

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ТЕКУЩИХ И СОХРАНЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАЛЬНОСТЕЙ ОТ МЕНЕЕ ЧЕМ ТРЕХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ

В.В. Богомолов

Разработан рекуррентный алгоритм определения координат автономного необитаемого подводного аппарата с использованием разномоментных измерений дальностей до гидроакустических маяков, лага и курсоуказателя при неизвестных априорных координатах подводного аппарата. Число одновременно используемых маяков может быть произвольным, но есть по крайней мере один момент, в который измерения поступают от не менее чем трех маяков. В этот момент для получения начальной точки линеаризации измерений используется приближенный аналитический способ. Предполагается, что в предшествующие моменты измерения сохранены для последующей обработки. В алгоритме используются два фильтра, параллельно обрабатывающие сохраненные и текущие измерения. Результаты двух фильтров комплексуются с применением так называемых фиктивных измерений. Представлены результаты моделирования и обработки натуральных данных, подтверждающие эффективность разработанного алгоритма.

Ключевые слова: Фильтр Калмана, автономный необитаемый подводный аппарат, система числения, байесовские методы оценивания, гидроакустические маяки

Введение

Успешность выполнения автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) поставленных задач зависит от точности навигационных определений. На борту АНПА применяются системы числения пути на основе автономных датчиков, но без коррекции ошибки числения нарастают со временем. Для коррекции систем числения могут применяться измерения дальностей до гидроакустических маяков [1–12]. Эффективность такой коррекции зависит от количества приемников и гидроакустических маяков, геометрических особенностей их расположения, а также математических подходов, используемых при обработке измерений. В настоящей работе речь идет об одном из таких методов получения корректирующей информации, а именно о методе длинной базы, в котором маяки разнесены друг от друга и от АНПА на значительное расстояние. Измерение дальности до

маяков формируется как произведение измеренного времени прохождения сигнала от маяка до АНПА на приближенную оценку скорости звука в воде. Измерения носят беззапросный характер. Шкалы времени маяков и АНПА синхронизированы. Координаты маяков считаются известными, тогда как априорные координаты АНПА неизвестны. Требуется найти координаты АНПА по серии накопленных разномоментных измерений дальностей до маяков с привлечением данных относительного лага и курсоуказателя с учетом стохастических свойств погрешностей измерителей. Случайный характер погрешностей измерений позволяет говорить о задаче байесовского оценивания, в которой, тем не менее, участвуют неизвестные детерминированные начальные значения координат АНПА.

Отметим, что при наличии достаточно точной для линеаризации измерений априорной информации о местоположении АНПА метод длинной базы

может быть реализован с помощью обобщенного или итерационного фильтров Калмана (ФК) [13–15, 21]. При значительной априорной неопределенности координат АНПА могут применяться более сложные Unscented ФК [14] или фильтр частиц [16–18]. Но поскольку в рассматриваемой задаче априорные координаты вообще отсутствуют, эти методы не применимы в чистом виде. Предлагаемое решение опирается на методы обработки линеаризованных измерений как наиболее простые для реализации, которые дополнены необходимыми для их корректного применения подготовительными действиями.

Для получения приемлемой точки линеаризации в момент t_0 , когда впервые появляются одномоментные измерения от трех или более маяков, здесь используется приближенный аналитический способ, предполагающий отсутствие погрешностей измерений. Чтобы не потерять полезную информацию, можно учесть сохраненные до момента t_0 измерения, а затем приступить к обработке измерений, поступивших после t_0 . Такое решение, использующее процедуру сглаживания в фиксированной точке [19], было исследовано в [20, 26]. Однако обработка большого числа сохраненных до момента t_0 измерений вызывает задержку. Чтобы ее избежать, измерения до и после момента t_0 предлагается обрабатывать параллельно с помощью двух фильтров. Первый фильтр в прямом времени обрабатывает текущие (поступающие в реальном времени) измерения, начиная с момента t_0 . Второй фильтр в обратном времени выполняет обработку сохраненных до момента t_0 измерений. Результаты первого фильтра корректируются по результатам второго до тех пор, пока не будут учтены все сохраненные измерения.

Настоящая статья опирается на материал, представленный в [27]. В статье изложены постановка и алгоритм решения задачи, приводятся результаты моделирования алгоритма по множеству случайных реализаций ошибок измерений, а также результаты обработки натурных данных.

■ Постановка задачи навигации АНПА

Для дискретных моментов времени $t_i, i = -N, \dots, 0, 1, 2, \dots$ на АНПА имеются измерения дальности до гидроакустических маяков, шкалы времени которых синхронизированы со шкалой времени АНПА

$$Y_i^j = T_i^j \hat{c}_0 = \sqrt{(x_i^j - x_i)^2 + (y_i^j - y_i)^2 + (z_i^j - z_i)^2} + \Delta c \cdot \tilde{T}_i^j + \delta_i + v_i^j, \quad (1)$$

где $j = 1..n_i$ – номер маяка из числа наблюдаемых на момент t_i ; x_i, y_i – неизвестные горизонтальные координаты АНПА в локальной прямоугольной системе координат с географической ориентацией осей (априорная информация о них отсутствует); x_i^j, y_i^j – известные горизонтальные координаты маяков; z_i^j, z_i – известные глубины маяков и АНПА; $\hat{c}_0, \Delta c$ – априорная оценка скорости распространения звука в воде и ее ошибка – постоянная величина со среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{\Delta c}$; T_i^j – измеренное время прохождения сигнала; \tilde{T}_i^j – расчетное время прохождения сигнала; δ_i – общая для всех маяков и v_i^j – некоррелированная для разных маяков белом шумные ошибки с СКО σ_δ, σ_v . Предполагается, что на борту АНПА используется система счисления по измерениям продольной и поперечной составляющих скорости относительного лага с инструментальными белом шумными ошибками, СКО которых при осреднении на интервале l с обозначим как $\sigma_{\Delta v}$ и показаниям курсоуказателя, например магнитного компаса, с ошибкой ΔK , представляющей собой стационарный марковский процесс первого порядка с СКО $\sigma_{\Delta K}$ и интервалом корреляции $\tau_{\Delta K}$. При счислении используются значения географических составляющих скорости течения с ошибками $\Delta U^x, \Delta U^y$ в виде стационарных марковских процессов первого порядка с СКО $\sigma_{\Delta U}$ и интервалом корреляции $\tau_{\Delta U}$. Все указанные ошибки считаются гауссовскими центрированными величинами. Далее под номерами i дискретных моментов времени будем понимать сами моменты t_i .

