

4. Boykov Y., Veksler O. and Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts // International Conference of Computer Vision (ICCV). – 1999. – P. 377-384.
5. Lei C., Selzer J., and Yang Y. Region-tree based stereo using dynamic programming optimization // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2006. – № 2. – P. 2378-2385.
6. HajerFradi, Jean-Luc Dugelay. Improved depth map estimation in Stereo Vision. Conference of Stereoscopic Displays and Applications XXII, San Francisco, Vol. 7863, January 2011.
7. URL: <http://www.eurecom.fr/fr/publication/3341/download/mm-publi-3341.pdf> (дата обращения 02.12.2012).
8. Konstantin Kramer. Real-Time Stereo Vision System. Tel-Aviv academic college of Engineering, 2006.
9. URL: <http://highlearn.afeka.ac.il/users/www/9357/files/projects/StereoVision.pdf>, дата обращения 02.12.2012).
10. Heiko Hirschmuller, Peter R. Innocent, Jon Garibaldi. Real-Time Correlation-Based Stereo Vision with Reduced Border Errors // International Journal of Computer Vision. – 2002. – Vol. 47, 1/3. – P. 229-246.
11. Wannas van der Mark, Dariu M. Gavrilă. Real-Time Dense Stereo for Intelligent Vehicles // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – March 2006. – Vol. 7, №. 1. – P. 38-50.
12. Yong Zhao, Gabriel Taubin. Real-time stereo on GPGPU using progressive multi-resolution adaptive windows // Image and Vision Computing. – 2011. – № 29. – P. 420-432.
13. Форсайт Дэвид А., Понс Жан. Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2004. – 928 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Чумаченко Александр Викторович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: alex_chumachenko@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79281554935; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Chumachenko Aleksandr Victorovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: alex_chumachenko@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone. +79281554935; the department of computer engineering; postgraduate student.

УДК 681.518.3

С.А. Отческий, И.Н. Бурдинский

КОРРЕКЦИЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЗИЦИИ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Цель данной работы исследование и разработка алгоритмов коррекции триангуляционного метода, который является классическим способом определения позиции автономных необитаемых подводных аппаратов с использованием гидроакустических навигационных систем. При выполнении данной работы произведен детальный анализ триангуляции, который показал основные недостатки данного метода и причины их возникновения. Рассмотрен алгоритм коррекции на основе данных о расстоянии до ближайшего опорного маяка. Разработан алгоритм коррекции на основании анализа данных о расстоянии до всех опорных маяков. Все представленные алгоритмы были реализованы в программной модели, и проверены серией численных экспериментов.

Навигация; гидроакустическая навигационная система; автономный необитаемый подводный аппарат; позиционирование.

S. A. Otcheskiy, I. N. Burdinkiy

CORRECTION OF TRIANGULATION METHOD FOR DETERMINATION THE POSITION OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

The purpose of this work is the research and development of correction algorithms for triangulation method which is the classical way of determination the position of autonomous underwater vehicles using sonar navigation systems. This paper first analysis triangulation algorithm and reviews its disadvantages and their reasons. Second reviews correction algorithm based on analysis of data about distance between vehicle and the closest sonar buoy. Third develops new correction algorithm based on analysis of data about distance between vehicle and all sonar buoys. All represented algorithms have been implemented in program model and tested on a series of numerical simulations.

Navigation; autonomous underwater vehicle; underwater sonar navigation system; positioning.

Введение. Большое значение в исследовании Мирового океана играют универсальные технические средства, обеспечивающие косвенное присутствие человека под водой. Одними из таких средств являются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). В настоящее время АНПА широко используются при проведении научных исследований океана, поиске разрывов информационных кабелей, нефте- и газопроводов, проложенных по дну океана, осуществлении аварийно-спасательных работ [1, 2].

Для бесперебойного функционирования аппарату необходимо своевременно получать информацию о своем текущем местоположении. На сегодняшний день при определении позиции подводных объектов наиболее часто используются гидроакустические навигационные системы (ГАНС), базирующиеся на принципе измерения времени распространения звуковой волны [3]. Эти системы позволяют управлять аппаратом в масштабе реального времени и действуют в диапазоне от нескольких метров до десятков километров.

