

УДК 551.46.077; 004.942

## АЛГОРИТМ ПРИВЕДЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА К ЗАДАННОЙ ЦЕЛИ

**И. Н. Бурдинский**

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Тихоокеанский государственный университет»,  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136  
E-mail: igor\_burdinsky@mail.ru*

Рассматривается один из возможных вариантов решения задачи приведения автономного необитаемого подводного аппарата к заданной цели. На дальних дистанциях навигация основывается на измерениях времени распространения акустических сигналов. Ближнее позиционирование выполняется посредством обработки изображений с оптической камеры. В качестве алгоритма, управляющего положением и ориентацией аппарата в пространстве, используется ПИД-регулятор. Представленный алгоритм реализован в программном коде и проверен на серии численных экспериментов.

*Ключевые слова:* автономный необитаемый подводный аппарат, позиционирование, акустические данные, обработка изображений.

**Введение.** Исследования в области разработки подводных аппаратов различного назначения приобрели в течение последних тридцати лет не меньшее значение, чем освоение околоземного космического пространства. Современные подводные аппараты по функциональному назначению можно разделить на три основные группы [1]: глубоководные, управляемые оператором, находящимся на борту аппарата; телеуправляемые, контролируемые дистанционно с судна обеспечения; автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), которые предназначены для выполнения широкого круга научных, военных и коммерческих задач.

Реализация длительного автономного функционирования АНПА становится возможной путём организации сети донных станций, обслуживающих группировку подводных аппаратов. Приведение к станции с последующей стыковкой, например, для зарядки батареи, программирования очередной миссии, копирования данных и т. д. является актуальной проблемой, которая, в свою очередь, зависит от точности навигации.

Существующие навигационные системы, используемые для решения задачи позиционирования АНПА, можно условно разбить на несколько больших групп [2–6]. В представленной работе предложен способ приведения и навигации подводного аппарата, базирующийся на акустическом и визуальном принципах наведения.

Рабочий диапазон акустических систем колеблется от нескольких метров до десятков километров, тогда как подводные оптические системы способны работать в диапазоне, не превышающем нескольких метров. Очевидно, что комбинация обоих принципов может быть полезна при создании реальной навигационной системы для решения задачи приведения АНПА.

**Постановка задачи.** В данной работе подводный аппарат моделируется материальной точкой, движение которой рассматривается в горизонтальной плоскости  $(x, y)$ . Предполагаем, что АНПА оборудован двигателями, позволяющими изменять направление (курс)  $\varphi \in [-\pi, \pi]$  и скорость  $v \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ . Аппарат имеет в своём составе гидроакустическую антенну и видеокамеру, направленную вниз перпендикулярно главной оси. Миссия АНПА сформулирована следующим образом. Стартуя с некоторой неизвестной начальной

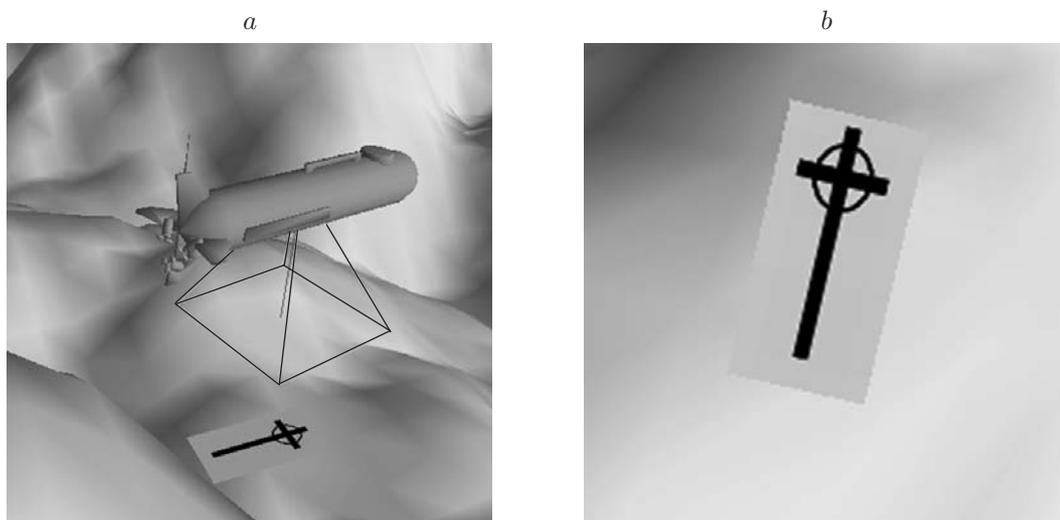


Рис. 1. Конфигурация виртуального эксперимента: *a* — виртуальная сцена, *b* — изображение с камеры АНПА

позиции, аппарат должен достичь определённой точки и принять необходимую ориентацию. Оба пространственных параметра однозначно задаются подводной целью, которая представляет собой графический шаблон, закреплённый, например, на морском дне и оборудованный акустическим бумом (рис. 1).

