

А. И. МАШОШИН, В. С. МЕЛЬКАНОВИЧ, В. Н. ТИМОФЕЕВ

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ЗВУКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОННОЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ

В статье описывается алгоритм определения глубины погружения источника звука с использованием многоэлементной донной линейной антенны, основанный на измерении задержек между сигналами в многолучевом канале. Точность алгоритма подтверждена путем моделирования и проверена экспериментально.

Ключевые слова: гидроакустика, донная линейная антенна, определение глубины погружения источника звука.

Введение

Известны гидроакустические рубежные системы, предназначенные для обнаружения морских объектов-нарушителей, входящих в охраняемый район [1–3]. В качестве таких систем, как правило, применяются шумопеленгаторные станции (ШПС) с установленными на дне низкочастотными линейными протяженными антеннами, состоящими из гидроакустических приемников (ГАП), расположенных друг от друга на расстоянии от единиц до десятков метров [1].

Основной задачей таких ШПС является выделение нарушителей (такowymi, как правило, считают подводные лодки, обитаемые и необитаемые подводные аппараты) из потока объектов, пересекающих рубеж. Обычно их обнаружение при помощи ШПС трудностей не вызывает. Сложнее обстоит дело с их классификацией. Чтобы отнести объект к классу «подводный» или «надводный», используются отличия спектров несущей и амплитудной огибающей подводных и надводных объектов [4–12]. Однако проблема состоит в том, что подводный объект-нарушитель может эффективно подстраивать свой шумовой портрет под шумовой портрет надводного корабля. Данная технология хорошо отработана – в частности, подводные лодки ВМС США оборудованы специальной аппаратурой, позволяющей маскировать шум лодки под шум надводного корабля.

Ввиду этого практический интерес представляет создание альтернативных методов и алгоритмов классификации подводных нарушителей. В этом смысле наиболее эффективный способ – определение глубины погружения обнаруженного объекта, поскольку искусственно исказить этот параметр крайне затруднительно.

Известен метод вычисления дистанции и глубины погружения источника звука [14] по многолучевому распространению его сигнала в океаническом волноводе. Суть

Машошин Андрей Иванович. Доктор технических наук, начальник научно-исследовательского центра «Интегрированные системы освещения обстановки», АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Мельканович Виктор Сергеевич. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Тимофеев Виталий Николаевич. Начальник группы, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

метода заключается в том, что в автокорреляционной функции (АКФ) широкополосного шума источника (рис. 1) появляются корреляционные максимумы (КМ), обусловленные когерентными сигналами, распространяющимися по разным акустическим лучам. Абсцисса каждого КМ равна относительному запаздыванию прихода на антенну пары лучей, а ширина – обратной величине полосы частот сигнала. Поскольку это запаздывание несет информацию о координатах источника, то с помощью системы уравнений, связывающих их с величиной относительного запаздывания акустических лучей можно в теории определить местонахождение источника.

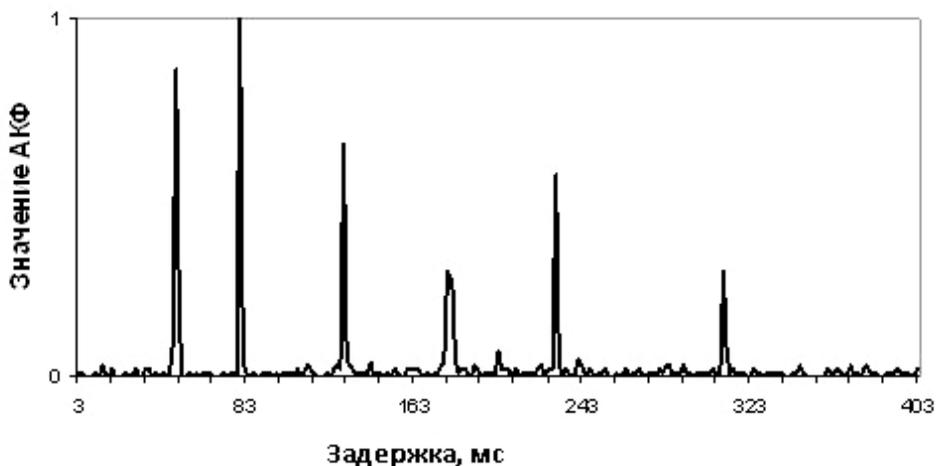


Рис. 1. Пример АКФ многолучевого широкополосного сигнала источника звука. График построен начиная с задержки 3 мс, чтобы исключить КМ наибольшей величины на нулевой задержке, не несущий полезной информации

Для практической реализации данного метода разработано большое количество алгоритмов [13–23]. Вместе с тем проведенные исследования показали, что как сам метод, так и реализующие его алгоритмы обладают существенным недостатком, который заключается в многозначности получаемого результата. Этот недостаток можно попытаться устранить, если привлечь дополнительную информацию.

В настоящей работе предложен алгоритм определения глубины погружения источника звука, позволяющий классифицировать объект, проходящий над донной линейной антенной.

Обоснование алгоритма

Геометрия задачи приведена на рис. 2.

На вход каждого ГАП линейной антенны ШПС приходит несколько акустических лучей, по которым распространяется шум объекта. Из них выделяются 2 луча:

- прямой (линия красного цвета);
- однократно отразившийся от поверхности моря (линия зеленого цвета).