Актуальной является проблема повышения точности позиции АНПА определяемой с использованием ГАНС, так как от этого напрямую зависит надежность управления аппаратом, а значит и успех выполняемой им миссии.

Цель данной работы исследование и разработка алгоритмов коррекции триангуляционного метода, который является классическим способом определения позиции АНПА с использованием ГАНС.

Триангуляционный метод. Сформулируем задачу нахождения положения АНПА с использованием ГАНС. На некоторой акватории моря расположены акустические маяки, образующие навигационную ячейку с известными координатами. Каждый маяк синхронно и периодически посылает акустический сигнал. АНПА регистрирует сигналы, излучаемые маяками. Располагая данными о моменте отправления сигнала и моменте достижения сигналом аппарата, вычисляется время распространения сигнала от каждого навигационного маяка. При известной скорости звука в воде в районе навигационной ячейки, время распространения может быть преобразовано в дистанцию аппарат-маяк r :

$$r = v_s \tau, \quad (1)$$

где v_s – скорость звука в воде; τ – время распространения акустического сигнала. На основе полученных данных требуется определить положение АНПА.

Рассмотрим работу триангуляционного метода на примере двумерного случая. Пусть вектор $P[x, y]$ определяет позицию АНПА, m – число опорных маяков, координаты которых задаются системой векторов $P_{Bi}[x_i, y_i]$; $i=1..m$. Вектор $d [d_1..d_m]$ содержит расстояния между АНПА и маяками:

$$d_i = \|P - P_{Bi}\| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}.$$

Представим формулу (1) в следующем виде:

$$r_i = v_s \tau_i = d_i + w_i,$$

где w_i – случайная помеха, распределенная по закону Гаусса с математическим ожиданием, равным нулю.

Возведем r_i в квадрат:

$$r_i^2 = \|P\|^2 + \|P_{Bi}\|^2 - 2P_{Bi}^T P + \xi_i, \tag{2}$$

где ξ_i – новая случайная помеха, описываемая формулой

$$\xi_i = w_i^2 + 2w_i d_i.$$

Написав уравнения (2) для каждого маяка получим систему следующего вида:

$$2 \begin{bmatrix} P_{B1}^T \\ \vdots \\ P_{Bm}^T \end{bmatrix} P = \begin{bmatrix} \|P_{B1}\|^2 - r_1^2 \\ \vdots \\ \|P_{Bm}\|^2 - r_m^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_m \end{bmatrix} + \|P\|^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

в матричной форме:

$$AP = B + \xi + \|P\|^2 E_m, \tag{3}$$

Система (3) не линейна относительно вектора P , так как присутствует член $\|P\|^2$. Приведем систему к линейной, умножив левую и правую часть на матрицу M (размер $(m-1)$ на m) следующего вида:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}.$$

В итоге из (3) получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$MAP = MB + M \xi.$$

Так как величину помехи ξ предсказать невозможно идея триангуляции заключается в решении методом наименьших квадратов следующей СЛАУ:

$$MAP = MB. \tag{4}$$

Согласно этому методу, минимизируется расстояние $(MAP-MB)^2$ и это значит, что результатом будет такая пара координат x, y , для которой норма $\|M\xi\|^2$ принимает минимально возможное значение. Обозначим условие минимума нормы $\|M\xi\|^2$. Так как $M\xi$ матрица вида:

$$\begin{bmatrix} \xi_1 - \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_1 - \xi_m \end{bmatrix},$$

норма $\|M\xi\|^2$ минимальна при следующем условии:

$$\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_m. \tag{5}$$

Если условие (5) справедливо для координат АНПА они будут являться решением системы уравнений (4). При абсолютной точности измерения скорости v_s и времени распространения τ (все w_i равны нулю), для любого положения аппарата все ζ_i равны нулю. Следовательно, в отсутствии помех триангуляционный алгоритм всегда позволяет получить наилучшее приближение к реальным координатам. Если в измерениях присутствует погрешность, позиция аппарата, вычисленная методом наименьших квадратов, будет определена с некоторой ошибкой.

