



УДК 681.883.48

© *И. Н. Бурдинский, 2009*

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ИСТОЧНИКИ ОШИБОК ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Бурдинский И. Н. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Вычислительная техника», тел.: (4212) 22-43-56, e-mail: igor_burdinsky@mail.ru (ТОГУ)

В данной работе дается краткий анализ существующих систем позиционирования подводных аппаратов, среди которых наиболее перспективными являются акустические системы. Описываются одно- и двухпроходной принципы регистрации гидроакустических сигналов. Далее представлено, что построение систем позиционирования сводится к задаче точного определения времени и скорости распространения гидроакустического сигнала. В результате анализа показано, что основные сложности при создании данных систем обусловлены неоднородностями водной среды в отношении скорости звуковой волны, потерей мощности, многолучевой структурой распространения сигнала и наличием шумовой помехи в гидроакустическом канале.

In this work we give a short review of the existing underwater vehicle navigation systems. Among them acoustic systems seem to be the most beneficial for the broad range of different applications. We describe one-way and two-way principles for the signal recording. Further, we show that the navigation problem can be reduced to the problem of time of flight and acoustic velocity measurements. We show that the major challenges in the construction of an acoustic navigation system are due to water inhomogeneity in terms of a sound wave velocity, power loss, multi-ray sound propagation nature, and noise in a hydroacoustic channel.

Ключевые слова: гидроакустика, навигация, акустические системы, ошибки позиционирования.

Мировой океан является богатейшим и наименее исследованным источником природных ресурсов. Именно поэтому 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 можно разделить на три основные группы [1]:

1) аппараты глубокого погружения управляются оператором, находя-

щимся на борту;

2) аппараты удаленного управления управляются оператором дистанционно, как правило, с борта судна обеспечения; управляющие сигналы поступают через кабель или оптоволокно;

3) автономные подводные аппараты – подводные роботы для автономного выполнения миссии.

Преимущества использования подводных роботов (ПР) для различных научных, военных и коммерческих целей, таких как исследование океана, поиск снарядов, инспекция подводных труб и кабелей, неоспоримы [2]. Среди основных систем ПР наиболее ключевую роль играют:

- система питания;
- система управления двигателями;
- система позиционирования;
- система целеуказания.

Задача *системы питания* – обеспечить бесперебойное функционирование аналоговых и цифровых блоков ПР, требующих электрического питания. *Система управления двигателями* трансформирует цифровые управляющие сигналы в механическое движение пропеллеров или винтов ПР. *Система позиционирования* служит для определения местоположения подводного аппарата относительно глобальной или относительной систем координат. *Система целеуказания* является связующим звеном между системами позиционирования и управления двигателями, отслеживает движение аппарата вдоль траектории, заложенной миссией [3].

Одной из главных и трудоемких задач подводной робототехники является точное и надежное позиционирование аппарата под водой, т. е. автономное определение положения, глубины погружения и курса в системе локальных или глобальных координат. В данной работе ограничимся лишь задачей определения местоположения ПР. Существующие методы решения задачи позиционирования делятся на следующие группы [4].

GPS-навигация. Вследствие того, что радиоволновое излучение проникает в воду на глубину нескольких длин волн (25–80 см [5, 6]), для определения местоположения аппарату следует всплыть на поверхность, принимать радиосигналы с GPS спутников и вычислить текущие координаты.

Системы относительного позиционирования. Включают устройство определения текущей скорости, например Доплеровский лаг, и инерциальную систему, позволяющую определить угол наклона аппарата относительно продольной, вертикальной и поперечной осей. При перемещении ПР информационно-измерительный комплекс собирает данные и вычисляет текущее положение. Очевидно, что при длительной миссии ошибка определения положения будет неограниченно нарастать, и с некоторого момента измерения становятся бессмысленными [7]. Поэтому данная методика, как правило, применяется в комбинации с GPS-навигацией. Точность современных инерционных систем составляет порядка 1% пройденного расстояния ПР [8].



