

УДК 551.46.077:629.584

ГРАДУИРОВКА НАВИГАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Ю.В. Матвиенко, Ю.В. Ваулин,
А.В. Каморный

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Организация работ по градуировке гидроакустических и бортовых средств навигации подводных роботов основана на прецизионных дальномерных измерениях в подводной среде. Градуировка выполняется на специализированном полигоне, координаты ключевых точек которого определены геодезическими методами с ошибкой менее 1 м. На полигоне элементами гидроакустической навигационной системы с длинной базой (маяками-ответчиками и управляющей антенной) образуются постоянно действующие стационарные дальномерные трассы, которые служат для определения и текущей коррекции эффективной скорости сигналов на акватории. Представлены результаты градуировки комплексированной навигационной системы, основанной на счислении и коррекции численных координат данными гидроакустической навигационной системы с длинной базой. С учетом источников формирования погрешностей обеспечивается значительное уменьшение суммарной навигационной ошибки в ходе длительного запуска АНПА по циклической траектории.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе работ по созданию подводных роботов серьезные проблемы возникают с оценкой точности навигационных средств. В составе каждого подводного робота, как правило, установлен ряд навигационных датчиков и устройств, комплексирование которых необходимо для решения задачи определения географических координат в подводном и надводном положениях. Точность решения этой задачи фактически определяет эффективность робототехнического средства при выполнении работ по назначению.

В настоящее время сертифицированных навигационных устройств, удовлетворяющих требованиям потребителя по точности, а требованиям разработчика по составу и техническим параметрам, явно недостаточно. Так, при поставках паспортизированы датчики магнитного курса, гидроакустического курса, глубины, крена, дифферента, угловых ско-

ростей. Известны погрешности широко доступных спутниковых навигационных систем. Ключевыми задачами разработчиков остаются задачи градуировки датчика абсолютной скорости, гидроакустических навигационных систем (ГАНС), поддерживающих работу подводного робота и дополнительно обеспечивающих информационный обмен с судном-носителем, а также в целом комплексной бортовой навигационной системы робота.

Эти работы обычно выполняются в ходе натурных испытаний робота по нестандартизованным методикам, причем методы градуировки основаны на выполнении исключительно дальномерных измерений в подводной среде, которые подтверждаются данными спутниковых навигационных систем на поверхности – единственной доступной внешней навигационной системы. Сама градуировка каждой системы сводится к определению шкалы измерений и оценке ее точности. Оценка точ-

ности гидроакустических дальномерных измерений между двумя подводными объектами, текущее положение которых контролируется или оценивается внешними надводными средствами, оказывается достаточно грубой как в силу недостаточной точности используемых спутниковых средств, так и за счет ошибок, формируемых при передаче координатных отсчетов, полученных на поверхности, под воду.

Тем не менее на основе обработки гидроакустических дальномерных данных ранее были разработаны методы оценки точности гидроакустических навигационных систем с длинной базой [1–3], с ультракороткой базой [4], доплеровского лага, оценки координат стартовых точек [5], оценки текущих параметров движущегося объекта навигации, которые применяются при испытаниях новых систем навигации [2]. Такие гра-

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел./факс: (423) 243-24-16. E-mail: yumat@marine.febras.ru

дуировки обычно выполняются в условиях мелководной акватории, чтобы минимизировать ошибки, обусловленные несоответствием надводных и подводных координат в ключевых точках траектории робота.

Для повышения точности градуировки навигационных средств нами был оборудован специализированный полигон в мелководной бухте (рис. 1), координаты ключевых точек которого были определены геодезическими методами с погрешностью не более 1 м. В этих ключевых точках были размещены три маяка-ответчика и управляющие антенны, которые являются абонентами гидроакустической навигационной системы с длинной базой. В ходе градуировки эти устройства реализуют функции постоянно действующих стационарных измерительных дальномерных трасс на акватории, в которой движется подводный робот, выполняющий градуировку своих навигационных средств.

Накопление измеряемых дальномерных данных по трем трассам



Рис. 1. Геодезический план полигона с ключевыми точками

(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 путем сравнения координат, вырабатываемых этой системой, с координатами робота, которые могут быть установлены по координатам известного объекта, установленного в ключевой точке и обнаруженного системами технического зрения робота.

Не вдаваясь в детали реализации методов градуировки перечисленных гидроакустических навигационных средств, которые можно найти в публикациях, например [1–5], ниже приведем и обсудим порядок проведения и ряд результатов градуировки отдельных устройств на этом полигоне.

