

УДК 681.88

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ БЕЗ СПЕЦИАЛЬНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ

А.В. Гриненков

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, 30
E-mail: grin_a_v@mail.ru

А.И. Машошин

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, 30
E-mail: aimashoshin@mail.ru

Ключевые слова: гидроакустика, шумящий объект, определение координат и параметров движения объекта, моделирование.

Аннотация: В статье обоснован не требующий специального маневрирования наблюдателя автоматический алгоритм определения координат и параметров движения морского объекта, обнаруженного в режиме шумопеленгования гидроакустического комплекса подводной лодки. Предлагаемый алгоритм является развитием известных алгоритмов и состоит в автоматической выработке известными методами приближённых данных о скорости, дистанции и курсе объекта наблюдения и "вписывании" этих данных в модель изменения пеленга объекта. Учитывая, что для оценки скорости объекта и дистанции до него с приемлемой точностью необходимо знать класс объекта наблюдения, решение задачи начинается с момента обнаружения объекта и осуществляется для каждой из гипотез о классе обнаруженного объекта. В статье приведено описание алгоритма и результаты его моделирования для типовых ситуаций.

1. Введение

Координаты (пеленг P , дистанция R) и параметры движения (курс K , скорость V) (КПД) морского объекта, обнаруженного гидроакустическим комплексом (ГАК) подводной лодки (ПЛ) в режиме шумопеленгования являются основой для выработки параметров движения для расхождения с ним на безопасном расстоянии [1, 2].

В основе всех известных алгоритмов определение КПД по данным режима шумопеленгования лежит изменение пеленга объекта во времени. Но проблема состоит в том, что при прямолинейном и равномерном движении источника шумоизлучения и наблюдателя (а именно так в абсолютном большинстве ситуаций движутся морские объекты) определение КПД с использованием только пеленгов принципиально не приводит к однозначному результату [1-4]. Кроме того, задача не решается когда изменение пеленга за время решения задачи статистически не превышает ошибку его измерения. Выходом из положения является либо специальное маневрирование ПЛ-

наблюдателя, либо использование дополнительной информации о курсе, скорости либо дистанции до объекта наблюдения.

В результате все известные из литературы алгоритмы определения КПД можно условно разбить на 2 группы [2]:

- автоматические алгоритмы («пеленгов» и другие), использующие только динамику пеленгов объекта наблюдения и требующие для своей реализации заметного изменения пеленга и специального маневрирования ПЛ-наблюдателя в процессе решения задачи;
- автоматизированные алгоритмы («подбор» и другие), базирующиеся на использовании динамики пеленгов, а также дополнительной информации (как правило, скорости объекта наблюдения), оцениваемой оператором-гидроакустиком при прослушивании шума объекта с учётом его класса.

И те, и другие алгоритмы имеют недостатки. Недостатком алгоритмов 1-й группы является недопустимо большое время решения задачи либо невозможность её решения в принципе. К тому же они не могут применяться в условиях интенсивного судоходства ввиду необходимости постоянного маневрирования ПЛ-наблюдателя. Недостатком алгоритмов 2-й группы является низкая точность определения КПД.

Создание и практическая реализация алгоритма определения КПД, свободного от перечисленных недостатков, остаётся актуальной задачей [5].

Целью работы является изложение автоматического алгоритма определения КПД по данным режима шумопеленгования ГАК ПЛ, не требующего специального маневрирования носителя ГАК. Идея предлагаемого алгоритма изложена авторами в работах [6-8].

2. Обоснование алгоритма

Предлагаемый алгоритм является развитием известных алгоритмов и состоит в автоматической выработке известными методами приближённых оценок скорости, дистанции и курса объекта наблюдения и в максимально правдоподобном «вписывании» их в модель динамики его пеленгов. При этом предполагается, что движение обнаруженного объекта осуществляется галсами с постоянным вектором скорости на каждом галсе. Изменение параметров движения объекта (т.е. смена галса) выявляется известными методами [9]. Решение задачи при смене галса начинается заново с использованием в качестве начальных приближений оценок КПД, полученных на предыдущем галсе.