Предполагается (см. рис. 1), что для $i < 0$ имеются измерения от не более чем двух маяков, а для $i = 0$ – от не менее чем трех маяков, горизонтальные координаты которых x_0^j, y_0^j не лежат на одной прямой, т.е. $n_i \leq 2$

при $i < 0, n_0 \geq 3, \text{rank} \begin{pmatrix} x_0^1 & \dots & x_0^{n_0} \\ y_0^1 & \dots & y_0^{n_0} \\ 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} = 3$. Количество

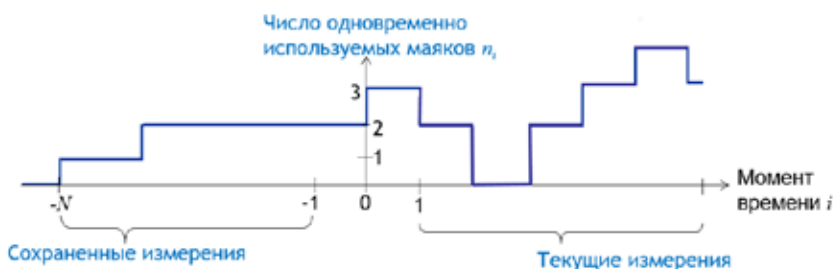


Рис. 1. Диаграмма числа одновременно используемых маяков

используемых маяков для $i > 0$ не оговаривается.

Требуется определить горизонтальные координаты АНПА x_i, y_i для моментов $i \geq 0$ по всем доступным измерениям (1). Задача сводится к оцениванию вектора

состояния $X_i = [x_i \ y_i \ \Delta c \ \Delta K_i \ \Delta U_i^x \ \Delta U_i^y]^T$ по измерениям Y_{-N}, \dots, Y_i , где $Y_i = (Y_i^1, \dots, Y_i^{n_i})^T$. Уравнения для координат имеют вид:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + \left(\begin{aligned} &(\tilde{V}_{\xi,i} \cos(\tilde{K}_i) - \tilde{V}_{\eta,i} \sin(\tilde{K}_i)) \Delta K_i + \\ &+\tilde{V}_{\xi,i} \sin(\tilde{K}_i) + \tilde{V}_{\eta,i} \cos(\tilde{K}_i) + \tilde{U}_i^x + \Delta U_i^x \end{aligned} \right) \Delta t_i + w_{x,i}, \\ y_i &= y_{i-1} + \left(\begin{aligned} &(-\tilde{V}_{\xi,i} \sin(\tilde{K}_i) - \tilde{V}_{\eta,i} \cos(\tilde{K}_i)) \Delta K_i + \\ &+\tilde{V}_{\xi,i} \cos(\tilde{K}_i) - \tilde{V}_{\eta,i} \sin(\tilde{K}_i) + \tilde{U}_i^y + \Delta U_i^y \end{aligned} \right) \Delta t_i + w_{y,i}. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнениях (2) $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$, $\tilde{V}_{\xi}, \tilde{V}_{\eta}$ – измеренные лагом значения продольной и поперечной составляющих скорости, \tilde{K} – измеренное значение курса, \tilde{U}^x, \tilde{U}^y – приближенные географические составляющие скорости течения, w_x, w_y – порожденные шумами лага белозумные ошибки координат с СКО $\sigma_w = \sigma_{\Delta V} \cdot \Delta t_i$.

■ Описание алгоритма решения

Обработка измерений в момент запуска решения ($i=0$)

Начальная точка \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 для линеаризации измерений дальности определяется аналитическим способом, подобно тому, как это делается в [9, 22, 23], путем решения системы из $(n_0 - 1)$, т.е. двух и более линейных уравнений:

$$\begin{aligned} &2\tilde{x}_0(x_0^1 - x_0^j) + 2\tilde{y}_0(y_0^1 - y_0^j) = \\ &= (Y_0^j)^2 - (Y_0^1)^2 - (x_0^j)^2 + (x_0^1)^2 - \\ &- (y_0^j)^2 + (y_0^1)^2 - (z_0^j - z_0)^2 + (z_0^1 - z_0)^2, \\ &j = 2 \dots n_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Эта система получена из разностей квадратов измерений (1) от гидроакустических маяков в предположении, что помехи измерений δ_0, ν_0^j и ошибка Δc нулевые. При горизонтальных координатах маяков, не лежащих на одной прямой (это оговорено по условию задачи), система (3) разрешима. В случае $n_0 > 3$ имеем избыточную систему уравнений, для решения которой применяется метод наименьших квадратов или псевдоинверсия.