Для исследования работы методов вычисления позиции АНПА, при помощи пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab, была создана модель ячейки гидроакустической навигационной системы. На рис. 1 представлены результаты моделирования работы триангуляционного метода. Моделирование производилось для ячейки из трех маяков правильной формы, в условиях наличия в измерениях дистанций аппарат-маяк систематической ошибки 10 %. График ставит в соответствие каждой паре координат x, y относительное значение погрешности вычисленных координат – Er (отношение величины отклонения рассчитанной позиции к расстоянию между соседними опорными маяками).

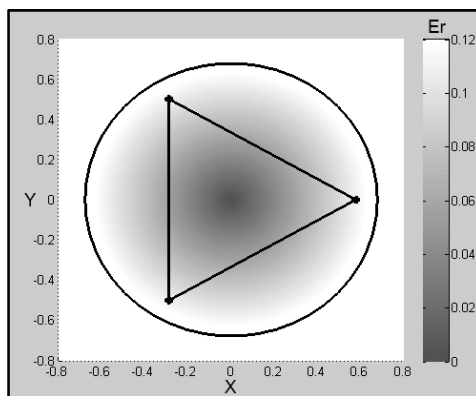


Рис. 1. Ошибка триангуляционного метода

Результаты моделирования показали:

- 1) ошибка рассчитанной позиции незначительна при нахождении АНПА в центре навигационной ячейки;
- 2) движение от центра навигационной ячейки, в частности приближение к любому опорному маяку, сопровождается ростом погрешности рассчитанных координат.

Детальный анализ результатов моделирования позволил установить, что при вычислении позиции наибольшее влияние оказывает измерительная информация, полученная от наиболее удаленных маяков. Чтобы объяснить данный эффект, сравним действительную и рассчитанную триангуляционным методом позиции АНПА.

Для решения полученного методом наименьших квадратов w_i и d_i все измерения распределены так, чтобы выполнялось условие (5), обозначим этот набор ζ_{tri} . В действительности, с ростом расстояния d растет ошибка w , поэтому w_j и d_j минимальны при j , равном $\arg\{\min_{i \in [1, m]}(\tau_i)\}$, и максимальны при j , равном $\arg\{\max_{i \in [1, m]}(\tau_i)\}$, набор ζ_{re} . Данные наборы совпадают, если аппарат равноудален от опорных маяков. В этом случае ошибка алгоритма стремится к нулю. Если наборы не совпадают, переход от ζ_{re} к ζ_{tri} осуществляется за счет уравнивания ζ_i путем увеличения составляющей w для измерения ближайшего маяка, и увеличе-

ния составляющей d для измерений остальных. Это приводит к приближению расчетной позиции к измерениям дальних маяков, которые, как правило, обладают наибольшей ошибкой. Из этого следует: ошибка триангуляционного метода увеличивается с ростом разницы между измеренными дистанциями, что подтверждается результатами моделирования.

Существенным недостатком триангуляционного метода является неприемлемо высокое значение ошибки вычисленных координат при нахождении АНПА рядом с любым опорным маяком. Наиболее простым путем исправления данного недостатка является коррекция рассчитанной позиции.

Корректирующие алгоритмы. В [4] был разработан алгоритм коррекции на основании анализа данных о расстоянии до ближайшего опорного маяка (корректирующий алгоритм №1). На рис. 2 представлены результаты моделирования его работы.

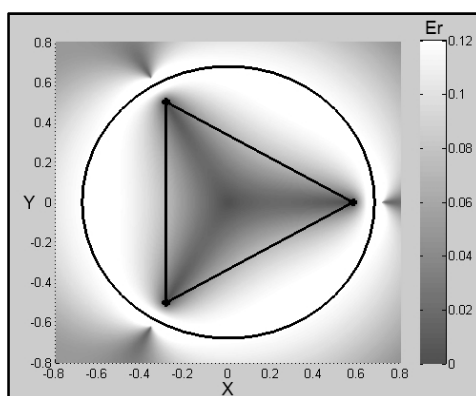


Рис. 2. Ошибка корректирующего алгоритма №1

Не смотря на низкую величину ошибки при нахождении АНПА рядом с любым из опорных маяков, увеличение погрешности рассчитанных координат в результате коррекции наблюдается чаще, чем уменьшение. При этом увеличение наблюдается внутри навигационной ячейки, в то время как коррекция должна обеспечивать максимально низкое значение погрешности в данной области.