1. Градуировка ГАНС с длинной базой

После установки в ключевых точках полигона маяков-ответчиков и управляющей гидроакустической антенны (связанной кабельной линией с постом управления) положение объекта навигации в развернутой навигационной системе с длинной базой определяется известным образом по измеренным текущим дальностям:

$$D_i = c_e t_i,$$

где t_i – время распространения навигационного сигнала от объ-

екта до соответствующего маяка, $i=1,2,3,\dots,C_e$ – эффективная скорость распространения сигналов на полигоне.

Эту скорость при градуировках считаем постоянной по всей акватории, заданной с учетом текущей гидрологической обстановки, но подлежащей оперативному уточнению за счет избыточности дальномерных данных. 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 до 0,1–0,3%.

Не менее значимыми оказываются ошибки измерения дальности, обусловленные неточным измерением времени прихода навигационных сигналов. Не вдаваясь в детали особенностей лучевого распространения сигналов, анализ которых можно найти в различных публикациях, например в [6], оценим инструментальную ошибку обнаружителя сигналов. Погрешность срабатывания обнаружителя, как известно, устанавливается соотношением

$$\sigma_i = \frac{1}{qF},$$

где q – отношение сигнал-шум, а F – полоса пропускания

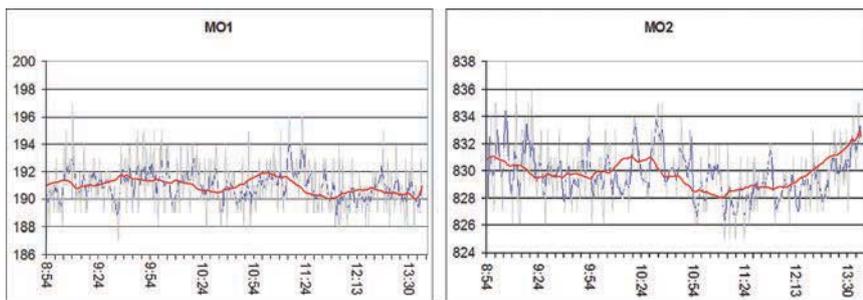


Рис. 2. Изменчивость времени прихода сигналов на стационарных трассах, образованных антенной и маяками ГАНС

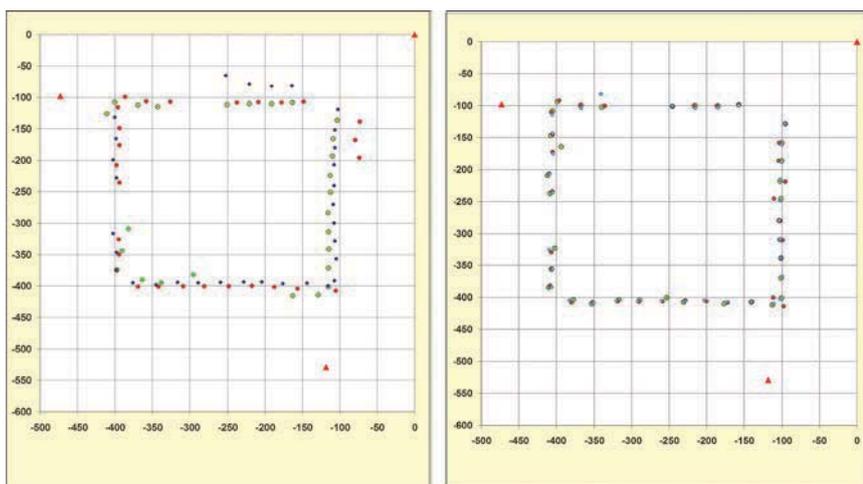


Рис. 3. Координатные данные движения АНПА при исходной (слева) и уточненной (справа) эффективной скорости сигналов

оптимального приемника. Для градуируемой ГАНС эти величины составляют ориентировочно $q=5-10$ и $F=100$ Гц, что дает ошибку $\sigma_t = 1-2$ мс.

Эти оценки подтверждаются длительными наблюдениями за временем распространения и срабатывания обнаружителей, реализованных в составе навигационного оборудования на развернутых стационарных трассах (между управляющей антенной и маяками), некоторые примеры приведены на рис. 2.

