

Ryzhov Vladimir Alexandrovich – e-mail: ryzhov@smtu.ru; phone: +78124940936; the department of applied mathematics and mathematical modeling; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

Semenov Nikolay Nikolaevich – e-mail: semenov@smtu.ru; phone: +78122388873; the department of marine information systems and technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

Chemodanov Mikhail Nikolaevich – e-mail: chemodanov@smtu.ru; phone: +78122388873; the department of marine Information systems and technologies; assistant professor.

УДК 629.127

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-7486

Ю.В. Ваулин, К.З. Лаптев**ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПЛАВАНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ЗАДАННОМ РАЙОНЕ**

Современный этап развития подводных технологий, в области создания подводных робототехнических систем, обеспечивает способность автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) длительное время работать в отдаленных районах Мирового океана. В этой связи оценка точности плавания АНПА становится фактором, который необходимо учитывать при планировании миссии и формировании длительных океанских маршрутов. С учетом существующих требований по навигационной точности, технология решения навигационной задачи и состав навигационного оборудования для автономных необитаемых подводных аппаратов к настоящему времени определены достаточно четко – это комплексирование данных счисления бортовой системы, включающей точный измеритель абсолютной скорости и инерциальную систему, с текущей коррекцией численных данных от внешних навигационных систем. Для коррекции используются спутниковые системы на поверхности или гидроакустические – в подводном положении. Последние отличаются конфигурацией гидроакустического оборудования, реализованного обычно в виде опорных маяков с известными или контролируемыми географическими координатами. Рассматриваются различные методы и результаты оценки точностных характеристик бортовых средств навигации автономных необитаемых подводных аппаратов, выполненные в условиях специально оборудованного полигона, позволяющие оценить точность счисления пути АНПА в заданном районе плавания. Полигон Института Проблем Морских Технологий располагается в мелководной бухте Амурского залива, в районе г. Владивосток. Полигон оборудован гидроакустической навигационной системой с длинной базой (ГАНС ДБ). Координаты маяков-ответчиков и базовой станции ГАНС ДБ на полигоне установлены с высокой точностью геодезическими методами. Высокоточное измерение координат маяков-ответчиков ГАНС ДБ дает возможность выполнить объективную оценку эффективной скорости звука в районе работ. На основе данных измерений ГАНС ДБ измеряется погрешность всей комплексированной бортовой навигационной системы АНПА. Также дается оценка погрешностей отдельных элементов навигационной системы АНПА, в том числе погрешность доплеровского лага и компаса. В статье рассматривается статистический способ оценки точности счисления АНПА позволяющий оценить влияние внешних факторов на точность измерения координат АНПА.

Автономный необитаемый подводный аппарат; навигация.

Yu.V. Vaulin, K.Z. Laptev**ESTIMATE OF THE AUV NAVIGATION ACCURACY IN THE SPECIFIED AREA**

The current stage of development of underwater technologies in the field of creation of underwater robotic systems provides the ability of Autonomous Underwater Vehicles (AUV) to work in remote areas of the Ocean for a long time. In this regard, estimate of the AUV navigation accuracy becomes a factor that needs to be considered when planning a mission and formation of long

ocean routes. Taking into account the existing requirements for navigational accuracy, the technology for the solution of a navigation task and composition of navigational equipment for the autonomous unmanned underwater vehicle are defined rather accurately. The AUV coordinates are measured by the dead reckoning method on the basis of the Doppler log and inertial navigation system data. A satellite-based navigational system and hydro-acoustic systems are used for the correction of coordinates. The hydro-acoustic navigation systems include one or more transponders with the known or controlled geographical coordinates. The integrated accuracy of a navigation system will be defined by the accuracy of a coordinate binding of transponders. The report discusses various methods and results of the evaluation of the accuracy characteristics of onboard navigation means of autonomous unmanned underwater vehicles performed in the specially equipped ground, allowing to assess the accuracy of dead-reckoning of the AUV path in the specified area of navigation. The polygon of the Institute of Marine Technology Problems is a shallow Bay of the Amur Gulf, near the city of Vladivostok. It is equipped with hydroacoustic navigation system with long base line (LBL). The coordinates of the transponders and base station of LBL installed with a high accuracy by geodetic methods. High-precision measurement of the coordinates of the transponders by LBL provides an opportunity to perform an objective evaluation of the effective speed of sound in the area of work. Based on the LBL data, the accuracy of the AUV integrated navigation system is estimated. The assessment of errors of separate elements of the navigation system of the AUV, including the error of the Doppler log and the compass, is also given. The article discusses a statistical method for estimating the accuracy of the AUV calculation allowing to evaluate the influence of external factors on the accuracy of the AUV coordinate measurement.