В основе синтеза алгоритма лежит стохастическая модель движения объекта на прямолинейном галсе, имеющая вид

$$(1) \quad \hat{P}_i = P(t_i, K, V, R_j) + \Delta X_i,$$

где \hat{P}_i – оценка пеленга объекта в момент времени t_i ; $P(t_i, K, V, R_j)$ – неслучайная функция, связывающая фактическое значение пеленга объекта в момент времени t_i с его курсом K , скоростью V и дистанцией R_j в произвольный момент времени t_j ; ΔP_i – ошибка оценки пеленга \hat{P}_i , распределённая по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием (МО) и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_p .

Функция $P(t_i, K, V, R_j)$ связана с параметрами движения объекта наблюдения и ПЛ-наблюдателя формулой [2]

$$(2) \quad P(t_i, K, V, R_j) = \arctg \frac{X_H(t_j) + R_j \cdot \sin(P_j) + V \cdot (t_i - t_j) \cdot \sin(K) - X_H(t_i)}{Y_H(t_j) + R_j \cdot \cos(P_j) + V \cdot (t_i - t_j) \cdot \cos(K) - Y_H(t_i)}, i = 1, \dots, N,$$

где $X_H(t_i), Y_H(t_i)$ – декартовы координаты ПЛ-наблюдателя, соответствующие моменту времени t_i ; N – количество моментов времени с начала текущего галса, в которые

измерялись пеленга объекта; R_j, P_j – дистанция и пеленг объекта, соответствующие некоторому произвольному моменту времени t_j из массива $i = 1, \dots, N$.

Если зафиксировать в правой части формулы (1) значения курса, скорости и дистанции объекта, то единственной случайной величиной останется только ошибка измерения пеленга ΔP_i . В результате совместная условная плотность распределения вероятностей (ПРВ) оценок пеленга в моменты времени t_j с учётом независимости ошибок их измерения запишется в виде [10]:

$$(3) \quad g_{\hat{p}_1, \dots, \hat{p}_N / K, V, R_j}(p_1, \dots, p_N) = \prod_{i=1}^N g_{\Delta P_i}(p_i - P(t_i, K, V, R_j)),$$

где $g_{\Delta P_i}(p)$ – ПРВ ошибки измерения пеленга на i -м цикле решения задачи, являющаяся нормальной ПРВ с нулевым МО и СКО σ_{P_i} .

Для определения скорости, курса и дистанции объекта в режиме шумопеленгования принципиально необходимо знание его класса. Поскольку на определение класса обнаруженного объекта требуется некоторое время (зачастую продолжительное), предлагается поступить следующим образом. Для каждого района плавания с использованием справочников и статистических данных (например, [14]) определяются средние значения и среднеквадратические разбросы скорости и шумности объектов каждого класса ω , объекты которого могут быть обнаружены в данном районе. Например, во внутренних морях наиболее встречающимися классами являются неатомные ПЛ, торговые суда среднего и малого водоизмещения, боевые надводные корабли классов корвет и фрегат. В открытых океанских районах наиболее часто обнаруживаются атомные ПЛ, крупные торговые суда и лайнеры, большие боевые надводные корабли. Имея эти данные, определение КПД обнаруженного объекта осуществляется для каждого класса, характерного для района плавания, с последующим выбором КПД, которые соответствуют фактическому классу объекта, определённого в результате его классификации.

При таком подходе ПРВ скорости обнаруженного объекта можно записать в виде:

$$(4) \quad g_{V/\omega}(v) = \text{norm}(v \parallel mV_\omega; sV_\omega),$$

где $\text{norm}(v \parallel mV_\omega; sV_\omega)$ – нормальная ПРВ аргумента v с МО mV_ω и СКО sV_ω .