С учетом сделанных оценок ошибок определения эффективной скорости и времени распространения можно дать оценку ошибки измерения дальности и затем координат развернутой ГАНС с длинной базой. Можно показать, после несложных преобразований, что эта оценка составит $\sigma_{LB} = 4-5$ м.

Оценки координатных измерений от установленных значений эффективной скорости дополнительно подтверждаются результатами обработки траектории движения АНПА, представленной на рис. 3, где различными цветами показаны расчеты по парам маяков М1, М2, М3. Расчет координат аппарата на плоскости выполнялся по трем дальностям. Избыточность дальномерных данных дает возможность уточнения скорости (путем стягивания в точку треугольника ошибки, формирующегося окружностями дальностей от каждого маяка при неточном задании скорости). При использовании установленной скорости звука средний радиус ошибки составил около 7 м. При использовании уточненной скорости звука средний радиус ошибки уменьшился до 1,32 м.

Названные выше оценки точности навигационной системы подтверждаются также сравнением координат АНПА по данным ГАНС и спутниковой навигационной системы (СНС). На рис. 4 приведены траектории, где АНПА движется по мерным линиям, определяя текущие координаты по ГАНС и счислению, а стартовые и финишные точки на поверхности – дополнительно по данным СНС, ошибка которой около 3–5 м.

2. Градуировка доплеровского лага и датчика курса

При градуировке лага и датчика курса АНПА совершает ряд проходов по фиксированным мерным линиям с различными постоянными скоростями при контроле времени движения. Положение мерной линии контролируется средствами ГАНС. При обработке данных формируется шкала измерений лага, дается оценка его точности и точности датчика курса.

Примеры обработки данных на мерных линиях для двух значений скорости приведены для траекторий, изображенных на рис. 4.

Параметры запуска, траектория которого приведена на рис. 4 (верхний):

- продолжительность пуска 2520 с;
- длина мерной линии 1500 м;
- установленная скорость движения 0,8 м/с;
- реальная скорость движения 0,806 м/с;
- координаты точки финиша по СНС: $x = -1539$ м; $y = -904,1$ м;
- координаты точки финиша по счислению: $x = -1499$ м; $y = -919,3$ м;
- координаты точки финиша по ГАНС: $x = -1538$ м; $y = -915,4$ м;
- погрешность счисления координат в точке финиша 42 м;
- фактический курс по данным ГАНС: $-118,17^\circ$;

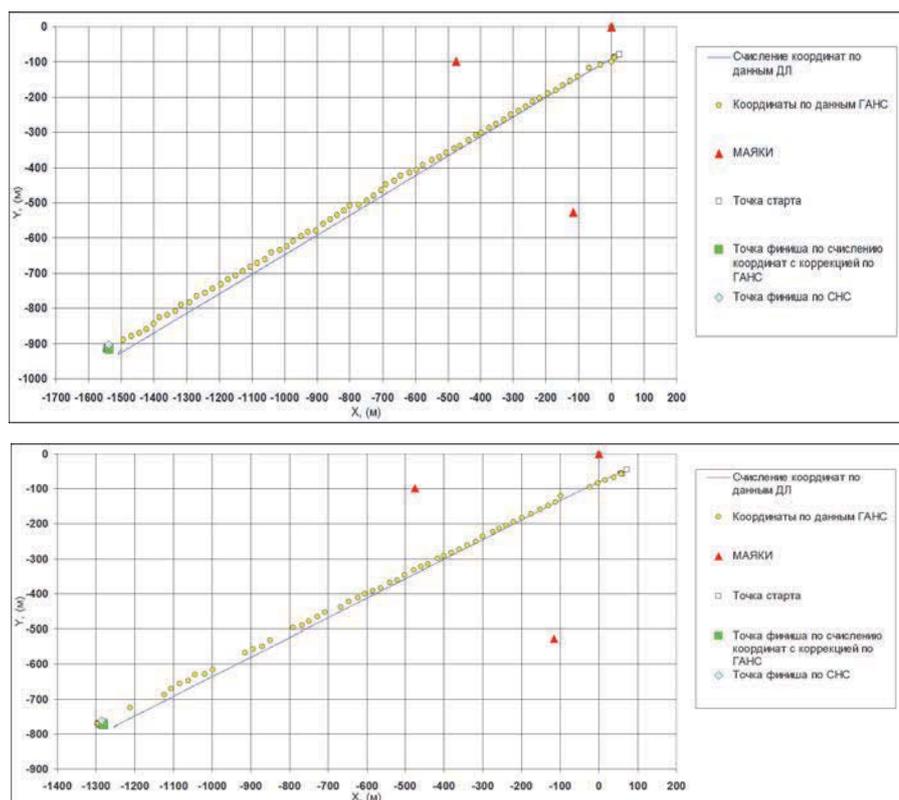


Рис. 4. Сравнение данных ГАНС и СНС

- курс по данным бортовой системы навигации: $-118,86^\circ$;

- ошибка задания курса $-0,69^\circ$.