Картографический метод. Используется при наличии детальной цифровой карты области морского дна, на которой будет выполняться миссия ПР. В этом случае цифровая карта копируется в память навигационной системы ПР и при выполнении миссии привязка к конкретному положению осуществляется посредством автоматического анализа визуальной информации. В качестве визуальной информации может выступать как изображение с обычной оптической камеры, так и изображения, полученные гидролокатором [9, 10].

Акустические системы. Большинство специалистов в области гидроакустики утверждают, что акустические системы позиционирования являются наиболее надежными и перспективными. В основу акустических систем позиционирования положен принцип измерения времени распространения акустического сигнала. Относительное расстояние r между *точкой регистрации* и *опорной точкой* определяется как

$$r = v \cdot t_d \cdot c, \quad (1)$$

где v – скорость звуковой волны в среде, t_d – время прохождения сигнала (time of flight, TOF), c – константа, зависящая от конфигурации эксперимента:

- $c = 1/2$; в точке регистрации располагается объект позиционирования, оборудованный совмещенным излучающим и приемным оборудованием. В качестве опорной точки выступает либо акустическое препятствие, либо маяк, который переизлучает приходящий сигнал. Время t_d в данном случае называется *two-way TOF* (рис. 1, а).
- $c = 1$; в опорной точке располагается маяк, посылающий периодически сигналы, принимаемые на стороне объекта позиционирования. Для определения t_d системы отсчета времени обоих объектов должны работать *синхронно* (рис. 1, б). Время t_d в данном случае называется *one-way TOF*.

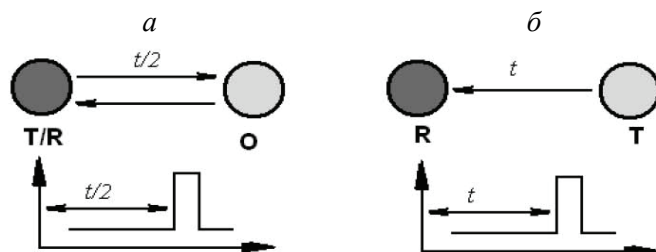


Рис. 1. Двухпроходное (а) и однопроходное (б) время распространения акустического сигнала: Т – передатчик, R – приемник, O – препятствие

Сравнивая достоинства и недостатки обоих принципов измерения TOF, исследователи, как правило, отмечают следующее – *two-way* системы проще в реализации и не требуют синхронизации часов на обеих приемных сторонах. Однако если предполагается использовать большое число ПР, работающих совместно, каждый аппарат потребует *индивидуальное* выделение време-

ни пользования каналом. В таком случае максимальная частота обновления положения ПР будет обратно пропорционально количеству работающих аппаратов. Кроме того, потребуется разработка сложного механизма, минимизирующего число *коллизий*, т. е. попыток одновременной передач сигналов различными аппаратами [11]. Если же использовать одностороннюю (*one-way*) передачу сигнала, частота обновления текущего положения будет зависеть только от технических особенностей маяка и аппарата.

Выражение (1) позволяет по известным t_d и v определить относительное расстояние между подводным аппаратом и источником излучения (маяком). Очевидно, чтобы определить глобальные координаты ПР, требуется выполнение двух условий:

- 1) необходимо иметь несколько маяков (три и более), разнесенных в пространстве;
- 2) ПР должен располагать точными и актуальными координатами маяков.

В идеальном случае маяки и объект позиционирования неподвижны, тогда алгоритм определения абсолютных координат сводится к вычислению простейших алгебраических выражений, которые успешно применяются в GPS-системах [12]. В реальности происходят случайные флуктуации маяков, движение подводного аппарата, присутствуют шумы, влияющие на регистрацию акустического сигнала и прочее. Пример алгоритма для вычисления глобальных координат в реальных условиях представлен в работе [13].

