

УДК 681.88
EDN WBYFMX

Г. В. КОНЮХОВ, А. И. МАШОШИН

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ЦЕЛИ ПРИ БИСТАТИЧЕСКОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ

В статье предложен алгоритм выработки координат и параметров движения подводной цели при бистатической гидролокации, в котором не используются данные о пространственной ориентации приемной антенны, свободно вращающейся вокруг вертикальной оси. Новизна алгоритма заключается в том, что пеленг и дистанция до цели вычисляются с привлечением измеренного приемником угла между направлениями прямого и отраженного от объекта сигналов излучателя, а также разности моментов прихода этих сигналов. Для применения алгоритма приемная антенна оборудуется датчиком угловой скорости.

Путем моделирования проверена корректность алгоритма и определена точность расчета координат и параметров движения цели с учетом различных факторов.

Ключевые слова: гидроакустика, бистатическая гидролокация, определение координат и параметров движения объекта, моделирование.

Введение

Уровень шумоизлучения подводных лодок (ПЛ) во всем мире неуклонно снижается благодаря внедрению соответствующих технических решений [1]. В настоящее время поиск ПЛ пассивными гидроакустическими средствами уже становится неэффективным, то же можно сказать и о подводных аппаратах различного типа и назначения [2]. В связи с этим при обнаружении подводных объектов на передний план выдвигаются распределенные системы подводного наблюдения (РСПН) на базе малогабаритных излучателей и приемников (как правило, в виде заякоренных радиогидроакустических буев – РГБ) [3–5], функционирующие в режиме мультистатической гидролокации [6–9].

В состав РСПН входят ненаправленные излучатели, равномерно распределенные по контролируемому району, и приемники с направленными антеннами, которые размещаются вокруг излучателей на дистанциях, обеспечивающих обнаружение заданных подводных объектов (целей). Излучатели генерируют зондирующие сигналы (ЗС), которые отражаются от целей и в виде эхосигналов (ЭС) поступают на входы антенн приемников. Наиболее широко РСПН с мультистатической гидролокацией применяются в противолодочной авиации [10].

Конюхов Геннадий Вячеславович. Кандидат технических наук, начальник группы, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (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».

Помимо обнаружения и классификации целей в задачи РСПН входит выработка их координат (пеленга, дистанции) и параметров движения (курса и скорости) [11, 12]. В системах с мульти- и моностатической гидролокацией этот процесс отличается.

При определении координат и параметров движения (КПД) объекта необходимо учесть техническое ограничение приемников РСПН, заключающееся в том, что их антенны свободно вращаются вокруг своей вертикальной оси и для расчета пеленга найденной цели необходимо контролировать текущее угловое положение антенны. В силу имеющихся ограничений на габариты и стоимость оборудовать РГБ высокоточной аппаратурой контроля углового положения в географической системе координат (СК) не представляется возможным. Как правило, для этого используется простейший магнитный компас с низкой точностью, причем существенно зависящей от географической широты (в частности, в высоких широтах такая погрешность становится неприемлемой).

Целью исследования является разработка алгоритма расчета КПД обнаруженной ПЛ при мультистатической гидролокации с учетом особенностей и ограничений решения задачи, а также проверка его корректности и определение точности выработки КПД в зависимости от различных факторов.

В разделе 1 приводится постановка задачи, в разделе 2 – обоснование алгоритма, а в разделе 3 – описание методики и результатов моделирования.

1. Постановка задачи

Мультистатическую систему гидролокации можно представить как совокупность однотипных бистатических систем «излучатель – приемник». Ненаправленный (все-направленный) излучатель периодически передает ЗС, которые отражаются от цели и в виде ЭС поступают на приемную антенну с круговым обзором в горизонтальной плоскости.

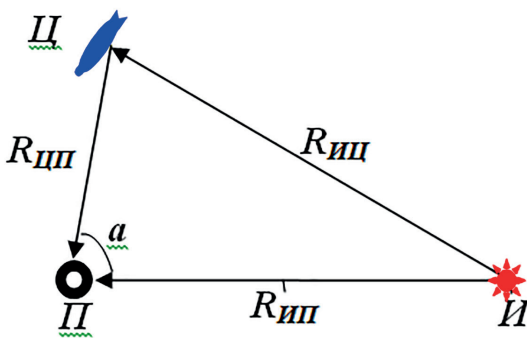


Рис. 1. Геометрическая схема бистатической системы гидролокации:

- Ц – цель; П – приемник; И – излучатель;
- $R_{ИП}$ – расстояние между излучателем и приемником;
- $R_{ИЦ}$ – расстояние между излучателем и целью;
- $R_{ЦП}$ – расстояние между целью и приемником (стрелки показывают направления сигнала);
- $\alpha = P_{изл} - P_{ц}$, где $P_{изл}$ – пеленг излучателя в момент обнаружения ЗС,
- $P_{ц}$ – пеленг цели в момент обнаружения ЭС

Рассмотрим функционирование мультистатической системы на примере одной бистатической системы, геометрия которой показана на рис. 1. В качестве СК используем плоскую декартову систему с центром в месте расположения приемника, осью X , направленной на восток, и осью Y – на север.