Курс объекта может быть вычислен по формуле:

$$(5) \quad K = K_\rho - \arcsin \left[\frac{V_H}{V} \cdot \sin(K_\rho - K_H) \right],$$

где K_ρ – относительный курс объекта, вычисляемый по трём пеленгам по формуле:

$$(6) \quad K_\rho = \arctg \frac{\sin(P_k - P_1) \cdot (t_N - t_k) \cdot \sin(P_N) - \sin(P_N - P_k) \cdot (t_k - t_1) \cdot \sin(P_1)}{\sin(P_k - P_1) \cdot (t_N - t_k) \cdot \cos(P_N) - \sin(P_N - P_k) \cdot (t_k - t_1) \cdot \cos(P_1)}$$

в которой P_1, P_k, P_N – пеленга объекта из массива пеленгов P_1, \dots, P_N , измеренных на одном галсе прямолинейного движения объекта в моменты времени t_1, \dots, t_N , причём для повышения точности оценки курса объекта пеленг P_k , соответствующий времени t_k , должен быть примерно равным среднему арифметическому из пеленгов P_1 и P_N .

Таким образом, оценка курса объекта является функцией его скорости и массива пеленгов. Условная (в зависимости от скорости) ПРВ курса объекта имеет вид:

$$(7) \quad g_{K/V}(k) = \delta \left(k - K_\rho + \arcsin \left[\frac{V_H}{V} \cdot \sin(K_\rho - K_H) \right] \right),$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция.

Дистанцию до цели будем определять на основе совместного применения энергетического (по абсолютному уровню сигнала объекта) и спектрального (по наклону спектра сигнала объекта) методов [11]. Эти методы реализуются путём измерения уровней сигнала объекта в M (как правило, трёх) частотных диапазонах (ЧД) режима шумопеленгования. Соответствующая стохастическая модель имеет вид:

$$(8) \quad W_k(P_0, r) = P_0 + K_k(r) + H_k + \Delta W_k, k = 1, \dots, M,$$

где $W_k(P_0, r)$ – неслучайная функция, связывающая фактическое значение уровня сигнала объекта в -м ЧД, дБ, с шумностью объекта P_0 , дБ, и дистанцией до него r , км; $K_k(r)$ – передаточная характеристика гидроакустического канала распространения шума объекта от точки излучения до входа приёмной антенны в k -м ЧД, дБ [12]; H_k – коэффициент передачи приёмного тракта ГАК в k -м ЧД, дБ; ΔW_k – относительная ошибка измерения уровня сигнала объекта в -м ЧД, дБ, распределённая по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением $\sigma_{\Delta W_k}$.

В результате максимально правдоподобную дистанцию до объекта можно определить при помощи алгоритма [13]:

$$(9) \quad \hat{R}_{opt} = \underset{r}{\operatorname{argmin}} \sum_{k=1}^M \frac{(\bar{W}_k - \bar{P}_0 - \bar{K}_k(r) - H_k)^2}{\sigma_{\Delta W_k}^2}.$$

Используя (4), (5) и (10) получаем алгоритм определения КПД обнаруженного объекта:

$$(10) \quad (\hat{R}_{opt}, \hat{V}_{opt}, \hat{R}_{opt/j}) = \underset{v, r}{\operatorname{argmin}} \left\{ \frac{(r - R_{opt/\omega})^2}{\sigma_{R_{opt/\omega}}^2} + \frac{(v - mV_\omega)^2}{sV_\omega^2} + \sum_{i=1}^N \frac{(p_i - P(t_i, k, v, r_j))^2}{\sigma_{p_i}^2} \right\}.$$

Заметим, что описанный подход позволяет определить КПД и тогда, когда пеленг объекта не изменяется во времени. В этом случае в качестве оценки скорости объекта используется наиболее вероятное её значение для рассматриваемого класса, в качестве относительного курса принимается обратный пеленг объекта, курс объекта вычисляется по формуле (6), дистанция до объекта определяется по формуле (10).