В соответствии с уравнением (1) задача позиционирования ПР сводится к точному определению двух значений – скорости фронта звуковой волны v и времени его распространения t_d . Одновременно с этим можно сделать вывод, что точность позиционирования ПР ограничена снизу погрешностью измерений параметров v и t_d .

Скорость звука v в морской воде – это сложная функция, зависящая от температуры T ($^{\circ}\text{C}$), солёности S (тысячных долей) и глубины D (м). Повышение одной из этих трех характеристик приводит к увеличению скорости звука. В качестве формулы для вычисления v (м/с), как правило, применяют выражение Вильсона:

$$v = 1449 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,0003T^3 + 1,39(S - 35) + 0,017D.$$

Здесь приведена упрощенная версия данного выражения, оригинальная версия может быть найдена в [14, 15]. Выражение Вильсона действительно в интервале T от -4 до 30°C ; S от 0 до 37 долей; D от 0 до 8000 м, при этом точность предсказания v составляет $\pm 0,3$ м/с. Примеры зависимости функции скорости звука от глубины приведен в работе [15].

Точное определение времени TOF также является нетривиальной задачей. Проблемы, требующие решения для точной и надежной регистрации приходящего акустического сигнала, можно разбить на следующие группы.

Потеря мощности сигнала. По мере удаления звуковой волны от излучателя амплитуда сигнала уменьшается. Если I_0 – интенсивность сигнала на



расстоянии 1 м от источника, то интенсивность I на некотором расстоянии z выражается как

$$I = I_0 \exp(-\alpha z),$$

где α – коэффициент затухания, зависящий от физических характеристик среды (плотности, температуры, солености) и несущей частоты акустического сигнала.

В акустике в качестве количественной меры ослабления сигнала используется *потеря мощности* [16]:

$$TL = 10 \log I_0/I \sim z.$$

Следует отметить, что в реальности функция потери мощности на различных расстояниях от источника имеет более сложную зависимость (рис. 2). Подобный характер поведения потери мощности объясняется при рассмотрении путей распространения звуковой волны в водной среде.

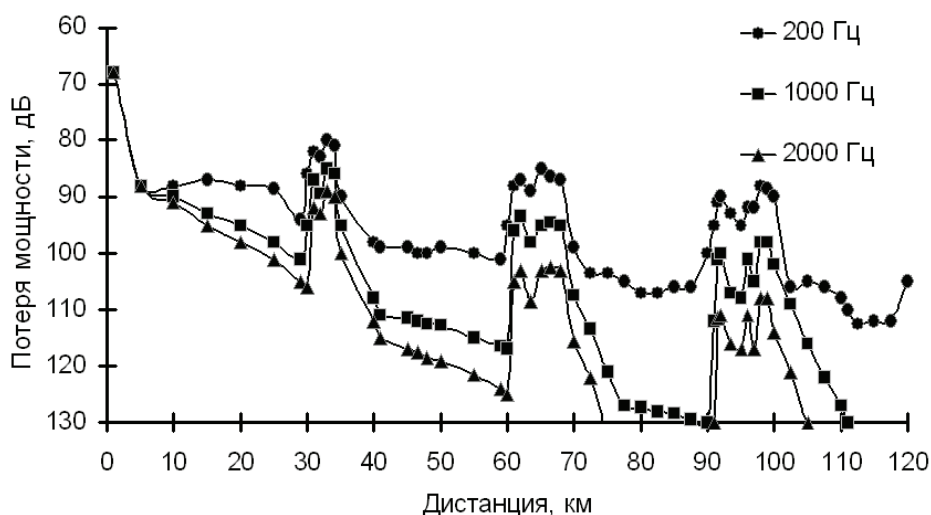


Рис. 2. Зависимость потери мощности сигнала от расстояния в реальном канале [16]

Многолучевая структура распространения звука является еще одним эффектом, усложняющим его регистрацию. В работе [6] приведены типовые случаи распространения звука в морской среде. Многолучевое распространение сигнала может приводить к искажению частотных характеристик и наложению несколько копий сигнала друг на друга. В теории телекоммуникации данным эффектам присвоены названия межчастотная и межсимвольная интерференция.

