

А. И. МАШОШИН, И. В. ПАШКЕВИЧ

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ПАССИВНЫХ ОРИЕНТИРОВ ДЛЯ НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Описаны конструкция подводных пассивных ориентиров (ППО) и их применение для навигации автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Рассмотрена процедура обсервации АНПА с помощью ППО. Показано, что при правильном маневрировании АНПА в процессе обсервации точность определения его координат ограничена только точностью позиционирования ППО при его установке. От этой точности также зависит расстояние между соседними ППО, устанавливаемыми вдоль маршрута АНПА. В случае оснащения АНПА высокоточной автономной навигацией ППО могут устанавливаться с интервалом в несколько сотен километров.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, подводный пассивный ориентир.

Введение

Автономные необитаемые подводные аппараты являются перспективным средством исследования морских глубин. Перечислим области их применения [1–5]:

- обследование дна перед началом работ по добыче углеводородов на шельфе и прокладке подводных трубопроводов;
- прокладка подводных кабелей, в первую очередь подо льдом;
- обследование подводных сооружений, добывающих платформ и трубопроводов;
- проведение широкомасштабных подводных научных исследований в различных областях (гидрофизика, морская биология, химия, геология, климатология, подводная археология);
- поиск затонувших кораблей и самолетов.

Кроме того, планируется широкомасштабное использование АНПА в военных целях [6–9].

Наиболее актуально применение АНПА для изучения и освоения Мирового океана в районах, покрытых льдом, особенно с учетом того, что, по имеющимся оценкам, в них сосредоточена значительная доля залежей полезных ископаемых. Ввиду этого можно с уверенностью прогнозировать, что уже в самом ближайшем будущем в Арктике развернутся широкомасштабные работы по поиску месторождений полез-

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».

Пашкевич Иван Владимирович. Главный специалист по разработке гидроакустики АНПА, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

ных ископаемых и следом за ними в районах обнаруженных месторождений будут созданы подводные (точнее, подледные) комплексы добычи полезных ископаемых. Роль АНПА в работе этих комплексов трудно переоценить. Они будут использоваться как в процессе поиска и добычи ископаемых, так и в регулярном транспортном сообщении подледных станций с материком. Естественно, что речь идет о больших АНПА с водоизмещением более 1,5 т.

Необходимым условием успешного применения АНПА для решения названных задач является их высокоточная подводная навигация, в основе которой лежит счисление пути с использованием бортовых навигационных датчиков – инерциальной навигационной системы (ИНС) и измерителя скорости движения (лага). Тем не менее, в силу накапливающейся погрешности счисления требуется периодическая коррекция координат АНПА с использованием внешних источников навигационных данных. И в этом состоит главная проблема, поскольку в условиях подледного плавания применение спутниковых и радионавигационных систем затруднено.

Учитывая, что при решении рассматриваемой задачи АНПА должны действовать в назначенном ограниченном районе либо двигаться по строго определенному протяженному маршруту, в условиях названных ограничений одним из способов коррекции координат является использование донных маяков-ответчиков (ДМО) [10], установленных вдоль маршрута движения АНПА. Вместе с тем, поскольку ДМО – это достаточно сложные гидроакустические станции, они имеют следующие недостатки:

- ограниченное время функционирования, обусловленное ограниченной емкостью аккумулятора батареи;
- высокая стоимость.

Ввиду этого в статье рассматривается возможность подводной коррекции координат АНПА с помощью альтернативного способа, основанного на использовании пассивных подводных ориентиров, названных так по аналогии с надводными, которые широко применяются в кораблевождении [11].

1. Варианты конструкции пассивных подводных ориентиров

Достоинствами ППО являются:

- достаточно высокая точность обсервации АНПА;
- высокая надежность и неограниченное время функционирования;
- относительно низкая стоимость.

ППО должен удовлетворять следующим требованиям:

- надежно обнаруживаться и распознаваться гидролокатором АНПА;
- координаты ППО должны быть известны с достаточной точностью.

Выполнение обоих требований с учетом названных условий является нетривиальной задачей. Рассмотрим варианты выполнения первого требования.

Трудности здесь состоят в том, что обнаружение и распознавание ППО должно осуществляться активным гидролокатором АНПА на достаточно большой дистанции на фоне донных объектов различного происхождения. Т.е. мало того что пассивный ППО должен обладать достаточно большим коэффициентом звукоотражения на частоте работы гидролокатора АНПА, он должен еще иметь признаки, отличающие его от других донных объектов.

После рассмотрения различных вариантов предпочтение было отдано конструкции ППО в виде некоторого звукоотражающего тела, оснащенного якорем с якорь-тросом длиной до 10 м, с положительной плавучестью, поддерживающей отражающее тело в вертикальном положении (рис. 1). В качестве отражающего тела рассматривались полая металлическая сфера (рис. 1, а) и треугольный уголкового отражатель (рис. 1, б).