Для вектора, включающего $x_0, y_0, \Delta c$, формируется априорная оценка $\tilde{\chi} = [\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, 0]^T$. Обратная ковариаци-

онная матрица ошибки этой оценки задается

$$\text{в виде } \tilde{P}_{\chi}^{-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sigma_{\Delta c}^2 \end{pmatrix}. \text{ Такая } \tilde{P}_{\chi}^{-1} \text{ пред-}$$

полагает бесконечно большие ошибки оценок \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 . Опираясь на $\tilde{\chi}, \tilde{P}_{\chi}^{-1}$, теперь уже с учетом стохастических свойств δ_0, ν_0^j и Δc , рассчитываются оценка $\hat{\chi}$ и ковариационная матрица P_{χ} . На этом этапе используются линеаризованное представление измерений $Y_0^j, j=1 \dots n_0$ и итерационный алгоритм их обработки [21]. Для последующей фильтрации формируются оценка вектора состояния $\hat{X}_{0/0} = [\hat{\chi}, 0, 0, 0]$ и ковариационная матрица ее ошибок $P_{0/0} = \begin{pmatrix} P_{\chi} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Theta \end{pmatrix}$,

$$\text{где } \Theta = \begin{pmatrix} \sigma_{\Delta K}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta U}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta U}^2 \end{pmatrix}.$$

Параллельная обработка текущих ($i > 0$) и сохраненных ($i < 0$) измерений

Как уже отмечалось во введении, для учета сохраненных до момента $i=0$ измерений можно использовать алгоритм, рассмотренный в работах [20, 26], который опирается на процедуру сглаживания в фиксированной точке [19]. Но обработка большого числа сохраненных в этом алгоритме до момента $i=0$ измерений может вызвать задержку, т.е. помешать своевременной обработке текущих измерений. Для преодоления этой проблемы предлагается проводить обработку измерений до и после момента $i=0$ параллельно с помощью двух рекуррентных фильтров в прямом и обратном времени. При этом результаты фильтра, работающего в прямом времени, корректируются по результатам фильтра, обрабатывающего сохраненные измерения в обратном времени, с использованием так называемых фиктивных измерений [24].

Для пояснения этого алгоритма на рис. 2 приведена схема преобразований гауссовских аппроксимаций апостериорных плотностей $f(X_i | Y_j, \dots, Y_l)$, условных по отношению к измерениям $Y_j, \dots, Y_l, i \geq -N$, происходящим на разных этапах работы алгоритма. Непосредственно в алгоритме вырабатываются оценки и ковариационные матрицы их ошибок, которые определяют гауссовские аппроксимации апостериорной плотности X_i .

После получения в момент $i=0$ оценки $\hat{X}_{0/0}$ и ковариационной матрицы $P_{0/0}$ (см.



Рис. 2. Схема преобразования гауссовских аппроксимаций апостериорных плотностей при параллельной обработке текущих и сохраненных измерений

предыдущий раздел) запускаются два ФК. Один фильтр в прямом времени (см. на схеме горизонтальные стрелки вправо) оценивает расширенный вектор состояния $\bar{X}_i = [X_0^T \ x_i \ y_i \ \Delta K_i \ \Delta U_i^x \ \Delta U_i^y]^T$ по текущим измерениям, а другой – в обратном времени (см. на схеме горизонтальные стрелки влево) оценивает расширенный вектор состояния $\bar{X}_{-i} = [X_0^T \ x_{-i} \ y_{-i} \ \Delta K_{-i} \ \Delta U_{-i}^x \ \Delta U_{-i}^y]^T$ в ходе обработки сохраненных до $i=0$ измерений. Обращаем внимание, что расширенные векторы \bar{X}_i и \bar{X}_{-i} образованы из X_0, X_i и X_0, X_{-i} с исключением дублирования Δc . По результатам работы фильтра в обратном времени, а именно оценке $\hat{x}_{0/i}$ начального вектора состояния и ковариационной матрицы ее ошибки $P_{0/i}$, полученным по измерениям Y_{-i}, \dots, Y_0 , формируется ковариационная матрица помех фиктивных измерений:

$$G_i = P_{0/0} (P_{0/0} - P_{0/i})^{-1} P_{0/0} - P_{0/0},$$

и сам вектор фиктивных измерений

$$\varphi_i = \hat{X}_{0/0} + (P_{0/0} + G_i) P_{0/0}^{-1} (\hat{X}_{0/i} - \hat{X}_{0/0}). \quad (4)$$

После чего полученные фильтром в прямом времени оценка $\hat{X}_{i/i}$ текущего вектора состояния X_i и ковариационная матрица ее ошибок $P_{i/i}$, которые

определены по измерениям Y_0, \dots, Y_i , уточняются путем обработки фиктивного измерения с помощью стандартной процедуры:

$$\hat{X}_i = \hat{X}_{i/i} + P_{(i,0)/i} (\Theta_i)^{-1} \Delta \varphi_i,$$

$$P_i = P_{i/i} - P_{(i,0)/i} (\Theta_i)^{-1} P_{(i,0)/i}^T,$$

где $\Delta \varphi_i = \varphi_i - \hat{X}_{0/i}$ – невязка фиктивного измерения, $\Theta_i = P_{0/i} + G_i$ – ковариационная матрица невязки, $\hat{X}_{0/i}, P_{0/i}$ – полученные фильтром в прямом времени оценка вектора X_0 с ковариационной матрицей ее ошибки, $P_{(i,0)/i}$ – вырабатываемая этим же фильтром матрица взаимных ковариаций ошибок оценок $\hat{X}_{i/i}$ и $\hat{X}_{0/i}$.

Метод фиктивных измерений был предложен в [24] для корректировки результатов ФК с таким расчетом, чтобы они соответствовали другим априорным данным о векторе состояния. При этом выполнять повторную обработку реальных измерений не требуется. В рассматриваемой задаче фиктивные измерения используются для быстрого преобразования результатов работы фильтра в прямом времени в результаты оценивания X_i по измерениям Y_{-i}, \dots, Y_i . Фиктивное измерение (4) предоставляет новую информацию о векторе X_0 , которая опирается на измерения для $i < 0$. Поскольку вектор X_0 коррелирован с текущим векто-

ром состояния X_i , при обработке φ_i уточняется оценка вектора X_i , полученная в прямом времени ($i > 0$).

Так как обработка измерений в прямом и обратном времени выполняется двумя независимыми фильтрами, работу этих фильтров можно реализовать с помощью технологии параллельных вычислений, что сократит время выполнения алгоритма. Вместе с обработкой текущего измерения Y_i можно обрабатывать не одно, как показано на рис. 2, а несколько измерений для $i < 0$. В отличие от рассмотренного в [20, 26] алгоритма, где текущие измерения Y_i для $i > 0$ обрабатываются после обработки всех Y_{-N}, \dots, Y_0 с применением процедуры сглаживания в фиксированной точке, здесь измерения для $i < 0$ учитываются постепенно, что позволяет получать уточненные оценки X_i с темпом поступления Y_i , т.е. в реальном времени.

