R, H)$  – неслучайная функция, связывающая истинные координаты ИС с истинным значением относительного запаздывания  $i$ -го и  $j$ -го сигнальных лучей, интерференция которых образует  $k$ -й КМ.

Из формулы (1) следует, что оптимальными оценками координат ИС будут те, для которых для каждого  $k$ -го КМ, обнаруженного в КФ, найдется пара сигнальных лучей, вышедших из ИС, интерференция которых образует в КФ обнаруживаемый КМ с абсциссой, близкой к абсциссе  $k$ -го КМ. Таким образом, для реализации рассматриваемого метода нужно определить область в пространстве  $[R, H]$  и в этой области найти точку, удовлетворяющую условию (1). При этом нужно учесть названные выше негативные факторы.

Проведенный анализ показал, что причины, снижающие точность определения координат источника рассматриваемым методом, полностью устранить не представляется возможным, но вызываемый ими отрицательный эффект можно уменьшить при применении ряда мер. Рассмотрим эти меры.

1) Экспериментально установлено, что точность определения координат рассматриваемым методом тем выше, чем больше КМ обнаружено в КФ. Поскольку коэффициент когерентности каждой пары лучей, от которого зависит появление соответствующего КМ в КФ, является слу-

**Таблица 1.** Абсциссы КМ, обнаруженных в КФ, последовательно измеренных на интервале в 1 мин в условиях зональной структуры гидроакустического поля в глубоком море

| Номер КФ | Абсциссы КМ, обнаруженных в КФ, мс |
|----------|------------------------------------|
| 1        | 7.5 19.3 42.0                      |
| 2        | 6.9 71.8                           |
| 3        | 7.0 49.4 79.3                      |
| 4        | 6.8 49.5                           |
| 5        | 7.6 41.9 49.3 71.9                 |
| 6        | 7.4 6.8                            |
| 1–6      | 6.9 7.5 19.3 42.0 49.4 71.8 79.3   |

чайной величиной, изменяющейся во времени, количество КМ, обнаруживаемых в КФ, вычисленных на последовательных интервалах времени, может изменяться (и, как правило, изменяется). Поэтому для получения достаточного количества КМ для решения задачи целесообразно объединить КМ, обнаруженные в КФ, вычисленные на интервале времени, на котором изменением координат ИС можно пренебречь. Экспериментально показано, что этот интервал составляет единицы минут.

В качестве подтверждения эффективности данного предложения в табл. 1 приведены значения абсцисс КМ, обнаруженных в КФ, последовательно измеренных на интервале в 1 мин в условиях зональной структуры гидроакустического поля в глубоком море с вертикальным распределением скорости звука (ВРСЗ), приведенным на рис. 3 красным цветом. Источник широкополосного шума находился в первой дальней зоне акустической освещенности на дистанции от приемной антенны 47 км на глубине 198 м. Приемная антенна располагалась на глубине 48 м. Прием осуществлялся в полосе частот 1–3 кГц. ОСП на выходе сформированного пространственного канала превышало 20 дБ. КФ широкополосного сигнала источника измерялся на интервале в 1 с с периодичностью 10 с. Поиск координат цели осуществлялся: по глубине – в диапазоне 5–300 м; по дистанции – в границах 1-й дальней зоны акустической освещенности (ДЗАО) 43–51 км.

Из рассмотрения табл. 1 следует, что наборы КМ в КФ, измеренных на последовательных интервалах времени, различаются. В последней строке табл. 1 приведены КМ, обнаруженные хотя бы в одной из КФ. Поскольку точность измерения абсциссы КМ составляет  $1/(3 \text{ кГц}) = 0.33 \text{ мс}$ , то из всех КМ, абсциссы которых отличались менее, чем на 0.33 мс, выбирался только один КМ.

В табл. 2 приведены результаты определения координат ИС с применением алгоритма (1) с использованием КМ каждой отдельной КФ и с ис-

**Таблица 2.** Результаты определения координат ИС с применением алгоритма (1)

| Номер КФ | Количество КМ, обнаруженных в КФ | Среднеквадратическая ошибка определения дистанции до цели, км | Среднеквадратическая ошибка определения глубины цели, м |
|----------|----------------------------------|---|---|
| 1        | 3                                | 7.4   | 28  |
| 2        | 2                                | 17.1  | 42  |
| 3        | 3                                | 9.2   | 31  |
| 4        | 2                                | 21.1  | 39  |
| 5        | 4                                | 4.4   | 12  |
| 6        | 2                                | 15.3  | 35  |
| 1–6      | 7                                | 0.3   | 8   |

пользованием объединенных КМ всех шести КФ. При этом следует заметить, что результат определения координат цели с использованием КМ одной отдельно взятой КФ во всех шести случаях был многозначным. В случае же использования всей совокупности КМ, обнаруженных во всех шести КФ, результат оказался однозначным, что обусловило высокую точность определения координат цели.