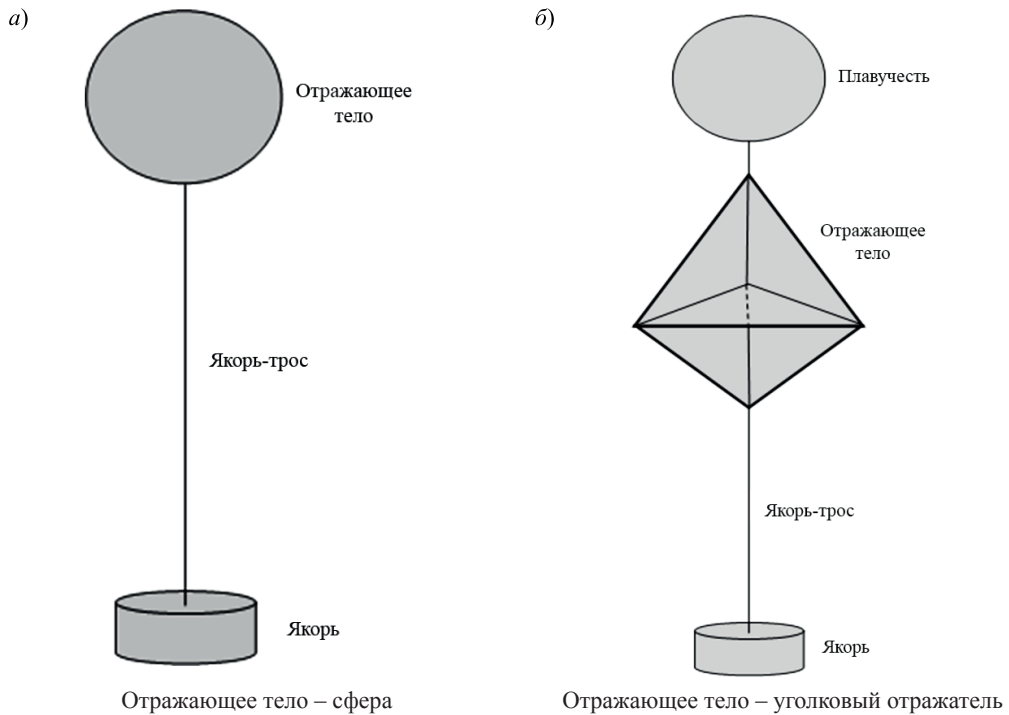


Рис.1. Виды конструкции ППО

Оценим дистанцию обнаружения ППО типовым гидролокатором большого АНПА со следующими параметрами:

- частота излучения $f_{zs} = 15$ кГц;
- полоса частот излучаемого зондирующего сигнала $\Delta f_{zs} = 3$ кГц;
- длительность излучаемого сигнала $T_{zs} = 100$ мс;
- давление зондирующего сигнала на оси характеристики направленности излучающей антенны $P_{zs} = 174$ дБ (здесь и далее значение давления приведено в децибелах относительно 20 мкПа);
- размеры приемной антенны (Ш×В) 2×0,5 м, что обеспечивает коэффициент концентрации на частоте излучения $\gamma = 30$ дБ [14];
- сектора обзора $\pm 130^\circ$ в горизонтальной плоскости и $\pm 30^\circ$ в вертикальной плоскости;
- пороговое индикаторное отношение «сигнал–помеха» (ОСП) для обнаружения эхосигнала $Q_{ir} = 32$ (15 дБ);
- неучтенные технические потери $B = 6$ дБ;
- приведенный уровень шумов моря при волнении 3 балла – 33 дБ (соответственно, давление помех на входе антенны на частоте и в полосе излучения $P_n = 44,2$ дБ);

- погрешности измерения пеленга обнаруженной цели:
 - ✓ приборная погрешность $\varepsilon_p = 0,1^\circ$;
 - ✓ флуктуационная среднеквадратическая погрешность при однократном зондировании [15]:

$$\sigma_p = \frac{40 \cdot c_{zv}}{L_{ant} \cdot f_{zs} \cdot Q_{tr}} \cdot \frac{R}{R_{обн}}, \quad (1)$$

где L_{ant} – ширина приемной антенны;

c_{zv} – скорость звука в воде;

R – текущая дистанция до цели;

$R_{обн}$ – дистанция обнаружения цели.

Из формулы (1) следует, что при приведенных параметрах гидролокатора на дистанции обнаружения (т.е. при пороговом ОСП) $\sigma_p = 0,4^\circ$. По мере приближения к цели погрешность уменьшается пропорционально сокращению дистанции.

Среднеквадратическая погрешность измерения угла места обнаруженной цели при однократном зондировании [15] составляет:

$$\sigma_\psi = \frac{40 \cdot c_{zv}}{H_{ant} \cdot f_{zs} \cdot Q_{tr}} \cdot \frac{R}{R_{обн}}, \quad (2)$$

где H_{ant} – высота приемной антенны.

Из формулы (2) следует, что при приведенных параметрах гидролокатора на дистанции обнаружения (т.е. при пороговом ОСП) $\sigma_\psi = 1,6^\circ$. По мере приближения к цели погрешность уменьшается пропорционально сокращению дистанции.

Среднеквадратическая погрешность измерения дистанции до обнаруженной цели при однократном зондировании составляет не более 2% от текущей дистанции и в основном определяется погрешностью знания скорости звука [12]:

$$\sigma_R = 0,02 \cdot R, \quad R > R_{МЗ}, \quad (3)$$

где R – дистанция до ППО;

$R_{МЗ}$ – граница мертвой зоны, определяемая длительностью излучаемого сигнала (в нашем случае $R_{МЗ} = 75$ м).