После исчерпания всех имеющихся до момента $i=0$ измерений оценивать компоненты вектора \bar{X}_i , относящиеся к моменту $i=0$, не имеет смысла, поэтому с этого момента в алгоритме оценивается только X_i по вновь поступившим измерениям.

■ Результаты моделирования

Для проверки эффективности алгоритма моделировались случайные погрешности измерений

дальности, скорости и курса АНПА с параметрами $\sigma_\delta = 5$ м, $\sigma_v = 10$ м, $\sigma_{\Delta c} = 3$ м/с, $\sigma_{\Delta v} = 0.1$ м/с, $\sigma_{\Delta K} = 5^\circ$, $\sigma_{\Delta U} = 0.25$ м/с, $\tau_{\Delta U} = \tau_{\Delta K} = 3600$ с. Дискретность поступления измерений 1 с. Решение проводилось при прямолинейном движении АНПА со скоростью 5 м/с вблизи 5 маяков, расположенных как показано на рис. 3. Предельная дальность, на которой от маяков поступают измерения, принята равной 1 км. До момента $i=0$ запуска алгоритма измерения от 1–2 одновременно наблюдаемых маяков сохранялись на протяжении 600 с.

По 1000 реализациям погрешностей моделировались три алгоритма: 1) алгоритм, обрабатывающий только измерения для $i \geq 0$ (без сохраненных измерений до момента $i=0$), 2) алгоритм с обработкой всех сохраненных измерений до начала обработки текущих измерений [20, 26], 3) представленный выше алгоритм, в котором предусматривается обработка в обратном времени 10 измерений для $i < 0$ параллельно с обработкой в прямом времени одного текущего измерения. На рис. 4 для трех алгоритмов и начальной точки линеаризации измерений, т.е. оценок \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 , полученных путем аналитического решения (3) без учета ошибок измерений, приведены действительные (полученные по реализациям ошибок оценок) среднеквадратические погрешности (СКП) [25] координат. Внизу показан график номеров одновременно используемых маяков, на котором интервал, где про-

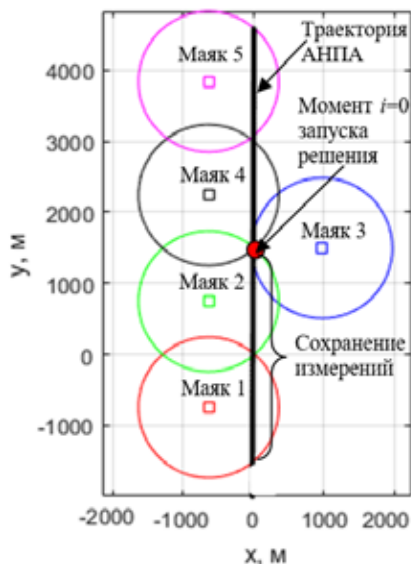


Рис. 3. Траектория движения АНПА и расположение маяков при моделировании. Окружности радиуса 1 км показывают границы доступных измерений от маяков

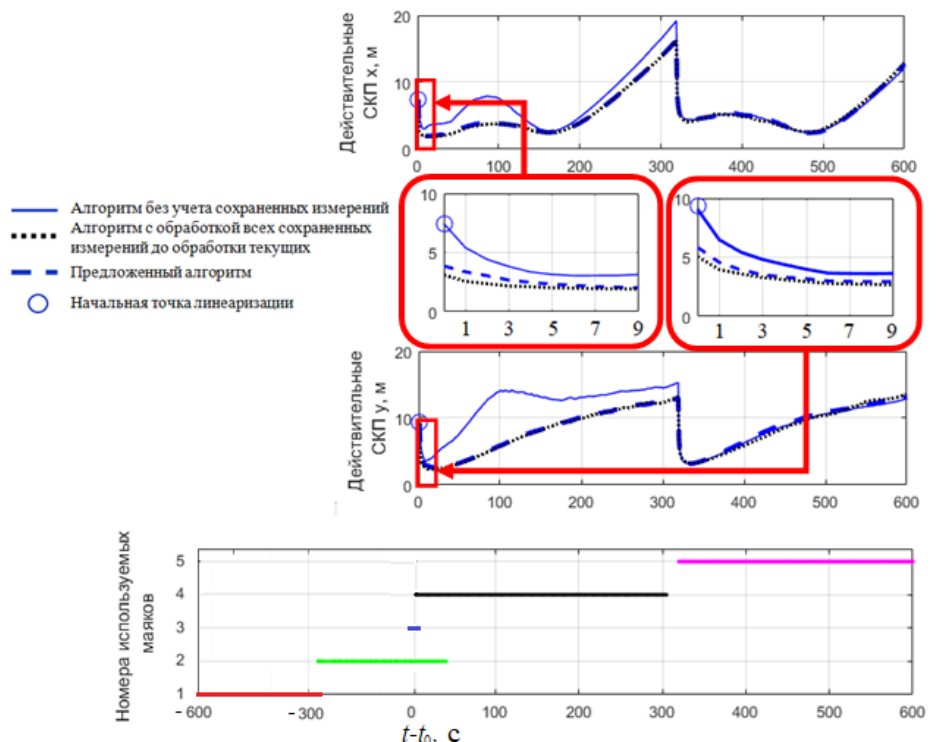


Рис. 4. Результаты моделирования алгоритмов

исходит сохранение измерений $[-600 \text{ с}, 0)$, представлен в сжатом виде.