Требуется в момент обнаружения цели рассчитать ее пеленг $P_{ц}$ относительно приемника и дистанцию $R_{ИП}$ между ними, а затем при сопровождении цели определить ее курс и скорость. При этом предполагается, что географические координаты излучателя и приемника известны с высокой точностью (закреплены при установке устройств либо периодически определяются по сигналам спутниковых навигационных

систем). Скорость звука $C_{зв}$ на глубине антенны измерена с известной погрешностью. Шкалы времени приемника и излучателя синхронизировать не требуется.

Проблема состоит в том, что из-за вращения гидроакустической антенны вокруг вертикальной оси и низкой точности встроенного малогабаритного компаса сложно вычислить пеленг прихода отраженного ЭС. В связи с этим необходимо разработать алгоритм расчета пеленга цели и расстояния до нее без позиционирования антенны приемника по горизонту.

2. Обоснование алгоритма

Пусть на приемник поступает ЗС в момент времени $t_{зс}$, а следом за ним ЭС в момент $t_{эс}$. Угол между пеленгами цели и излучателя вычислим по формуле $\alpha = \bar{\alpha} - \alpha'$, где $\bar{\alpha}$ – измеренный угол между пеленгами ЗС и ЭС в связанной с приемной антенной СК; α' – изменение горизонтальной угловой ориентации антенны приемника в глобальной СК на интервале $[t_{зс}; t_{эс}]$, которое рассчитывается с помощью датчика угловой скорости с вертикальной осью чувствительности (без учета ее наклона) или инерциального измерительного модуля.

В результате пеленг цели можно определить по выражению

$$P_{ц} = P_{изл} - \alpha. \quad (1)$$

Отметим, что во всех приводимых далее формулах истинные (неслучайные) величины и их оценки обозначаются одними и теми же символами, отличие состоит в том, что над оценками указывается символ \wedge .

Пеленг излучателя $P_{изл}$ и расстояние от него до приемника $P_{ипп}$ (оно понадобится в дальнейшем) вычисляются по формулам

$$P_{изл} = \arctg \frac{X_{изл}}{Y_{изл}}; \quad R_{ипп} = \sqrt{X_{изл}^2 + Y_{изл}^2}, \quad (2)$$

где $X_{изл}$, $Y_{изл}$ – известные смещения излучателя относительно приемника по восточной и северной осям СК.

Для треугольника «излучатель – цель – приемник» можно записать систему уравнений

$$\begin{aligned} R_{иц} + R_{цп} - R_{ипп} &= C_{зв} \cdot \Delta t, \\ R_{иц}^2 &= R_{цп}^2 + R_{ипп}^2 - 2R_{цп}R_{ипп} \cdot \cos(\alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta t = t_{эс} - t_{зс}$; $C_{зв}$ – скорость звука в воде.

Первое выражение в (3) связывает расстояния, пройденные ЗС по трассам «излучатель – цель – приемник» и «излучатель – приемник», с разностью времен их обнаружения, а второе – длины сторон треугольника и угол α (в соответствии с теоремой косинусов).

Выразив $R_{иц}$ из первого уравнения в (3) и подставив во второе, получим:

$$(R_{ипп} + C_{зв} \Delta t - R_{цп})^2 = R_{цп}^2 + R_{ипп}^2 - 2R_{цп}R_{ипп} \cos \alpha, \quad (4)$$

откуда

$$R_{цп} = \frac{C_{зв}^2 \cdot \Delta t^2 + 2R_{ипп} \cdot C_{зв} \cdot \Delta t}{2C_{зв} \cdot \Delta t + 2R_{ипп} - 2R_{ипп} \cos \alpha} = \frac{C_{зв} \cdot \Delta t}{2} \cdot \frac{C_{зв} \cdot \Delta t + 2R_{ипп}}{C_{зв} \cdot \Delta t + R_{ипп} (1 - \cos \alpha)}. \quad (5)$$

Таким образом, мы рассчитали пеленг цели $P_{ц}$ и дистанцию между ней и приемником $R_{цп}$ без данных об угловом положении приемной антенны. Очевидно, что выражения (1), (5) не обеспечивают высокой точности вычислений, т. к. при использовании $P_{ц}$, $R_{цп}$ не учитываются свойства погрешностей измерений. Тем не менее формулы (1), (5) достаточно точны и просты для использования при работе в режиме реального времени.