Рассмотрим 2 варианта отражающего тела ППО [12]:

- полая сфера радиуса $R_{сф} = 0,5$ м, коэффициент отражения которой (называемый силой цели)

$$K = 10 \lg \left(\frac{R_{сф}^2}{4} \right) = -12 \text{ дБ}; \quad (4)$$

- треугольный уголкового отражатель со стороной треугольника $L = 1$ м, имеющий силу цели

$$K = 10 \lg \left(\frac{L^4 \cdot f_{zs}^2}{3 \cdot c_{zv}^2} \right) = 15,2 \text{ дБ}. \quad (5)$$

Характеристики гидроакустических условий:

- цилиндрический закон распространения акустического сигнала с переходным расстоянием 1 км;
- коэффициент пространственного затухания на частоте излучения $\beta = 2,1$ дБ/км.

Дальность обнаружения ППО определяется как решение относительно R уравнения [12]

$$P_{zs} + K - 2 \cdot \beta \cdot R - 40 \cdot \lg R - 120 + A(R) + 5 \cdot \lg(\Delta f_{zs} \cdot T_{zs}) - (P_n - \gamma) - B = Q_{tr}, \quad (6)$$

где $A(R)$ – аномалия распространения сигнала, при цилиндрическом законе вычисляемая по формуле

$$A(R) = \begin{cases} 0 & \text{при } R \leq R_0 \\ 20 \cdot \lg \frac{R}{R_0} & \text{при } R > R_0 \end{cases}; \quad (7)$$

K – сила цели, дБ.

Из решения уравнения (6) следует, что дистанция обнаружения ППО составляет 4,3 км при отражающем теле в виде полый сферы с радиусом 0,5 м и 9,1 км – при отражающем теле в виде треугольного уголкового отражателя со стороной треугольника 1 м.

Поскольку вариант с полый сферой существенно проигрывает по дальности обнаружения варианту с треугольным уголковым отражателем, в дальнейшем будем рассматривать только последний.

Распознавание ППО описанной конструкции в активном режиме работы гидролокатора АНПА осуществляется по следующим признакам:

- по его неподвижности (что отличает ППО от подвижных морских объектов);
- по известному отстоянию ППО от дна (что отличает его от донных объектов);
- по его известным геометрическим размерам (что отличает ППО от крупногабаритных донных объектов);
- по известной величине силы цели на частоте излучения.

Схема определения координат АНПА с использованием ППО описанной конструкции представлена на рис. 2.

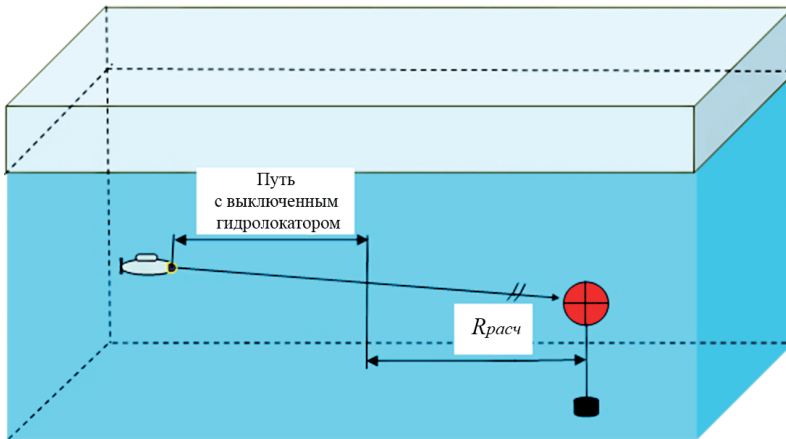


Рис. 2. Иллюстрация процедуры поиска ППО

При движении АНПА по заданному маршруту система управления (СУ) АНПА извлекает из памяти вычислителя характеристики следующего по маршруту движения ППО, а именно: географические координаты, геометрические размеры, величину отстояния отражающего тела от дна, коэффициент отражения (сила цели) и рас-

четную дальность обнаружения гидролокатором АНПА $R_{расч}$. СУ периодически рассчитывает текущее расстояние до ППО. Как только расчетное расстояние до ППО, увеличенное на возможную погрешность счисления пути, станет равным расчетной дальности обнаружения ППО $R_{расч}$, СУ выдает команду погрузиться на максимально возможную глубину (не меньшую, чем глубина расположения отражающего тела ППО), включить гидролокатор и начать поиск ППО.

При обнаружении на фоне донной реверберации локального отражающего объекта в гидролокаторе начинается его классификация.

Алгоритм классификации состоит из нескольких этапов.