Видно, что предложенный рекуррентный алгоритм, который может быть реализован с темпом поступления Y_i , не уступает по точности алгоритму, обрабатывающему сразу все сохраненные измерения до начала обработки текущих. Оба этих алгоритма имеют преимущество на протяжении 320 секунд перед алгоритмом, обрабатывающем только измерения для $i \geq 0$. В момент $t=320 \text{ с}$, как видно из нижнего графика, начинают поступать измерения от 5-го маяка и происходит значительное уточнение координат для всех алгоритмов. Для предложенного алгоритма разность действительных и расчетных (полученных по реализациям ковариационных матриц, вырабатываемых алгоритмом) СКП находится на уровне 0,5 м. Таким образом, алгоритм вырабатывает адекватную реальным ошибкам расчетную СКП.

СКП оценок \hat{x}_0, \hat{y}_0 в рассматриваемом случае близка к СКП стохастических решений. Это связано с благоприятной геометрией расположения маяков и АНПА в момент t_0 . При менее благоприятной геометрии расположения маяков и АНПА может использоваться сетка начальных точек линеаризации [20].

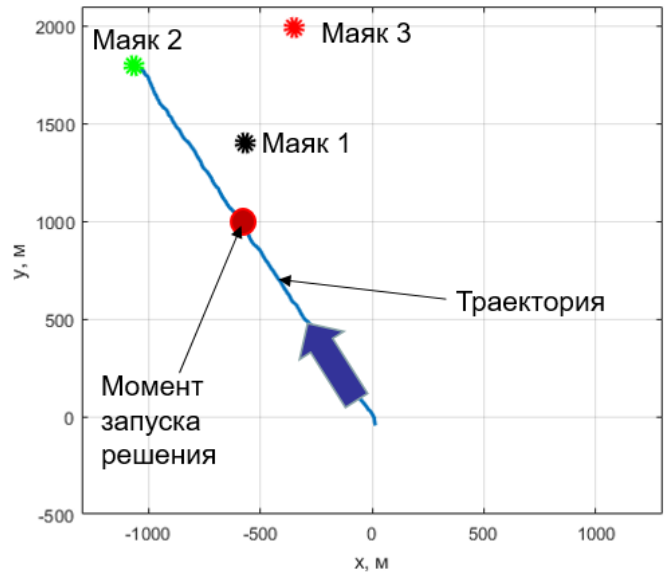


Рис. 5. Траектория движения АНПА и расположение маяков в натурном эксперименте

■ Результаты обработки натуральных данных

При проведении натуральных испытаний был использован катер с приемником спутниковой навигации и буксируемый подводный аппарат с гидроакустической системой. На полигоне размещались три гидроакустических маяка (см. рис. 5). Истинные коор-

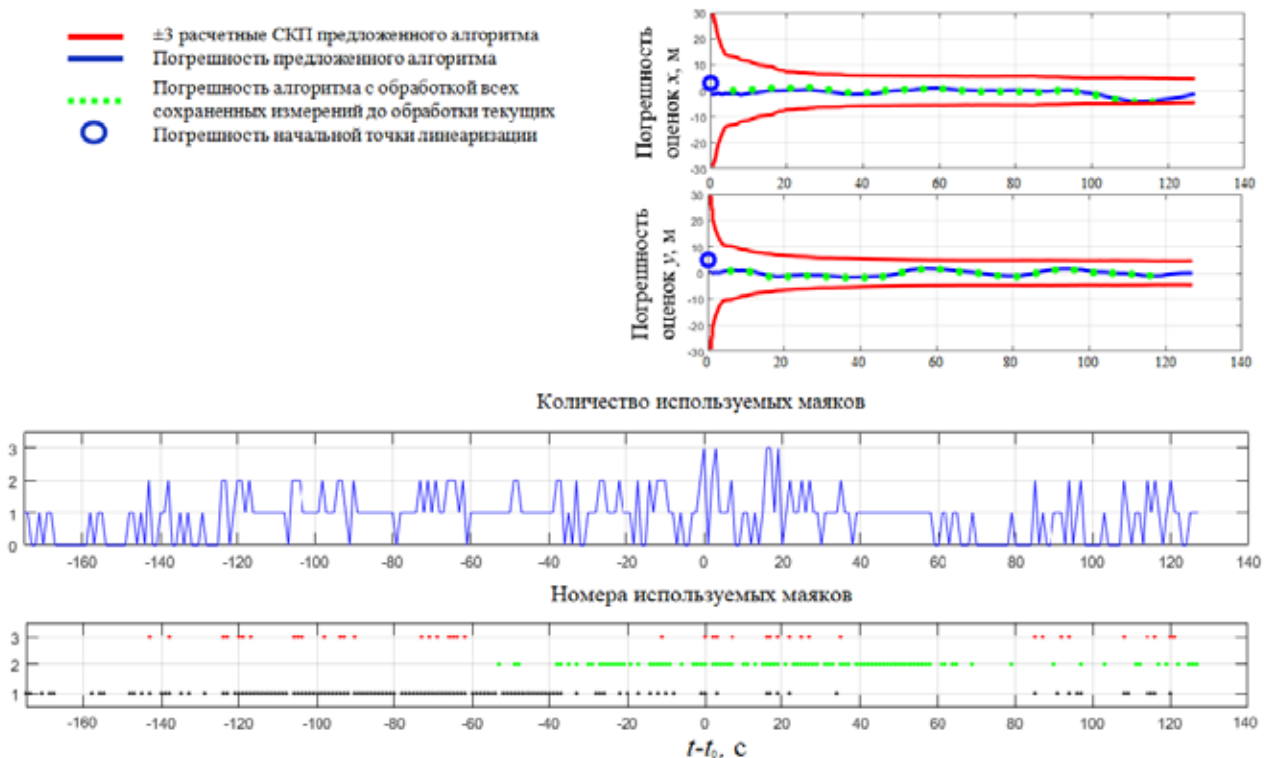


Рис. 6. Результаты апробации алгоритмов по натурным данным

динаты буксируемого аппарата рассчитаны на основе координат от приемника спутниковой навигации и известной длины кабель-троса. Для счисления использованы скорости от этого приемника, поэтому ошибки курса и течений отсутствуют и в задаче не оцениваются, а ошибки измерений дальности, скорости звука и скорости АНПА имеют СКО $\sigma_s = 5$ м, $\sigma_v = 7$ м, $\sigma_{\Delta c} = 3$ м/с, $\sigma_{\Delta v} = 0.1$ м/с. Дискретность поступления измерений 1 с. До момента $i=0$ запуска решения на протяжении 175 секунд сохранялись измерения от не более чем двух одновременно наблюдаемых маяков.