От остальных лучей их отличает то, что ввиду минимального количества отражений от границ волновода они наиболее интенсивны, а следовательно, соответствующий им КМ в АКФ имеет наибольший уровень.

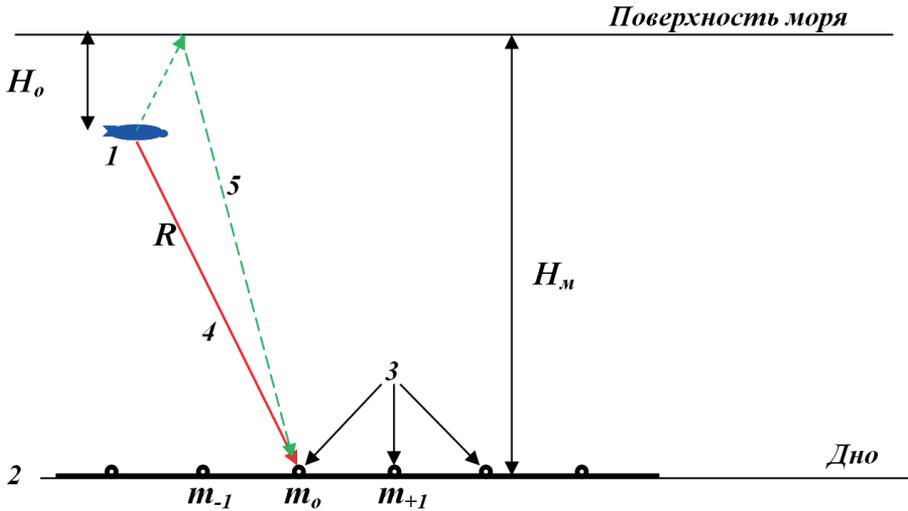


Рис. 2. Геометрия задачи: 1 – объект-нарушитель; 2 – линейная антенна ШПС; 3 – ГАП антенны ШПС; 4 – прямой акустический луч, по которому шум объекта-нарушителя распространяется до антенны ШПС; 5 – акустический луч, однократно отразившийся от поверхности моря; H_m – глубина моря; H_o – глубина погружения объекта-нарушителя; R – наклонное (кратчайшее) расстояние между объектом и ГАП с номером m_o , на котором шум объекта имеет максимальный уровень

Относительное запаздывание прихода на ГАП этих лучей равно:

$$\tau_{12} = \frac{\sqrt{R^2 + 4 \cdot H_m \cdot H_o} - R}{c}, \quad (1)$$

где R – наклонное (кратчайшее) расстояние между объектом и ГАП; H_m – глубина моря; H_o – глубина погружения объекта-нарушителя; c – средняя скорость распространения звукового сигнала в волноводе, рассчитываемая на основе измеренного вертикального распределения скорости звука.

Величина относительного запаздывания τ_{12} определяется следующим образом: на выходе ГАП, где шум объекта имеет наибольший уровень (пусть этот ГАП имеет номер m_o), вычисляется АКФ широкополосного шума источника, в ней выделяется КМ наибольшей величины и находится его абсцисса, которая равна искомому запаздыванию τ_{12} .

Поскольку известны глубина моря H_m в районе установки ШПС и параметры τ_{12} и c , для расчета глубины погружения объекта H_o из формулы (1) необходимо найти наклонное расстояние R между источником и ГАП с номером m_o . Для этого воспользуемся разностно-дальномерным методом [24], в основе которого лежит измерение задержек прихода сигнала на три приемника, определяемых как абсциссы наибольших по уровню КМ во взаимно-корреляционной функции (ВКФ) сигналов на выходе каждой пары ГАП.

Выберем 3 ГАП: один с номером m_o , на котором шум объекта имеет самый высокий уровень, и два с номерами m_{-1} и m_{+1} , симметрично расположенные относительно первого. Необходимо, чтобы расстояние между приемниками L было максимальным, но не превышало интервал когерентности сигнала (30-40 длин волн на частотах ниже 1 кГц и 50 длин волн на частотах выше 1 кГц) на верхней частоте используемого для измерения ВКФ частотного диапазона [25]. Следует заметить,

что указанные величины интервала когерентности являются весьма усредненными и соответствуют открытым акваториям. В мелководных районах со сложными рельефом дна и конфигурацией вертикального распределения скорости звука интервал когерентности может быть существенно меньше.

Определив описанным способом относительное запаздывание τ_- между сигналами источника на выходе m_o -го и m_{-1} -го ГАП, а также относительное запаздывание τ_+ на выходе m_o -го и m_{+1} -го ГАП, вычислим наклонное расстояние между источником и ГАП с номером m_o по формуле

$$R = \frac{2 \cdot L^2 - c^2 \cdot (\tau_+^2 + \tau_-^2)}{2 \cdot c \cdot (\tau_+ + \tau_-)}. \quad (2)$$

Вместе с наклонным расстоянием измеренные запаздывания τ_- и τ_+ позволяют вычислить угол α (рис. П1) с вершиной в точке размещения ГАП с номером m_o между линией антенны и направлением на объект:

$$\alpha = \arccos \frac{(c \cdot \hat{\tau}_- + R)^2 - (c \cdot \hat{\tau}_+ + R)^2}{4 \cdot L \cdot R}. \quad (3)$$

Вывод формул (2) и (3) приведен в приложении.