1. С момента обнаружения объекта в процессе приближения к нему на каждом цикле локации измеряются следующие характеристики (классификационные признаки) объекта:

- скорость объекта $V_{об}$, измеряемая одним из двух способов – по доплеровскому смещению частоты эхосигнала (ЭС) при излучении тонального зондирующего сигнала или сигнала в виде последовательности Костаса либо по результатам траекторного анализа объекта;
- коэффициент отражения (сила цели) объекта $K_{об}$, который рассчитывается по формуле [12]

$$K_{об} = P_{es} - P_{zs} + 2 \cdot \beta \cdot R + 40 \cdot \lg R + 120 - A(R) \text{ дБ}, \quad (8)$$

где P_{es} – давление эхосигнала в его полосе частот, измеренное на выходе приемного тракта и приведенное ко входу приемной антенны, дБ;

R – измеренное гидролокатором наклонное расстояние до объекта, м;

- горизонтальная геометрическая протяженность объекта L , определяемая по формуле

$$L = R_{об} \cdot N_{ХН} \cdot \Delta\alpha_{ХН}, \quad (9)$$

где $N_{ХН}$ – количество характеристик направленности (ХН) антенны в горизонтальной плоскости, в которых наблюдается эхосигнал;

$\Delta\alpha_{ХН}$ – ширина ХН антенны в горизонтальной плоскости, рад;

- отстояние обнаруженного объекта от дна $H_{об}$, которое рассчитывается по формуле

$$H_{об} = \max(0; \Delta H_{АНПА} + R_{об} \cdot \sin(\psi)), \quad (10)$$

где $\Delta H_{АНПА}$ – измеренная эхолотом глубина под килем АНПА, м;

ψ – измеренный гидролокатором угол в вертикальной плоскости прихода эхосигнала, рад (с плюсом – выше горизонта, с минусом – ниже).

Решение о том, что обнаруженный объект является ППО, принимается на основе вычисленных вероятностей его непринадлежности к возможным альтернативным подледным классам объектов с использованием оценок перечисленных классификационных признаков (КП).

В таблице приведены средние значения КП для ППО и 4-х альтернативных классов подледных объектов, а также предельные погрешности их измерения.

Средние значения классификационных признаков
подледных объектов и предельные погрешности их измерения

Классификационный признак (КП)	Классы объектов					Предельная погрешность измерения КП
	ППО (кл. 0)	Складки рельефа (кл. 1)	Камни (кл. 2)	ПЛ (кл. 3)	АНПА (кл. 4)	
	Среднее значение КП					
$V_{об}^3$, уз. КП-1	0	0	0	>2	>1	$\Delta V = 3 \cdot \frac{2 \cdot C_{эс}}{f_{эс} \cdot T_{эс}} = 0,6$ м/с
$K_{об}^2$, дБ КП-2	15,2	$10 \lg(R_{эс}^2 \Delta \alpha \Delta \psi) - 30$	-10...0	8	-12	6...10 дБ
L , м КП-3	1	>100	1-3			$\Delta L = R_{эс} \cdot \Delta \alpha_{ХН}$, м
$H_{об}^2$, м КП-4	10	0	0	>20	>5	$\Delta H = R_{эс} \cdot \frac{\Delta \psi}{2}$ м

2. На каждом цикле измерения КП вычисляются апостериорные вероятности непринадлежности обнаруженного объекта к каждому из четырех альтернативных классов с использованием каждого из четырех КП. Вычисление осуществляется по формуле

$$P_{\overline{ппо}_i} = \frac{F_{0j}}{F_{0j} + F_{ij}}, \quad (11)$$

где $P_{\overline{ппо}_i}$ – апостериорная вероятность непринадлежности ППО к i -му альтернативному классу по j -му КП;

F_{ij} – значение функции правдоподобия принадлежности объекта к i -му классу по j -му КП (класс $i = 0$ соответствует ППО), вычисляемое по формуле

$$P_{ij} = \exp \left\{ -4,5 \cdot \left[\frac{\hat{x}_j - m_{ij}}{\Delta x_j} \right]^2 \right\}, \quad (12)$$

\hat{x}_j – результат измерения (оценка) j -го КП;

m_{ij} – среднее значение j -го КП для i -го класса;

Δx_j – предельная погрешность измерения j -го КП.

3. Решение о принадлежности обнаруженного объекта к классу ППО принимается, если для каждого i -го альтернативного класса хотя бы по одному j -му КП вероятность непринадлежности к этому классу ППО превышает заданный порог $P_{нор}$ (например, $P_{нор} = 0,9$). Если же хотя бы для одного альтернативного класса хотя бы по одному j -му КП вероятность непринадлежности к этому классу ППО меньше величины $1 - P_{нор}$, принимается решение, что обнаруженный объект не ППО. Если на текущем цикле локации окончательное решение не принято, сближение с обнаруженным объектом продолжается. И так до тех пор, пока одно из решений не будет принято.

Рассмотрим, как описанный алгоритм будет работать в динамике. Допустим, что обнаруженным объектом фактически является ППО.

Вскоре после обнаружения объекта можно будет принять решение о его подвижности/неподвижности. Если допустить крайний случай, а именно что скорость неподвижного ППО была измерена с предельной погрешностью и составила $V_{об} = 0,6$ м/с, то расчет по формуле (11) покажет: вероятность того, что цель неподвижна, равна 0,92. Т.е. классы 3 и 4 (ПЛ и АНПА) в дальнейшем можно не рассматривать.

Вторым КП, который становится информативным с дистанции обнаружения, является сила цели, вычисляемая по формуле (8) с использованием измеренных давления эхосигнала на входе антенны и расстояния до объекта. Из табл. 1 следует, что сила цели ППО в случае применения уголкового отражателя существенно превышает силу цели объектов классов 1 и 2 (подвижные объекты рассматривать не будем, поскольку они исключаются по скорости). Отражения от складок грунта практически идентичны донной реверберации. Коэффициент отражения от камней существенно меньше коэффициента отражения от уголкового отражателя. По этой причине даже с учетом достаточно большой погрешности измерения по данному признаку в большинстве случаев удастся исключить классы 1 и 2 уже на дистанциях, близких к дистанции обнаружения.

