

Т. В. АБКЕРИМОВ, К. Г. КЕБКАЛ, А. И. МАШОШИН

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИЕМНИКОВ ДОННОЙ ЛИНЕЙНОЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

В статье описываются определенные путем моделирования условия, при которых позиционирование приемников донной линейной гидроакустической антенны осуществляется со среднеквадратической погрешностью, не превышающей 1 м. Результаты моделирования подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: гидроакустика, донная линейная антенна, позиционирование гидроакустических приемников.

Введение

Донные линейные гидроакустические многоэлементные антенны приобретают все более широкое распространение для мониторинга подводной обстановки [1–3]. Однако для их корректного функционирования местоположение каждого гидроакустического приемника (ГАП) антенны должно быть определено с высокой точностью.

Вычислить координаты каждого ГАП в процессе прокладки антенны судном-кабелеукладчиком по причине технических трудностей не представляется возможным. Ввиду этого возникает необходимость в применении специальной методики позиционирования антенны.

Известен целый ряд методов позиционирования стационарных и буксируемых сейсмокос [4–16]. Все они базируются на использовании одного либо нескольких излучателей акустических сигналов с известными координатами, принимаемых датчиками сейсмокосы и совместно обрабатываемых посредством одного из алгоритмов.

Для практического применения этих методов необходимо определить условия, при которых они обеспечивают требуемую точность позиционирования ГАП.

Воспользуемся методом, описанным в работе [4]. На сервисном судне (СС) устанавливаются:

- гидроакустический излучатель широкополосных импульсных гидроакустических сигналов большой мощности в рабочем диапазоне частот ГАП;
- приемник спутниковой навигационной системы (СНС).

СС с минимальной скоростью движется зигзагами, периодически пересекая линию антенны. В процессе движения с борта СС излучаются гидроакустические сигналы с периодом, зависящим от глубины моря в районе. На момент излучения каждого сигнала в память компьютера, размещенного на СС, записывается время излучения и географические координаты излучателя.

Абкеримов Тимур Владимирович. Аспирант, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).
Кебкал Константин Георгиевич. Доктор технических наук, главный конструктор, АО «Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации» (С.-Петербург).

Машошин Андрей Иванович. Доктор технических наук, начальник научно-исследовательского центра «Интегрированные системы освещения обстановки», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член общественного объединения «Академия навигации и управления движением».

В процессоре, к которому подключены выходы всех ГАП, осуществляется идентификация каждого сигнала, принятого каждым ГАП, и фиксируется время его обнаружения. Часы, установленные на СС и в процессоре, где обрабатываются сигналы, должны быть синхронизированы с высокой точностью.

С использованием полученных данных формируется система уравнений

$$\hat{\tau}_{i,j} = \tau(X_i, Y_i, H_i, X_{r_j}, Y_{r_j}, H_{r_j}, Czv) + \Delta\tau_{i,j}, \quad i = 1, \dots, N_{GAP}, \quad j = 1, \dots, M_i, \quad (1)$$

где $\hat{\tau}_{i,j}$ – оценка разности времени излучения сигнала СС на j -м цикле и времени его приема i -м ГАП (далее – задержка);

$\tau(X_i, Y_i, H_i, X_{r_j}, Y_{r_j}, H_{r_j}, Czv)$ – фактическое время распространения посланного излучателем на j -м цикле сигнала от СС до i -го ГАП, вычисляемое по формуле

$$\tau(X_i, Y_i, H_i, X_{r_j}, Y_{r_j}, H_{r_j}, Czv) = \frac{\sqrt{(X_i - X_{r_j})^2 + (Y_i - Y_{r_j})^2 + (H_i - H_{r_j})^2}}{Czv}; \quad (2)$$

X_i, Y_i – координаты i -го ГАП в местной плоской декартовой системе координат;

H_i – глубина i -го ГАП;

X_{r_j}, Y_{r_j} – координаты излучателя на j -м цикле излучения в той же декартовой системе координат;

H_{r_j} – глубина излучателя на j -м цикле излучения;

Czv – скорость звука;

$\Delta\tau_{i,j}$ – погрешность измерения задержки $\hat{\tau}_{i,j}$;

N_{GAP} – количество ГАП в антенне;

M_i – количество замеров задержки $\hat{\tau}_{i,j}$ для i -го ГАП.

В системе (1) подлежащими оценке неизвестными являются координаты каждого ГАП, включая глубину. Если вертикальное распределение скорости звука вычислено высокоточным измерителем и далее рассчитана скорость распространения сигнала между излучателем и приемником, расположенными на известных глубинах, то вклад неточного знания скорости звука в погрешность определения координат не будет превышать 0,05%. Ввиду этого скорость звука при реализации метода можно считать известной.