Из рис. 6 видно, что предложенный рекуррентный алгоритм с параллельной обработкой текущих и сохраненных измерений имеет такую же точность, что и алгоритм с обработкой всех сохраненных измерений до начала обработки текущих. Расчетная СКП предложенного алгоритма адекватно передает реальный уровень погрешности.

Заключение

Представлен рекуррентный алгоритм решения задачи определения координат АНПА с использованием разномоментных измерений дальностей до гидроакустических маяков, относительного лага и курсоуказателя при отсутствии априорных координат АНПА. Алгоритм запускается в момент, когда на АНПА впервые одновременно получены измерения от трех или более маяков, горизонтальные координаты которых не находятся на одной прямой. Для получения начальной точки линеаризации измерений применяется аналитический подход, не учитывающий погрешности измерений. Дальнейшая обработка измерений выполняется на основе байесовских методов оценивания с учетом стохастических свойств погрешностей измерителей. Текущие измерения и измерения, полученные до запуска алгоритма, обрабатываются параллельно с помощью отдельных фильтров в прямом и обратном времени. Оценки фильтра в прямом времени постепенно уточняются по результатам фильтра в обратном времени. Такой алгоритм может быть реализован в реальном времени. Результаты моделирования и обработки натурных данных показывают, что он практически не проигрывает в точности алгоритму, в котором сначала обрабатываются все полученные до запуска алгоритма измерения, а потом текущие измерения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00626, <https://rscf.ru/project/23-19-00626/>

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Paull L., Saeedi S., Seto M., Li H. AUV Navigation and Localization: A Review // *IEEE Journal of oceanic engineering*. 2014. Vol. 39, No. 1. P. 131–149. DOI 10.1109/JOE.2013.2278891.
2. Кеббал К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // *Гирроскопия и навигация*. 2016. №3. С. 115–130. DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.3.115-130.
3. Матвиенко Ю.В., Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Щербатюк А.Ф. Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов // *Изв. ЮФУ. Технические науки*. 2016. С. 123–141.
4. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб: Университет ИТМО, 2017. 196 с.
5. Sigiel N. Methods of autonomous underwater vehicles positioning // *Scientific journal of polish naval academy*. 2019. Vol. 1. P. 31–43. DOI 10.2478/sjpn-2019-0003.
6. González-García J., Gómez-Espinosa A., Cuan-Urquiza E., García-Valdovinos L.G., Salgado-Jiménez T., Cabello J.A.E. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation and Communication for Collaborative Missions // *Applied science*. 2020. Vol. 10. DOI 10.3390/app10041256.
7. Кошаев Д.А. Многоальтернативный алгоритм одноподводной навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 1. Математическое описание // *Гирроскопия и навигация*. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 109–130. DOI 10.17285/0869-7035.0035.
8. Щербатюк Д.А. Алгоритм навигационного обеспечения работы группы АНПА на основе фильтра частиц и разностно-дальномерной гидроакустической системы // *Подводные исследования и робототехника*, 2021. № 4 (38). С. 50–57. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_05.
9. Кошаев Д.А. Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // *Гирроскопия и навигация*. 2022. № 4. С. 122–141. DOI 10.17285/0869-7035.00107.
10. Машошин А.И., Пашкевич И.В. Алгоритмы позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата в процессе приведения и причаливания к подводному причальному устройству // *Гирроскопия и навигация*. 2023. Т. 31, № 1 (120). С. 103–119.
11. Грузликов А.М., Караулов В.Г., Мухин Д.А., Шалаев Н.А. Результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // *Изв. ЮФУ. Технические науки. Раздел 4. Связь, навигация и наведение*. 2023. С. 265–274. DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-265-274.
12. Пашкевич И.В., Мартынова Л.А. Метод уменьшения погрешности определения местоположения АНПА при посадке на подводное причальное устройство // *Сб. материалов XVIII Всерос. науч.-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления»*. Таганрог, 2023. С. 324–343.
13. Kepper J.H., Claus B.C., Kinsey J.C. A Navigation Solution Using a MEMS IMU, Model-Based Dead-Reckoning, and One-Way-Travel-Time Acoustic Range Measurements for Autonomous Underwater Vehicles // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2018. Vol. 44. P. 664–682. DOI 10.1109/JOE.2018.2832878.
14. Zhang X., Mu X., Liu H., He B., Yan T. Application of Modified EKF Based on Intelligent Data Fusion in AUV Navigation // *Proc. of the 2019 IEEE Underwater Technology (UT)*. Kaohsiung, Taiwan, 2019. P. 1–4. DOI 10.1109/UT.2019.8734414.
15. Li P., Li Z., Chen C., Chen J., Chen Z. A High-Precision Positioning Method for Autonomous Underwater Vehicles with Communication Delays // *Electronics*. 2024. Vol. 13(3). P. 466. DOI 10.3390/electronics13030466.
16. Maurelli F., Krupinski S., Petillot Y., Salvi J. A particle filter approach for AUV localization // *Proc. of the Conference: Oceans 2008*. Quebec City, QC, Canada, 2008. P. 1–7. DOI 10.1109/OCEANS.2008.5152014.
17. Sotiropoulos P., Tosi N., Andritsos F., Geffard F. Optimal docking pose and tactile hook-localisation strategy for AUV intervention: The

DIFIS deployment case // *Ocean Engineering*. 2012. Vol. 46. P. 33–45. DOI 10.1016/j.oceaneng.2012.02.005.