Если на основании двух признаков делается вывод о непринадлежности обнаруженного объекта ни к одному из 4-х альтернативных классов, то принимается решение, что он является ППО. В противном случае сближение с ним продолжается, пока не будет выполнена классификация по всем четырем КП одновременно.

На дистанции обнаружения 9 км минимальная оценка горизонтальной протяженности объекта L при ширине приемной антенны 2 м составляет 400 м. Если ширина обнаруженного объекта превышает эту величину, то эхосигнал будет наблюдаться в нескольких пространственных каналах и рассчитываемая по формуле (11) вероятность того, что обнаруженный объект является непротяженным, превысит порог 0,9. Это даст возможность исключить из дальнейшего рассмотрения протяженные цели. Если же эхосигнал наблюдается в одном пространственном канале, оценка его горизонтальной протяженности, полученная на дистанции 9 км, составляет от 0 м до 400 м. В связи с этим вынести решение о непротяженности объекта на дистанции 9 км не представляется возможным. По мере приближения к обнаруженному объекту, если его протяженность более 100 м, эхосигнал от него, начиная с дистанции 2,25 км, будет наблюдаться в нескольких пространственных каналах. В нашем же случае при обнаружении ППО эхосигнал на всех дистанциях будет наблюдаться в одном канале, однако уже на расстоянии 2,25 км можно будет принять решение, что объект не является протяженным, и тем самым исключить из рассмотрения класс объектов 1. Данный КП, используемый совместно с силой цели, позволяет повысить надежность исключения из рассмотрения протяженных целей.

Оценка отстояния обнаруженного объекта от дна информативна, когда глубина, на которой движется АНПА, превышает глубину отражающего тела ППО. В частности, если отражающее тело ППО отстоит от дна на 10 м, а у АНПА под килем 5 м, то при предельной погрешности измерения угла прихода эхосигнала в вертикальной плоскости 3° , начиная с расстояния 400 м, эхосигнал от ППО будет наблюдаться в отрыве от донной реверберации, соответственно, оценка отстояния обнаруженного объекта от дна будет больше нуля.

Если обнаруженный объект фактически является АНПА или ПЛ, то он будет правильно классифицирован с использованием оценки скорости на дистанции, близкой

к дистанции обнаружения. Если обнаружен протяженный объект, то он надежно будет распознан по силе цели и, если потребуется, по горизонтальной протяженности. Малоразмерные донные объекты будут классифицированы по силе цели и отстоянию от дна.

Следует особо заметить, что классификация по всем КП выполняется по результатам каждого цикла локации, повторяющегося с периодом порядка 15 с. Вычисленные вероятности накапливаются, что позволяет уменьшить флуктуации оценок вероятностей.

Если принято решение, что обнаруженный объект является искомым ППО, вычисляются координаты АНПА по формуле

$$\begin{aligned}\hat{X}_{АНПА} &= \hat{X}_{ППО} + \hat{R} \cdot \cos(\hat{\psi}) \cdot \sin(\hat{P} \pm 180), \\ \hat{Y}_{АНПА} &= \hat{Y}_{ППО} + \hat{R} \cdot \cos(\hat{\psi}) \cdot \cos(\hat{P} \pm 180),\end{aligned}\tag{13}$$

где $\hat{X}_{АНПА}, \hat{Y}_{АНПА}$ – искомые оценки координат АНПА;

$\hat{X}_{ППО}, \hat{Y}_{ППО}$ – известные оценки координат ППО;

\hat{R} – оценка наклонной дистанции до ППО;

$\hat{\psi}$ – оценка вертикального угла ППО;

\hat{P} – оценка пеленга ППО.

Оценим погрешности определения координат АНПА с использованием формулы (13).

Дисперсии оценок координат АНПА могут быть определены по формулам [16]:

$$\begin{aligned}\sigma_{\hat{X}_{АНПА}}^2 &= \sigma_{\hat{X}_{ППО}}^2 + \sigma_{\hat{Z}_X}^2, \\ \sigma_{\hat{Y}_{АНПА}}^2 &= \sigma_{\hat{Y}_{ППО}}^2 + \sigma_{\hat{Z}_Y}^2,\end{aligned}\tag{14}$$

где $\sigma_{\hat{X}_{ППО}}^2, \sigma_{\hat{Y}_{ППО}}^2$ – дисперсии оценок координат ППО;

$\sigma_{\hat{Z}_X}^2, \sigma_{\hat{Z}_Y}^2$ – дисперсии случайных величин Z_X, Z_Y , вычисляемых по формулам:

$$\begin{aligned}Z_X &= R \cdot \cos(\psi) \cdot \sin(P \pm 180), \\ Z_Y &= R \cdot \cos(\psi) \cdot \cos(P \pm 180).\end{aligned}\tag{15}$$

Учитывая независимость и малость погрешностей оценки дистанции и углов, относительные дисперсии переменных Z_X, Z_Y могут быть определены по формулам [16]:

