

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 движителями, 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

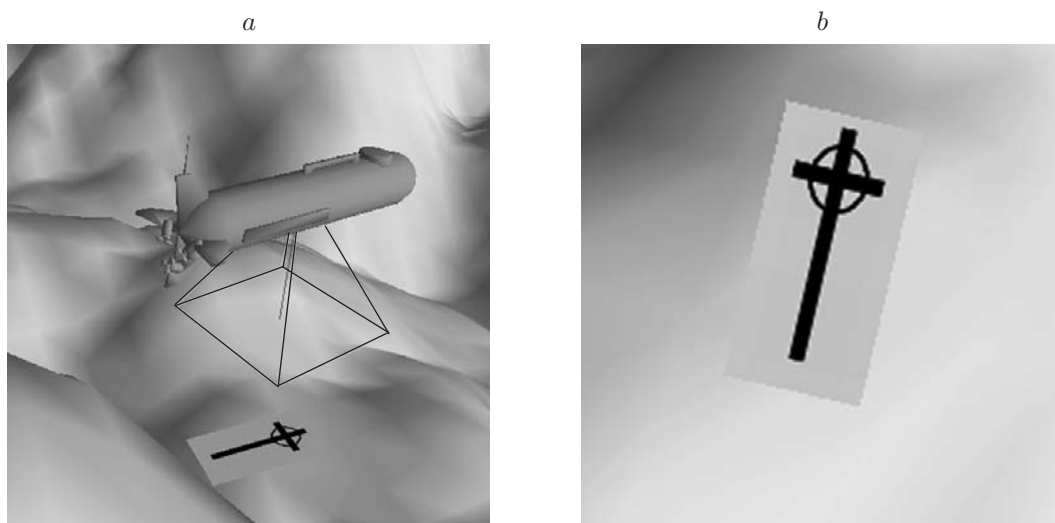


Рис. 1. Конфигурация виртуального эксперимента: *a* — виртуальная сцена, *b* — изображение с камеры АНПА

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 τ — 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_φ и g_v , которые влияют на курс φ 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 τ 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 τ [9], т. е. аппарат ориентируется в направлении буя. Выбор функции

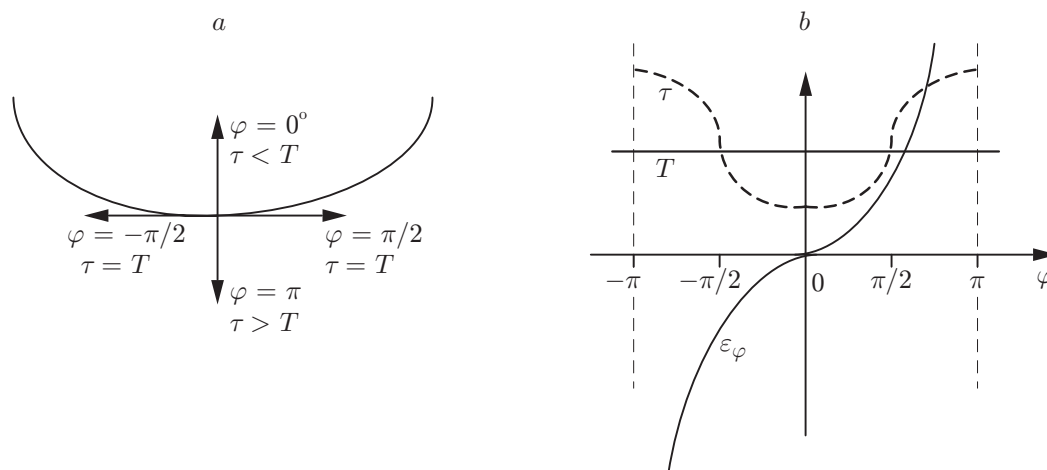


Рис. 2. Зависимости задержки τ и периода T от курса φ : *a* — движение аппарата относительно буя, *b* — график функции рассогласования ε_φ

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 θ' и масштабирующему коэффициенту σ' 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 (σ, θ) 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 (σ, θ) -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 σ' и угловой разности θ' , 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 σ' 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 φ_i . На каждой итерации основного программного цикла положение АНПА вычислялось в соответствии с функциями управления g_φ 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 θ' 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° , а смещение относительно (x_{p0}, y_{p0}) находилось в диапазоне 15–20 % размера шаблона.

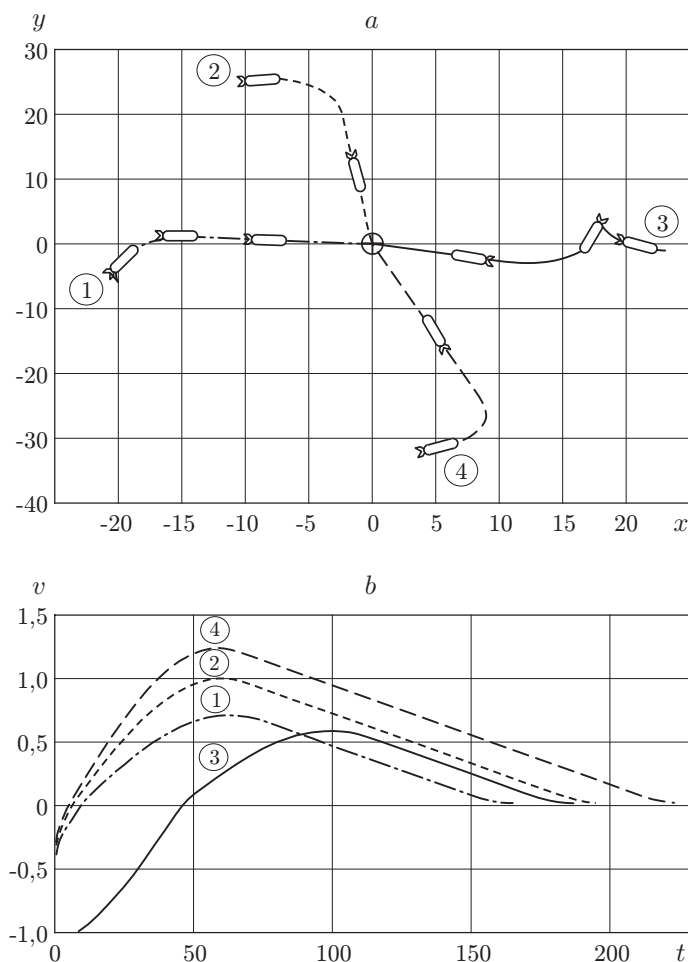


Рис. 3. Результаты численных экспериментов: a — траектории АНПА при акустической навигации, b — распределение скоростей вдоль траектории

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.