Поскольку точность определения пеленга и дистанции зависит, главным образом, от измерений α и Δt , остановимся на расчете среднеквадратической погрешности (СКП) этих параметров.

Погрешность измерения времени прихода широкополосного импульсного сигнала на антенну имеет центрированное нормальное распределение с СКП [13, 14]

$$\sigma_t = \frac{1}{\Delta f \cdot q}, \quad (6)$$

где Δf – ширина полосы частот ЗС (на практике составляет примерно 15% от средней частоты ЗС); q – отношение «сигнал–помеха».

Для неперекрывающихся интервалов времени такие погрешности взаимно независимы.

Следовательно, СКП измерения разности времени прихода ЗС и ЭС будет равна

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{1,41}{\Delta f \cdot q}. \quad (7)$$

То же самое можно сказать о статистических свойствах погрешности измерения угла между направлениями прихода ЗС и ЭС на антенну: ее СКП в среднем составляет 20% от ширины диаграммы направленности антенны на частоте ЗС [15], находящейся в интервале 20–90°. Таким образом, СКП σ_{α} измерения угла α составит 28% от ширины диаграммы, т. е. $\sigma_{\alpha} = 5\text{--}25^\circ$.

Погрешность определения величины α' (изменения углового положения антенны приемника) на интервале $[t_{ЗС}; t_{ЭС}]$ существенно меньше σ_{α} . Так, при использовании микромеханического гироскопа с систематическим уходом, изменяющимся от пуска к пуску в пределах $\pm 0,1$ град/с, погрешность определения α' за 10 с не выйдет за пределы ± 1 град.

Моделирование, результаты которого приведены в разделе 2, осуществлялось при $\sigma_{\Delta t} = 1$ мс (соответствует СКП оценки дистанции 1,5 м) и $\sigma_{\alpha} = 5\text{--}30^\circ$. При этом предполагалось, что погрешности измерений имеют белозумный характер.

Для определения путевой скорости и путевого угла цели (в дальнейшем для краткости будем употреблять термины «скорость» и «курс») необходимо вести наблюдение за объектом на некотором интервале времени и вычислять на каждом цикле локации (т.е. для каждого ЗС) пеленг $P_{ц}$ по (1) и дистанцию $R_{цп}$ по (5).

С привлечением данных о пеленгах курс цели K можно рассчитать по формуле (8) (рис. 2), справедливой при неподвижном приемнике и прямолинейном равномерном движении объекта:

$$K = \arctg \frac{\sin(P_{цk} - P_{ц1}) \cdot (t_N - t_k) \cdot \sin(P_{цN}) - \sin(P_{цN} - P_{цk}) \cdot (t_k - t_1) \cdot \sin(P_{ц1})}{\sin(P_{цk} - P_{ц1}) \cdot (t_N - t_k) \cdot \cos(P_{цN}) - \sin(P_{цN} - P_{цk}) \cdot (t_k - t_1) \cdot \cos(P_{ц1})}, \quad (8)$$

где $P_{ц1}$, $P_{цk}$, $P_{цN}$ и t_1 , t_k , t_N – измеренные пеленги цели и соответствующие им моменты времени (знак \wedge для упрощения записи опущен).

Для повышения точности все три пеленга должны быть максимально разнесены во времени, т. е. в качестве $P_{ц1}$ должен использоваться пеленг в момент обнаружения цели, а в качестве $P_{цN}$ – последний измеренный пеленг, $P_{цk} \approx (P_{ц1} + P_{цN})/2$.

Скорость цели V можно вычислить с использованием теоремы косинусов (рис. 2):

$$V = \frac{\sqrt{R_{цп1}^2 + R_{цпN}^2 - 2 \cdot R_{цп1} \cdot R_{цпN} \cdot \cos \Delta P}}{t_N - t_1}, \quad (9)$$

где $R_{цп1}$ и $R_{цпN}$ – дистанции между целью и приемником, соответствующие циклу локации, на котором произошло обнаружение, и последнему циклу; $\Delta P = P_{цN} - P_{ц1}$ – изменение пеленга цели за время контакта с ней.