Autonomous underwater vehicle; navigation.

Введение. При проектировании, производстве и отладке автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) серьезные проблемы возникают с оценкой точности отдельных элементов навигационного комплекса и навигационной системы в целом. В первую очередь требуют калибровки датчики и системы собственной разработки. Для подводных роботов ИПМТ это доплеровский лаг и гидроакустическая навигационная система (ГАНС). Также, требуют уточнения характеристики полученных по поставке паспортизированных датчиков, поскольку на их точность влияют, например, погрешности установки и другие внешние факторы. Как правило, указанные работы невозможно выполнить в полном объеме в лабораторных условиях, поэтому значительная часть работ по оценке точностных характеристик бортовых средств навигации АНПА производится во время морских испытаний по нестандартизованным методикам. В ИПМТ для этих целей используется специально оборудованный морской полигон, расположенный в бухте "Патрокл" залива Петра Великого.

Методы калибровки навигационных датчиков и оценки текущих параметров движущегося объекта навигации основаны на статистической обработке гидроакустических дальномерных данных полученных в подводной среде, которые подтверждаются данными спутниковых навигационных систем на поверхности [1–6].

1. Оценка инструментальных погрешностей элементов навигационной системы АНПА. Материальное обеспечение эксперимента. Специализированный полигон ИПМТ оборудован в мелководной бухте (рис. 1), координаты ключевых точек которого были определены геодезическими методами с погрешностью не более 1м. В этих ключевых точках были размещены три маяка-ответчика и управляющие антенны, которые являются абонентами гидроакустической навигационной системы с длинной базой. В ходе эксперимента эти устройства реализуют функции постоянно действующих стационарных измерительных дальномерных трасс на акватории, в которой движется подводный робот, выполняющий проверку своих навигационных средств.



Рис. 1. План полигона с ключевыми точками

Накопление измеряемых дальномерных данных по трем трассам (антенна–маяки) с оценкой эффективных скоростей распространения сигналов по различным направлениям в акватории позволяет дать достаточно точную оценку координат объекта навигации и взвешенную оценку эффективной скорости распространения сигналов, действующей в текущее время и необходимой для увеличения точности любых других дальномерных, а фактически координатных, измерений в акватории. При точной координатной привязке ключевых точек в условиях такого полигона можно выполнить объективную оценку точности всей комплексной бортовой навигационной системы. Приведенные ниже данные получены в условиях полигона во время ряда запусков одного из АНПА входящего в состав робототехнического комплекса МТ-2012 [7]. Навигационный комплекс АНПА МТ-2012 имеет традиционную для аппаратов ИПМТ структуру [8–14] основой которой является система счисления координат, в которую входят: гироскоп Octans III (IxSea) и магнитный компас, датчики крена и дифферента, датчики угловых скоростей, датчик глубины, доплеровский лаг, развитая эхолокационная система. Для коррекции счисленных координат используются данные от спутниковой навигационной системы (СНС) и данные от ГАНС с длинной базой [15–16]. Скорость звука на АНПА определяется в режиме реального времени измерителем параметров среды (ИПС).

Погрешность измерения координат на АНПА складывается из погрешностей отдельных элементов навигационной системы (НС). При отсутствии коррекции от ГАНС и СНС, уравнения погрешностей измерения координат при двухмерном гидрометрическом счислении пути выглядят так:

$$\Delta x = \Delta x_0 + \int_0^t [\Delta V_{f_дн} * \cos Fi] dt + \int_0^t [\Delta V_{r_дн} * \sin Fi] dt + \int_0^t [(V_{f_дн} * \sin \Delta Fi) * \sin Fi] dt + \int_0^t [(V_{r_дн} * \sin \Delta Fi) * \cos Fi] dt, \quad (1)$$

$$\Delta y = \Delta y_0 + \int_0^t [\Delta V_{f_дн} * \sin Fi] dt + \int_0^t [\Delta V_{r_дн} * \cos Fi] dt + \int_0^t [(V_{f_дн} * \sin \Delta Fi) * \cos Fi] dt + \int_0^t [(V_{r_дн} * \sin \Delta Fi) * \sin Fi] dt \quad (2)$$

Погрешность определения точки старта Δx_0 , Δy_0 определяется точностью СНС. Погрешность измерения скорости доплеровским лагом $\Delta V_{f_дл}$, $\Delta V_{r_дл}$ – прямо пропорциональна погрешности измерения скорости звука в районе движения АНПА и инструментальной погрешностью, одной из составляющей которой является погрешность направления лучей.

$$V_{f_дл} = \frac{f_{g13}}{4f_0} \cdot \frac{c}{\cos \theta}, \quad (3)$$

$$V_{r_дл} = \frac{f_{g42}}{4f_0} \cdot \frac{c}{\cos \theta}, \quad (4)$$

$V_{f_дл}$ – продольная скорость, $V_{r_дл}$ – поперечная скорость, f_{g13} – доплеровский сдвиг частот по продольным лучам, f_{g42} – доплеровский сдвиг частот по поперечным лучам, f_0 – частота излучения, θ – направление лучей.