Результаты, приведенные в табл. 2, подтверждают тот факт, что с увеличением количества КМ, обнаруженных в измеренной АКФ, точность определения координат цели повышается.

2) Влияние флуктуаций параметров лучей, обусловленных флуктуациями параметров канала распространения, можно уменьшить путем трассового анализа во времени координат источника, вычисленных рассматриваемым методом.

В качестве иллюстрации данного предложения на рис. 1 маркерами синего цвета нанесены 12 оценок координат ИС, полученные в описанном выше эксперименте. Каждая оценка получена с применением алгоритма (1) с использованием объединенных КМ, обнаруженных в шести КФ, последовательно измеренных с интервалом в 10 с. Красным маркером показано истинное положение ИС.

Из рассмотрения рис. 1 следует, что 10 оценок расположились кучно на интервале от 45 до 51 км по дистанции и от 170 до 220 м по глубине, а две оценки оказались далеко в стороне. Ясно, что алгоритмический отсев таких оценок труда не составит.

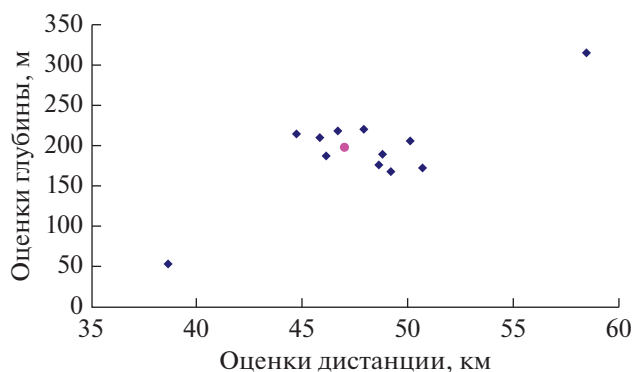
3) Поскольку реализация алгоритма (1) базируется на переборе предполагаемых точек местонахождения ИС в пространстве “дальность–глубина” с вычислением для каждой точки критерия оптимальности, естественно предположить, что неоднозначность результата, свойственная рассматриваемому методу, будет зависеть от размеров выбранной области поиска решения. Говоря точнее, чем компактнее эта область, тем вероятность получения неоднозначных решений будет

меньше. Кроме того, при сужении области поиска решения сокращается время решения задачи и уменьшаются требования к производительности вычислителя. Для определения области поиска решения целесообразно применить один из известных методов определения координат ИС, дающих менее точный, но однозначный результат.

Наиболее просто это можно реализовать, предварительно определив тип ИС и воспользовавшись соответствующими этому типу плотностями распределения вероятностей (ПРВ) его глубины  $g_H(h)$  и интенсивности его шумоизлучения в рабочем диапазоне частот (РДЧ) приемной антенны  $g_{W_0}(w)$ . Тогда границы области по глубине  $H_{\min}$ ,  $H_{\max}$  можно определить из условий

$$\int_{H_{\min}}^{H_{\max}} g_H(h) dh = P_H, \quad H_{\max} - H_{\min} \rightarrow \min, \quad (2)$$

которые означают, что границы по глубине должны быть такими, чтобы вероятность нахождения в них истинной глубины источника была равна заданной вероятности  $P_H$  (например, 0.95) и при



**Рис. 1.** Оценки координат ИС, полученные на последовательных односторонних интервалах времени при поиске решения в границах 1-й ДЗАО (красным маркером показано истинное положение ИС).

этом интервал глубин был бы минимально возможным.

Границы области по дистанции  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  могут быть определены из аналогичных условий

$$\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} g_{R|\hat{W}}(r) dr = P_R, \quad R_{\max} - R_{\min} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $g_{R|\hat{W}}(r)$  – условная (в зависимости от интенсивности сигнала источника на входе приемной антенны  $\hat{W}$ ) ПРВ дистанции  $R$  до ИС, вычисляемая по приближенной формуле

$$g_{R|\hat{W}}(r) = \frac{\int_0^{\infty} g_{W_0}(w) g_{\Delta W}(\hat{W} - W(w, r)) dw}{\int_0^{\infty} \left\{ \int_0^{\infty} g_{W_0}(w) g_{\Delta W}(\hat{W} - W(w, R)) dw \right\} dR}. \quad (4)$$

В формуле (4)  $W(w, R)$  – неслучайная функция (называемая передаточной характеристикой канала распространения сигнала), связывающая интенсивность  $W$  сигнала источника в рабочем диапазоне частот на входе приемной антенны с его интенсивностью в точке нахождения ИС и с дистанцией до источника  $R$ ;  $g_{\Delta W}(x)$  – ПРВ ошибки  $\Delta W$  измерения интенсивности сигнала источника  $\hat{W}$  на входе антенны.