Учитывая описанные выше особенности триангуляционного метода, был разработан второй способ коррекции, который производится на основании анализа данных о расстоянии до всех опорных маяков (корректирующий алгоритм №2). Алгоритм подразумевает следующие действия:

1. Определим ближайший маяк и вычислим корректирующий фактор:

$$\Delta r = v_s \tau_j - r_j,$$

где τ_j – время распространения звуковой волны между ближайшим маяком и АНПА; r_j – расстояние между маяком и позицией аппарата рассчитанной триангуляционным методом.

2. Определим направление коррекции:

$$\vec{S} = \sum \vec{V}_i, \vec{V}_i = p_{Bi} - p,$$

где p_{Bi} – координаты i -го маяка; p – координаты аппарата рассчитанные триангуляционным методом.

3. Определим коэффициент корректирующего смещения Rel :

$$Rel = \frac{\min(SN, PN)}{\max(SN, PN)},$$

$\cos(a_i) < 0, PN = PN + \tau_i |\cos(a_i)|, \cos(a_i) > 0, SN = SN + \tau_i \cos(a_i),$

$$\cos(a_i) = \frac{(S^x V_i^x) + (S^y V_i^y)}{|\vec{V}_i| |\vec{S}|}.$$

4. Скорректируем позицию:

$$\bar{p} = p + \Delta r(1 - \text{Rel}) \frac{\vec{S}}{|S|}.$$

На рис. 3 представлены результаты моделирования работы второго корректирующего алгоритма.

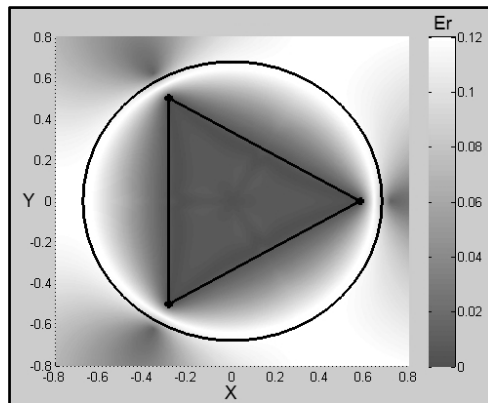


Рис. 3. Ошибка корректирующего алгоритма №2

Второй способ коррекции значительно уменьшает ошибку триангуляционного метода внутри навигационной ячейки. Погрешность вычисленных координат при нахождении АНПА рядом с опорным маяком незначительна. В отличие от первого способа, увеличение ошибки скорректированных координат отсутствует.

Оценка эффективности корректирующих алгоритмов. Исследование работы методов определения позиции АНПА для простоты и наглядности проводилось в условиях наличия в измерениях дистанций аппарат-маяк систематической ошибки равной 10 %. На практике измерения содержат также случайную ошибку, которая часто по величине превосходит систематическую. Поэтому была произведена оценка эффективности корректирующих алгоритмов в условиях наличия в измерениях дистанций аппарат-маяк только случайной ошибки (результаты представлены в табл. 1), и в условиях наличия случайной и систематической ошибок (результаты представлены в табл. 2). В первом случае при задании ошибки в модели использовалось нормальное распределение с математическим ожиданием 0 и среднеквадратическим отклонением 5/3. Во втором случае нормальное распределение с математическим ожиданием -5 и среднеквадратическим отклонением 5/3. Оценка эффективности проводилась для области внутри навигационной ячейки из трех маяков в соответствии со следующими статистическими параметрами ошибки координат, рассчитанных алгоритмами: максимальное значение ошибки (MAX), среднее значение ошибки (MEAN), среднеквадратическое отклонение ошибки (δ).

Таблица 1

Оценка эффективности корректирующих алгоритмов в условиях случайных ошибок измерений дистанций аппарат-маяк

	Триангуляционный метод, %	Коррекция №1, %	Коррекция №2, %
MAX	3,05	2,51	3,42
MEAN	1,38	1,26	1,32
δ	0,34	0,23	0,31

Таблица 2

Оценка эффективности корректирующих алгоритмов в условиях случайных и систематической ошибок измерений дистанций аппарат-маяк

	Триангуляционный метод, %	Коррекция №1, %	Коррекция №2, %
MAX	6,53	4,92	3,15
MEAN	2,89	2,18	1,38
δ	1,13	0,86	0,27

В условиях случайных ошибок наилучший результат показал первый корректирующий алгоритм, однако он не обеспечил существенное уменьшение погрешности триангуляционного метода в рассматриваемой области. Второй корректирующий алгоритм показал более чем двукратное уменьшение погрешности рассчитанных координат при наличии в измерениях систематической ошибки.