Заметим, что по формулам (8) и (9) можно рассчитать КПД цели на относительно коротком интервале времени после обнаружения, что на практике представляет особый интерес.

Теперь рассмотрим случай, когда время позволяет определять КПД объекта на более длительном интервале и с меньшей погрешностью. Для решения задачи синтезируем алгоритм определения КПД по критерию максимального правдоподобия на основе гипотезы о прямолинейном равномерном движении цели.

Измеряемыми параметрами на каждом i -м цикле локации являются $\hat{\alpha}_i$ и $\hat{\Delta t}_i$, поэтому составим для них стохастические уравнения:

$$\hat{\alpha}_i = P_{цi} - P_{излi} + \Delta\alpha_i, \quad (10)$$

$$\hat{\Delta t}_i = \frac{R_{ицi} + R_{цпi} - R_{ип}}{C_{зв}} + \Delta\tau_i, \quad (11)$$

где α_i и Δt_i на i -м цикле локации; $P_{ц1}$, $P_{изл}$, $R_{ицi}$, $R_{цпi}$ – истинные значения параметров на i -м цикле локации; $\Delta\alpha_i$, $\Delta\tau_i$ – погрешности измерения α_i и Δt_i на i -м цикле локации, распределенные по нормальному закону с нулевыми средними.

Выразим неизвестные величины $P_{цi}$, $R_{цпi}$, $R_{ицi}$ через параметры прямолинейного и равномерного движения цели:

$$P_{цi} = \arctg \frac{X_1 + V_x \cdot T_{sl} \cdot (i-1)}{Y_1 + V_y \cdot T_{sl} \cdot (i-1)},$$

$$R_{цпi} = \sqrt{(X_1 + V_x \cdot T_{sl} \cdot (i-1))^2 + (Y_1 + V_y \cdot T_{sl} \cdot (i-1))^2}, \quad (12)$$

$$R_{ицi} = \sqrt{(X_1 + V_x \cdot T_{sl} \cdot (i-1) - X_{изл})^2 + (Y_1 + V_y \cdot T_{sl} \cdot (i-1) - Y_{изл})^2},$$

где X_1 , Y_1 – декартовы координаты цели в момент времени t_1 ; V_x , V_y – проекции скорости цели на координатные оси; T_{sl} – период излучения ЗС.

Принимая во внимание соотношение (12) и независимость погрешностей измерений $\hat{\alpha}_i$, $\hat{\Delta t}_i$ как друг от друга, так и на разных циклах локации, запишем совмест-

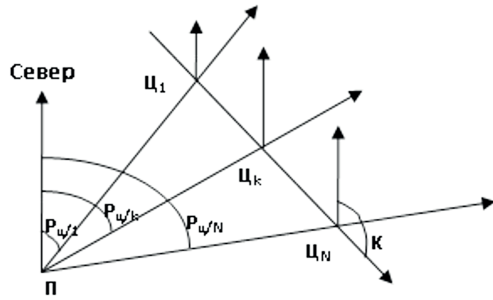


Рис. 2. Определение курса цели:
 $Ц_i, P_{цi}$ – местоположение цели и ее пеленг в момент времени t_i ;
 $П$ – местоположение приемника

ную условную плотность распределения вероятностей (ПРВ) оценок $\hat{\alpha}_i, \Delta \hat{t}_i$ на N циклах локации с учетом нормального характера их распределения. Далее рассчитаем максимально правдоподобные [16, 17] оценки КПД цели:

$$(X_{1opt}, Y_{1opt}, V_{xopt}, V_{yopt}) = \arg \min_{X_1, Y_1, V_x, V_y} \sum_{i=1}^N \left[\frac{(\hat{\alpha}_i - P_{цi} + P_{изл})^2}{\sigma_\alpha^2} + \frac{\left(\Delta \hat{t}_i - \frac{R_{ицi} + R_{цпi} - R_{ип}}{C_{зв}} \right)^2}{\sigma_{\Delta t}^2} \right]. \quad (13)$$

Поиск глобального минимума в правой части (13) ведется прямым двухэтапным перебором в окрестности значений КПД цели, рассчитанных на предыдущем цикле локации. Сначала перебор осуществляется по 11 значениям каждой из искомым переменных: для X_1, Y_1 – на интервале, равном удвоенной дистанции, вычисленной по (5); для V_x, V_y – на интервале, равном удвоенной скорости, рассчитанной по (9). После получения значений X_1, Y_1 и V_x, V_y , соответствующих минимуму (13), поиск минимума повторяется в окрестности обнаруженного минимума на интервалах в 20 раз меньших, чем на первом этапе.