Погрешность измерения курса АНПА ΔFi – определяется точностью ИНС (или компаса) и точностью установки датчика курса (ИНС) относительно корпуса АНПА. В соответствии с паспортными данными, погрешность измерения курса для гирокомпаса Octans III составляет $0,1^\circ \text{sec}$ (широты). Погрешность установки антенн ДЛ и гирокомпаса относительно корпусной конструкции АНПА устанавливается в лабораторных условиях с точностью $0,1^\circ$.

2. Описание результатов эксперимента. Методика подтверждения характеристик НС АНПА и калибровки навигационных датчиков в условиях полигона описана в [17–18]. Запуск АНПА осуществлялся на полигоне ИПМТ в условиях мелководной бухты (глубина 6–20 м). Программная траектория представляла собой циклическое движение по квадрату со стороной 300 м с координатной привязкой (рис. 2). Средняя скорость движения $0,95$ м/с. Коррекция численных координат во время движения осуществлялась на АНПА по данным ГАНС с периодом 30 с. Продолжительность пуска составила – 24 ч 34 минуты, пройденная дистанция – 84350 м. Погрешность счисления координат без коррекции ГАНС в точке финиша достигла 67,8 м, а погрешность счисления с коррекцией ГАНС – 7,2 м.

Процедура оценки точности навигации и калибровки навигационных датчиков и систем производилась в ходе постобработки полученных данных.

По результатам запуска было проведено уточнение эффективной скорости распространения сигналов на полигоне C_e . Скорость распространения сигналов

C_e связана с измеренными дальностями в соответствии с формулой:

$$D_i = c_e t_i, \quad (5)$$

здесь t_i – время распространения навигационного сигнала от объекта до соответствующего маяка, $i = 1, 2, 3$.

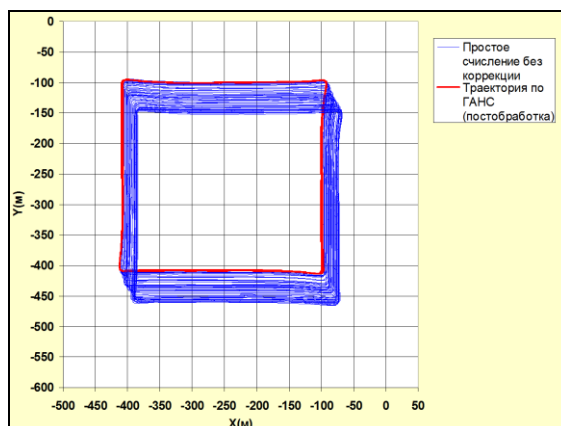


Рис. 2. Траектория движения АНПА по данным ГАНС (постобработка) и по данным простого счисления за 24 часа движения АНПА.

Определение эффективной скорости выполняется в два этапа. Первый – на основе определения координат фиксированной управляющей антенны по дальномерным данным от маяков-ответчиков – и притягиванию результатов расчета к истинным геодезическим координатам этой антенны. На втором этапе, при определении координат объекта навигации по измеренным дальностям от маяков-ответчиков, введенное значение эффективной скорости для определения дальностей уточняется при сведении дальномерного треугольника ошибки, сформированного неточным заданием скорости, в точку. Весь опыт работ на полигоне показывает, что таким образом, можно довести относительную ошибку измерения скорости звука до 0.1–0,3 %. На рис. 2 показана реальная траектория АНПА по данным ГАНС с учетом уточненной эффективной скорости звука и для сравнения траектория АНПА по данным бортовой автономной навигационной системы (БАНС) без учета коррекции по ГАНС. Основываясь на полученных данных можно оценить погрешность счисления координат за время запуска АНПА, и получить калибровочные коэффициенты для ДЛ. На рис. 3 показан график погрешности счисления координат по исходным данным (до калибровки ДЛ) и после калибровки. За 24 часа непрерывного движения АНПА по данным ГАНС преодолел расстояние равное 84350 м. За это время накопленная погрешность измерения координат методом простого счисления с некалиброванным ДЛ составила 67,8 м или 0,08 % от пройденного пути. Столь малая величина объясняется тем, что траектория носила циклический замкнутый характер и накапливаемая погрешность счисления координат “компенсировалась” на взаимно противоположных галсах.