В результате из формулы (1) получим глубину расположения объекта:

$$H_o = \frac{(c \cdot \tau_{12} + R)^2 - R^2}{4 \cdot H_m}. \quad (4)$$

Описанный алгоритм работоспособен при выполнении двух условий:

- 1) превышение уровня КМ флуктуаций фона в АКФ и ВКФ превосходит заданное пороговое значение;
- 2) среднеквадратическая погрешность (СКП) измерения абсцисс КМ существенно меньше измеряемой величины.

В случае измерения АКФ первое условие выполняется, если в предположении полной когерентности прямого и отраженного лучей справедливо неравенство [18, 19]

$$Q_{АКФ} = \sqrt{2 \cdot \Delta f \cdot T \cdot K_{пр} \cdot K_{отр}} \cdot \frac{q}{(q+1)} > Q_{tr}, \quad (5)$$

где $Q_{АКФ}$ – превышение КМ флуктуаций фона в АКФ, называемое выходным отношением «сигнал–помеха» (ОСП);

Δf – ширина полосы частот, в которой вычисляется АКФ;

T – время накопления АКФ;

$K_{пр}, K_{отр}$ – отношение мощности соответственно прямого луча и луча, однократно отраженного от поверхности, к суммарной мощности всех лучей на выходе ГАП;

q – входное ОСП (по мощности) в полосе частот Δf ;

Q_{tr} – пороговое значение выходного ОСП, как правило равно 5.

Второе условие выполняется, если

$$\tau_{12} > 3 \cdot \sigma_\tau, \quad (6)$$

где σ_τ – СКП измерения абсциссы КМ в АКФ либо ВКФ, определяемая следующим образом [26]:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\Delta f \cdot q}. \quad (7)$$

При вычислении ВКФ в предположении когерентности прямого и отраженного лучей и отсутствия корреляции помехи на выходе двух разнесенных в пространстве ГАП первое условие выполняется, если справедливо неравенство [18, 19]

$$Q_{VKF} = \sqrt{\frac{\Delta f \cdot T}{(1 + q_1^{-1}) \cdot (1 + q_2^{-1}) + 1}} > Q_{tr}, \quad (8)$$

где q_i – ОСП на выходе i -го ГАП.

Периодически определяя наклонную дистанцию и глубину объекта, можно контролировать параметры его движения – курс K_o , скорость V_o и глубину погружения H_o .

Моделирование алгоритма

В ходе моделирования предполагалось на конкретном примере оценить точность определения глубины объекта, а также дистанции до него.

Моделирование проводилось для следующих условий:

- глубина моря – 200 м;
- скорость звука у дна – 1460 м/с;
- глубина расположения объекта – 180 м;
- расстояние между ГАП в антенне – 20 м;
- полоса частот, в которой вычисляются ВКФ и АКФ, варьируется от 100 Гц до 2000 Гц;
- ОСП (по мощности) в полосе частот в момент пересечения антенны изменяется от –15 дБ до +35 дБ.

Горизонтальная проекция траектории движения объекта относительно антенны приведена на рис. 3.

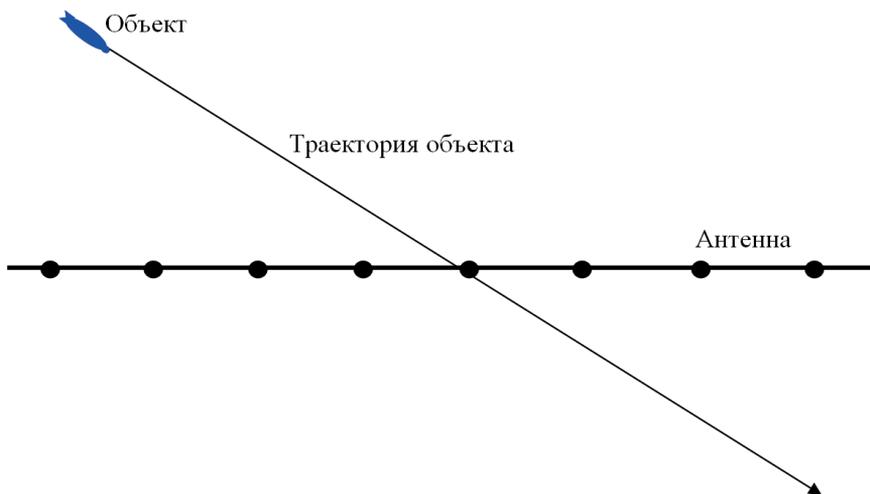


Рис. 3. Горизонтальная проекция траектории движения объекта относительно антенны

Моделирование заключалось в следующем:

- выбирались значения полосы частот и ОСП из заданных интервалов;
- рассчитывались интервалы изменения задержек в АКФ и ВКФ на глубине расположения объекта от 10 до 190 м. Для АКФ они составили от 20 до 190 мс, в ВКФ – от 0 до 8,4 мс;