Разделим задачу приведения на условные этапы, именуемые дальней и ближней навигацией. На первом этапе АНПА выполняет серию замеров времени распространения акустических сигналов, по которым он выдвигается в район подводной цели. Как только система технического зрения осуществляет видеозахват подводной цели, аппарат переходит в режим ближней навигации, на котором уточнение положения и ориентации осуществляется посредством цифрового анализа изображений, полученных камерой.

**Навигация по акустическим данным.** Функционирование акустических навигационных систем базируется на принципе измерения времени распространения звуковой волны в водной среде. По способу организации обмена сообщениями между передатчиком и приёмником навигационные системы делятся на двухпроходные, однопроходные синхронные и однопроходные асинхронные. В последнем случае акустический буй посылает в канал сигналы с периодом  $T$ , при этом АНПА функционирует в пассивном режиме, т. е. работает только на приём сообщений. Пусть  $\tau$  — время между двумя моментами регистрации последовательных акустических посылок, тогда  $\tau < T$  указывает, что аппарат движется в направлении буя, а при  $\tau = T$  относительное расстояние между ними не изменяется. Особо следует подчеркнуть, что использование однопроходного асинхронного принципа обмена сообщениями является предпочтительным при наличии группировки подводных аппаратов, доступ которых к общему коммуникационному каналу осуществляется посредством временного либо кодового разделения канала (технологии TDMA (Time Division Multiple Access) и CDMA (Code Division Multiple Access) соответственно [7]).

В целом акустическая навигация АНПА состоит в решении двух задач:

- 1) реализации надёжного детектирования сигналов в зашумлённом канале;
- 2) преобразовании замеров акустических задержек в управляющие сигналы движителей аппарата, изменяющие его положение и курс.

Регистрация акустических сообщений в реальной среде является нетривиальной задачей. В [8] представлено детальное описание метода и аппаратная реализация, в которой

надёжное детектирование акустических сигналов достигалось с использованием фазоманипулированных  $M$ -последовательностей и модифицированной корреляционной функции. К главным достоинствам этого метода следует отнести высокую точность измерений наклонной дальности распространения сигналов и устойчивость к помехам (относительная ошибка измерения дальности составляет не более 0,5 % при регистрации сигналов для отношения сигнал/шум менее  $-10$  дБ).

Преобразование измерений акустических задержек в управляющие сигналы движителей предлагается реализовать на базе классического ПИД-регулятора, определённого функцией вида

$$g(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} \varepsilon(t), \quad (1)$$

где  $K_p, K_i, K_d$  — параметры пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей соответственно;  $g(t)$  и  $\varepsilon(t)$  — функции управления и рассогласования.

Движение аппарата в рассматриваемой модели контролируется управляющими функциями  $g_\varphi$  и  $g_v$ , которые влияют на курс  $\varphi$  и скорость  $v$ . Пусть АНПА движется с некоторой скоростью  $v$  и курс  $\varphi = 0^\circ$  соответствует ориентации, при которой аппарат направлен на буй (рис. 2, *a*). Очевидно, что если  $\varphi \in (-\pi/2, \pi/2)$ , то АНПА приближается к бую, а значит, период регистрации сигналов  $\tau$  меньше, чем действительный период следования  $T$ . При  $\varphi = -\pi/2$  и  $\varphi = \pi/2$  аппарат движется эквидистантно относительно буя, т. е.  $\tau = T$ .

В остальных случаях он удаляется от буя и  $\tau > T$ . Для константы  $A$  и скорости изменения периода регистрации навигационных сигналов  $\zeta = \partial\tau/\partial t$  функцию рассогласования по курсу определим как

$$\varepsilon_\varphi = \begin{cases} \zeta, & \tau < T, \\ \text{sign}(\zeta)A - \zeta & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2)$$

Соответствующая функция управления (рис. 2, *b*) изменяет курс таким образом, чтобы минимизировать  $\tau$  [9], т. е. аппарат ориентируется в направлении буя. Выбор функции