После пересчета траектории с учетом нового калибровочного коэффициента ДЛ итоговая погрешность координат практически не изменилась, но изменился характер графика изменения погрешности – исчезли периодические колебания амплитудой 10-15 м. Очевидно, если бы траектории АНПА была прямолинейной а не циклической и замкнутой, то погрешность счисления координат с некалиброванным ДЛ была бы значительно выше. Поэтому для оценки реальных характеристик НС, кроме погрешности счисления координат определим погрешность пройденного пути. В рамках данного эксперимента получены следующие значения погрешности пройденного пути БАНС АНПА (табл. 1). На рис. 4 показана погрешность пройденного пути до калибровки ДЛ, а на рис. 5 после вычисления и учета калибровочного коэффициента ДЛ.



Рис. 3. Погрешность счисления координат АНПА до калибровки ДЛ и после калибровки

Таблица 1

	Оценка пройденного пути, м	Погрешность счисления пройденного пути, %
ДЛ не калиброван, скорость звука не уточненная	81717	3,1
ДЛ не калиброван, скорость звука уточнена	82504	2,1
ДЛ калиброван, эффективная скорость звука уточнена	84352	0,002

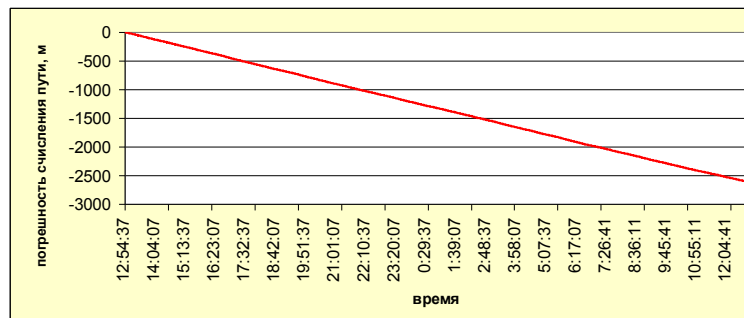


Рис. 4. Погрешность счисления пройденного пути АНПА до калибровки ДЛ 2600 м за 24 ч



Рис. 5. Погрешность счисления пройденного пути АНПА после калибровки ДЛ

Из рис. 5 видно, что хотя итоговая ошибка счисления пройденного пути на момент окончания запуска находится около нуля, на некоторых участках погрешность достигала 20 м. Здесь изменения погрешности в зависимости от времени носят не системный характер, и видимо, связаны не только с неучтенной инструментальной погрешностью датчиков, но и с непредсказуемой неоднородностью внешней среды, характером рельефа дна и другими факторами.

Результаты оценки характеристик НС АНПА МТ-2012 [17–18] показывают, что описанная методика позволяет снизить инструментальную погрешность датчиков НС (ДЛ, измеритель скорости звука) путем их калибровки в натуральных условиях на полигоне.

3. Оценка точности счисления статистическим способом. Учитываемые при счислении пути АНПА истинный курс; пройденное расстояние; элементы течения всегда известны с некоторыми ошибками, поэтому счисляемое место АНПА следует рассматривать как приближенное.

Средняя квадратная ошибка $M_c(t)$ счисления за время t вычисляется по формулам: [8]

$$M_c(t) = \frac{1}{2^{1-\theta}} K_c t \quad \text{— при продолжительности плавания до 2 ч} \quad (6)$$

$$M_c(t) = K_c t^\theta \quad \text{— при продолжительности плавания более 2 ч} \quad (7)$$

где t – продолжительность плавания в часах; K_c – коэффициент точности счисления; θ – безразмерный параметр, определяющий скорость нарастания ошибки счисления с увеличением времени t .

Таким образом, знание коэффициента точности счисления для АНПА является одним из необходимых параметров позволяющих рассчитывать среднюю квадратическую ошибку счисления.

Из практики кораблевождения известно, что средние значения коэффициентов K_c для кораблей различных классов и для различных условий плавания, а также для различных районов могут быть вычислены по невязкам счисляемых мест, полученным при наблюдениях. Исходя из этого утверждения, произведен расчет K_c для АНПА «МТ-2012» в заданном районе плавания. В основу расчетов положена оценка точности счисления статистическим способом. Данный способ является основным, так как связан с совместным учетом всех факторов влияющих на точность счисления и применяется, в большинстве случаев решения задач, связанных с оценкой точности счисляемого места; он базируется на применении выводов теории случайных функций. Исходными данными для расчетов были взяты невязки счисляемых мест, полученные при определении места по данным ГАНС с дискретностью 2–2, 5 часа при плавании АНПА по счислению в заданном районе бухты Патрокл.