Эффективность данного предложения проиллюстрирована на рис. 2, отличающемся от рис. 1 только тем, что поиск решения осуществлялся в пределах 1-й и 2-й ДЗАО. Из сравнения рис. 1 и рис. 2 следует, что при расширении области поиска решения появляются ложные решения, обусловленные многозначностью рассматриваемого метода.

4) Проведенное моделирование показало, что для сокращения многозначности результата целесообразно принять следующие дополнительные меры:

- при поиске сигнальных лучей, соответствующих КМ, обнаруженным в вычисленной КФ, рассматривать только те лучи, которые попали в тот же пространственный канал веера характеристик направленности антенны в вертикальной плоскости, что и сигнал, использованный для вычисления КФ;

- из всех точек области в пространстве  $[R, H]$ , в которой ищется решение задачи, рассматривать только те точки, которые удовлетворяют двум условиям: для них найдены пары лучей, соответствующих максимальному количеству обнаруженных КМ в измеренной КФ, и при этом одна из этих пар лучей соответствует КМ в КФ с максимальным ОСП.

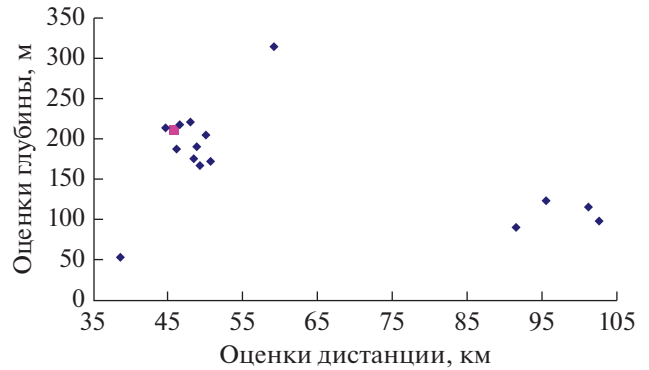


Рис. 2. Оценки координат ИС, полученные на последовательных одноминутных интервалах времени при поиске решения в границах 1-й и 2-й ДЗАО (красным маркером показано истинное положение ИС).

5) Учитывая изменчивость гидроакустических условий во времени, измерения доступных параметров среды (глубина моря, вертикальное распределение скорости звука, волнение поверхности) целесообразно производить непосредственно перед реализацией метода.

Алгоритм (1) реализуется за 10 шагов.

1) Если на выходе антенны формируется веер пространственных каналов (ПК) и сигнал источника наблюдается в нескольких ПК, выбирается ПК с наибольшим ОСП, и сигнал на его выходе подвергается циклическому корреляционному анализу. Если сигнал источника наблюдается в единственном ПК, КФ вычисляются на выходе этого ПК. На каждом цикле корреляционного анализа вычисляется последовательность из 5–10 накопленных КФ с параметрами: полоса частот 1–5 кГц, длина реализации порядка 1 с, количество накоплений порядка 10. В каждой накопленной КФ последовательности обнаруживаются КМ и помещаются в единый массив. Если количество элементов  $K$  в этом массиве на данном цикле оказалось равным нулю, начинается новый цикл измерения последовательности КФ. При  $K > 0$  осуществляется переход на следующий шаг алгоритма.

2) Описанным выше способом (формулы (2)–(4)) определяются границы области в пространстве  $[R, H]$ , в которых будет осуществляться поиск решения.

3) Организуется перебор положений ИС в данной области с шагами по дальности и глубине, на которых конгруэнцию лучей в данных гидроакустических условиях можно считать постоянной.

4) Для каждого положения ИС, описываемого координатами  $R, H$ , формируется массив лучей в вертикальной плоскости, вышедших из источника.

5) Путем вычисления с использованием стандартной лучевой программы траектории каждого

луча из сформированного массива выделяется совокупность лучей, попавших в ПК, на выходе которого была вычислена КФ. Все дальнейшие процедуры реализуются с этой совокупностью лучей.