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_{Z_X}^2}{Z_X^2} &= \frac{\sigma_{R_n}^2}{R^2} + \operatorname{tg}^2(\psi) \cdot \sigma_{\psi}^2 + \operatorname{ctg}^2(P) \cdot \sigma_P^2, \\ \frac{\sigma_{Z_Y}^2}{Z_Y^2} &= \frac{\sigma_{R_n}^2}{R^2} + \operatorname{tg}^2(\psi) \cdot \sigma_{\psi}^2 + \operatorname{tg}^2(P) \cdot \sigma_P^2.\end{aligned}\tag{16}$$

Подставляя (16) в (14), получим:

$$\begin{aligned}\sigma_{\hat{X}_{АНПА}}^2 &= \sigma_{\hat{X}_{ППО}}^2 + \cos^2(\psi) \cdot \sin^2(P) \cdot \sigma_{R_n}^2 + \\ &+ R^2 \cdot \sin^2(\psi) \cdot \sin^2(P) \cdot \sigma_{\psi}^2 + R^2 \cdot \cos^2(\psi) \cdot \cos^2(P) \cdot \sigma_P^2, \\ \sigma_{\hat{Y}_{АНПА}}^2 &= \sigma_{\hat{Y}_{ППО}}^2 + \cos^2(\psi) \cdot \cos^2(P) \cdot \sigma_{R_n}^2 + \\ &+ R^2 \cdot \sin^2(\psi) \cdot \cos^2(P) \cdot \sigma_{\psi}^2 + R^2 \cdot \cos^2(\psi) \cdot \sin^2(P) \cdot \sigma_P^2.\end{aligned}\tag{17}$$

Учитывая малость угла ψ , можно принять

$$\begin{aligned}\cos^2(\psi) &\approx 1, \\ \sin^2(\psi) &\approx 0.\end{aligned}\tag{18}$$

Тогда (17) примет вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{\dot{x}_{АНПА}}^2 &= \sigma_{\dot{x}_{ППО}}^2 + \sin^2(P) \cdot \sigma_{R_n}^2 + R^2 \cdot \cos^2(P) \cdot \sigma_P^2, \\ \sigma_{\dot{y}_{АНПА}}^2 &= \sigma_{\dot{y}_{ППО}}^2 + \cos^2(P) \cdot \sigma_{R_n}^2 + R^2 \cdot \sin^2(P) \cdot \sigma_P^2.\end{aligned}\tag{19}$$

Дисперсия круговой погрешности оценки координат АНПА составит

$$\sigma_{\Delta R_{АНПА}}^2 = \sigma_{\dot{x}_{АНПА}}^2 + \sigma_{\dot{y}_{АНПА}}^2 = \sigma_{\dot{x}_{ППО}}^2 + \sigma_{\dot{y}_{ППО}}^2 + \sigma_{R_n}^2 + R^2 \cdot \sigma_P^2.\tag{20}$$

Подставляя в (20) дисперсии оценок пеленга (1) и дистанции (3), получим:

$$\begin{aligned}\sigma_{\Delta R_{АНПА}}^2 &= \left(\sigma_{\dot{x}_{ППО}}^2 + \sigma_{\dot{y}_{ППО}}^2\right) + 4 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 + \sigma_{P/обн}^2 \cdot \frac{R^4}{R_{обн}^2} = \\ &= \left(\sigma_{\dot{x}_{ППО}}^2 + \sigma_{\dot{y}_{ППО}}^2\right) + 4 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{R^4}{R_{обн}^2} = \\ &= \left(\sigma_{\dot{x}_{ППО}}^2 + \sigma_{\dot{y}_{ППО}}^2\right) + 4 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 \cdot \left(1 + 0,125 \cdot \frac{R^2}{R_{обн}^2}\right).\end{aligned}\tag{21}$$

Из анализа формулы (21) следует, что дисперсия круговой погрешности координат АНПА равна сумме дисперсии погрешности позиционирования ППО (первая сумма в скобках в формуле (21)) и дисперсии, обусловленной погрешностями измерения пеленга и дистанции ППО (второй член в формуле (21)). При этом вторая дисперсия зависит от расстояния до ППО: с его сокращением дисперсия монотонно уменьшается.

Для оценки влияния погрешностей измерения пеленга и дистанции на погрешность оценки координат АНПА на рис. 3 приведен график зависимости величины 2-го члена в формуле (21) от расстояния до ППО.

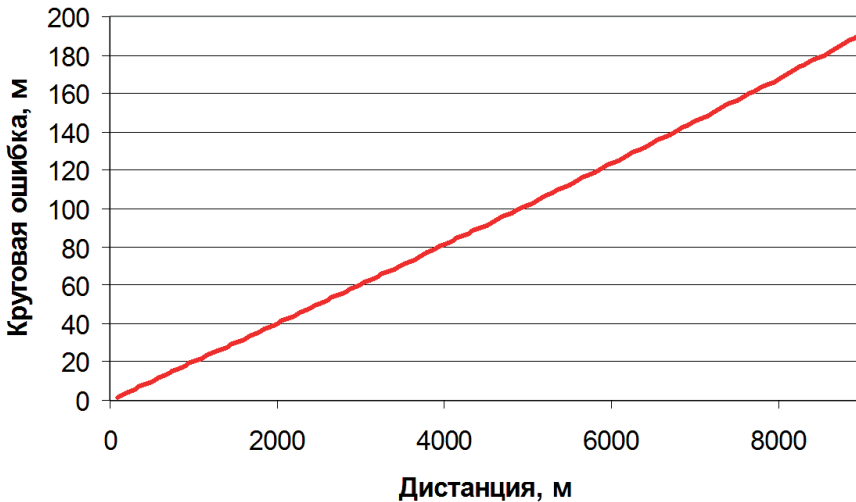


Рис. 3. Зависимость от дистанции до ППО составляющей среднеквадратической круговой погрешности определения координат АНПА, обусловленной погрешностями измерения гидролокатором АНПА пеленга и расстояния до ППО