Заметим, что при мультистатической гидролокации зона обнаружения цели имеет сложную форму. В частности, при бистатической гидролокации это область между двумя эллипсами (рис. 3), описываемая системой из двух неравенств:

$$\begin{aligned} R_{иц} + R_{цп} &< R_{\max}, \\ |R_{иц} + R_{цп} - R_{ип}| &> \frac{C_{зв} \cdot \tau}{2}. \end{aligned} \quad (14)$$

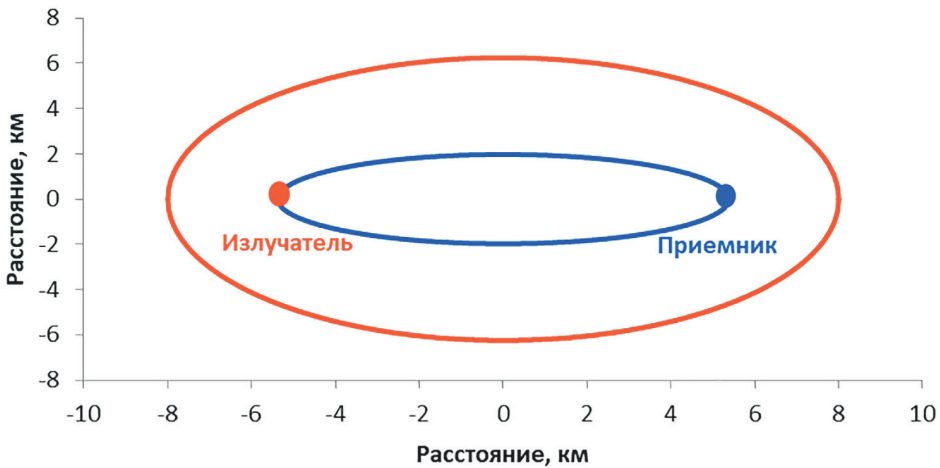


Рис. 3. Зона обнаружения цели бистатической системой гидролокации, расположенная между двумя эллипсами (рассчитана при $R_{ип} = 10$ км, $R_{\max} = 16$ км, $\tau = 1$ мс, $C_{зв} = 1500$ м/с)

Первое неравенство в (14) определяет внешнюю эллиптическую границу зоны обнаружения. Запись означает, что длина пути сигнала от излучателя до цели и затем до приемника не должна превышать расстояния R_{\max} , на котором сигнал затухает до минимального уровня, необходимого для обнаружения.

Второе условие описывает эллиптическую границу мертвой зоны: ЗС и ЭС не должны прийти на приемник одновременно (с точностью τ до 1/2 длительности ЗС), так как в этом случае ЭС будет подавлен ЗС.

На рис. 3 видно, что при траекториях объекта, пересекающих мертвую зону, контакт с ним будет делиться на два этапа – до вхождения в мертвую зону и при выходе из нее. В связи с этим описанный алгоритм определения КПД необходимо усовершенствовать таким образом, чтобы при пересечении целью мертвой зоны (что трудно проконтролировать) ее координаты вырабатывались путем экстраполяции на основе гипотезы о неизменности курса и скорости. При восстановлении контакта с объектом расчет его КПД продолжается на основе той же гипотезы.

3. Моделирование алгоритма

Цели моделирования алгоритма – проверка его корректности и определение точности оценки КПД цели в зависимости от различных факторов.

Условия моделирования:

- цель обнаруживается в зоне, изображенной на рис. 3;
- расстояние между излучателем и приемником $R_{\text{ип}} = 10$ км;
- пеленг излучателя относительно приемника $P_{\text{изл}} = 90^\circ$;
- в момент обнаружения цели расстояние от приемника до нее $R_{\text{цп}} = 8$ км, пеленг цели относительно приемника $P_{\text{ц}} = 40^\circ$;
- скорость цели $V = 3$ м/с;
- курс цели $K = 160^\circ$;
- период излучения ЗС (цикл локации) $T_{\text{сл}} = 20$ с.

Погрешности всех измеряемых параметров независимы как друг от друга, так и во времени и имеют центрированное нормальное распределение со следующими среднеквадратическими отклонениями (СКО):

- для измерений координат излучателя и приемника по сигналам спутниковой навигационной системы – 30 м;
- для измерений разности времен обнаружения ЗС и ЭС – $\sigma_{\Delta t} = 1$ мс;
- для измерений разности пеленгов ЗС и ЭС – $\sigma_{\alpha} = 5...30^\circ$;
- для используемой скорости звука – 3 м/с.