Параметры запуска, траектория которого приведена на рис. 4 (нижний):

- продолжительность пуска 2520 с;

- длина мерной линии 1400 м;

- установленная скорость движения 0,7 м/с;

- реальная скорость движения 0,703 м/с;

- координаты точки финиша по СНС: $x=-1285,2$ м; $y=-761,5$ м;

- координаты точки финиша по счислению: $x=-1244,1$ м; $y=-774,9$ м;

- координаты точки финиша по счислению с коррекцией: $x=-1280,3$ м; $y=-761,5$ м;

- погрешность счисления координат в точке финиша 43 м;

- фактический курс по данным ГАНС: $-118,34^\circ$;

- курс по данным бортовой системы навигации: $-119,11^\circ$;

- ошибка задания курса: $-0,77^\circ$.

Размер мерных линий составил, с учетом ошибки ГАНС, 1500 ± 6 м и 1400 ± 5 , что соответствует погрешности градуировки лага около 0,003–0,005 м/с.

Сравнением курсов по данным бортовой системы и ГАНС можно оценить действующую инструментальную ошибку датчика курса менее 1 град.

3. Оценка системы счисления пути и комплексирования

Для получения таких оценок выполнялись запуски АНПА по достаточно сложным траекториям движения переменными курсами и скоростями с контролем координат средствами ГАНС, выполнением счисления и коррекции численных координат средствами ГАНС. При этом для уменьшения ошибок ГАНС должна уточняться эффективная скорость сигналов, влияние которой хорошо видно на

рис. 5, где изображены расчетные траектории комплексированной системы при коррекции данными ГАНС.

В другом примере программа-задание предусматривала выход АНПА в район, обследование площадки шириной 315 м и длиной 235 м сетью прямолинейных галсов с шагом 60 м, возвращение в точку, близкую к точке старта. Заданная скорость движения 0,9 м/с. Во время движения координаты АНПА вычислялись простым счислением пути по данным бортовой навигационной системы и счислением координат с коррекцией по данным ГАНС. В начале и в конце запуска координаты АНПА на поверхности дополнительно определялись бортовым приемником СНС.

На рис. 6 приведены траектории движения, сформированные различными навигационными средствами.

Параметры запуска:

- продолжительность пуска 2820 с;

- скорость движения 0,9 м/с;

- координаты точки старта по СНС: $x=25,6$ м; $y=-27,3$ м;

- координаты точки финиша по СНС: $x=-69$ м; $y=-78,9$ м;

- координаты точки финиша по счислению: $x=-47,1$ м; $y=-91,5$ м;