В предположении, что все погрешности $\Delta\tau_{i,j}$ являются независимыми и нормально распределенными с нулевыми математическими ожиданиями и одинаковыми среднеквадратическими отклонениями, искомые координаты X_i, Y_i, H_i находятся методом наименьших квадратов:

$$(X_i, Y_i, H_i)_{opt} = \min_{X_i, Y_i, H_i} \sum_{j=1}^{M_i} \left[\hat{\tau}_{i,j} - \tau(X_i, Y_i, H_i, X_{r_j}, Y_{r_j}, H_{r_j}, Czv) \right]^2, \quad i = 1, \dots, N_{GAP}. \quad (3)$$

В настоящей работе исследуется зависимость точности определения координат ГАП с использованием формулы (3) от различных факторов, а именно:

- вида траектории СС относительно антенны с учетом глубины моря;
- количества принятых сигналов каждым ГАП M_i ;
- точности позиционирования излучателя в момент излучения в горизонтальной плоскости и по глубине;
- точности измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП.

Поставлена также более конкретная задача – найти такие значения перечисленных факторов, при которых круговая среднеквадратическая погрешность (СКП) определения горизонтальных координат ГАП не превышает 1 м.

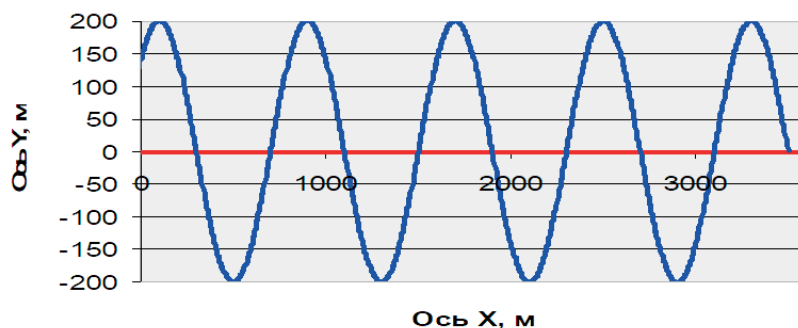
В разделе 1 показано решение задачи путем моделирования, в разделе 2 полученные модельные результаты подтверждаются экспериментально.

Оценка точности позиционирования путем моделирования

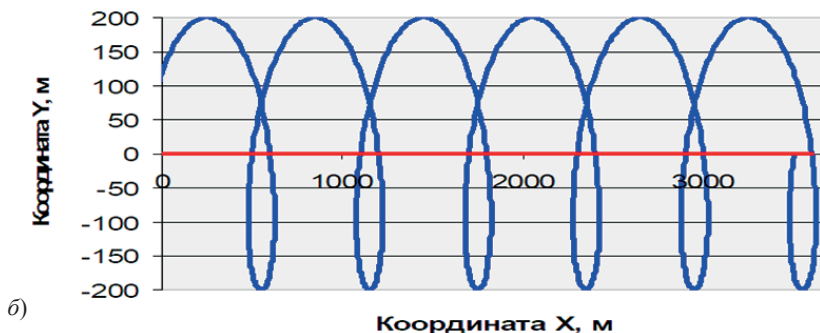
Для оценки точности позиционирования ГАП донной антенны была разработана программная модель, позволяющая учитывать влияние перечисленных факторов.

Модель функционировала следующим образом.

1. С использованием некоторой местной трехмерной декартовой системы координат с центром, совпадающим с местоположением одного из ГАП донной антенны, осью X , направленной на восток, осью Y , ориентированной на север, и осью Z , направленной вертикально вверх, задавались фактические координаты ГАП. Поскольку на практике координаты каждого ГАП определяются независимо, моделирование с целью точного позиционирования достаточно проводить для единственного ГАП.
2. Задавалась и моделировалась в той же декартовой системе координат траектория движения СС относительно донной антенны. Известно, что для обеспечения высокой точности позиционирования ГАП траектория СС должна быть сложной, позволяющей облучать каждый ГАП с разных направлений. Такими траекториями, в частности, являются синусоида (рис. 1, а) и циклоида (рис. 1, б), расположенные симметрично относительно донной антенны.



Траектория СС в форме синусоиды (синяя линия) относительно донной линейной антенны (красная линия)



Траектория СС в форме циклоиды (синяя линия) относительно донной линейной антенны (красная линия)

Рис. 1. Траектории СС, проходящие симметрично относительно донной антенны

3. В процессе движения СС моделировалась периодическая (с заданным периодом) передача гидроакустических сигналов буксируемым излучателем, поме-

щенным на заданную глубину. На момент времени каждого излучения в названной декартовой системе рассчитывались фактические координаты излучателя, куда вносились случайные нормально распределенные погрешности с нулевыми математическими ожиданиями и заданными СКП. Далее полученные таким образом оценки координат излучателя $\hat{X}_{w_j}, \hat{Y}_{w_j}, \hat{Z}_{w_j}$ с привязкой ко времени излучения запоминались.