6) Для каждой пары лучей рассчитывается ОСП КМ, который эти лучи формируют в КФ [17, 18]:

$$Q_{T_{i,j}} = \left[ 2N \Delta f \Delta T \frac{r_{ij}^2 S_i S_j}{(S_s + S_n)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где  $\Delta f$ ,  $\Delta T$  – полоса частот и длительность сигнала, используемые для вычисления КФ;  $N$  – количество осредняемых реализаций КФ;  $S_s$ ,  $S_n$  – мощности соответственно суммарных сигнала и помехи на выходе ПК;  $S_i$  – мощность на выходе ПК сигнала, пришедшего по  $i$ -му лучу;  $r_{ij}$  – коэффициент когерентности сигналов, пришедших по  $i$ -му и  $j$ -му лучам, вычисляемый по эмпирической формуле:

$$r_{ij} = \max \left( 0; 1 - \frac{T_{i,j}(R, H)}{\Delta T} \right) \times 10^{-s_m(m_i+m_j) - s_n(n_i+n_j)}, \quad (6)$$

в которой  $T_{i,j}(R, H)$  – модуль относительного запаздывания  $i$ -го и  $j$ -го лучей на входе приемной антенны;  $m_i, n_i$  – количество отражений  $i$ -го луча от поверхности и дна соответственно при распространении от ИС до приемной антенны;  $s_m, s_n$  – эмпирические коэффициенты ( $s_m, s_n = 0.03, \dots, 0.06$ ).

Заметим, что формула (6) учитывает тот факт, что наибольшее влияние на величину коэффициента когерентности лучей оказывает их относительное запаздывание, отнесенное к интервалу времени, на котором измеряется КФ, а также количество отражений лучей от границ волновода.

7) Пары лучей, для которых  $Q_{T_{i,j}} < Q_{\text{пор}}$ , где  $Q_{\text{пор}}$  – пороговое ОСП для обнаружения КМ в КФ, исключаются из дальнейшего рассмотрения.

8) Для каждого  $k$ -го КМ, обнаруженного в КФ, из оставшихся пар лучей определяется та пара  $i, j$ , для которой разность  $\Delta \tau_k = |\hat{\tau}_k - T_{i,j}(R, H)|$  минимальна. Эта минимальная разность  $\Delta \tau_{k, \min}$  сравнивается с пороговым значением  $\Delta \tau_{\text{пор}}$ , рассчитываемым по формуле:

$$\Delta \tau_{\text{пор}} = (2-3) \sqrt{\sigma_{\hat{\tau}_k}^2 + \sigma_{T_{i,j}}^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{T_{i,j}}$  – СКО вычисления относительного запаздывания лучей, обусловленная неточным знанием характеристик гидроакустических условий и их флуктуациями ( $\sigma_{T_{i,j}} = (0.01-0.05)R_{\text{км}}$  мс).

Если минимальная разность  $\Delta \tau_{k, \min}$  меньше порогового значения  $\Delta \tau_{\text{пор}}$ , то соответствующая ей пара лучей  $(i, j)_k$  приписывается  $k$ -му обнару-

женному КМ. В противном случае фиксируется отсутствие пар лучей, соответствующих  $k$ -му КМ.

В результате выполнения описанной процедуры для всех КМ, обнаруженных в последовательности КФ, для текущего положения ИС определяется и запоминается в памяти вычислителя количество КМ в КФ  $L(R, H)$ , для которых определены соответствующие им пары лучей.

9) После завершения перебора всех положений ИС в области пространства  $[R, H]$  выбираются те, которым соответствует максимальное значение  $L(R, H)$  и при этом одна из этих пар лучей соответствует КМ в КФ с максимальным ОСП.

10) Если таких точек в выбранной области пространства  $[R, H]$  найдено несколько, то в качестве МП-оценок координат на текущем цикле измерения последовательности КФ принимаются все эти точки, а далее организуется их трассировка во времени, в ряде случаев позволяющая отсеять ложные точки. Если и в результате трассировки решение осталось многозначным, единственное решение определяется осреднением координат трассируемых точек либо привлекается дополнительная информация для выбора одной из точек.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Моделирование осуществлялось в 2 этапа. На 1-м этапе оценивалась потенциальная точность рассматриваемого метода в типовых гидроакустических условиях (ГАУ) при большом ОСП на выходе приемной антенны и в предположении, что все параметры, описывающие ГАУ, точно известны. На 2-м этапе оценивалось влияние на точность рассматриваемого метода ОСП сигнала на выходе приемной антенны, а также неточного знания параметров, описывающих ГАУ.