- определялась траектория движения объекта, которая разбивалась на интервалы измерения 10 накоплений АКФ и ВКФ с длительностью каждого накопления 200 мс;
- для каждого i -го интервала вычислялось наклонное расстояние между объектом и ближайшим ГАП, а также между объектом и двумя соседними ГАП справа и слева;
- на интервале каждого накопления длительностью 200 мс цифровыми методами генерировался шум объекта со спектром в выбранной полосе частот, спадающим по закону f^{-2} ;
- в зависимости от рассчитанных дистанций сгенерированный шум объекта пересчитывался по сферическому закону на выход трех названных ГАП;
- одновременно на интервале каждого накопления независимо генерировалась широкополосная помеха на выходе каждого из трех ГАП, спадающая по закону f^{-2} ;
- на каждом интервале вычислялись накопленные АКФ смеси сигнала и помехи на выходе ближайшего к объекту ГАП и две ВКФ смеси сигнала и помехи на выходе ближайшего к объекту и каждого из соседних ГАП. Пример вычисленной АКФ приведен на рис. 4, ВКФ – на рис. 5;

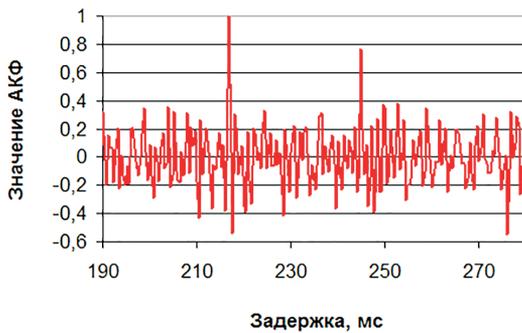


Рис. 4. Пример вычисленной АКФ с КМ наибольшей величины при задержке 216,8 мс, обусловленной интерференцией прямого луча и однократно отразившегося от поверхности, и вторым по величине КМ при задержке 244,8 мс, обусловленной интерференцией прямого луча и однократно отразившегося от дна, а затем от поверхности

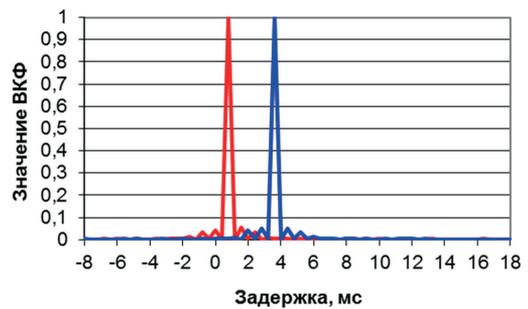


Рис. 5. Пример вычисленной ВКФ сигналов на выходе ближайшего к объекту ГАП и соседнего с ним слева (линия красного цвета), а также на выходе ближайшего к объекту ГАП и соседнего с ним справа (линия синего цвета). КМ в ВКФ соответствуют задержкам распространения шума объекта на соответствующие ГАП

- в вычисленной АКФ выделялись 2-3 наиболее превышающих фон максимума и определялись их абсциссы, которые сопоставлялись с абсциссами максимумов, выделенных на предыдущих циклах обработки. Посредством этого сравнения находится абсцисса τ_{12} максимума, соответствующего интерференции прямого луча и луча, однократно отразившегося от поверхности. Указанная процедура необходима, поскольку в силу разных причин этот максимум не всегда в наибольшей степени превышает фон. В качестве иллюстрации этого утверждения на рис. 6 в зависимости от времени приведены: задержки между прямым лучом и лучом, отразившимся от поверхности (штриховая линия зеленого цвета), а также между прямым лучом и лучом, отразившимся сначала от дна, затем от поверхности (штриховая линия синего цвета); абсцисса наибольшего по уровню максимума (сплошная линия красного цвета);

- в каждой из двух вычисленных ВКФ выделялись узкополосные КМ, наиболее превышающие фон, и определялись их абсциссы τ_- и τ_+ . Динамика изменения положения на оси этих абсцисс и их теоретических значений при движении объекта показана на рис. 7;

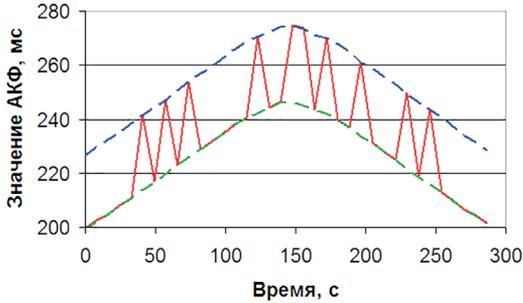


Рис. 6. Рассчитанные зависимости от времени задержки между прямым лучом и отразившимся от поверхности (штриховая линия зеленого цвета) и между прямым лучом и отразившимся сначала от дна, затем от поверхности (штриховая линия синего цвета), а также абсцисса наибольшего по уровню пикового значения в смоделированной АКФ (сплошная линия красного цвета)

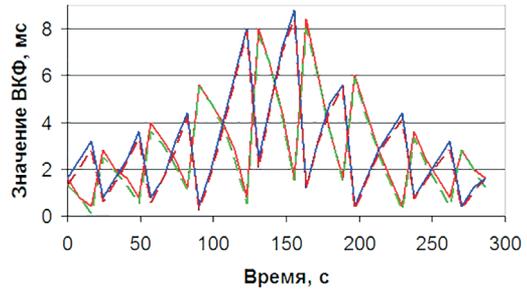


Рис. 7. Динамика изменения положения на оси абсцисс наибольших КМ в ВКФ (сплошные линии) и их теоретические величины (штриховые линии) при движении объекта