4. На момент каждого излучения рассчитывалось фактическое расстояние от излучателя до единственного ГАП. Путем его деления на скорость распространения сигнала между излучателем и ГАП определялось время его распространения. В значение этого времени вносилась случайная нормально распределенная погрешность с нулевым математическим ожиданием и заданной СКП, учитывающими точность измерения времени обнаружения сигнала на выходе ГАП и синхронизации часов на СС и в процессоре, обрабатывающем сигналы на выходе ГАП. Полученные оценки времени распространения \hat{t}_j запоминались.
5. После прохождения СС всей заданной траектории заархивированные данные обрабатывались методом наименьших квадратов – по формуле (3) вычислялись координаты X, Y, H единственного ГАП и погрешности их определения $\Delta X, \Delta Y, \Delta H$. Поскольку не было оснований считать, что функционал в правой части (3) является одномодальным, задача решалась простым перебором 30 значений каждого из искомых параметров в диапазоне, ограниченном максимально возможными погрешностями их определения посредством рассматриваемого метода. Величины, задающие этот диапазон, были предварительно вычислены путем моделирования с учетом предельно больших погрешностей, возникающих при решении исследуемой задачи под влиянием вышеупомянутых факторов.
6. Моделирование повторялось 1000 раз. На основании полученных результатов с использованием погрешностей позиционирования ГАП, вычисленных на каждом цикле, рассчитывалась круговая СКП определения горизонтальных координат ГАП и СКП определения глубины ГАП.

Моделирование осуществлялось при следующих исходных данных:

- глубина моря 300 и 2000 м;
- СС движется вдоль антенны по синусоиде со скоростью 1 м/с, амплитуда которой подлежит определению;
- ненаправленный излучатель буксируется на глубине 3 м;
- излучатель с периодом в 10 с испускает импульсный широкополосный сигнал в полосе частот 200–2000 Гц длительностью 1 мс и давлением, обеспечивающим на выходе каждого ГАП отношение «сигнал–помеха» более 20 дБ;
- СКП определения горизонтальных декартовых координат излучателя в момент излучения сигнала составляет 5–20 м;
- СКП определения заглубления излучателя – 0,5–2 м;
- СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП – 0,5–2,5 мс;
- СКП определения скорости звука – 0,5 м/с;
- количество сигналов, фиксируемых одним ГАП, – 500–1500.

Все случайные величины моделировались в соответствии с центрированными нормальными распределениями с указанными СКП.

В процессе моделирования требовалось вычислить круговую СКП определения координат ГАП в зависимости от:

- ширины полосы, в пределах которой движется СС;
- количества сигналов, принятых каждым ГАП;
- СКП определения координат излучателя в момент трансляции сигнала;
- СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП.

Результаты моделирования для глубины моря 2000 м в районе, где установлена антенна, приведены на рис. 2–6.

На рис. 2 показана зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от ширины полосы движения СС по синусоидальной траектории при глубине моря 2000 м. Расчет осуществлялся при СКП определения координат излучателя в момент передачи сигнала на уровне 5 м и СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП, равной 1 мс.

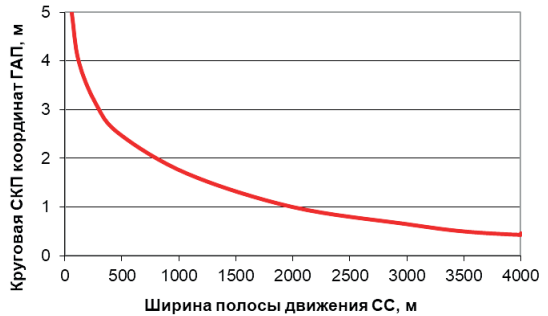


Рис. 2. Зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от ширины полосы движения СС по синусоидальной траектории при глубине моря 2000 м

Из рис. 2 следует, что целевая СКП в 1 м при определении координат ГАП достигается при ширине полосы движения СС в 2000 м, т.е. соответствующей глубине моря в районе, где лежит донная антенна.

На рис. 3 приведена зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП. Расчет осуществлялся при СКП определения координат излучателя в момент передачи сигнала, равной 5 м, и полосе движения СС 2000 м.

Из рис. 3 следует, что для достижения целевого показателя в 1 м СКП времени распространения сигнала от излучателя до ГАП должна быть меньше 1 мс.

На рис. 4 приведена зависимость СКП определения глубины ГАП от СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП. Расчет осуществлялся при СКП определения координат излучателя в момент трансляции сигнала, равной 5 м, СКП определения заглубления излучателя 1 м и полосе движения СС 2000 м.



Рис. 3. Зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП при глубине моря 2000 м

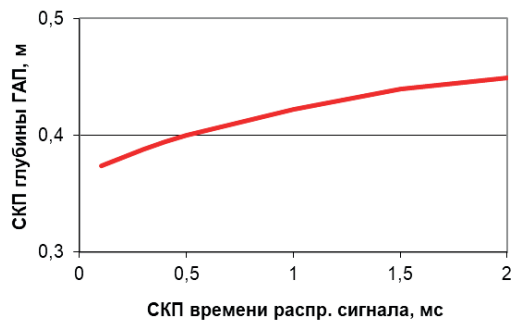


Рис. 4. Зависимость СКП определения глубины ГАП от СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП при глубине моря 2000 м

На рис. 5 представлена зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от СКП определения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП. Линии синего цвета соответствуют 1440 сигналам, принятым одним ГАП, красные линии – 860 замерам, при этом величины, обозначенные сплошными линиями рассчитаны при СКП знания горизонтальных координат излучателя, равной 5 м, а величины, которым соответствуют штриховые линии, – при СКП 10 м. Из рис. 5 следует, что целевой показатель в 1 м достигается, если количество принятых сигналов превышает 1000.