3. Заключение

1) Предложен не требующий специального маневрирования наблюдателя автоматический алгоритм определения координат и параметров движения (КПД) морского объекта, обнаруженного в режиме шумопеленгования гидроакустического комплекса подводной лодки. Идея, положенная в основу алгоритма, состоит в привлечении для решения задачи к традиционно используемому массиву измеренных пеленгов объекта оценок скорости, курса и дистанции до объекта, полученных разными методами. При этом, поскольку точность этих оценок существенно зависит от класса обнаруженного объекта, предложено до определения класса обнаруженного объекта, которое может занять продолжительное время, решать задачу определения КПД применительно ко всем классам объектов, которые могут быть обнаружены в районе плавания, с последующим выбором оценок КПД, которые соответствуют классу, определённому в результате классификации объекта.

2) Идея о привлечении к решению задачи определения КПД дополнительной информации в виде оценок скорости, курса и дистанции до объекта, позволяет получать результат и в случае, когда пеленг обнаруженного объекта практически не изменяется.

3) Проведённое моделирование позволило оценить среднеквадратические ошибки определения КПД. Показано, что при обнаружении объекта на дистанции до 30 км (скорость изменения пеленга в этом случае составляет 0,5-1,0 град/мин и более) установившиеся значения среднеквадратических ошибок определения КПД лежат в пределах:

- курса 5^0 - 7^0 ;
- скорости 1,0-1,5 м/с;
- дистанции 2-3 км.

4) При обнаружении объекта на больших дистанциях, когда скорость изменения пеленга не превышает 0,1 град/мин, и задача решается с использованием алгоритма, не использующего динамику изменения пеленга, среднеквадратические ошибки определения КПД лежат в пределах:

- курса 5^0 - 30^0 ;
- дистанции до 20%;
- среднеквадратическая ошибка скорости равна величине среднеквадратического разброса скорости объектов соответствующего класса.

Список литературы

1. Справочник вахтенного офицера. М.: Воениздат, 1975. 455 с.
2. Поленин В.И. Методы задачи определения координат и параметров движения цели по данным ГАК подводных лодок. С.Пб.: ВМА им. Н.Г.Кузнецова. 2004. 86 с.
3. Benlian Xu B., Wang Z. An adaptive tracking algorithm for bearings-only maneuvering target // International Journal of Computer Science and Network Security. 2007. Vol. 7, No. 1. P. 304-312.
4. Landelle B. Robustness considerations for bearings-only tracking // 11th International Conference on Information Fusion. France: Thales Optronique, Universite Paris-Sud. 2008. P. 8.
5. Прокаев А.Н. Метод относительных перемещений // Гидроакустика. 2021. Вып.46 (2). С.61-71.
6. Гриненков А.В., Машошин А.И., Саватеев К.Ф. Алгоритм автоматического определения координат и параметров движения целей без специального маневрирования наблюдателя // Морская радиоэлектроника, 2014, № 4 (50). С. 50-57.
7. Гриненков А.В., Машошин А.И. Алгоритм определения координат и параметров движения объекта в интегрированной системе боевого управления подводной лодки // Сборник докладов научно-технической конференции «Состояние, проблемы и перспективы создания корабельных информационно-управляющих комплексов». «ОАО «Концерн «Моринсис-Агат», Москва, 2014, 2-3 апреля. С. 212-221.
8. Гриненков А.В., Машошин А.И. Патент РФ № 2 649 887 с приоритетом от 10.05.2017 по заявке № 2017116305. Способ определения координат (пеленга и дистанции) и параметров движения (курса и скорости) морской шумящей цели. Опубл. 05.04.2018, бюлл. № 10.
9. Поляк Г.Л. Определение факта маневра цели // Морской сборник. 1989. № 4.
10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1988.
11. Машошин А.И. Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до объекта // Морская радиоэлектроника. 2012. № 2 (40). С. 30-34.
12. Урик Р.Дж. Основы гидроакустики // Л.: Судостроение, 1978.
13. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. - М.: Сов.радио, 1977.
14. Охрименко С.Н., Мнакацян А.А., Рубанов И.Л. Некоторые особенности шумоизлучения объектов, обнаруживаемых при помощи гидроакустических средств // Научный вестник ОПК России. 2023. Вып.2. С.51-56.