Из рис. 3 следует, что на дистанции обнаружения ППО 9 км вклад погрешностей измерения гидролокатором пеленга и дистанции ППО в среднеквадратическую круговую погрешность определения координат АНПА составляет 192 м. При сближении с ППО этот вклад монотонно уменьшается вплоть до величины 2 м на дистан-

ции 100 м. Эта погрешность является предельно малой, поскольку при дальнейшем сближении ППО попадает в мертвую зону гидролокатора.

Таким образом, для обеспечения высокоточного позиционирования АНПА с использованием ППО необходимо:

- максимально точно позиционировать ППО при его установке;
- сближаться с ППО на расстояние, при котором расчетная погрешность позиционирования АНПА, обусловленная погрешностями измерения пеленга и дистанции ППО, будет меньше погрешности позиционирования ППО.

2. Методы установки и позиционирования пассивных подводных ориентиров

Выбор метода установки и позиционирования ППО зависит от ряда условий. Если в летний период года район свободен ото льда, ППО могут быть установлены с надводных кораблей (судов) и позиционированы с использованием имеющихся на корабле средств высокоточной обсервации.

В районах с ледовым покровом ППО могут устанавливаться с использованием ледокола либо со льда через специально для этого просверленные лунки нужного диаметра.

Задача усложняется, если район покрыт льдом круглогодично и по каким-либо причинам не представляется возможным применить ни один из названных способов. В этом случае ППО могут быть установлены при помощи подводной лодки, оборудованной системой высокоточной подводной навигации.

Оценим точность позиционирования ППО при установке его с судна, оборудованного приемником спутниковой навигационной системы. Рассмотрим 2 варианта:

- судно не оборудовано гидролокатором для определения координат ППО, погрузившегося на дно;
- судно оборудовано таким гидролокатором.

В первом варианте погрешность позиционирования ППО будет складываться из погрешности позиционирования судна (точнее, той его части, с которой ППО погружается в воду) и величины сноса ППО в процессе погружения вследствие подводного течения. В качестве предельной погрешности позиционирования судна можно принять 10 м. При средней скорости погружения ППО 1 м/с и скорости течения 1 уз. величина сноса составит $0,5 H_m$, где H_m – глубина моря в месте установки ППО. Таким образом, в морях Северного Ледовитого океана погрешность позиционирования ППО, определяемая величиной его сноса при погружении, может составлять от 100 до 1000 м.

Если судно оборудовано гидролокатором, то с его помощью может быть осуществлено позиционирование установленного ППО. Учитывая, что использование гидролокатора позволяет наиболее точно измерить дистанцию и пеленг и менее точно угол в вертикальной плоскости, позиционирование целесообразно выполнить путем одновременного измерения пеленга ППО P , наклонной дистанции до ППО R и глубины под килем H_m . Тогда координаты ППО могут быть вычислены по формулам:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{\text{ппо}} &= \hat{X}_C + \sqrt{\hat{R}^2 - \hat{H}_m^2} \cdot \sin(\hat{P}), \\ \hat{Y}_{\text{ппо}} &= \hat{Y}_C + \sqrt{\hat{R}^2 - \hat{H}_m^2} \cdot \cos(\hat{P}), \end{aligned} \quad (22)$$

где \hat{X}_C, \hat{Y}_C – оценки координат судна, полученные с применением спутниковой навигационной системы.

Воспользовавшись приведенной выше методикой вычисления точности позиционирования АНПА (формулы (14)–(21) и рис. 3), получим предельную круговую погрешность позиционирования ППО (с учетом погрешности позиционирования судна) не более 30 м. При необходимости погрешность позиционирования ППО можно уменьшить, замерив P, R и H_M с нескольких (желательно взаимно перпендикулярных) направлений и усреднив полученные координаты ППО.

Расстояние между ППО, установленными вдоль маршрута, даст возможность АНПА пройти весь маршрут и прибыть в его целевую точку с круговой погрешностью, не превосходящей допустимую. Для этого АНПА, двигаясь постоянным курсом от одного ППО к другому, должен попасть в круг с центром в точке расположения этого ППО и радиусом, равным дистанции обнаружения ППО гидролокатором.

Если принять, что погрешность позиционирования АНПА с использованием ППО обусловлена главным образом погрешностью позиционирования ППО, то это условие выполняется при

$$\Delta L_{АНПА/отн} \cdot L_{ППО} < R_{обн} - 2 \cdot \Delta L_{ППО}, \quad (23)$$

где $\Delta L_{АНПА/отн}$ – предельная величина отклонения от маршрута за единицу пройденного пути;

$L_{ППО}$ – расстояние между соседними ППО;

$R_{обн}$ – дистанция обнаружения ППО гидролокатором АНПА;

$\Delta L_{ППО}$ – предельная погрешность позиционирования ППО.