На рис. 6 показана зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от СКП определения горизонтальных координат излучателя. Синие линии соответствуют 1440 сигналам, принятым одним ГАП, зеленые – 860 замерам, красные – 580 замерам. Сплошными линиями обозначены величины, рассчитанные при СКП определения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП, равной 0,5 мс, штриховыми – величины, рассчитанные при СКП 1 мс.

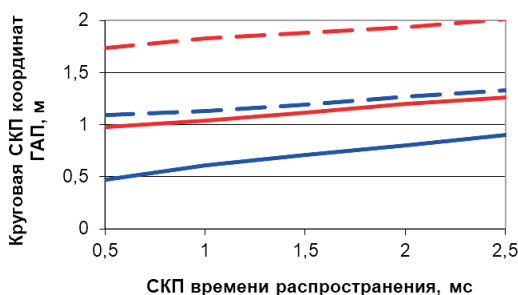


Рис. 5. Зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от СКП времени распространения сигнала от излучателя до ГАП при глубине моря 2000 м

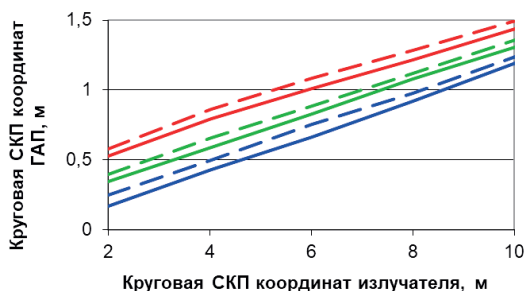


Рис. 6. Зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от круговой СКП определения горизонтальных координат излучателя при глубине моря 2000 м

Из рис. 6 следует, что целевой показатель в 1 м достигается при СКП определения горизонтальных координат излучателя не более 5 м.

По результатам моделирования для глубины моря 2000 м можно сделать следующие выводы:

- 1) позиционирование ГАП с круговой СКП менее 1 м достигается, если:
 - ширина полосы движения СС вдоль линии антенны не менее 2000 м;
 - количество сигналов, принятых одним ГАП, не менее 1000;
 - СКП определения горизонтальных координат излучателя в момент трансляции сигнала не более 5 м;
 - СКП определения заглубления излучателя в момент передачи сигнала не превышает 1 м;
 - СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП менее 1 мс;
- 2) при перечисленных условиях СКП определения глубины ГАП не превышает 0,5 м.

Для глубины моря 300 м было выполнено моделирование в таком же объеме.

Поскольку графики для глубины 300 м по форме аналогичны приведенным выше, в статье представлен только один из них – наиболее важный. При этом выводы для глубины моря 300 м сделаны с учетом всех графиков.

На рис. 7 для глубины моря 300 м представлена зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от СКП времени распространения сигнала от излучателя до ГАП. Красная линия соответствует ширине полосы движения СС 1300 м при принятии 541 сигнала, зеленая – 900 м (479 сигналов), синяя – 630 м (271 сигнал). Расчет выполнялся при СКП определения горизонтальных координат излучателя 5 м и СКП определения глубины излучателя 1 м.

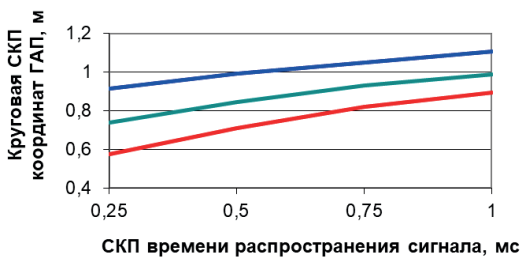


Рис. 7. Зависимость круговой СКП определения горизонтальных координат ГАП от СКП времени распространения сигнала от излучателя до ГАП при глубине моря 300 м

По результатам моделирования при глубине моря в рассматриваемом районе 300 м можно сделать выводы:

- 1) круговая СКП позиционирования ГАП менее 1 м достигается при следующих условиях:
 - ширина полосы движения СС вдоль линии антенны не менее 900 м;
 - количество сигналов, принятых одним ГАП, – не менее 500;
 - СКП определения горизонтальных координат излучателя в момент излучения сигнала не должна превышать 5 м;
 - СКП определения заглубления излучателя в момент трансляции сигнала не должна превышать 1 м;
 - СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП – менее 1 мс;
- 2) при соблюдении перечисленных условий СКП определения глубины ГАП не превышает 1,2 м.

Экспериментальная проверка точности позиционирования ГАП

Точность позиционирования ГАП экспериментально проверялась в акватории Ладожского озера при глубине в месте проведения работ 34–36 м с незначительным наклоном в сторону открытой воды.