18. Menna B.V., Villar S.A., Acosta G.G. Particle Filter based Autonomous Underwater Vehicle Navigation System aided thru acoustic communication ranging // *Proc. of the Conference: Global Oceans 2020*. Singapore. U.S. Gulf Coast, Biloxi, MS, USA, 2020. P. 1–10. DOI 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389432.

19. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1977. С. 440.

20. Богомолов В.В. Оценка эффективности нелинейных навигационных решений по разномоментным измерениям дальности до гидроакустических маяков // *Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием*. Санкт-Петербург, 2022. С. 120–123.

21. Богомолов В.В. Анализ эффективности нелинейных решений задачи навигации подводных аппаратов // *Материалы XXIII конференции молодых ученых с международным участием*. Санкт-Петербург, 2021. С. 223–227.

22. Барабанов О.О., Барабанова Л.П. Математические задачи дальномерной навигации. М.: Физматлит, 2007. 272 с.

23. Деревянкин А.В., Матасов А.И. О конечном алгоритме определения местоположения объекта по разностям измерений псевдодальностей // *Гироскопия и навигация*. 2015. № 2. С. 106–117. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.2.106-117.

24. Кошаев Д.А. Метод фиктивных измерений для многоальтернативного оценивания процессов в линейной стохастической системе // *Автомат. и телемех.* 2016. № 6. С. 81–108. DOI 10.1134/S0005117916060060.

25. Степанов О.А., Исаев А.М. Методика сравнительного анализа рекуррентных алгоритмов нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации на основе предсказательного моделирования // *Гироскопия и навигация*. 2023. Т. 31, № 3 (122). С. 48–65.

26. Богомолов В.В., Кошаев Д.А. Алгоритм позиционирования подводного аппарата по измерениям дальности до маяков при их недостаточном для одномоментного навигационного решения количестве // *Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова*. Санкт-Петербург, 2022. С. 66–69.

27. Bogomolov V. AUV Positioning By The Ranges To Less Than Three Acoustic Beacons Based On Recursive Bayesian Estimation // *Proc. of the 2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS)*. Vladivostok, Russian Federation, 2023. P. 037–040. DOI 10.1109/ICOS60708.2023.10425637.

Справка об авторе

БОГОМОЛОВ Владимир Валентинович, младший научный сотрудник

АО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор”, Университет ИТМО

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30

Область научных интересов: разработка алгоритмов фильтрации применительно к задаче позиционирования АНПА

E-mail: bogomolov.v.v.@yandex.ru

Тел.: +7(981)789-53-64

ORCID: 0009-0001-7648-0384

Для цитирования:

Богомолов В.В. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ ТЕКУЩИХ И СОХРАНЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАЛЬНОСТЕЙ ОТ МЕНЕЕ ЧЕМ ТРЕХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ // *Подводные исследования и робототехника*. 2024. №. 2 (48). С. 58–67. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_07. EDN: TGEQGR.



AUV POSITIONING WITH SIMULTANEOUS PROCESSING OF SAVE AND CURRENT RANGES TO LESS THAN THREE ACOUSTIC BEACONS

V.V. Bogomolov

The paper presents a recursive algorithm for determining the coordinates of an autonomous underwater vehicle (AUV) using time-different ranges to the acoustic beacons with log and heading indicator aiding with unknown a priori coordinates of the underwater vehicle. Any number of beacons can be used simultaneously, but at least at one moment the measurements from minimum three beacons are available. At this moment the initial linearization point is obtained using an approximate analytical method. At all the previous moments the measurements are saved for further processing. The algorithm uses two filters parallelly processing the saved and current measurements. The solutions of the forward-time filter are updated by the backward-time filter data using the dummy measurements. The results of modeling and test this real data are presented, confirming the effectiveness of the developed algorithm.

Keywords: Kalman filter, autonomous underwater vehicle, dead reckoning system, Bayesian estimation methods, hydroacoustic beacons.