Откуда следует

$$L_{ППО} < \frac{R_{обн} - 2 \cdot \Delta L_{ППО}}{\Delta L_{АНПА/отн}}. \quad (24)$$

На рис. 4 приведена зависимость расстояния между соседними ППО от предельной относительной погрешности отклонения АНПА от маршрута, посчитанная по формуле (24) при двух значениях предельной погрешности позиционирования ППО – $\Delta L_{ППО} = 30$ м и 1000 м, которые соответствуют двум вариантам позиционирования ППО, и дистанции обнаружения ППО гидролокатором АНПА $R_{обн} = 9$ км.

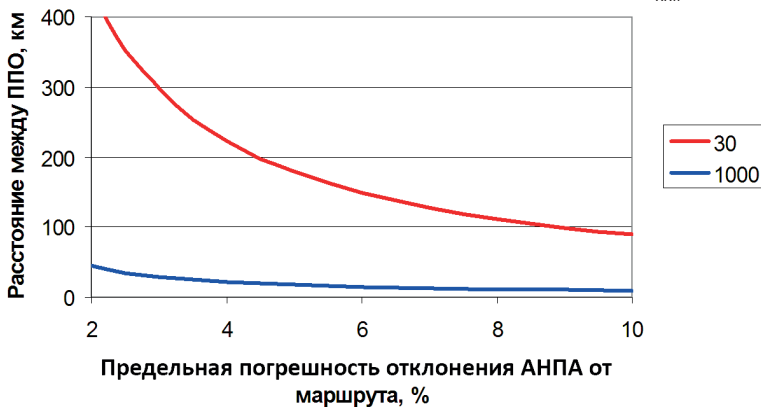


Рис. 4. Зависимость расстояния между соседними ППО от предельной относительной погрешности отклонения АНПА от маршрута. Параметром графика является погрешность позиционирования ППО, м

Из рис. 4 следует, что при позиционировании ППО с использованием гидролокатора расстояние между соседними ППО сокращается с 430 км при отклонении АНПА от маршрута 2% до 88 км при отклонении 10%. Без использования гидролокатора эти расстояния уменьшаются до 10 раз.

В принципе ППО могут устанавливаться вдоль маршрута реже, чем предписывает формула (24). В этом случае есть вероятность, что АНПА, достигнув расчетной точки нахождения ППО, не обнаружит его и будет вынужден его искать, двигаясь по траектории, представляющей собой раскручивающуюся спираль, – оптимальной для поиска неподвижной цели [13]. При этом с учетом малой скорости АНПА поиск может занять продолжительное время.

Заключение

Подледное плавание АНПА по заданному маршруту может быть обеспечено за счет установленных вдоль маршрута пассивных подводных ориентиров (ППО), преимуществом которых по сравнению с донными маяками-ответчиками является неограниченное время функционирования и существенно меньшая стоимость.

В работе описана процедура обсервации АНПА с помощью ППО. Показано, что при правильном маневрировании АНПА в процессе обсервации точность определения его координат ограничена только точностью позиционирования ППО при его установке. От этого также зависит расстояние между соседними ППО, устанавливаемыми вдоль маршрута АНПА. В случае оснащения АНПА высокоточной автономной навигацией ППО могут устанавливаться с интервалом в несколько сотен километров.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.
2. Инзарцев А.В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. №2(4). С. 5–14.
3. Боженов Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №1. С. 4–68.
4. Millar, G., Mackay, L., Maneuvering Under the Ice, *Sea Technology*, 2015, vol. 56, no. 4, pp. 35–38.
5. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. №1. С. 4–13.
6. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.
7. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. №5. С. 79–88.
8. Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №3. С. 37–48.
9. Jane's International Defense, 2013, September, p. 15; 2013, December, p. 22.
10. Кебкэл К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. №3 (94). С. 115–130.
11. Справочник штурмана / под ред. В.Д. Шандабылова. М.: Воениздат, 1968. 540 с.
12. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
13. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. М.: Сов. радио, 1977. 336 с.
14. Смарышев М.Д., Добровольский Ю.Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984.

15. Бреннан Л.Э. Точность измерения угловых координат радиолокатором с антенной в виде фазированной решетки // Зарубежная радиоэлектроника. 1962. №1. С.27–34.
 16. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988.
-

Mashoshin, A.I. and Pashkevich, I.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)
Application of Underwater Passive Landmarks for Autonomous Unmanned Underwater Vehicles Navigation, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 3 (110), pp. 95–108.

Abstract. The article describes the design of passive underwater landmarks (PUL) and their use for navigation of autonomous unmanned underwater vehicles (AUV). The procedure of AUV observation using PUL is considered. It is shown that with proper maneuvering of the AUV during observation, the accuracy of determining its coordinates is limited only by the accuracy of the PUL positioning during installation. This accuracy also affects the distance between neighboring PULs installed along the AUV's route. If the AUV is equipped with a high-precision autonomous navigation system, the PULs can be installed at the intervals of several hundred kilometers.

Key words: autonomous unmanned underwater vehicle, underwater passive landmark.

Материал поступил 14.04.2020