Перед испытаниями было выполнено измерение вертикального распределения скорости звука (рис. 8, *слева*), на основе которого был произведен расчет спада мощности излучаемого сигнала по мере увеличения расстояния (рис. 8, *справа*). Вертикальное распределение измерялось при помощи прибора SVP-1500 фирмы HydroTech (Китай).

В экспериментах использовалось гидроакустическое оборудование производства АО «Лаборатория гидроакустической телеметрии и навигации», в частности гидроакустические модемы СПиН-26П и СПиН-26П УКБ с надстроенной ультракороткобазовой антенной (рис. 9, *слева*). Частотный диапазон их работы – 18–34 кГц, диаграмма направленности полусферическая с сектором излучения 165°, уровень излучения сигнала на расстоянии 1 м – 140 дБ относительно 20 мкПа.

Оба модема были оснащены часами малого дрейфа Abracon AST3TQ-50 и линией, по которой модемный процессор получал сигнал точного времени с частотой 1 Гц (1 PPS – pulse per second) от подключенного к модему приемника CHC GPS/GLONASS. Для синхронизации часов применялась встроенная в программное обеспечение моде-

ма утилита, позволяющая принимать последовательность 1PPS сигналов, усреднять временной разброс 1PPS-импульсов и устанавливать одинаковое время на часах гидроакустических модемов с погрешностью менее 40 нс. Кроме того, она учитывала скорость рассинхронизации часов – 18 мкс/ч, которая приводила к погрешности оценки дистанции в пределах 0,1 м.

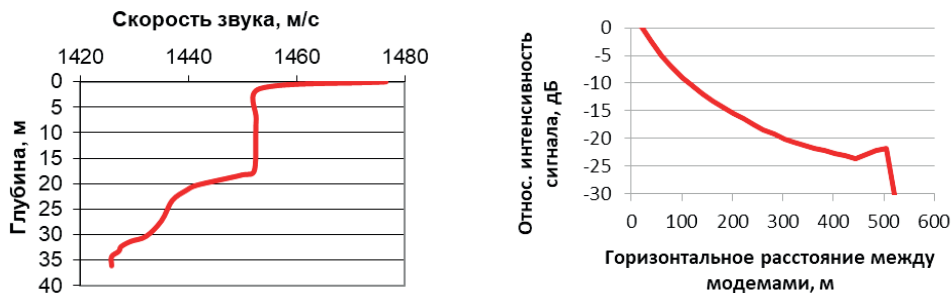


Рис. 8. Вертикальное распределение скорости звука (слева) и зависимость от горизонтального расстояния между излучающим и принимающим модемами относительной интенсивности сигнала на входе принимающего модема, расположенного у дна (справа).

Глубина источника – 1,8 м, глубина приемника – 34,25 м

Из модемов СПиН-26П составлялась гирлянда (рис. 9, справа), которая представляла собой лить длиной 50 м и сечением 10 мм с якорем весом 14 кг. В двух метрах выше якоря были закреплены модемы, а еще в двух метрах над ними – пластиковый кухтыль для обеспечения промежуточной плавучести и маркер на поверхности (рис. 10). Заякоренная гирлянда устанавливалась на глубине 34,25 м, гидроакустический модем – на глубине 32,25 м. Географические координаты места его размещения определялись с использованием приемника дифференциальной СНС и запоминались. Гидроакустический модем на заякоренной гирлянде работал только в режиме приема.

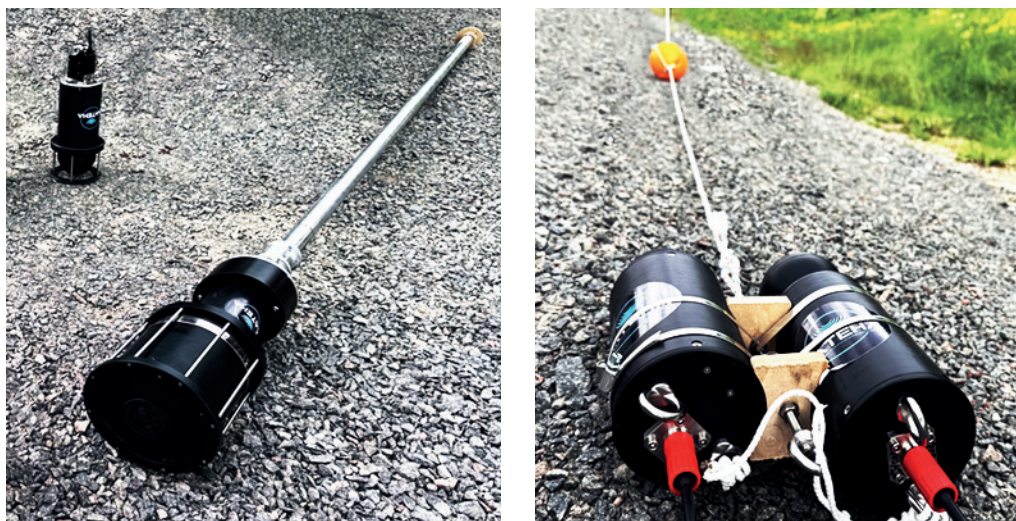


Рис. 9. Модем со штангой для крепления к катеру (слева) и донный модем в составе заякоренной гирлянды (справа)

Гидроакустический модем с надстроенной ультракороткобазовой антенной СПиН-26П УКБ устанавливался с катера на приборной штанге в обтекателе (рис. 11) на глу-

бине 1,8 м и работал только в режиме излучения сигналов по временному сценарию, одинаковому в обоих модемах. При реализации синхронного сценария модем на дне был способен оценивать задержку поступления в приемник сигнала, излученного модемом на поверхности.