Моделирование осуществлялось для трех типов ГАУ (рис. 3):

– условий ДЗАО при нахождении ИС в ближней и в одной из дальней зон. Данные ГАУ являются наиболее благоприятными для рассматриваемого метода, поскольку распространение сигнала в них характеризуется малым числом лучей, достигающих приемную антенну, и малым числом их отражений от границ волновода, что обеспечивает высокое ОСП КМ в КФ;

– условий сплошной акустической освещенности (САО) в глубоком море. Данные ГАУ являются менее благоприятными для рассматриваемого метода, поскольку распространение сигнала в них характеризуется большим числом отражений сигнала от поверхности моря, что ведет к потере когерентности лучей;

– условий САО в мелком море. Данные ГАУ являются еще менее благоприятными для рассматриваемого метода, поскольку к отражениям

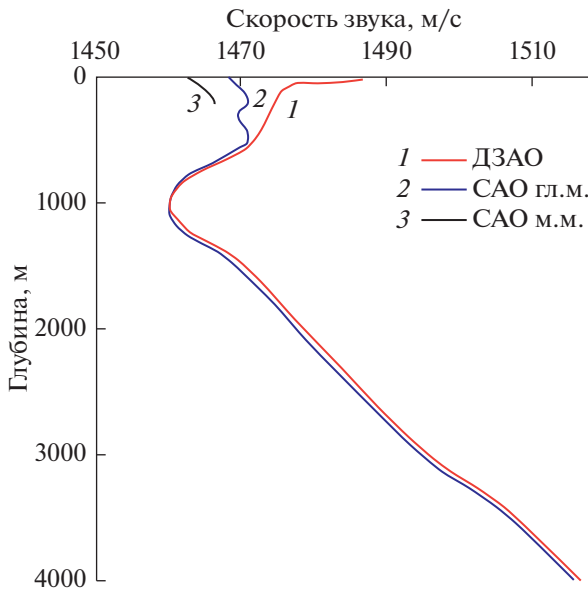


Рис. 3. Варианты вертикального распределения скорости звука, для которых осуществлялось моделирование.

от поверхности моря добавляются отражения от дна, что ведет к еще большей потере когерентности лучей.

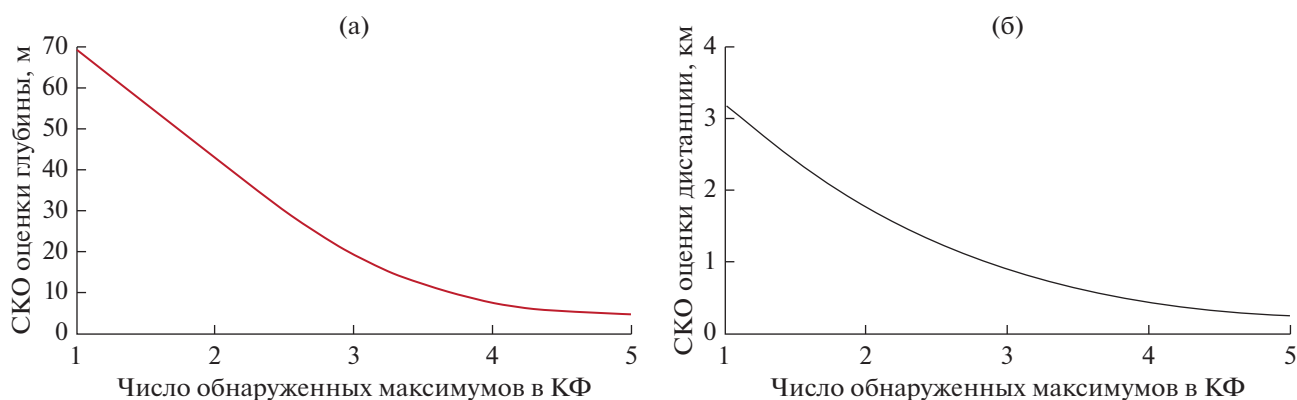
Результаты, полученные на 1-м этапе моделирования, приведены в табл. 3. Поиск координат ИС для всех рассмотренных вариантов осуществлялся: по глубине – в диапазоне 5–300 м; по дистанции: в условиях САО – на интервале  $\pm 30\%$  от истинной дистанции (т.е. предполагалось, что с точностью  $\pm 30\%$  дистанция до ИС может быть определена описанным выше пассивным методом); в условиях ДЗАО – в расчетных границах ДЗАО (при этом был рассмотрен вариант, когда при нахождении ИС в 1-й ДЗАО поиск решения осуществлялся в интервале от начала 1-й ДЗАО до конца 2-й ДЗАО).