Для расчета K_c необходимо знать параметр θ . Из опыта кораблевождения он имеет величину от 0,3 до 0,8. В данном случае для расчетов было принято его среднее значение, равное 0,5. Методика вычисления коэффициента K_c описана в [1], коэффициент точности счисления рассчитывается по формуле:

$$K_c = \frac{[Ct^\theta]}{[t^{2\theta}]}, \quad (8)$$

где K_c – коэффициент точности счисления в м; C – счислимая невязка в м; t – продолжительность плавания в часах; θ – безразмерный параметр, определяющий скорость нарастания ошибки счисления с увеличением времени t .

Для удобства расчетов исходные данные для расчета коэффициента точности счисления сведены таблицы.

Таблица № 1 расчета приближенного K_{c_1} за период 23,5 ч.

Таблица 1

№ п/п	Время (T_i) обсервации	$t_i = T_i - T_{i-1}$	$\sqrt{t_i}$	Невязка C на момент обсервации	$C \times \sqrt{t_i}$
1	2	3	4	5	6
1.	12:30:00	Исходная обсервация		00,0	00,0
2.	14:00:00	1 ^ч 5	1,22	27,8 метры	33,9
3.	16:00:00	2,0	1,41	26,8	37,8
4.	18:00:00	2,0	1,41	24,3	34,3
5.	20:00:00	2,0	1,41	29,1	41,0
6.	22:00:00	2,0	1,41	31,5	44,4
7.	00:00:00	2,0	1,41	33,4	47,1
8.	02:00:00	2,0	1,41	41,3	58,2
9.	04:00:00	2,0	1,41	43,4	61,2
10.	06:00:00	2,0	1,41	51,6	72,8
11.	08:00:00	2,0	1,41	53,4	75,3
12.	10:00:00	2,0	1,41	58,3	82,2
13.	12:00:00	2,0	1,41	62,5	88,1
		$[t^{20}] = 23,5$			$[C \times t_i^{0,5}] = 675,4$

$$675,4 = 23,5 K_{c_1}; \text{отсюда } K_{c_1} = 1,13 \frac{675,4}{23,5} = 32,5 \text{ м/ч}^{0,5} \text{ Коэффициент } 1,13$$

введен в расчеты для получения величины K_c с вероятностью 0,683.

Таблица № 2 расчета приближенного K_{c_2} за период 24,5 ч.

Таблица 2

№ п/п	Время (T_i) обсервации	$t_i = T_i - T_{i-1}$	$\sqrt{t_i}$	Невязка C на момент обсерва- ции	$C \times \sqrt{t_i}$
1	2	3	4	5	6
1.	12:30:00	Исходная обсервация		0	0
2.	14:30:00	2,0	1,41	23,2	32,7
3.	16:30:00	2,0	1,41	22,9	32,3
4.	18:30:00	2,0	1,41	28,3	39,9
5.	20:30:00	2,0	1,41	31,3	44,1
6.	22:30:00	2,0	1,41	30,5	43,0
7.	00:30:00	2,0	1,41	36,9	52,0
8.	02:30:00	2,0	1,41	40,9	57,7

9.	04:30:00	2,0	1,41	49,0	69,1
10.	06:30:00	2,0	1,41	52,2	74,0
11.	08:30:00	2,0	1,41	58,9	83,0
12.	10:30:00	2,0	1,41	55,1	77,7
13.	13:00:00	2,5	1,58	62,5	98,8
		$[t^{20}] = 24,5$			$[C \times t_i^{0,5}] = 704,3$

$$704,3 = 24,5 K_{c_2}; K_{c_2} = 1,13 \frac{704,3}{24,5} = 32,5 \text{ м/ч}^{0,5}$$

Таблица № 3 расчета приближенного K_{c_3} за период 24,5 ч.

Таблица 3

№ п/п	Время (T_i) обсервации	$t_i = T_i - T_{i-1}$	$\sqrt{t_i}$	Невязка С на момент обсерва- ции	$C \times \sqrt{t_i}$
1	2	3	4	5	6
1.	12:30:00	Исходная обсервация		0	0
2.	15:00:00	2,5	1,58	25,9	40,9
3.	17:00:00	2,0	1,41	25,7	36,2
4.	19:00:00	2,0	1,41	27,3	38,5
5.	21:00:00	2,0	1,41	29,7	41,9
6.	23:00:00	2,0	1,41	35,7	50,3
7.	01:00:00	2,0	1,41	36,4	51,3

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
8.	03:00:00	2,0	1,41	47,6	67,1
9.	05:00:00	2,0	1,41	48,9	68,9
10.	07:00:00	2,0	1,41	58,4	82,3
11.	09:00:00	2,0	1,41	55,9	78,8
12.	11:00:00	2,0	1,41	58,6	82,6
13.	13:00:00	2,0	1,41	62,5	88,1
		$[t^{20}] = 24,5$			$[C \times t_i^{0,5}] = 726,9$

$$726,9 = 24,5 K_{c_3}; K_{c_3} = 1,13 \frac{726,9}{24,5} = 33,5 \text{ м/ч}^{0,5}$$

Таблица № 4 расчета приближенного K_{c_4} за период 22,0 ч.