Рис. 10. Маркер гирлянды и лодка, с которой она устанавливалась

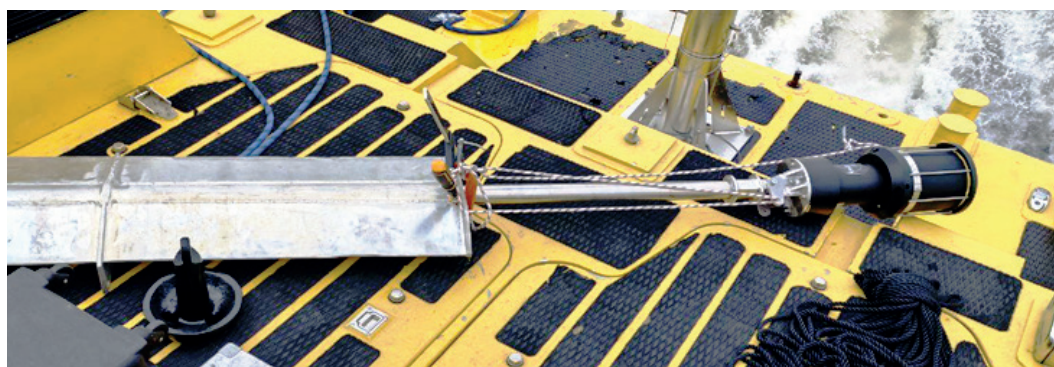


Рис. 11. Модем в обтекателе приборной штанги катера

В ходе экспериментов модем на поверхности подключался к дифференциальному приемнику СНС, который располагался на верхушке штанги над модемом. Модем излучал гидроакустический сигнал с периодом в 2 с. Гидроакустический сигнал представлял собой пакет данных – так называемое синхронное срочное сообщение [17], которое содержало номер пакета, адрес отправителя и географические координаты модема на поверхности в момент формирования сигнала. Модем работал в режиме расширенных уведомлений, в которых была информация о временных метках начала и окончания процесса передачи пакета данных излучателем в воду. Благодаря этим временным меткам появлялась возможность оценивать (путем интерполяции между соседними СНС-координатами) местоположение излучающего модема не в момент формирования, а во время излучения сигнала в воду и записывать показатели этого времени в память.

Поскольку у передаваемого сигнала фиксированная длительность и задержки времени между его формированием и излучением в воду тоже известны, модем на дне мог самостоятельно интерполировать между соседними СНС-координатами, получаемыми в последовательно принятых пакетах данных, для оценки местоположения излучающего модема именно во время трансляции сигнала в воду.

Катер с гидроакустическим модемом на приборной штанге двигался по траектории, напоминающей фрагменты циклоиды, удаляясь от маркера гирлянды не более чем на 500 м, что было обусловлено рефракционным ограничением дистанции распространения сигнала между приповерхностным и придонным модемами (рис. 8, *справа*). Катер выполнил 10 галсов в виде замкнутой кривой вокруг места установки донного модема.

Модем на дне обнаруживал, демодулировал и декодировал принимаемый пакет данных, а в ходе обработки синхронизирующих импульсов, входящих в состав пакета, оценивал задержку распространения сигнала в гидроакустической среде и сохранял ее в памяти с привязкой ко времени.

Зафиксированные данные обрабатывались на берегу по описанной выше методике и распределялись по экспериментам. Каждый эксперимент включал данные, полученные на протяжении примерно четверти окружности движения катера. Было получено 40 оценок координат ГАП. Результаты обработки приведены на рис. 12–14.

На рис. 12 показан маршрут движения катера с излучающим модемом относительно маркера гирлянды на одном галсе. Местоположение излучающего модема определялось по данным приемника СНС, расположенного на верхушке приборной штанги. Оценки координат донного модема, полученные после пересчета данных о его местоположении в локальную систему координат, отмечены красными точками. Локальная система координат формировалась при первом контакте донного модема с модемом на поверхности, в данном случае при вхождении на заданную траекторию движения катера, на расстоянии 450 м от точки постановки заякоренной гирлянды. Местоположение лодки с кабельным подключением гидроакустического модема, которое определялось по данным СНС-приемника к моменту начала движения катера по заданной траектории, обозначено ромбом.

На рис. 13 в укрупненном масштабе показано пятно рассеивания оценок местоположения донного маяка, полученных по результатам каждого эксперимента, относительно его истинного положения.