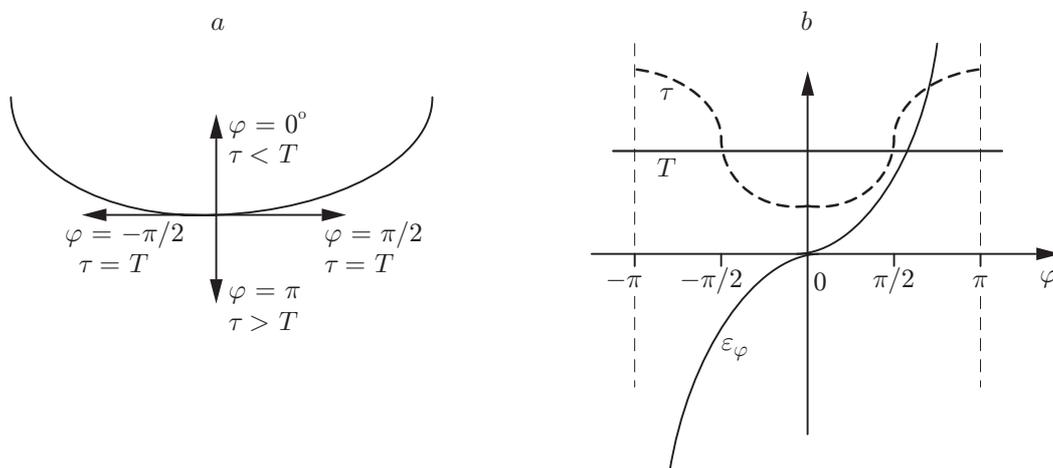


Рис. 2. Зависимости задержки  $\tau$  и периода  $T$  от курса  $\varphi$ : *a* — движение аппарата относительно буя, *b* — график функции рассогласования  $\varepsilon_\varphi$

рассогласования по скорости очевиден:

$$\varepsilon_v = B\tau, \quad (3)$$

где  $B$  — масштабирующий коэффициент. Таким образом, рассогласование возрастает в случае, если аппарат отдаляется от буя, и наоборот. Перемещение аппарата по третьей координате (высоте над дном) может быть зафиксировано исходя из условий оптимального видеозахвата мишени.

Акустическая навигация завершается в момент, когда АНПА приближается к цели настолько близко, что система технического зрения способна обнаружить её. Тогда дальнейшее позиционирование осуществляется по серии изображений, получаемых бортовой видеокамерой.

**Навигация по визуальным данным.** На малых дистанциях до буя визуальная навигация используется для прецизионного позиционирования АНПА и выравнивания его курса в соответствии с шаблоном подводной цели. Положение аппарата корректируется по относительному смещению  $(\Delta x, \Delta y)$ , угловой разности  $\theta'$  и масштабирующему коэффициенту  $\sigma'$  между изображением  $I$ , снятым камерой, и шаблоном  $I_p$ , находящимся в памяти аппарата. В литературе рассматриваются различные варианты решения данной проблемы [10–13]. Существующие алгоритмы, как правило, обладают высокими вычислительными затратами, что значительно затрудняет их реализацию в аппаратном обеспечении.

В представленной работе определение неизвестных параметров выполняется посредством лог-полярного преобразования. Созданный алгоритм включает следующие вычислительные стадии. Для уменьшения шума и удаления несущественных деталей на изображении исходные данные с камеры сворачиваются с функцией Гаусса. Далее вычисляется нормализованный градиент изображения, которое затем преобразуется к бинарному путём сравнения длины градиента с выбранным порогом. В бинарном изображении  $I_b$  находится условный центр цели по заимствованным формулам физического центра масс объекта сложной формы:

$$x_0 = \sum_{x \in I_b} x/N, \quad y_0 = \sum_{y \in I_b} y/N.$$

Лог-полярное преобразование ставит в соответствие точку  $(x, y)$  декартовой плоскости точке  $(\sigma, \theta)$  лог-полярной сетки. Формулы преобразования координат определены как [14]

$$\sigma = \log \left( \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \right),$$

$$\theta = \arctan \left( (y - y_0)/(x - x_0) \right),$$

где  $(x_0, y_0)$  — начало координат лог-полярной плоскости.

Таким образом, изображение с видеокамеры АНПА переводится в  $(\sigma, \theta)$ -пространство. В качестве начала координат выступает центр масс, заданный на предыдущем шаге. Далее алгоритм вычисляет корреляционную функцию лог-полярного изображения, полученного с камеры, и лог-полярного представления шаблона. Максимум функции определяет неизвестные параметры масштаба  $\sigma'$  и угловой разности  $\theta'$ , а относительный сдвиг между  $I$  и  $I_p$  находится по формуле

$$(\Delta x, \Delta y) = (x_0 - x_{p0}, y_0 - y_{p0}),$$

где  $(x_{p0}, y_{p0})$  — это координаты центра масс шаблона. Отметим, что для входного изображения размером  $M \times N$  пикселей общая вычислительная сложность представленного алгоритма составляет  $O(MN \log(M))$  операций.