Моделирование выполнялось путем многократной выработки КПД цели, входящей в зону обнаружения бистатической системы гидролокации, для множества случайных реализаций погрешностей измерений. На каждом цикле локации к фактическим значениям измеряемых параметров добавляли нормально распределенные случайные погрешности в соответствии с заданными СКО.

Последовательность моделирования следующая:

- 1) рассчитывали истинные координаты цели;
- 2) вычисляли истинные расстояния от цели до излучателя и приемника;
- 3) с использованием (14) проверяли возможность обнаружения ЭС на текущем цикле локации; если она отсутствовала, то происходил переход к следующему циклу;
- 4) если ЭС регистрировался, то вычисляли истинную разность времени прихода на приемник ЗС и ЭС, а затем к ней добавляли случайную погрешность измерения в соответствии с заданной ПРВ;

- 5) определяли истинную разность пеленгов прихода на приемник ЗС и ЭС и добавляли случайную погрешность измерения согласно ПРВ;
- 6) в соответствии с (13) и с учетом (12) рассчитывали максимально правдоподобные оценки КПД цели на текущем цикле локации с привлечением результатов всех предыдущих N циклов локации, затем определяли и запоминали их погрешности. Далее вычисляли K и V с применением (13) и выражений

$$K = \operatorname{arctg} \frac{V_x}{V_y}, \quad V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}.$$

Моделирование велось от момента обнаружения цели до ее входа в мертвую зону (рис. 3), а затем от выхода цели из мертвой зоны до окончательного ухода из района действия бистатической системы. По результатам каждого цикла локации вычисляли и фиксировали (с привязкой к номеру цикла локации) погрешности определения КПД.

После завершения моделирования с привлечением погрешностей определения КПД объекта на одноименных циклах локации были рассчитаны СКП определения дальности, пеленга, курса и скорости цели в зависимости от номера цикла локации (времени контакта с объектом), по результатам построены соответствующие графики (рис. 4, 5).

На рис. 4 представлены кривые погрешности вычисления КПД цели для одной реализации погрешностей измерений. Моделирование проводилось при СКП вычисления разности пеленгов ЗС и ЭС, равной 10° .

Как видно из графиков, контакт с целью длился 23 мин с момента ее обнаружения, затем прерывался на 23 мин (пребывание в мертвой зоне), затем снова возникал еще на 23 мин.

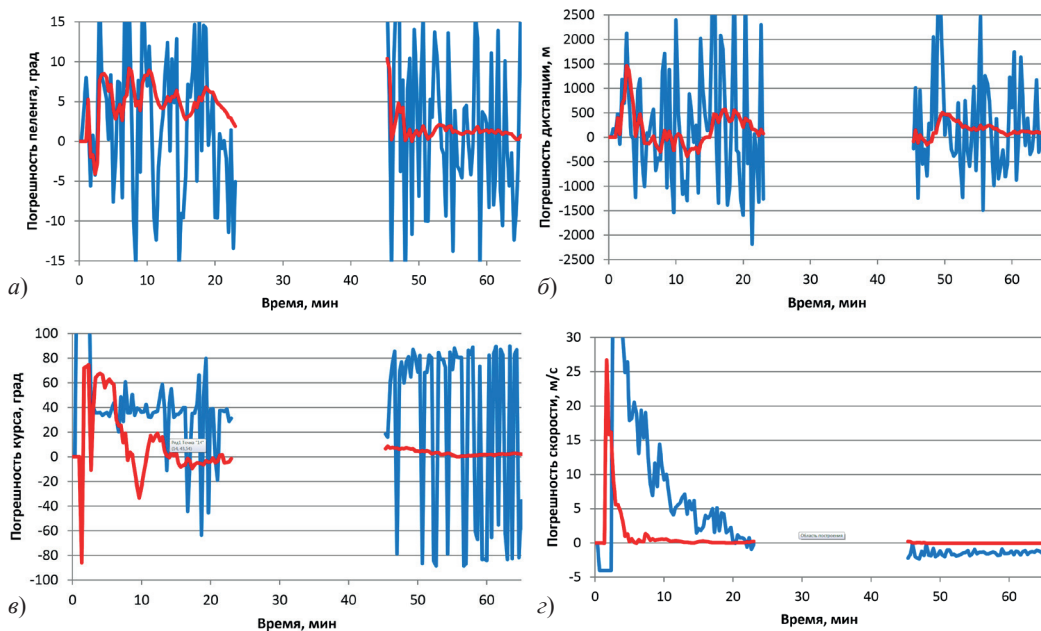


Рис. 4. Кривые погрешностей расчета КПД цели с момента обнаружения при измерении разности пеленгов прихода ЗС и ЭС с СКП = 10° :

а) погрешность пеленга; б) дистанции; в) курса; г) скорости.