Анализ табл. 3 приводит к следующим выводам:

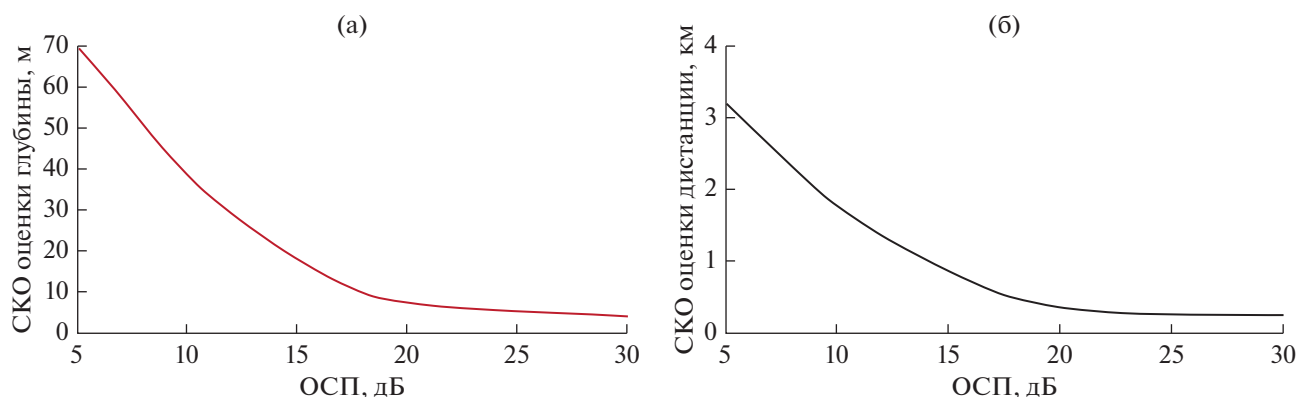
– в условиях ДЗАО при нахождении ИС в одной из дальних зон, а также в условиях САО в глубоком море координаты ИС потенциально могут быть определены однозначно и с пренебрежимо малыми ошибками. Однако необходимо заметить, что этот вывод справедлив, если количество

Таблица 3. Результаты 1-го этапа моделирования

| Истинные координаты ИС                                      |         | Границы области поиска решения |            | ОСП на выходе антенны, дБ | Максимальное значение $L(R, H)$ | Количество КМ в КФ | СКО МП-оценок координат ИС |         |
|---|---------|--------------------------------|------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------------|---------|
| $R$ , км  | $H$ , м | по $R$ , км                    | по $H$ , м |                           |                                 |                    | $R$ , км                   | $H$ , м |
| Условия ДЗАО, глубина приемной антенны 300 м                |         |                                |            |                           |                                 |                    |                            |         |
| а) ближняя ЗАО  |         |                                |            |                           |                                 |                    |                            |         |
| 7   | 200     | 1–11                           | 5–300      | 20                        | 3                               | 3                  | 0.01                       | 2       |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 3                  | 0.02                       | 10      |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 3                  | 0.5                        | 40      |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 3                  | 0.3                        | 100     |
| б) 1-я ДЗАО   |         |                                |            |                           |                                 |                    |                            |         |
| 50  | 200     | 35–50                          | 5–300      | 20                        | 7                               | 7                  | 0.02                       | 3       |
| 50  | 200     | 35–120                         | 5–300      | 20                        | 7                               | 7                  | 0.021                      | 3       |
| в) 2-я ДЗАО   |         |                                |            |                           |                                 |                    |                            |         |
| 97  | 200     | 85–120                         | 5–300      | 20                        | 8                               | 8                  | 0.01                       | 2       |
| Условия САО в глубоком море, глубина приемной антенны 300 м |         |                                |            |                           |                                 |                    |                            |         |
| 50  | 200     | 35–65                          | 5–300      | 20                        | 7                               | 7                  | 0.02                       | 3       |
| 97  | 200     | 85–115                         | 5–300      | 20                        | 9                               | 9                  | 0.01                       | 2       |
| Условия САО в мелком море, глубина приемной антенны 50 м    |         |                                |            |                           |                                 |                    |                            |         |
| 30  | 100     | 20–40                          | 5–180      | 20                        | 4                               | 4                  | 0.4                        | 2       |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 4                  | 9.8                        | 3       |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 4                  | 6.7                        | 40      |
| 30  | 5       | 20–40                          | 5–180      | 20                        | 5                               | 5                  | 5.2                        | 2       |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 5                  | 4.4                        | 5       |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 5                  | 5.7                        | 15      |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 5                  | 6.3                        | 55      |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 5                  | 4.5                        | 95      |
|   |         |                                |            |                           |                                 | 5                  | 3.8                        | 115     |



**Рис. 4.** Зависимость СКО оценок координат ИС от количества обнаруженных КМ в КФ, для которых определены соответствующие им пары лучей: (а) – СКО оценки глубины; (б) – СКО оценки дистанции.