Таблица 4

№ п/п	Время (T_i) обсервации	$t_i = T_i - T_{i-1}$	$\sqrt{t_i}$	Невязка С на момент обсерва- ции	$C \times \sqrt{t_i}$
1.	12:30:00	Исходная обсервация		0	0
2.	15:30:00	2,0	1,41	22,5	31,7
3.	17:30:00	2,0	1,41	25,4	35,8
4.	19:30:00	2,0	1,41	30,8	43,4
5.	21:30:00	2,0	1,41	28,9	40,7
6.	23:30:00	2,0	1,41	33,5	47,2

7.	01:30:00	2,0	1,41	37,4	52,7
8.	03:30:00	2,0	1,41	45,0	63,5
9.	05:30:00	2,0	1,41	53,3	75,4
10.	07:30:00	2,0	1,41	53,1	74,9
11.	09:30:00	2,0	1,41	55,9	78,8
12.	11:30:00	2,0	1,41	61,2	86,3
		$[t^{20}] = 22,0$			$[C \times t_i^{0,5}] = 630,4$

$$630,4 = 22,0 K_c; \quad K_c = \frac{630,4}{22,0} = 32,4 \text{ м/ч}^{0,5}$$

По формуле среднего весового рассчитаем более точный коэффициент точности счисления для АНПА «МТ-2012» в заданном районе бухты Патрокл.

$$K_c = \frac{n_1 K_{c_1} + n_2 K_{c_2} + n_3 K_{c_3} + n_4 K_{c_4}}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} = \frac{13 \times 32,5 + 13 \times 32,5 + 13 \times 33,5 + 12 \times 32,4}{13 + 13 + 13 + 12} = 32,7 \text{ м/ч}^{0,5} \quad (9)$$

Полученный коэффициент точности счисления, вычисленный по невязкам в заданном районе K_c , может быть использован для оценки точности счисления для этого района или района со схожими физико-географическими условиями плавания.

Как было показано выше [19–20], средняя квадратическая ошибка счисления за время плавания определяет радиус круга, в пределах которого с вероятностью 0,683 находится счисляемое место АНПА, при условии, что ошибка исходной точки счисления равна 0. Таким образом, для нашего конкретного случая, счисляемое место АНПА «МТ-2012» в заданном районе бухты Патрокл должно находиться в пределах круга, радиусом 160,2 метра. Фактически за 24 часа плавания АНПА накопленная погрешность измерения координат методом простого счисления с некалиброванным ДЛ составила 67,8 м.

Заключение. Описанная в статье методика позволяет снизить инструментальную погрешность датчиков навигационной системы АНПА МТ-2012, путем их калибровки в натуральных условиях на полигоне. В то же время результаты оценки характеристик навигационной системы показывают, что изменения погрешности в зависимости от времени носят не системный характер и связаны не только с неучтенной инструментальной погрешностью датчиков, но и с непредсказуемой неоднородностью внешней среды, характером рельефа дна, наличием течения и другими факторами. Показанный в статье статистический способ оценки точности счисления АНПА позволяет более точно и полно оценить точность счисляемого места АНПА, т.к. данный способ связан с совместным учетом всех факторов, влияющих на точность счисления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Киселев Л.В., Молоков Ю.Г., Никифоров В.В., Рылов Н.И. Автоматические подводные аппараты. – Л., Судостроение, 1981. – 248 с.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под общей ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука. 2005. – 400 с.
3. Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Рылов Р.Н. Метрологическое обоснование аттестации систем гидроакустического навигационного комплекса АНПА в мелком море // Пятая Российская научно-техническая конференция «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (НО-2004, г. Санкт-Петербург).
4. Патент РФ №2378663. Способ определения горизонтальных координат неподвижного подводного источника навигационных сигналов / Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Рылов Р.Н. 09.06.2008.

5. Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н. Физические основы и метрологическое обеспечение гидроакустической дальнометрии в мелком море // Приборы. – 2006. – № 11. – С. 55-60.
6. Матвиенко Ю.В. Статистическая обработка информации гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой // В сб. «Морские технологии». – Владивосток: Дальнаука, 1998. – Вып. 2. – С. 70-80.
7. Борейко А.А., Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М. Навигационное и алгоритмическое обеспечение комплекса АНПА-ТНПА при решении задач мониторинга донной поверхности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 112-127.
8. Gornak V.E., Inzartsev A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Scherbatyuk A.Ph. MMT-3000 – Small AUV of New Series of IMTP FEB RAS. Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, September 18-21, 2006, Boston, USA, ISBN CD-ROM: 1-4244-0115-1.
9. Scherbatyuk A.Ph. Algorithms of AUV MMT3000 Positioning Based on Use of Towed Acoustic Transducer // Proceedings of 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07). August 19-22, 2007. – Durham, New Hampshire, USA, 2007.
10. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В. Навигация и управление в подводном пространстве // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 23-28.
11. Tufhanov I., Scherbatyuk A., Vaulin Yu. V. Development of Centralized Control System for AUV Group Operation // Proceedings of the 18th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. – Portsmouth, USA, 2013.
12. Yu.V. Matviyenko., Vaulin Yu. V. The navigational support of autonomous underwater vehicles for extreme ocean depths // Proceedings of the XXIIIth International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, 30 May-01 June 2016. – P. 422-424. ISBN 978-5-91995-037-0.
13. Inzartsev A.V., Kisel'ev L.V., Matviyenko Yu.V. and all. Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone // In book "Motion Control", InTech, Vienna, Austria, 2009. – P. 229-244.
14. Inzartsev A.V., Kisel'ev L.V., Matviyenko Yu.V. et al. Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone // Gyroscopy and Navigation. – 2010. – Vol. 1, No. 2. – P. 107-112.
15. Патент Р.Ф. G01S 9/60, № 713278. Гидроакустическая синхронная дальномерная навигационная система / Касаткин Б.А., Кобаидзе В.В. 1978.
16. Агеев М.Д., Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Рылов Н.И. Гидроакустические средства навигации подводного робота // VIII Межд. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». – М., 2003. Т. 4.2. – С. 40-41.
17. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Каморный А.В. Оценка характеристик навигационных средств подводных роботов в условиях полигона // Материалы докладов VI Всероссийской науч.-техн. конференции "Технические проблемы освоения Мирового океана". – Владивосток: Дальнаука, 2015.
18. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Каморный А.В. Градуировка навигационных средств подводных роботов // Подводные исследования и робототехника. – 2015. – № 1 (19). – С. 16-23.
19. Министерство обороны Союза ССР. Главное управление навигации и океанографии. Кораблевождение // Практическое пособие для штурманов – 1972. – С. 461-467.
20. Руководство по оценке точности кораблевождения. – Л.: ГУ МО, 1970.

REFERENCES

1. Ageev M.D., Kasatkin B.A., Kiselev L.V., Molokov Yu.G., Nikiforov V.V., Rylov N.I. Avtomaticheskie podvodnye apparaty [Automatic underwater vehicles]. Leningrad: Sudostroenie, 1981, 248 p.
2. Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. i dr. Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots. System and technology], Ed. by M.D. Ageeva. Moscow: Nauka, 2005, 400 p.