Вычисления по формулам (1), (5), (8), (9) – синий цвет; с применением алгоритма (13) – красный цвет

Графики на рис. 4 показывают, что алгоритм (13) позволяет существенно уменьшить погрешности определения КПД цели по сравнению с применением формул (1), (5), (8), (9).

Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что из всех используемых при решении задачи погрешностей измерения параметров значимое влияние на точность вычислений оказывает только погрешность измерения угла между пеленгами проходящих на приемник ЗС и ЭС.

На рис. 5 продемонстрированы кривые СКП оценок КПД цели в зависимости от времени, прошедшего с момента ее обнаружения, полученные для 1000 случайных реализаций погрешностей измерений с использованием алгоритма (13) при СКП измерения разности пеленгов ЗС и ЭС $\sigma_{\alpha} = 5-30^{\circ}$.

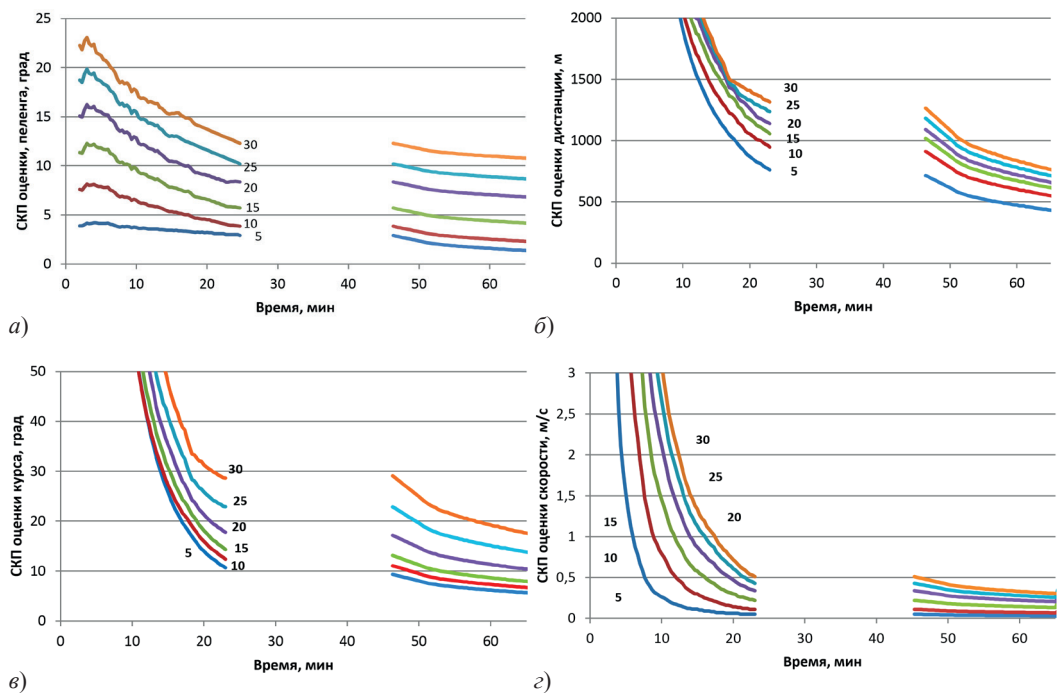


Рис. 5. СКП оценок КПД цели во времени начиная с момента обнаружения:

а) СКП оценок пеленга; б) дистанции; в) курса; г) скорости.

Получены с помощью (13) при СКП измерения разности пеленгов ЗС и ЭС, равной $5-30^{\circ}$

По данным рис. 5 можно сделать следующие выводы:

- 1) при увеличении времени наблюдения цели до ее вхождения в мертвую зону СКП расчета КПД монотонно уменьшается; после выхода из мертвой зоны снижение продолжается, но уже с меньшей скоростью;
- 2) при увеличении СКП измерения разности пеленгов ЗС и ЭС на интервале от 5 до 30° СКП КПД цели плавно растет. Это свидетельствует о том, что разработанный алгоритм работоспособен в широком диапазоне погрешностей вычисления разности пеленгов ЗС и ЭС, т.е. при использовании приемных антенн с разной шириной диаграммы направленности.