**Рис. 5.** Зависимость СКО оценок координат ИС от ОСР на выходе приемной антенны: (а) – СКО оценки глубины; (б) – СКО оценки дистанции.

КМ в КФ  $L(R, H)$ , для которых определены соответствующие им пары лучей, достаточно велико (более пяти). При меньших значениях  $L(R, H)$  решение задачи становится многозначным и, как следствие, ошибки определения координат ИС существенно возрастают (рис. 4);

– в условиях ДЗАО при нахождении ИС в ближней зоне, а также в условиях САО в мелком море координаты ИС даже потенциально имеют многозначные оценки с большими СКО.

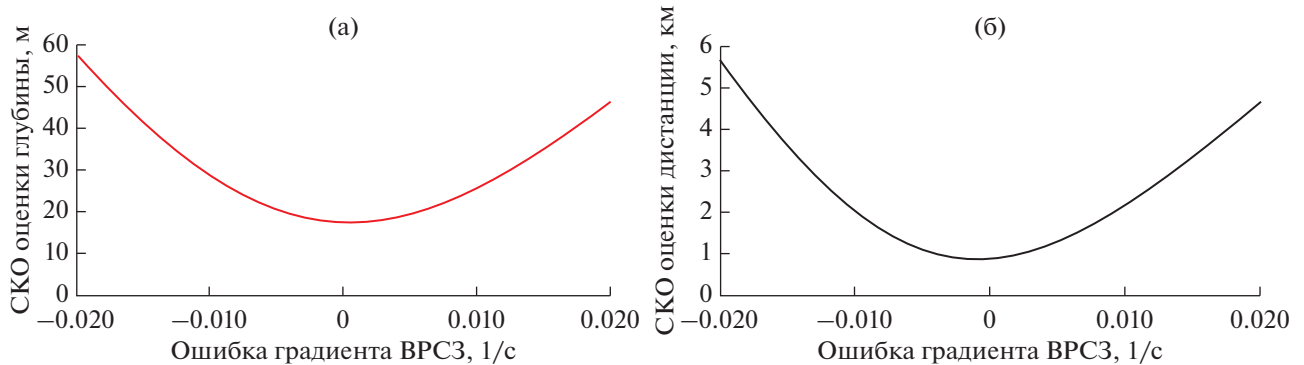
Таким образом, можно заключить, что рассматриваемый метод определения координат ИС потенциально применим только в условиях глубокого моря и только на относительно больших дистанциях.

Теперь рассмотрим, как ведут себя оценки координат ИС в реальных условиях работы, под которыми понимаются различные значения ОСР на выходе антенны, а также неточное знание характеристик текущих гидроакустических условий (в первую очередь, ВРСЗ).

На рис. 5 приведены зависимости СКО оценок координат ИС от ОСР на выходе приемной антенны, соответствующие приведенному в табл. 3 варианту нахождения ИС в 1-й ДЗАО, посчитанные при условии точного знания характеристик текущих гидроакустических условий. При этом следует заметить, что, начиная с ОСР 10–15 дБ, оценки становятся многозначными и в качестве решения задачи принимается среднее значение всех полученных оценок. Из рассмотрения рис. 5 следует, что, начиная с ОСР 15 дБ, с уменьшением ОСР ошибки координат быстро увеличиваются.

На рис. 6 для того же варианта нахождения ИС в 1-й ДЗАО показаны зависимости СКО оценок координат ИС, полученных при большом ОСР в условиях неточного знания ВРСЗ. При моделировании рассматриваемого алгоритма истинное ВРСЗ искажалось одновременно двумя способами:

– в него вносились флуктуационные ошибки измерения глубины и скорости звука с нулевыми средними значениями и СКО, равными 1 м и 1 м/с соответственно;



**Рис. 6.** Зависимость SKO оценок координат ИС от ошибки в знании градиента ВРСЗ: (а) – SKO оценки глубины; (б) – SKO оценки дистанции.

– искажался градиент ВРСЗ в интервале  $-0.02$ – $0.02$   $\text{с}^{-1}$ .

Из рассмотрения рис. 6 следует:

– при внесении только флуктуационных ошибок (точки на рис. 6, соответствующие нулевой абсциссе) SKO оценки глубины ИС возрастает до 17 м, SKO оценки дистанции – до 0.9 км;

– при искажении градиента истинного ВРСЗ в дополнение к флуктуационным ошибкам SKO оценок дистанции и глубины ИС возрастают значительно.