References

1. Paull, L., Saeedi, S., Seto M., Li H., AUV Navigation and Localization: A Review, IEEE Journal of oceanic engineering, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 131–149, DOI 10.1109/JOE.2013.2278891.
2. Kebkal K.G. and Mashoshin A.I., AUV acoustic positioning methods, Gyroscopy and Navigation, 2017, vol. 8, no. 1, DOI 10.17285/0869-7035.2016.24.3.115-130.
3. Matvienko Yu.V., Inzartsev A.V., Kiselev L.V., and Shcherbatyuk A.F., Prospects for improving efficiency autonomous underwater robots, Izvestiya YuFu. Tekhnicheskie nauki, 2016, pp. 123-141.
4. Stepanov O.A., Metody obrabotki navigatsionnoi izmeritelnoi informatsii (Methods of Navigation Measurement Data Processing), St. Petersburg: ITMO University, 2017.
5. Sigiel N., Methods of autonomous underwater vehicles positioning, Scientific journal of polish naval academy, 2019, vol. 1, pp. 31-43, DOI 10.2478/sjnpa-2019-0003.
6. González-García J., Gómez-Espinosa A., Cuan-Urquizo E., García-Valdovinos L.G., Salgado-Jiménez T. and Cabello J.A.E., Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions, Applied science. 2020, vol. 10, DOI 10.3390/app10041256.
7. Koshaev D.A., Multiple model algorithm for single-beacon navigation of autonomous underwater vehicle without its a priori position. Part 1. Mathematical formulation, Gyroscopy and Navigation, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 230-243, DOI 10.17285/0869-7035.0035.
8. Shcherbatyuk D.A., Algoritm navigacionnogo obespecheniya raboty gruppy ANPA na osnove fil'tra chastic i raznostno-dal'nomernej gidroakusticheskoy sistemy, Podvodnye issledovaniya i robototekhnika 2021. vol 4 (38), pp. 50-57, DOI: 10.37102/1992-4429_2021_38_04_05.
9. Koshaev D.A. AUV relative position and attitude determination using acoustic beacons. Gyroscopy and Navigation, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 262-276, DOI 10.17285/0869-7035.00107.
10. Mashoshin A.I. and Pashkevich I.V., AUV positioning algorithms used in its homing and docking to underwater docking station, Gyroscopy and Navigation, 2023, vol. 14, pp. 66-74.
11. Gruzlikov A.M., Karaulov V.G., Mukhin D.A., and Shalaev N.A., Results of testing the positioning algorithm and determining the orientation of the underwater vehicle based on data from hydro-acoustic beacons, Izvestiya YuFu. Tekhnicheskie nauki. Section 4. Communication, Navigation, and Guidance, 2023, pp. 265-274, DOI 10.18522/2311-3103-2023-1-265-274.
12. Pashkevich I.V., Martynova L.A., Metod umen'sheniya pogreshnosti opredeleniya mestopolozheniya ANPA pri posadke na podvodnoe prichal'noe ustrojstvo, Sbornik materialov XVIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya». 2023, pp. 334-343.
13. Kepper J.H., Claus B.C., Kinsey J.C. A Navigation Solution Using a MEMS IMU, Model-Based Dead-Reckoning, and One-Way-Travel-Time Acoustic Range Measurements for Autonomous Underwater Vehicles, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, V. 44, p. 664 – 682, DOI 10.1109/JOE.2018.2832878.
14. X. Zhang, X. Mu, H. Liu, B. He and T. Yan, Application of Modified EKF Based on Intelligent Data Fusion in AUV Navigation, Proc. of the 2019 IEEE Underwater Technology (UT), Kaohsiung, Taiwan, 2019, pp. 1-4, DOI 10.1109/UT.2019.8734414.
15. P. Li, Z. Li, C. Chen, J. Chen and Z. Chen, A High-Precision Positioning Method for Autonomous Underwater Vehicles with Communication Delays, Electronics 2024, Vol. 13(3), pp. 466, DOI 10.3390/electronics13030466.
16. F. Maurelli, S. Krupinski, Y. Petillot and J. Salvi, A particle filter approach for AUV localization, Proc. of the Conference Oceans 2008, Quebec City, QC, Canada, 2008, pp. 1-7, DOI 10.1109/OCEANS.2008.5152014.
17. Sotiropoulos P, Tosi N, Andritsos F, Geffard F. Optimal docking pose and tactile hook-localisation strategy for AUV intervention: The DIFIS deployment case, OCEAN ENGINEERING 46; 2012. p. 33-45, DOI 10.1016/j.oceaneng.2012.02.005.
18. B. V. Menna, S. A. Villar and G. G. Acosta, Particle Filter based Autonomous Underwater Vehicle Navigation System aided thru acoustic

communication ranging, Proc. of the Conference: Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, Biloxi, MS, USA, 2020, pp. 1-10, DOI 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389432.

19. Meditch J., Stochastic Optimal Linear Estimation and Control, McGraw-Hill Inc., 1969.

20. Bogomolov V.V., Estimating the efficiency of nonlinear navigation solutions by different-time ranges to the acoustic beacons, XXIV konferentsiya molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem (24th Conference of Young Scientists with International Participation), Proceedings, St. Petersburg, Russia, 2022, pp. 120-123.

21. Bogomolov V.V., Efficiency analysis of nonlinear solutions to the problem of underwater vehicles navigation, XXIII konferentsiya molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem (23rd Conference of Young Scientists with International Participation), Proceedings, St. Petersburg, Russia, 2021, pp. 223-227.

22. Barabanov O.O., Barabanova L. P. Matematicheskie zadachi dal'nomernej navigacii. M.: FIZMATLIT, 2007. pp. 272.

23. Derevyankin A.V., Matasov A.I. O konechnom algoritme opredeleniya mestopolozheniya ob'ekta po raznostyam izmerenij psevdodal'nostej, Gyroscopy and Navigation. 2015. vol. 2. pp. 106–117, DOI 10.17285/0869-7035.2015.2.3.106-117.

24. Koshaev D.A., Method of dummy measurements for multiple model estimation of processes in a linear stochastic system, Automation and Remote Control, 2016, vol. 77, no. 6, pp. 1009-1030, DOI 10.1134/S0005117916060060.

25. Stepanov O.A., Isaev A.M., A Procedure of Comparative Analysis of Recursive Nonlinear Filtering Algorithms in Navigation Data Pro-

cessing Based on Predictive Modeling, Gyroscopy and Navigation, 2023, vol. 31, no. 3 (122), pp. 48–65.

26. Bogomolov V.V. and Koshaev D.A., Algorithm for underwater vehicle positioning based on the measurements of distance to beacons with their number being insufficient for an instant navigation solution, XXXIII konferentsiya pamyati N.N. Ostryakova (33rd Conference in Memory of N.N. Ostryakov), Proceedings, 2022, pp. 66-69.

27. V. Bogomolov, AUV Positioning By The Ranges To Less Than Three Acoustic Beacons Based On Recursive Bayesian Estimation, Proc. of the 2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, Russian Federation, 2023, pp. 037-040, DOI 10.1109/ICOS60708.2023.10425637.

Information about the author

BOGOMOLOV Vladimir Valentinovich, junior researcher
State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI
Elektropribor, JSC, University ITMO

Work address: 30, Malaya Posadskaya str., Saint Petersburg
197046, Russia

Area of scientific interests: development of filtering algorithms in
relation to the problem of AUV positioning

E-mail: bogomolov.v.v@yandex.ru

Phone: +7(981)789-53-64)

ORCID: 0009-0001-7648-0384

Recommended citation:

Bogomolov V.V. AUV POSITIONING WITH SIMULTANEOUS PROCESSING OF RANGE AND CURRENT RANGES TO LESS THAN THREE ACOUSTIC BEACONS // Подводные исследования и робототехника. 2024. No. 2 (48). P. 58–67. DOI: 10.37102/1992-4429_2024_48_02_07. EDN: TGEQGR.