- с использованием формул (2) и (4) вычислялись наклонное расстояние до объекта R_i (результат приведен на рис. 8) и глубина расположения объекта H_i (результат приведен на рис. 9);

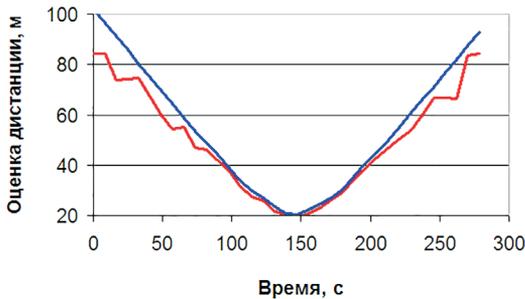


Рис. 8. Пример определения наклонной дистанции до объекта в процессе пересечения им линии антенны при ширине полосы частот 1000 Гц для вычисления ВКФ и ОСП при нахождении объекта над антенной 13,6 дБ. Линия синего цвета – теоретическая зависимость, линия красного цвета – результат моделирования

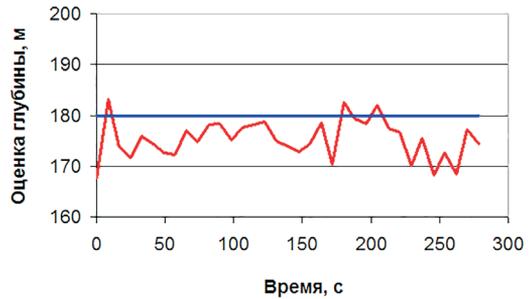


Рис. 9. Пример определения глубины расположения объекта в процессе пересечения им линии антенны при ширине полосы частот 1000 Гц для вычисления ВКФ и ОСП при нахождении объекта над антенной 13,6 дБ. Линия синего цвета – теоретическая зависимость, линия красного цвета – результат моделирования

- вычисленные значения этих параметров сравнивались с их величинами, заданными исходя из модели движения объекта. На основе полученных результатов рассчитывались погрешности оценки ΔR_i и ΔH_i ;
- по завершении моделирования траектории объекта определялись СКП оценок наклонного расстояния и глубины расположения объекта для выбранных полосы частот и ОСП.

Моделирование выполнялось для различных комбинаций полосы частот и ОСП, его результаты представлены на рис. 10 и 11. На рис. 10 приведены зависимости СКП оценок дистанции и глубины от полосы частот, на рис. 11 – от ОСП.

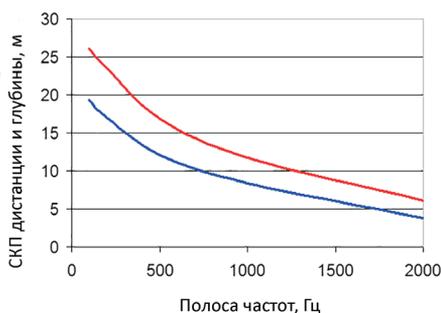


Рис. 10. Зависимость СКП оценок дистанции (линия синего цвета) и глубины (линия красного цвета) объекта от ширины полосы частот, в которой вычисляются АКФ и ВКФ, при ОСП в момент прохода над антенной 13,6 дБ

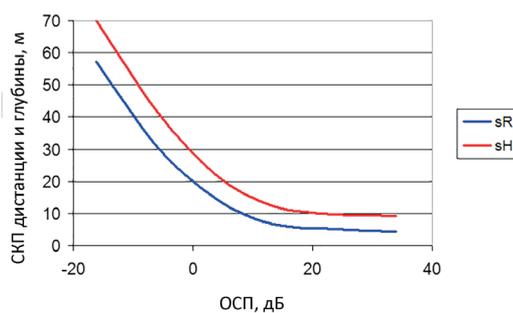


Рис. 11. Зависимость СКП оценок дистанции (линия синего цвета) и глубины (линия красного цвета) объекта от ОСП на выходе ГАП в момент пересечения линии антенны при полосе частот, в которой вычисляются АКФ и ВКФ, 1000 Гц

Из рисунков следует:

- при ОСП в момент прохода над антенной 13,6 дБ и при полосе частот более 1000 Гц СКП оценки дистанции до объекта не превышает 8 м, глубины объекта – 12 м;
- при полосе частот 1000 Гц и ОСП в момент прохода над антенной более 10 дБ дистанция и глубина определяются с аналогичной погрешностью.

В заключение следует сделать одно важное замечание. Результаты моделирования получены для случая, когда в зоне видимости антенны находится только один шумящий объект. Если присутствуют несколько источников звука, количество КМ в АКФ и ВКФкратно возрастает, что существенно затрудняет решение задачи, поскольку алгоритм будет генерировать координаты не только реально существующих, но и ложных объектов. Кроме того, может наблюдаться ситуация, когда при вычислении дистанции и глубины по формулам (2) и (4) будут использоваться КМ в АКФ, соответствующие одному объекту, а КМ в ВКФ – другому.

Выходом из положения является трассировка оценок дистанции и глубины во времени, которая позволит отсеивать ложные объекты.

Экспериментальная проверка алгоритма

Алгоритм проверялся с привлечением экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний в 2022 году инженерной волоконно-оптической сейсмокося в акватории Ладожского озера [27]. Сейсмокося длиной 100 м, состоящая из 309 волоконно-оптических датчиков, укладывалась на дно на глубине 23 м. Скорость звука по всему водному слою была постоянной – 1430 м/с.