Отсюда следует естественный вывод, что для применения рассматриваемого метода на практике ВРСЗ нужно измерять достаточно точно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен алгоритм определения координат (дистанции и глубины) источника широкополосного сигнала (ИС), использующий в качестве входных данных параметры корреляционных максимумов (КМ) в корреляционной функции (КФ) сигнала на выходе приемной гидроакустической антенны. Предложен ряд алгоритмических мер, позволяющих частично преодолеть негативные факторы, влияющие на точность алгоритма при работе в реальных условиях.

Путем имитационного моделирования показано, что в условиях глубокого моря при достаточно больших дистанциях до ИС разработанный алгоритм потенциально (т.е. при достаточно точном знании текущих характеристик гидроакустических условий, большом ОСП на выходе приемной антенны и обнаружении в КФ не менее пяти КМ) обеспечивает высокоточную однозначную оценку координат ИС. В условиях мелкого моря, а также на малых дистанциях в глубоком море оценки координат ИС с использованием разработанного алгоритма характеризуются многозначностью с большим разбросом значений.

Путем моделирования получены зависимости точности оценки координат ИС в зависимости от количества обнаруженных КМ в КФ, ОСП на выходе приемной антенны, точности измерения вертикального распределения скорости звука.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-08-00253-а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bucker H.P.* Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sources in shallow water // *J. Acoust. Soc. Am.* 1976. V. 59. № 2. P. 368–373.
2. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A., Schmidt H.* Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem // *J. Acoust. Soc. Am.* 1988. V. 83. P. 571–587.
3. *Baggeroer A.B., Kuperman W.A.* Matched Field Processing in Ocean Acoustics / In: *Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration*. Ed. Moura J.M.F., Loutrier I.M.G. Kluwer Publishing, 1993. P. 79–114.
4. *Tolstoy A.* Matched Field Processing for Ocean Acoustics. New Jersey: World Scientific Publishing Co., 1993.
5. *Зуйкова Н.В., Свет В.Д.* Согласованная обработка сигналов в океанических волноводах // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. № 3. С. 389–403.
6. *Porter M.D., Tolstoy A.* The matched field processing benchmark problems // *J. Computational Acoustics.* 1994. № 3. P. 161–185.
7. *Сазонтов А.Г., Малеханов А.И.* Согласованная пространственная обработка сигналов в подводных звуковых каналах (обзор) // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 2. С. 233–253.
8. *Baggeroer A.B.* Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? // *Proc. the 1st Int. Conf. and Exhibition on Underwater Acoustics*. Corfu Island, Greece: Heraklion, 2013. P. 41–49.
9. *Орлов Е.Ф., Фокин В.Н., Шаронов Г.А.* Исследование параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в глубоком океане // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 5. С. 902–907.



10. *Лазарев В.А., Орлов Е.Ф., Фокин В.Н., Шаронов Г.А.* Частотная зависимость параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в мелком море // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 4. С. 685–688.
11. *Hassab I.C.* Contact Localization and Motion Analysis in the Ocean Environment: a Perspective // IEEE J. Oceanic Engineering. 1983. V. OE-8. № 3. P. 136–147.
12. *Quazi A.H., Lerro D.T.* Passive localization using time-delay estimates with sensor positional errors // J. Acoust. Soc. Am. 1985. V. 78. № 5. P. 1664–1670.
13. *Worthmann B.M., Song H.C., Dowling D.R.* High frequency source localization in a shallow ocean sound channel using frequency difference matched field processing // J. Acoust. Soc. Am. 2015. V. 138. P. 3549.
14. *Михнюк А. Н.* Определение координат источника звука с помощью согласованных с морским волноводом алгоритмов обработки сигналов // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 3. С. 401–406.
15. *Каришнев Н.С., Кузнецов Г.Н., Луньков А.А.* Обнаружение малошумного источника сигнала и оценка его координат в мелком море с использованием скалярной или векторно-скалярной антенн и согласованной фильтрации // Гидроакустика. 2014. Вып. 20(2). С. 74–84.
16. *Кузнецов Г.Н., Михнюк А.Н., Смирнов Н.М., Полканов К.И.* Использование буксируемого векторно-скалярного модуля и согласованной фильтрации для однозначной оценки координат широкополосного источника в пассивном режиме // Гидроакустика. 2015. Вып. 24(4). С. 36–51.
17. *Машошин А.И.* Помехоустойчивость выделения максимумов в корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением сигнала в водной среде // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 823–829.
18. *Машошин А.И.* Исследование условий применимости корреляционной функции широкополосного многолучевого сигнала для оценки координат источника // Акуст. журн. 2017. Т. 63. № 3. С. 307–313.
19. *Хилько А.И., Смирнов И.П., Машошин А.И., Шафранюк А.В.* Исследование когерентности акустических полей высокочастотных шумовых источников в случайно неоднородной среде // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 2. С. 217–227.