3. *Matvienko Y.V., Rilov N.I., Rilov R.N.* Metrologicheskoe obosnovanie attestatsii sistem gidroakusticheskogo navigatsionnogo kompleksa ANPA v melkom more [Metrological study of certification systems AUV sonar navigation system in a shallow sea], *Pyataya Rossiiskaya naychno-tehnicheskaya konferenciya «Sovremennoe sostoyanie i problemi navigatsii i okeanografii»* [The fifth Russian scientific-technical conference "Current state and problems of navigation and oceanography"] (DK-2004, St. Petersburg).
4. *Matvienko Y.V., Rilov N.I., Rilov R.N.* Sposob opredeleniya gorizontol'nykh koordinat nepodvizhnogo podvodnogo istochnika navigatsionnykh signalov [The method for determining the horizontal coordinate-ordinates of the fixed underwater source of navigation signals]. Patent RF No. 2378663 from 09.06.2008.
5. *Zlobina N.V., Kasatkin B.A., Matvienko U.V., Rilov R.N.* Fizicheskie osnovy i metrologicheskoe obespechenie gidroakusticheskoy dal'nometrii v melkom more [Physical principles and metrological support of hydroacoustic in the shallow sea], *Pribory* [Instrumentation], 2006, No. 11, pp. 55-60.
6. *Matvienko U.V.* Statisticheskaya obrabotka informatsii gidroakusticheskoy navigatsionnoy sistemy s yl'trakovoy bazoy [Statistical processing of information of the USBL], *V sb. "Morskie tekhnologii"* [In the collection of "Marine technology"]. Vladivostok: Dalnayka, 1998, Issue 2, pp. 70-80.
7. *Boreiko A.A., Vaulin U.V., Kostenko V.V., Matvienko U.V., Pavin A.M.* Navigatsionnoe i algoritmicheskoe obespechenie kompleksa ANPA-TNPA pri reshenii zadach monitoringa donnoy poverkhnosti [Navigation and algorithmic support AUV-ROV complex in solving problems monitoring bottom surface], *Izvestiya UFY. Tehnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 3 (152), pp. 112-127.
8. *Gornak V.E., Inzartsev A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Scherbatyuk A.Ph.* MMT-3000 – Small AUV of New Series of IMTP FEB RAS. Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, September 18-21, 2006, Boston, USA, ISBN CD-ROM: 1-4244-0115-1.
9. *Scherbatyuk A.Ph.* Algorithms of AUV MMT3000 Positioning Based on Use of Towed Acoustic Transducer, *Proceedings of 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07). August 19-22, 2007. Durham, New Hampshire, USA, 2007.*
10. *Kiselev L.V., Inzarcev A.V., Matvienko U.V., Vaylin U.V.* Navigatsiya i upravlenie v podvodnom prostranstve [Navigation and control in underwater space], *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2004, No. 5, pp. 23-28.
11. *Tuphanov I., Scherbatyuk A., Vaulin Yu. V.* Development of Centralized Control System for AUV Group Operation, *Proceedings of the 18th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. Portsmouth, USA, 2013.*
12. *Yu.V. Matviyenko., Vaulin Yu. V.* The navigational support of autonomous underwater vehicles for extreme ocean depths, *Proceedings of the XXIIIth International Conference on Integrated Navigation Systems, Saint Petersburg, 30 May-01 June 2016*, pp. 422-424. ISBN 978-5-91995-037-0.
13. *Inzartsev A.V, Kiselyov L.V, Matviyenko Yu.V* and all. Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone, In book "Motion Control", *InTech, Vienna, Austria, 2009*, pp. 229-244.
14. *Inzartsev A.V, Kiseljev L.V., Matviyenko Yu.V.* et al. Integrated Positioning System of Autonomous Underwater Robot and Its Application in High Latitudes of Arctic Zone, *Gyroscopy and Navigation*, 2010, Vol. 1, No. 2, pp. 107-112.
15. *Kasatkin B.A., Kobaidze V.V.* Gidroakusticheskaya sinkhronnaya dalnomernaya navigatsionnaya sistema [Hydroacoustic synchronous long base line system]. Patent R.F. G01S 9/60, No. 713278, 1978.
16. *Ageev M.D., Kasatkin B.A., Matvienko U.V., Rilov R.N., Rilov N.I.* Gidroakusticheskie sredstva navigatsii podvodnogo robota [Hydroacoustic navigation means of an underwater robot], *VIII Mezhd. naych.-tekh. konf. "Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy"* [Modern Methods and Means of Oceanological Research], Moscow, 2003, Vol. 4.2, pp. 40-41.
17. *Vaulin U.V., Matvienko U.V., Kamornii A.V.* Otsenka kharakteristik navigatsionnykh sredstv podvodnykh robotov v usloviyakh poligona [Evaluation of the characteristics of navigation aids underwater robots in a landfill], *Materialy dokladov VI Vserossiiskoy naych.-tekh. konferentsii "Tehnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana"* [Proceedings of VI All-Russian scientific-sian-tehn. Conference "Technical problems of the world's oceans."]. Vladivostok: Dalnayka. 2015.

18. *Vaulin U.V., Matvienko U.V., Kamornii A.V.* Gradyirovka navigatsionnykh sredstv podvodnykh robotov [The calibration of navigational aids underwater robots], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2015, No. 1 (19), pp. 16-23.
19. Ministerstvo oborony Souza SSR. Glavnoe upravlenie navigatsii i okeanografii. Korablevozhdenie [Ministry of Defense of the USSR. General Directorate of Navigation and Oceanography. Sailing], *Prakticheskoe posobie dlya shtyrmanov* [A practical guide for navigators], 1972, pp. 461-467.
20. Rykovodstvo po otsenke tochnosti korablevozhdeniya [Guide to assessing the accuracy of navigation]. Leningrad: GY MO, 1970.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Г.Ю. Илларионов.

Ваулин Юрий Валентинович – Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН); e-mail: vaulin@marine.febras.ru; 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: +74232432416; к.т.н.; ведущий научный сотрудник.

Лаптев Константин Зотеевич – e-mail: laptev@marine.febras.ru; заслуженный военный специалист Российской Федерации; контр-адмирал запаса.

Vaulin Yuriy Valentinovich – Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences Institute of Marine Technology Problems (IMTP FEB RAS); e-mail: vaulin@marine.febras.ru; 5A, Sukhanova street, Vladivostok, 690091, Russia; phone: +74232432416; cand. of eng. sc.; leading researcher.

Laptev Konstantin Zoteevich – e-mail: laptev@marine.febras.ru; honored military specialist of the Russian Federation; rear Admiral of a stock.