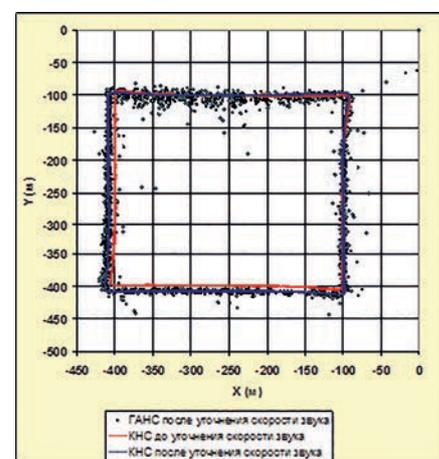


Рис. 5. Перерасчет координат АНПА с уточненной скоростью звука

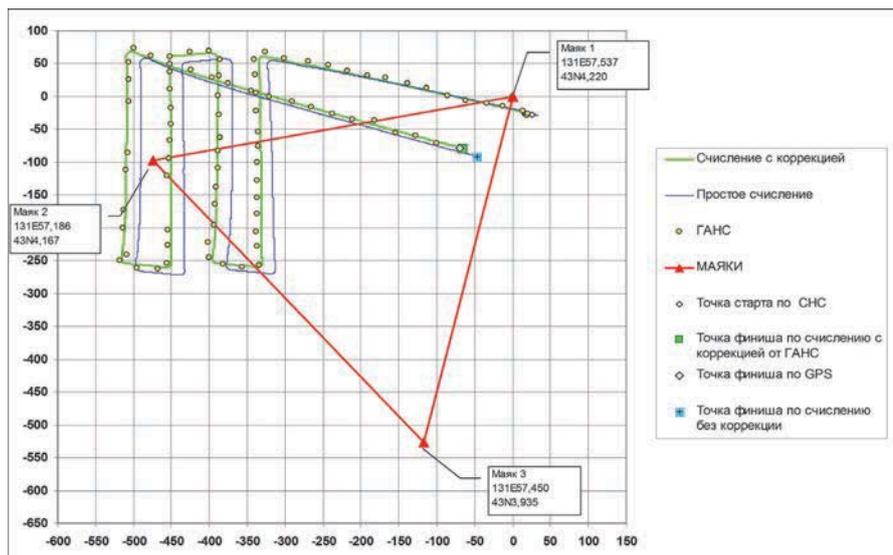


Рис. 6. Траектория движения АНПА для проверки бортовой навигационной системы

- координаты точки финиша по счислению с коррекцией: $x = -65,6$ м; $y = -79,7$ м;

- погрешность счисления координат в точке финиша 25 м;

- погрешность счисления с коррекцией в точке финиша 3,5 м.

По результатам запуска установлено: скорость накопления погрешности определения координат в режиме счисления без коррекции от ГАНС $\sigma_{ki} = 31$ м за 1 час движения. Погрешность в режиме с коррекцией от ГАНС составила 3,5 м.

Погрешность измерения координат по данным счисления относительно показаний СНС составила 25 м, что соответствует погрешности абсолютного лага 0,0088 м/с.

4. Проверка характеристик навигационной системы в ходе продолжительного запуска

Очень важные особенности работы комплексированной навигационной системы можно выявить на основании данных, полученных на названном полигоне в ходе продолжительного запуска АНПА. Такие запуски полезны для поиска и анализа факторов,

формирующих навигационные ошибки, в том числе для оценки суточных изменений эффективной скорости звука на акватории, флуктуаций времени прихода гидроакустических сигналов, влияния изменений скорости звука на точность лага и точности задания курса и компенсации инструментальных ошибок при выполнении многократных повторяющихся галсов. Отметим, что АНПА, выполняющий градуировку навигационных средств, был оснащен бортовой аппаратурой ГАНС с возможностью измерений дистанций до маяков-ответчиков и бортовой автономной навигационной системой (БАНС) на базе доплеровского лага, разработанного ИПМТ, и гироскопического датчика курса. В бортовой навигационной системе были реализованы алгоритмы комплексирования, основанные на методах оптимальной фильтрации и позволяющие осуществлять коррекцию численных координат по данным ГАНС в режиме реального времени.

Запуск осуществлялся на полигоне ИПМТ в условиях мелководной бухты (глубина 6–20 м). Программная траектория представляла собой циклическое движение по

квадрату со стороной 300 м. Для программирования использовались команды движения в целевые точки с заданными абсолютными координатами. Коррекция численных координат при этом производилась с периодом 30 с по данным измерения дистанций до трех маяков-ответчиков ГАНС.

Параметры запуска:

- продолжительность пуска 24 ч 34 мин;

- пройденная дистанция 81900 м;

- заданная скорость движения 0,8 м/с;

- координаты точки старта по СНС: $x = -15,6$ м; $y = -43,3$ м;

- координаты точки финиша по СНС: $x = -102,4$ м; $y = -255,3$ м;

- координаты точки финиша по счислению: $x = -57,1$ м; $y = -305,8$ м;

- координаты точки финиша по счислению с коррекцией: $x = -102,2$ м; $y = -262,5$ м;

- погрешность счисления координат без коррекции ГАНС в точке финиша 67,8 м;

- погрешность счисления с коррекцией ГАНС в точке финиша 7,2 м.