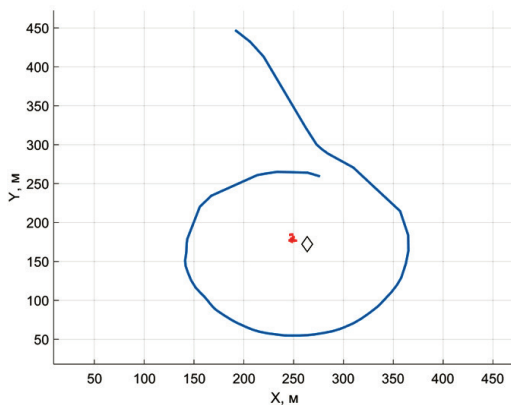


Рис. 12. Оценка местоположения донного модема: маршрут движения катера с модемом на поверхности на одном галсе (*синяя линия*); местоположение лодки с кабельным подключением гидроакустического модема (*ромб*); оценки местоположения придонного модема по результатам обработки данных каждого эксперимента (*красные точки*)

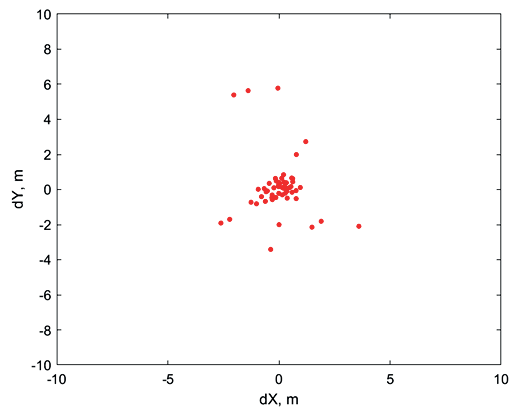


Рис. 13. Разброс оценок местоположения донного модема, полученных по результатам каждого эксперимента, относительно его истинного положения

На рис. 14 представлены гистограммы отклонения оценок местоположения донного модема от его среднего значения по горизонтали (*слева*) и вертикали (*справа*). Среднеквадратические отклонения составили: по горизонтали 0,9 м, по вертикали 1,6 м.

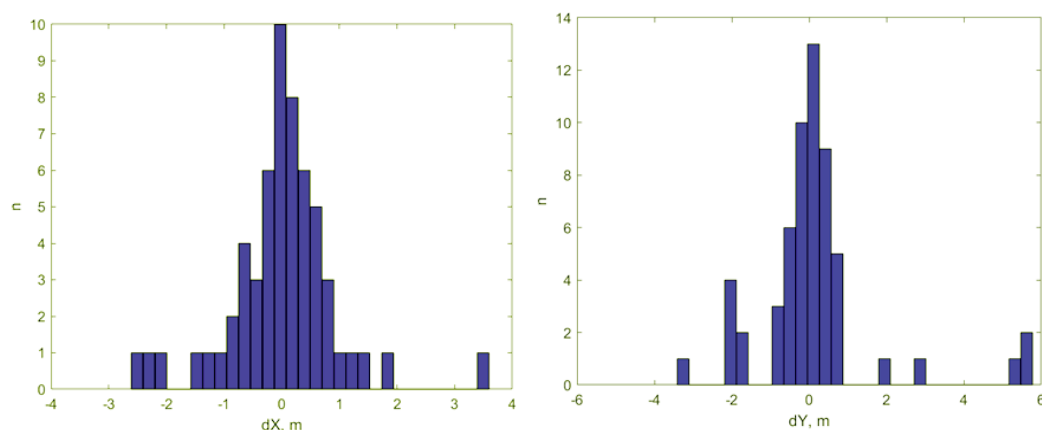


Рис. 14. Гистограммы отклонения оценок местоположения донного модема от его среднего значения по горизонтали (*слева*) и вертикали (*справа*)

Поскольку в экспериментах использовались СНС с заявленной точностью определения координат 2 м, полученная в результате погрешность позиционирования маяка не выходит за указанные рамки и является удовлетворительной для поставленной задачи. В дальнейшем при использовании СНС с поправками RTK ожидается дальнейшее повышение точности определения местоположения донного маяка.

Моделирование по приведенной выше методике позволило получить круговую СКП оценки координат ГАП 0,53 м, СКП оценки глубины ГАП – 1,15 м, что не противоречит результатам эксперимента.

Заключение

Выполнено моделирование известного метода позиционирования приемников гидроакустической антенны путем многократного измерения времени распространения сигнала от излучателя, буксируемого движущимся СС, до гидроакустического приемника с последующим решением системы уравнений. Показано, что для определения местоположения гидроакустических приемников донной антенны с круговой СКП не более 1 м должны выполняться следующие условия:

- СС должно двигаться вдоль антенны по синусоидальной траектории с размахом не менее 2000 м при глубине 2000 м и 900 м при глубине 300 м;
- количество сигналов, принятых одним приемником, должно быть не менее 1000 при глубине 2000 м и не менее 500 при глубине 300 м;
- СКП определения горизонтальных координат излучателя в момент трансляции каждого сигнала не должна превышать 5 м;
- СКП определения заглубления излучателя в момент трансляции каждого сигнала не должна превышать 1 м;
- СКП измерения времени распространения сигнала от излучателя до ГАП должна быть менее 1 мс.