В ходе моделирования выяснилось, что погрешности выработки координат излучателя и приемника, а также погрешности знания скорости звука существенно не влияют на результаты, поэтому их воздействие в работе не исследуется.

Заключение

1. Разработан алгоритм определения КПД цели в режиме бистатической гидролокации, который не требует контроля угловой ориентации антенны приемника и обеспечивает достаточно высокую точность расчетов.

2. Значительно снизить погрешности выработки КПД позволяет процедура вычисления его максимально правдоподобных оценок, базирующаяся на гипотезе о прямолинейном и равномерном движении цели.

3. Основным фактором, влияющим на точность расчетов, является погрешность измерения разности пеленга приходящих на приемник ЗС и ЭС, зависящая от ширины диаграммы направленности приемной антенны на частоте ЗС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Спиридонов В.П.** Какими быть субмаринам будущего? // Национальная оборона. 2018. №11 (152). С. 50–60.
2. **Jane's unmanned maritime vehicle.** 2019–2020. Ed. Kelvin Wong. IHS Markit. Coulsdon, Surrey, UK. 2020.
3. **Пешехонов В.Г., Брага Ю.А., Машошин А.И.** Сетевые подходы к решению проблемы освещения подводной обстановки в Арктике // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. №3. С. 219–227.
4. **Коваленко В.В.** Информационное обеспечение противолодочной борьбы // Морской сборник. 2015. № 10. С. 39–48.
5. **Криницкий С., Охрименко С., Паршуков В., Рубанов И.** Сетевая система освещения подводной обстановки // Морской сборник. 2021. № 2. С. 65–71.
6. **Ehlers, F.,** Cooperative underwater target tracking, *Proceedings of 1st Underwater Acoustics Conference and Exhibition*, 23rd to 28th June 2013, Corfu island, Greece, 2013, pp. 59–66.
7. **Ehlers, F., Allen Osse L.,** Multistatic Active Sonar, A Networked System For Undersea Surveillance, *Military Technology*, MILTECH, 2009, № 9, pp. 128–133.
8. **Daun, M., Broetje, L., Ehlers, F.,** Simultaneous Localization and Tracking onboard AUVs with Multistatic Sonar Data, *Proceedings of the 4th International conference and exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results*, 20–24 June 2011, Kos, Greece.
9. **Daun, M., Ehlers, F.,** Tracking Algorithms for Multistatic Sonar Systems, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, Article ID 461538. <https://doi.org/10.1155/2010/461538>
10. **Бородавкин А.Н., Богомолов А.П., Дурнев И.Н., Титков И.В.** Радиогидроакустические системы морской авиации. СПб.: ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия», 2022. 287 с.
11. **Поленин В.И.** Методы и задачи определения координат и параметров движения цели по данным ГАК подводных лодок: монография. СПб: ВМА им. Н.Г. Кузнецова. 2004. 86 с.
12. **Гриненков А.В., Машошин А.И.** Алгоритм определения координат и параметров движения подводного источника шумоизлучения без специального маневрирования наблюдателя // Гирскопия и навигация. 2024. Т. 32. № 2(125). С. 98–122. EDN: MCTSNV.
13. **Ширман Я.Д., Манжос В.Н.** Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
14. **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.
15. **Ратынский М.В.** Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
16. **Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988. 480 с.
17. **Кендал М., Стьюарт А.** Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973.

Konuykhov, G.V. and Mashoshin, A.I. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

Algorithm for Determining the Coordinates and Motion Parameters of an Underwater Target When Using a Bistatic Sonar, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2026, vol. 34, no. 1 (132), pp. 109–119.

Abstract. The article proposes an algorithm for determining the coordinates and motion parameters of an underwater target during multistatic sonar detection, which does not require any data on the attitude of the receiving antenna freely rotating around a vertical axis. The novelty of the algorithm is that the target's bearing and distance are determined using the measured angle between the direction of the projector's direct signal arriving at the receiving antenna, and the direction of the same signal reflected from the target; the difference in the time of direct and reflected signals detection is used as well. For the algorithm application, it is essential that the receiving antenna is equipped with an angular velocity sensor. The algorithm performance has been verified by simulation, and the accuracy of estimating the target's coordinates and motion parameters has been confirmed, considering various effects.

Key words: underwater acoustics, multistatic sonar detection, determination of object's coordinates and motion parameters, simulation.

Материал поступил 12.08.2024