Работу навигационной системы на борту АНПА иллюстрирует рис. 7, где к траектории, представленной данными комплексированной системы с отметками ГАНС, добавлена (обозначена синим цветом) траектория, полученная счислением только по данным гироскопа и абсолютного лага. При измерении скорости доплеровским лагом использовалась предустановленная скорость звука, равная 1500 м/с. Результат запуска показал, что погрешность измерения координат по счислению за 24 часа работы составила 67,8 м. То есть скорость накопления погрешности для БАНС в данном запуске составила 2,6 м/ч. Однако по столь малой величине погрешности нельзя делать выводы о точности

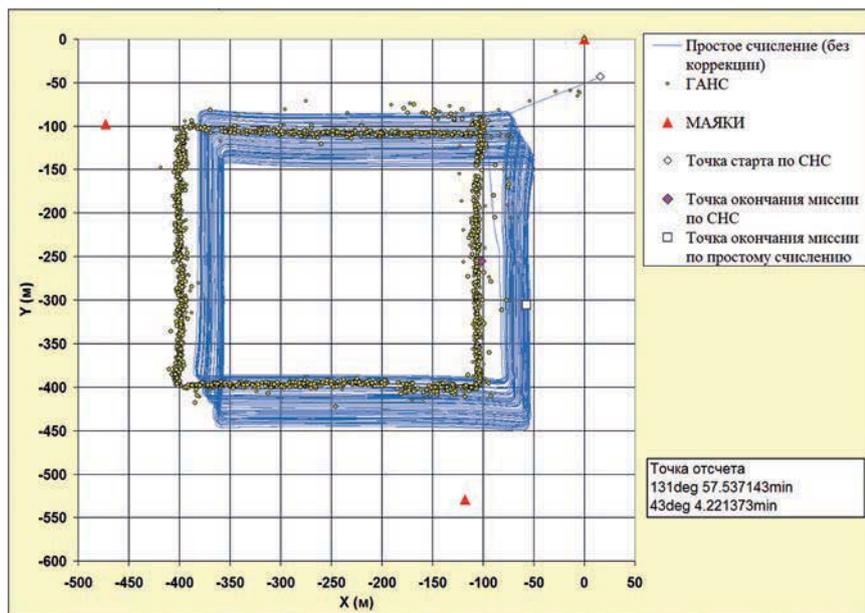


Рис. 7. Траектория движения АНПА по данным ГАНС ДБ и данным простого счисления без коррекции (продолжительность – 24 часа)

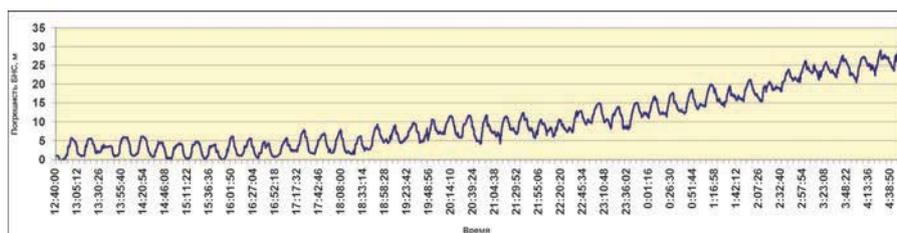


Рис. 8. Погрешность простого счисления координат (без коррекции по ГАНС) при циклическом движении по замкнутой траектории (за 16 часов)

счисления координат, поскольку в данном случае траектория носила циклический замкнутый характер и накапливаемая погрешность счисления “компенсировалась” на взаимно противоположных галсах.

Характер формирования ошибки счисления при циклическом движении приведен на рис. 8. Накапливаемая ошибка носит периодический характер, и для адекватной оценки необходимо обеспечить ее выделение на идентичных галсах. Так, при движении по одной и той же стороне квадрата АНПА проходит суммарно чуть более 20 км одним курсом с формированием ошибки на каждом галсе 2–3 м, что дает в целом накопленную абсолютную ошибку около 200 м (около 30 м/ч), а относительную – порядка 1%.

Для того чтобы более корректно оценить точность счисления координат, в данном запуске был рассчитан пройденный путь по данным комплексированной системы и по данным автономной навигационной системы (без коррекции от ГАНС). Накопление погрешности имеет линейную зависимость от времени и составляет 2600 м, или 3%, от пройденного расстояния в случае счисления с заданной скоростью звука и уменьшается до 1842 м, или 2%, для уточненной скорости.