Расстояние от места установки сейсмокося до берега не превышало 500 м. Координаты концов сейсмокося были определены при помощи приемника дифференциальной спутниковой навигационной системы (ДСНС). В процессе испытаний сигналы, поступающие от каждого ГАП антенны в полосе частот до 4 кГц, записывались в память нутбука с точной привязкой ко времени.

В качестве шумящего объекта использовался широкополосный излучатель, который буксировался катером со скоростью 1,0 м/с на глубине 12,5 м. Координаты катера определялись при помощи ДСНС и записывались в память ноутбука с точной привязкой ко времени. Полученные экспериментальные данные обрабатывались по описанной выше методике. Длительность одного цикла обработки составляла 0,5 с.

В ходе обработки данных выяснилось, что в районе испытаний присутствует множество локальных источников шумов, которые проявляются в виде большого количества КМ в АКФ и ВКФ, образованных как прямыми сигналами источников, так и их отражениями от дна, поверхности и береговой черты. Пример вычисленной АКФ приведен на рис. 12.

Ввиду этого для выявления трассы излучателя были предприняты следующие меры:

- рассчитывались диапазоны задержек в АКФ и ВКФ, соответствующие глубине района и возможным дистанциям между объектом и сейсмокозой, и при обработке сигналов выделялись КМ в АКФ и ВКФ только в этих диапазонах;
- вычисленные на каждом цикле обработки координаты объектов трассировались во времени, что позволяло отсеять неподвижные и ложные источники.

На рис. 13 показаны результаты, полученные в ходе эксперимента, когда излучатель удалялся от сейсмокозы со скоростью 1 м/с. Линия красного цвета соответствует оценкам наклонной дистанции до объекта, линия синего цвета – оценкам глубины расположения объекта. Штриховые линии показывают фактические значения дистанции и глубины. Ошибки смещения оценок дистанции и глубины составили 5,3 и 7,9 м, среднеквадратические флюктуационные погрешности определения дистанции и глубины – 7,7 м и 6,9 м соответственно.

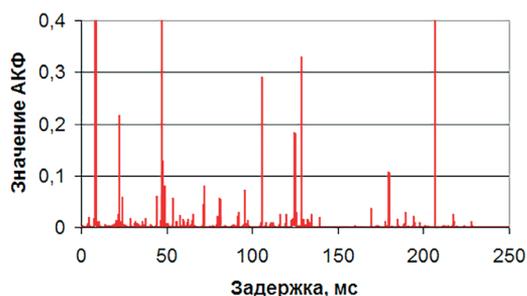


Рис. 12. Пример АКФ, вычисленной с использованием экспериментальных данных. Для наглядности графика исключен не несущий полезной информации КМ наибольшей величины с нулевой задержкой

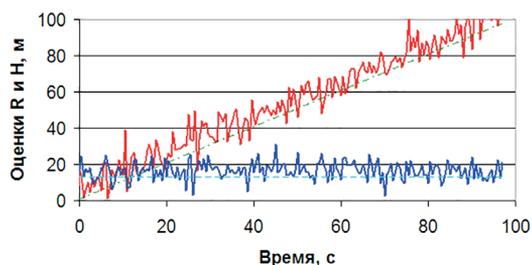


Рис. 13. Пример определения наклонной дистанции (линия красного цвета) и глубины (линия синего цвета) объекта при удалении излучателя от линии сейсмокозы со скоростью 1 м/с. Штриховыми линиями обозначены фактическая дистанция и глубина

Заключение

1. Разработан алгоритм, позволяющий с использованием линейной донной гидроакустической антенны определять глубину, на которой морские объекты ее пересекают, а также другие параметры их движения – курс, скорость и текущее наклонное расстояние до антенны.

2. Алгоритм базируется на вычислении задержек между сигнальными лучами, по которым распространяется широкополосный шум объекта, и состоит в вычис-

лении автокорреляционной функции широкополосного шума объекта на выходе приемника антенны, соответствующего максимальному отношению «сигнал–помеха», и двух взаимно-корреляционных функций сигналов на выходе этого приемника и каждого из двух приемников слева и справа, отстоящих от среднего приемника на расстояние, близкое (но не превышающее) к интервалу пространственной когерентности сигнала на верхней частоте используемого частотного диапазона.

3. Исследованы условия применимости предложенного алгоритма. Показано, что основными факторами, влияющими на точность определения координат объекта, являются ширина полосы частот, используемая для вычисления корреляционных функций, и отношение «сигнал–помеха» на выходе приемника при проходе объекта над антенной.