Особенности поведения функции потери мощности, представленные на рис. 2, объясняются наличием так называемых зон конвергенций, т. е. таких

областей, в которых звуковые волны накладываясь могут усиливать друг друга. Например, в северной части Атлантического океана данные зоны возникают на периодическом расстоянии 65 км, имея при этом протяженность порядка 2 км [16].

Следствием многолучевой структуры распространения звука является то, что импульсная характеристика беспроводного канала выглядит как серия импульсов с уменьшающейся амплитудой. В телекоммуникации вводится понятие *задержка распространения* τ_d , которая определяется как интервал времени, в течение которого на приемной стороне прибудет значительная часть отражений (50 % общей мощности отражений). В системах передачи данных следует выбирать длительность одиночной посылки T из условия $T \gg \tau_d$, иначе возникает эффект межсимвольной интерференции. Для дальномерных гидроакустических систем позиционирования выполнение данного условия практически невозможно.

Эффект Доплера возникает при относительном движении источника и регистрирующего приемника. В реальных системах гарантировать стационарность ПР и маяка практически невозможно. Эффект Доплера проявляется в изменении частоты несущего сигнала. Изменение несущей частоты может составлять несколько процентов, что является серьезной проблемой для систем, использующих частотную модуляцию.

Шум является еще одним из доминирующих факторов, влияющих на надежную регистрацию акустического сигнала. Основные источники шума подразделяются на следующие категории: гидродинамические (ветер, волны, турбулентция), биологические (производимые живыми существами), технические (обусловленные активностью человека на поверхности моря), термальные (возникающие из-за хаотичного движение молекул воды) [17]. Пример спектральной характеристики шума в реальной морской среде приведен в работе [18]. В соответствии с представленными в указанной работе результатами исследований уровень фоновый акустического шума на частотах используемых для подводной передачи данных составляет 20–70 дБ относительно 1 мПа.

В литературе, как правило, рассматривают две модели шума – *аддитивный гауссовский белый шум* (AWGN) и *импульсная помеха*.

Модель AWGN описывает случайный шум, характеризующийся непрерывным и равномерным частотным спектром, при этом амплитуда случайных помех имеет распределение Гаусса. В работе [19] было показано, что детектирование сигнала посредством нахождения максимума корреляционной функции возможно только в канале имеющим AWGN шум. В том случае, когда имеется многолучевое распространение сигнала, причем максимальная энергия сосредоточена не на кратчайшем пути, классический корреляционный метод с поставленной задачей не справляется.

Импульсная помеха описывается как случайный всплеск большой амплитуды и короткой длительности. Наличие в канале импульсной помехи



приводит, как правило, к полной потере информации на некотором временном отрезке посылаемого сигнала.

Синхронизация систем отсчета. Позиционирование ПР, реализованное на измерении one-way TOF, требует синхронизации систем отсчета на стороне приемника и передатчика. Очевидно, что расхождение систем тактирования, обусловленное различными причинами (например, температура окружающей среды), приводит к потере синхронизации, и, как следствие, точность позиционирования значительно ухудшается.

Большинство способов решения проблемы синхронизации (как правило для радиоканалов) принимает за основу постулат, что время прохождения сигнала в канале мало. В случае гидроакустической передачи сигнала требуются реализация более сложных механизмов для синхронизации отправляющей и принимающей стороны [20].

В заключение отметим, что построение акустических систем позиционирования должно базироваться на решении двух ключевых задач: определении *скорости* и *времени* распространения звуковой волны в водной среде. Определение скорости осложнено ее зависимостью от параметров водной среды (солености, температуры, глубины). Точная регистрация сигнала для определения времени распространения, в свою очередь, осложняется, в большей степени, потерей мощности, многолучевым распространением и наличием шумовой составляющей. Оригинальные решения упомянутых проблем станут ключом к созданию дальномерных систем позиционирования нового качества.