Для управления положением и ориентацией аппарата воспользуемся ПИД-регулятором. Соответствующие функции рассогласования имеют вид

$$\varepsilon_v = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \cos \theta, \quad \varepsilon_\varphi = \theta.$$

Параметр  $\sigma'$  не участвует в формулах рассогласования, однако он может использоваться для определения и регулировки вертикальной дистанции между АНПА и подводной целью.

**Численные эксперименты.** Представленный алгоритм был опробован посредством ряда численных экспериментов. Время рассматриваемой модели дискретно и представляет собой серию отсчётов  $t_i$ . Обозначим положение и курс АНПА в момент  $t_i$  через  $[x_i, y_i]$  и  $\varphi_i$ . На каждой итерации основного программного цикла положение АНПА вычислялось в соответствии с функциями управления  $g_\varphi$  и  $g_v$ :

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} + g_v(t_i) \begin{bmatrix} \cos \varphi_i \\ \sin \varphi_i \end{bmatrix}, \quad \varphi_{i+1} = \varphi_i + g_\varphi(t_i).$$

В начале эксперимента АНПА находится в режиме акустической навигации, т. е. в качестве функций рассогласования выступают выражения (2) и (3). Высота над морским дном в этом варианте реализации модели задавалась фиксированной. Приближаясь к подводной цели, АНПА переключается в режим визуальной навигации. В качестве критерия переключения используется малое относительное расстояние между бумом и аппаратом, позволяющее системе технического зрения обнаружить цель. Визуальная навигация осуществляется до тех пор, пока угловая разность  $\theta'$  и относительный сдвиг  $(\Delta x, \Delta y)$  не будут минимальными.

Движение аппарата моделировалось в разработанном трёхмерном симуляторе. Виртуальная сцена включала АНПА, подводную цель и синтетическое морское дно (см. рис. 1). Внешняя форма виртуального аппарата позаимствована у реального аппарата ММТ-3000 [15].

Результаты численных экспериментов (в относительных единицах) отражены на рис. 3. Траектории АНПА, который стартовал с различных начальных позиций и курсов, представлены на рис. 3, *a*. Отметим, что вне зависимости от начальных параметров во всех случаях аппарат достигал акустического буя, отмеченного на графике окружностью. Как правило, скорость аппарата вдоль траектории сначала возрастала, достигала некоторого максимального значения, а затем медленно убывала, как показано на рис. 3, *b*. Если система технического зрения не захватывала цель (например, была задана большая высота над мишенью), аппарат начинал совершать мотыльковые движения в окрестности буя.

Эксперименты в режиме визуальной навигации выявили, что выбор шаблона для подводной цели является критичным. Главным требованием является то, что вектор ориентации подводной цели в пространстве должен определяться однозначно. Один из возможных вариантов такого шаблона приведён на рис. 1, *b*. Во всех экспериментах с этим шаблоном угловая ошибка не превысила  $5^\circ$ , а смещение относительно  $(x_{p0}, y_{p0})$  находилось в диапазоне 15–20 % размера шаблона.