4. Работоспособность алгоритма проверена путем моделирования и экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГАК МГК-608Э. Официальный сайт АО «НИИ «Атолл». [Электронный ресурс]. www.niatoll.ru (дата обращения: 12.02.2025).
2. SOSUS (Sound surveillance system). Википедия. [Электронный ресурс]. ru.wikipedia.org (дата обращения 12.02.2025).
3. IUSS (Integrated undersea surveillance system). Википедия. [Электронный ресурс]. en.wikipedia.org (дата обращения 12.02.2025).
4. Телятников В.И. Методы и устройства классификации гидроакустических сигналов // Зарубежная радиоэлектроника. 1979. №9. С. 19–38.
5. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.
6. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988.
7. Loureance, J.G., Classification of ships using underwater radiated noise, Underwater Acoustic Data Processing (edited by Y.T.Chan), *Proceedings of NATO Advanced Study Institute*, 1989, pp. 591–596.
8. Машошин А.И. Особенности синтеза алгоритмов классификации морских объектов по их гидроакустическому полю // Морская радиоэлектроника. 2009. №2 (28). С. 8–12.
9. Патент РФ № 2681526. Способ определения класса шумящей цели и дистанции до нее / Марасёв С.В., Машошин А.И., Подшивалов Г.А. Заявл. 22.02.2018. Оpubл. 07.03.2019, бюл. №2.
10. Патент РФ № 2746581. Способ определения класса шумящего морского объекта / Марасёв С.В., Машошин А.И., Подшивалов Г.А. Заявл. 26.05.2020. Оpubл. 19.04.21, бюл. №11.
11. Патент РФ № 2681432. Способ определения класса шумящей цели и дистанции до нее / Марасёв С.В., Машошин А.И., Подшивалов Г.А. Заявл. 12.04.2018. Оpubл. 06.03.2019, бюл. №2.
12. Патент РФ № 2685419. Способ определения класса шумящей цели / Марасёв С.В., Машошин А.И., Подшивалов Г.А. Заявл. 04.05.2018. Оpubл. 18.04.2019, бюл. №11.
13. Quazi, A.H., Lerro, D.T., Passive localization using time-delay estimates with sensor positional errors, *JASA*, 1985, vol. 78, №5, pp. 1664–1670.
14. Hassab, I.C., Contact Localization and Motion Analysis in the Ocean Environment: a Perspective, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1983, vol. OE-8, №3, pp.136–147.
15. 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, *Journal Acoust. Soc. Am.*, 2015, vol. 138, pp. 35–49.
16. Орлов Е.Ф., Фокин В.Н., Шаронов Г.А. Исследование параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в глубоком океане // Акустический журнал. 1988. Т. 34. Вып. 5. С. 902–907.
17. Лазарев В.А., Орлов Е.Ф., Фокин В.Н., Шаронов Г.А. Частотная зависимость параметров интерференционной модуляции широкополосного звука в мелком море // Акустический журнал. 1989. Т. 35. Вып. 4. С. 685–688.

18. Машошин А.И. Помехоустойчивость выделения максимумов в корреляционной функции широкополосного шумового сигнала морского объекта, обусловленных многолучевым распространением сигнала в водной среде // Акустический журнал. 2001. Т. 47. №6. С. 823–829.
19. Машошин А.И. Исследование условий применимости корреляционной функции широкополосного многолучевого сигнала для оценки координат источника // Акустический журнал. 2017. Т. 63. №3. С. 307–313.
20. Патент РФ № 2690223. Способ определения координат морской шумящей цели / Машошин А.И., Мельканович В.С. Заявл. 28.08.2018. Оpubл. 31.05.2019, бюл. №16.
21. Патент РФ № 2724962. Способ определения координат морской шумящей цели / Гриненков А.В., Машошин А.И., Мельканович В.С. Заявл. 27.11.19. Оpubл. 29.06.2020, бюл. №19.
22. Патент РФ № 2797161. Способ определения координат морской шумящей цели / Гриненков А.В., Машошин А.И. Заявл. 27.09.22. Оpubл. 31.05.23, бюл. №16.
23. Патент РФ № 2812119. Способ определения координат морской шумящей цели / Гриненков А.В., Машошин А.И. Заявл. 27.09.22. Оpubл. 23.01.24, бюл. № 3.
24. Телятников В.И. Методы и устройства для определения местоположения источника звука // За-рубежная радиоэлектроника. 1978. №4. С. 66–86.
25. Carey, W.M., The determination of signal coherence length based on signal coherence and gain measurements in deep and shallow water, *J. Acoust. Soc. Am.*, 1998, vol. 104, pp. 831–837.
26. Kozick, R.J., Sadler, B.M., Communication channel estimation and waveform design: time delay estimation on parallel, flat fading channel, US Army research laboratory, 2010, 42 p.
27. Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» впервые представил проект по созданию морских сейсмических буксируемых кос // Корабел.ру. 2019.

Приложение

Вывод формул для вычисления координат и параметров движения объекта

Имеется линейная донная эквидистантная гидроакустическая антенна (рис. П1).

Рассмотрим привязанную ко дну моря плоскую декартову систему координат с центром в месте расположения ГАП с номером m_o , осью X , направленной вдоль линии антенны, и осью Y , ориентированной перпендикулярно линии антенны.