Обзор и сравнение существующих подводных акустических навигационных систем приведен в работах [21–23].

Библиографические ссылки

1. *Underwater Vehicles and National Needs.* / Committee on Undersea Vehicles and National Needs, National Research Council. USA, Washington, D.C.: National Academies Press, 1996.
2. *Advances in Unmanned Marine Vehicles.* / G. Roberts, R. Sutton. Institution of Engineering and Technology, 2005.
3. *Technology and applications of Autonomous underwater vehicles.* / ed. G. Griffiths. – CRC Press, 2003.
4. *Springer handbook of robotics.* / O. Khatib, B. Siciliano. Springer, 2008.
5. *Butler L.* Underwater radio communication [Electronic resource]. / L. Butler. Electronic data: Amateur Radio, 1987.
6. *Christ R.D.* The ROV Manual A user guide for observation class remotely operating vehicles. / R.D. Christ, R.L. Wernli. Butterworth-Heinemann, 2007.
7. *Siciliano B.* Underwater robots. Motion and force control of vehicle-manipulator systems. / B. Siciliano, O. Khatib, F. Groen. – 2nd edition. – Springer, 2006.
8. *Recent advances in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation* [Electronic resource]. // R.M. Eustice, L.L. Whitcomb, H. Singh, M. Grund. – Proceedings



of the IEEE/MTS Oceans, 2006.

9. *Williams S.* Towards terrain-aided navigation for underwater robotics [Electronic resource]. // S. Williams, G. Dissanayake, H. Durrant-Whyte. – Advanced robotics, 2001.

10. *Experiments* on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera. // J. Y. Park, B. Jun, P. Lee, J. Oh. Ocean Engineering. 2009. № 36.

11. *Schill F.* Pruning local schedules for efficient swarm communication [Electronic resource] // F. Schill, U. Zimmer. – Electronic data, 2007.

12. *Tsui J.* Fundamentals of Global Positioning System Receivers. / J. Tsui. Wiley-Interscience, 2005.

13. *Bahr A.* Cooperative localization for autonomous underwater vehicle. // A. Bahr, J. Leonard. International Journal on Robotics Research, 2009.

14. *Wilson W. D.* Equation for the speed of sound in sea water. // W.D. Wilson. J. Acoust. Soc. Amer., 1960. № 32.

15. *Tolstoy I.* Ocean Acoustic. Theory and experiment in underwater sound. / I. Tolstoy, C. S. Clay. Acoustical Society of Amer, 1987.

16. *Etter P. C.* Underwater Acoustic Modeling. Principles, techniques and applications. / P. C. Etter. Taylor & Francis, 1995.

17. *The Ocean Engineering Handbook.* / ed. Ferial El-Hawary. CRC Press, 2001.

18. *Wenz G. M.* Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. // G. M. Wenz. J. Acoust. Soc. Amer., 1962. № 34.

19. *Zelst A. V.* Implementation of a mimo ofdm-based wireless lan system. // A. V. Zelst, T. Schenk. – IEEE Transaction on Signal Processing, 2004. № 52.

20. *Syed A. A.* Time synchronization for high latency acoustic networks [Electronic resource]. // A. A. Syed, J. Heidemann. 2006.

21. *Kinsey J.C.* A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges [Electronic resource]. // J. C. Kinsey, R. M. Eustice, L. L. Whitcomb. In IFAC Conference of Maneuvering and Control of Marine Craft, 2006.

22. *Автономные подводные роботы. Системы и технологии* / М. Д. Агеев, Б. А. Касаткин, Л. В. Киселев, Ю. В. Матвиенко и др. / под ред. акад. М. Д. Агеева. М., 2005.

23. *Бурдинский И. Н.* О применении сложных сигналов в гидроакустических системах навигации и управления подводными роботами // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 1(5).