Установлено, что при соблюдении перечисленных условий СКП определения глубины ГАП не превышает 0,5...1,2 м.

Экспериментальная проверка метода позиционирования показала погрешность оценки местоположения донного маяка в пределах 0,9 м по горизонтали и 1,6 м по вертикали, что соответствует заявленной точности работы использованных в экспериментах приемников СНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГАК МГК-608Э. Официальный сайт АО «НИИ «Атолл».
2. Junfeng Chen, Hao Li, Xiangpeng Xiao, Cunzheng Fan, Baoqiang Yan, Shixiong Zhang, Haoguang Liu, Ke Ai, Zhijun Yan, Qizhen Sun, Fully distributed hydroacoustic sensing based on ultra-highly sensitive and lightweight fiber-optic hydrophone cable, *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, vol. 169, pp. 1–9.
3. Borowski, B., Sutin, A., Roh, H.-S., Bunin, B., Passive acoustic threat detection in estuarine environments, *Proceedings of SPIE*, 2008, vol. 6945, p. 694513, doi: 10.1117/12.779177.
4. Патент США №6,005,828. Acoustic positioning of seismic ocean bottom cable, Paul Ellington Carroll Roy Wilson James at all.; заявитель и патентообладатель Input/Output, Inc., Stamford; № 08/963676; заявл. 31.10.1997; опубл. 21.12.1999.
5. Патент США №3,953,827. Method of determining the angular position of a towed marine seismic cable and apparatus for carrying out said method, Robert Le Moal Jacques Cholet Daniel Saussier; Entreprise de Recherches et d'Activites Petrolieres SA, France; № 443251; заявл. 19.02.1974; опубл. 27.04.1976.
6. Патент США №4,068,208. Marine streamer position determination system. Joseph A. Rice Jr., Larry W. Moore, Robert C. Donald; заявитель и патентообладатель Texas Instruments Inc.; № 05/595937; заявл. 14.07.1975; опубл. 10.01.1978.
7. Патент США №4,641,287. Method for locating an on-bottom seismic cable, Walter P. Neeley; заявитель и патентообладатель Mobil Oil Corporation; № 06/605089; заявл. 30.04.1984; опубл. 03.02.1987.
8. Патент США №4,011,540. Combined electret hydrophone and transmission line, John B. Farr; заявитель и патентообладатель BP Corp North America Inc.; – № 05/651668; заявл. 22.01.1976; опубл. 08.03.1977.
9. Патент США №4,204,188. Cable for sea seismic exploration, Helmut Weichart, Jürgen Schmidt; заявитель и патентообладатель Prakla Seismos GmbH; – № 05/902220; заявл. 02.05.1978; опубл. 20.05.1980.
10. Патент США №6,738,715. Method for attenuating noise in seismic data, Andrew P. Shatilo, Richard E. Duren; заявитель и патентообладатель ExxonMobil Upstream Research Company; – № 10/072588; заявл. 05.02.2002; опубл. 18.05.2004.
11. Патент США №4,845,686. Method and device for determining the position of immersed objects with respect to the ship which tows them, Jean Brac; заявитель и патентообладатель Institut Français du Pétrole (IFPEN); – № 07/112942; заявл. 27.10.1987; опубл. 04.07.1989.
12. Патент США №4,037,189. Method and apparatus for determining the profile of an underwater pipeline, Duncan Bell, Jack L. Odell, David E. Olson, Allen E. Peirce; заявитель и патентообладатель Western Gear Corporation; № 05/623584; заявл. 20.10.1975; опубл. 19.07.1977.
13. Патент США №4,446,538. Marine cable location system, Robert G. Zachariadis; заявитель и патентообладатель Mobil Oil Corporation; № 06/358756; заявл. 16.03.1982; опубл. 01.05.1984.
14. Патент США №3,860,900. Method of monitoring the position of towed underwater apparatus, Ronald J. Scudder; заявитель и патентообладатель Western Electric Co., Inc. (AT&T); № 334320; заявл. 21.02.1973; опубл. 14.01.1975.
15. Kebkal, A.G., Kebkal, K.G., Komar, M., Data-link Protocol for Underwater Acoustic Networks, *MTS/IEEE Conference Proceedings OCEANS 2005 Europe*, Brest, France, 2005.

Abkerimov, T.B. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg), **Kebkal, K.G.** (Laboratory of Hydro-acoustic Telemetry and Navigation, St. Petersburg), **Mashoshin, A.I.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC) Estimating the Accuracy of Positioning the Receivers of a Bottom Linear Sonar Array, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2026, vol. 34, no. 1 (132), pp. 96–108.

Abstract. In the paper, positioning of receivers of a bottom linear sonar array with a known method is simulated. The conditions under which the maximum RMS error of 1 m is provided are determined by the simulation. Simulation results are experimentally confirmed.

Key words: acoustics, bottom linear array, positioning of sonar receivers.

Материал поступил 01.02.2026