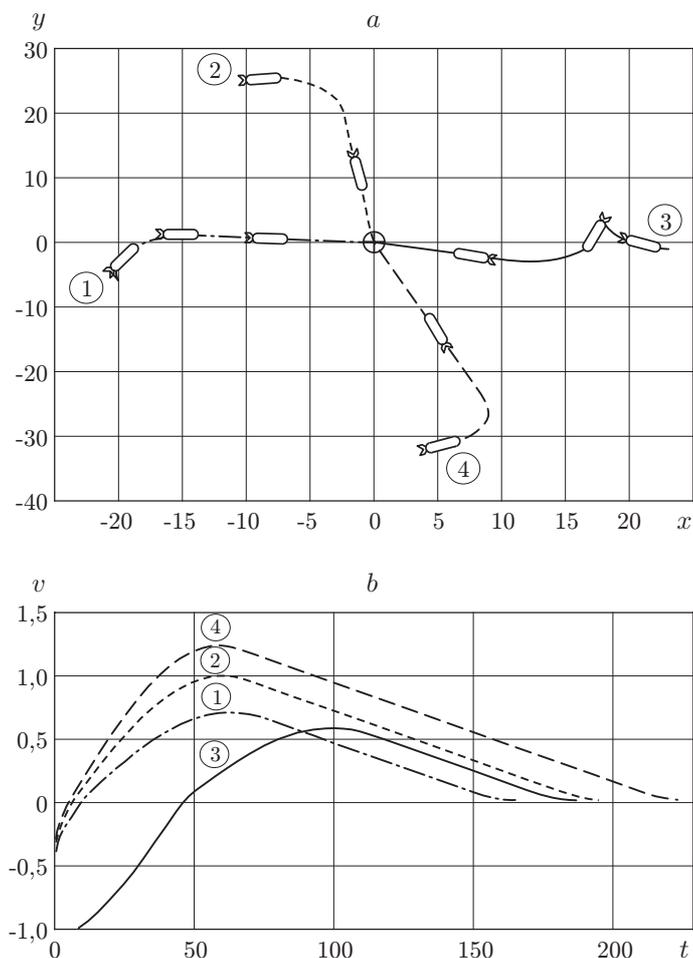


Рис. 3. Результаты численных экспериментов:  $a$  — траектории АНПА при акустической навигации,  $b$  — распределение скоростей вдоль траектории

**Заключение.** В данной работе рассмотрены вопросы приведения к подводной мишени автономного необитаемого подводного аппарата. Предложенное решение комбинирует принципы позиционирования АНПА по акустическим и визуальным данным. Серия численных экспериментов подтверждает высокую точность и надёжность представленного способа приведения. Результаты работы предполагается использовать при проектировании информационно-управляющей системы подводных роботов, разрабатываемых Институтом проблем морских технологий ДВО РАН для исследования шельфа Арктики. В условиях работы подо льдом предлагаемый способ позволит решить задачу стыковки аппарата с донной станцией или возвращения в полынью, размеры которой соизмеримы с размерами аппарата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Undersea** Vehicles and National Needs. Washington: National Academies Press, 1996. 116 p.
2. **Butler L.** Underwater radio communication // *Amateur Radio*. 1987. N 2. P. 27–35.
3. **Eustice R. M., Whitcomb L. L., Singh H., Grund M.** Recent advances in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation // *Proc. of the Oceans'06 IEEE/MTS Conference and Exhibition*. Boston, USA, 2006. P. 1–6.

4. **Williams S., Dissanayake G., Durrant-Whyte H.** Towards terrain-aided navigation for underwater robotics // *Adv. Robotics*. 2001. **15**, N 5. P. 533–549.
5. **Бурдинский И. Н.** Методы и средства детектирования сигналов гидроакустических систем позиционирования // *Вестн. ТОГУ*. 2009. № 4. С. 39–46.
6. **Борейко А. А., Воронцов А. В., Кушнерик А. А., Щербатюк А. Ф.** Алгоритмы обработки видеоизображений для решения некоторых задач управления и навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // *Подводные исследования и робототехника*. 2010. № 1. С. 29–39.
7. **Rice J.** Seaweb acoustic communication and navigation networks // *Intern. Conf. Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results*. Heraklion, Greece, 2005. P. 1–7.
8. **Бурдинский И. Н.** Цифровая система обработки гидроакустических шумоподобных сигналов // *Цифровая обработка сигналов*. 2009. № 1. С. 21–26.
9. **Burdinsky I., Bezruchko F., Myagotin A.** Global extremum searching algorithm for the AUV guidance toward an acoustic buoy // *Proc. of the Oceans'11 IEEE/OES Conference and Exhibition*. Santander, Spain, 2011. P. 1–7.
10. **Cole L., Austin D.** Visual object recognition using template matching // *Proc. of Australasian Conf. on Robotics and Automation*. 2004.  
URL: <http://www.araa.asn.au/acra/acra2004/papers/cole.pdf> (дата обращения: 11.05.2011).
11. **Garcia R., Batlle J., Cufi X., Amat J.** Positioning an underwater vehicle through image mosaicking // *IEEE Intern. Conf. on Robotics and Automation*. 2001. Vol. 3. P. 2779–2784.
12. **Reddy B. S., Chatterji B. N.** An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration // *IEEE Trans. Image Process.* 1996. **5**, N 8. P. 1266–1271.
13. **Dufournaud Y., Schmid C., Horaud R.** Image matching with scale adjustment // *Comput. Vis. Image Underst.* 2004. **93**, N 2. P. 175–194.
14. **Wolberg G., Zokai S.** Robust image registration using log-polar transform // *IEEE Intern. Conf. on Image Processing*. 2000. Vol. 1. P. 493–496.
15. **Горнак В. Е., Икзарцев А. В., Львов О. Ю. и др.** ММТ-3000 — новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // *Подводные исследования и робототехника*. 2007. № 1. С. 12–20.

*Поступила в редакцию 11 мая 2011 г.*

---