Также была произведена оценка эффективности корректирующих алгоритмов при обработке данных полученных в ходе натурального эксперимента, который проводился в августе 2012 г. в бухте Патрокл, Приморский край. В ходе эксперимента производилась серия измерений дальности между излучателем акустических сигналов и приемником. При этом излучатель был зафиксирован на пирсе, а приемник находился на лодке и в ходе эксперимента перемещался по акватории бухты. На основе измеренных дальностей относительно трех различных позиций приемника и географических координат, полученных с помощью системы GPS, была произведена серия вычислений позиции излучателя. Статистические параметры ошибки вычисленных исследуемыми алгоритмами координат представлены в табл. 3.

Наиболее эффективным оказался второй корректирующий алгоритм, показавший практически двукратное уменьшение средней ошибки триангуляционного метода. После проведения эксперимента было установлено, что между приемником и передатчиком присутствовала рассинхронизация внутренних часов. Это стало причиной наличия систематической ошибки в измеренных дальностях.

Таблица 3

Оценка эффективности корректирующих алгоритмов при обработке экспериментальных данных

	Триангуляционный метод, %	Коррекция №1, %	Коррекция №2, %
MAX	4,66	4,83	3,31
MEAN	3,63	3,36	2,09
δ	0,42	0,48	0,35

Заключение. В работе был произведен детальный анализ триангуляционного метода, который показал его недостатки и причины их возникновения. Был рассмотрен способ коррекции на основании анализа данных о расстоянии до ближайшего опорного маяка, призванный исправить выявленные недостатки триангуляции. Так как рассмотренный способ не имел должного эффекта, был разработан

алгоритм коррекции на основании анализа данных о расстоянии до всех опорных маяков. Серия численных экспериментов показала высокую стойкость разработанного метода к систематическим ошибкам измерений. Это говорит о том, что практическое использование второго корректирующего метода возможно без измерения и постоянной корректировки скорости звука в воде.

В настоящее время ведется работа по апробации и улучшению разработанного корректирующего алгоритма с учетом динамика движения АНПА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chitre M. Shahabudeen S., Stojanovic M.* Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges // Marine technology society journal. – 2008. – Vol. 42, № 1. – P. 103-116.
2. *Агеев М.Д. и др.* Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 400 с.
3. *Kinsey J.C., Eustice R.M. and Whitcomb L.L.* A survey of underwater vehicle navigation. In IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft, 2006.
4. *Myagotin A.V., Burdinskiy I.N.* A framework of an acoustic navigation network servicing multiple autonomous underwater vehicles [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.actapress.com/Abstract.aspx?paperId=4115>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Сай.

Отческий Семен Александрович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН; e-mail: semgog@yandex.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 84232432416; техник.

Бурдинский Игорь Николаевич – e-mail: igor_burdinsky@mail.ru; к.т.н.; доцент.

Otcheskiy Semen Aleksandrovich – Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: semgog@yandex.ru; 5a, Sukhanov street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +74232432416; technician.

Burdinskiy Igor Nikolayevich – e-mail: igor_burdinsky@mail.ru; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.942; 531.761

И.В. Карабанов, И.Н. Бурдинский, А.С. Мионов, М.А. Линник

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЛОЖНОГО ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Целью данной работы является разработка модели распространения сложного гидроакустического фазоманипулированного сигнала в условиях мелкого моря на основе экспериментальных данных, что должно обеспечить соответствие модели реальным условиям эксплуатации. При выполнении данной работы были описаны математически и далее реализованы программно эффекты гидроакустического канала для условий мелкого моря с использованием экспериментальных данных. Математическая модель позволяет провести анализ работы различных способов обработки при обнаружении сигнала и оценки его параметров. В статье приведены результаты моделирования приема сигнала с использованием разработанной модели.

Гидроакустический канал; обработка сигналов; распространение сигнала; мелкое море; сложные фазоманипулированные сигналы.