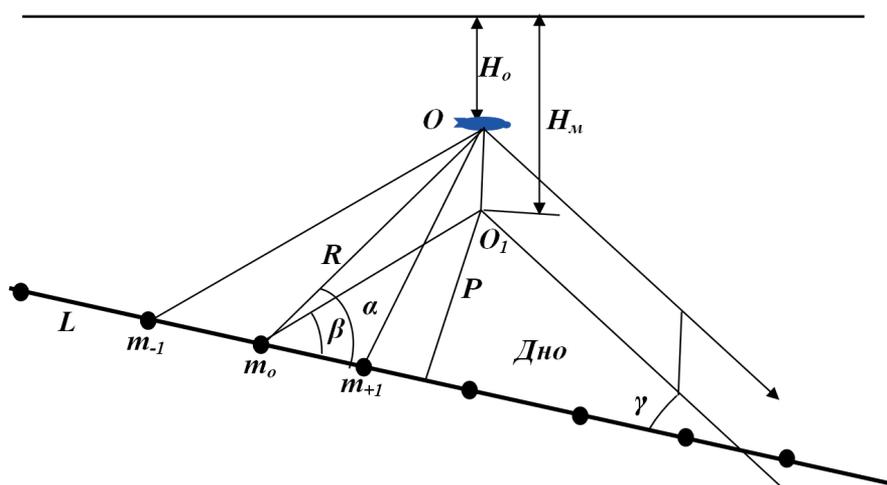


Рис. П1. Иллюстрация определения координат и параметров движения объекта

Требуется определить наклонное расстояние R до объекта от ГАП с номером m_o , угол α с вершиной в месте размещения ГАП с номером m_o между линией антенны и направлением на объект, скорость объекта V и курс объекта γ относительно линии ГАП.

Задержки прихода сигнала объекта O на ГАП m_o и m_{-1} , а также на ГАП m_o и m_{+1} определяются в виде

$$\hat{\tau}_- = \frac{\sqrt{R^2 \cdot \sin^2 \alpha + (L + R \cdot \cos \alpha)^2} - R}{c},$$

$$\hat{\tau}_+ = \frac{\sqrt{R^2 \cdot \sin^2 \alpha + (L - R \cdot \cos \alpha)^2} - R}{c},$$
(П1)

где $\hat{\tau}_-, \hat{\tau}_+$ – задержки прихода сигнала объекта на ГАП m_o и m_{-1} и на ГАП m_o и m_{+1} соответственно;

R – искомое расстояние между объектом и ГАП m_o ;

α – искомый угол между линией ГАП и направлением на объект;

L – расстояние между соседними ГАП;

c – скорость звука на глубине ГАП.

Возведя обе части обоих уравнений (П1) в квадрат и выполнив несложные преобразования, получим:

$$(c \cdot \hat{\tau}_- + R)^2 = R^2 + L^2 + 2 \cdot L \cdot R \cdot \cos \alpha,$$
(П2)

$$(c \cdot \hat{\tau}_+ + R)^2 = R^2 + L^2 - 2 \cdot L \cdot R \cdot \cos \alpha.$$

Вычтем в (П2) из первого уравнения второе:

$$(c \cdot \hat{\tau}_- + R)^2 - (c \cdot \hat{\tau}_+ + R)^2 = 4 \cdot L \cdot R \cdot \cos \alpha,$$
(П3)

откуда

$$\cos \alpha = \frac{(c \cdot \hat{\tau}_- + R)^2 - (c \cdot \hat{\tau}_+ + R)^2}{4 \cdot L \cdot R}.$$
(П4)

Подставляя (П4) в первое уравнение (П2), получим

$$(c \cdot \hat{\tau}_- + R)^2 = R^2 + L^2 + 2 \cdot L \cdot R \cdot \frac{(c \cdot \hat{\tau}_- + R)^2 - (c \cdot \hat{\tau}_+ + R)^2}{4 \cdot L \cdot R}.$$
(П5)

После несложных преобразований будем иметь

$$(c \cdot \hat{\tau}_-)^2 + 2 \cdot c \cdot \hat{\tau}_- \cdot R + (c \cdot \hat{\tau}_+)^2 + 2 \cdot c \cdot \hat{\tau}_+ \cdot R = 2 \cdot L^2,$$
(П6)

откуда

$$R = \frac{2 \cdot L^2 - c^2 \cdot (\hat{\tau}_-^2 + \hat{\tau}_+^2)}{2 \cdot c \cdot (\hat{\tau}_- + \hat{\tau}_+)}.$$
(П7)

В результате дистанция до объекта рассчитывается по формуле (П7), косинус угла между линией ГАП и направлением на объект – по формуле (П4).

Декартовы координаты объекта в момент t_1 измерения наклонной дистанции до объекта записываются в виде

$$Y_1 = R \cdot \cos \alpha,$$

$$X_1 = \sqrt{R^2 - (H_m - H_o)^2} = \sqrt{R^2 (1 - \cos^2 \alpha) - (H_m - H_o)^2},$$
(П8)

где H_m – глубина моря в месте расположения антенны.

При повторном определении в момент времени t_2 наклонной дистанции R и угла α относительно некоторого ГАП с номером m_2 и вычисления с их помощью координат объекта X_2, Y_2 скорость объекта V и курс относительно линии ГАП γ могут быть вычислены по формулам:

$$V = \frac{\sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}}{t_2 - t_1},$$
$$\gamma = \arctg \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}.$$

(П9)

Mashoshin, A.I., Mel'kanovich, V.S., and Timofeev, V.N. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg) Algorithm for Determining the Depth of a Sound Source Using a Bottom Linear Antenna, *Girokopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 1 (128), pp. 146–158.

Abstract. The paper describes an algorithm for determining the depth of a sound source using a multielement bottom linear antenna, based on measurements of differences in signal delays in a multipath channel. The accuracy of the algorithm is confirmed by simulation and verified experimentally.

Key words: hydroacoustics, bottom linear antenna, depth of a sound source submersion

Материал поступил 29.11.2024