При детальном анализе отдельных фрагментов траектории было установлено, что для реализации максимальной навигационной точности необходимо не только уточнить эффективную скорость сигналов, но и компенсировать инструментальную погрешность

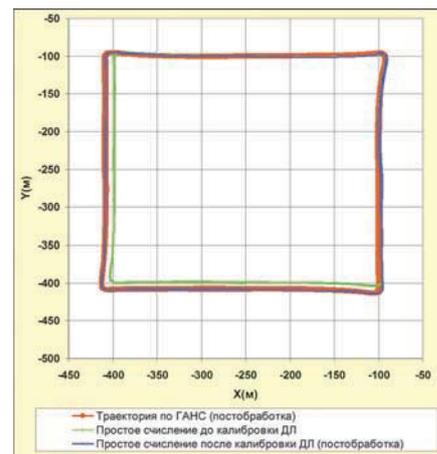


Рис. 9. Траектория движения АНПА по данным ГАНС (постобработка) и данным простого счисления на одном из квадратов

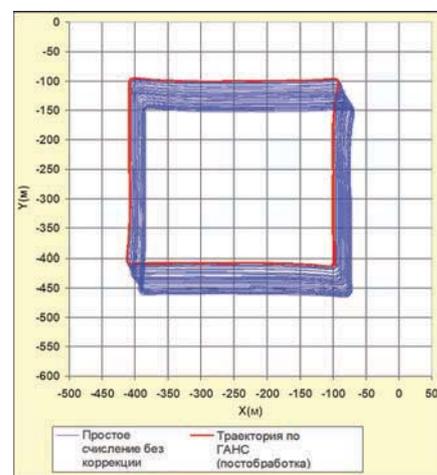


Рис. 10. Траектория движения АНПА по данным ГАНС (постобработка) и данным простого счисления (24 часа движения АНПА)

измерителя абсолютной скорости (фактически выполнить дополнительную калибровку лага). Последнее возможно с учетом пройденного пути по траектории одного квадрата, вычисленного по данным ГАНС, и введении калибровочного коэффициента лага. На рис. 9 показан фрагмент траектории АНПА (один квадрат) за первые 20 минут движения. Приведены траектория ГАНС с уточненной скоростью сигналов и численные координаты с уточненной скоростью звука и при калибровочном коэффициенте лага, равном 1,0223.

С учетом сделанных поправок общая траектория движения АНПА в ходе суточного запуска по

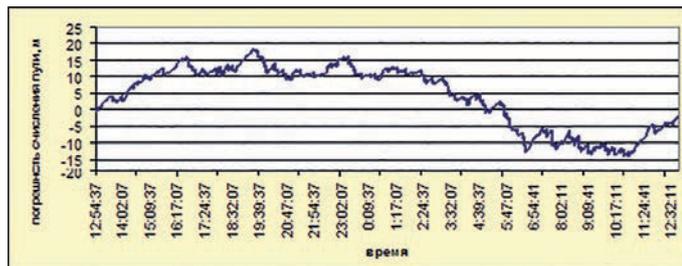


Рис. 11. Погрешность счисления пути автономной навигационной системой относительно КНС после калибровки лага

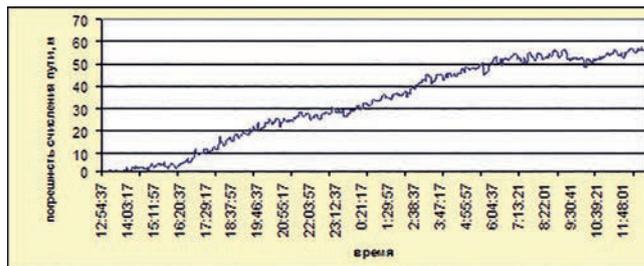


Рис. 12. Погрешность счисления координат автономной навигационной системой после калибровки лага

данным бортовой навигационной системы выглядит в виде, представленном на рис. 10.

Погрешность счисления пути комплексированной системой в результате всего суточного запуска уменьшилась до величины, равной 2 м (менее 0,01 % от пройденной дистанции). График формирования погрешности счисления пути в ходе выполнения миссии при

уточненной скорости звука, равной 1514 м/с, и калибровочном коэффициенте лага, равном 1,0223, показан на рис. 11.

Отметим, что в ходе суточного запуска навигационная ошибка имеет зависимость, близкую к гармонической, что, видимо, связано с суточными изменениями температур и соответственно скорости звука.

Несмотря на уменьшение погрешности счисления пути до 0,01% от пройденной дистанции, погрешность счисления координат фактически сохранилась и составила до 57 м за 24 часа. На рис. 12 показано, как накапливалась погрешность счисления координат (автономный режим, без коррекции от ГАНС).

ЛИТЕРАТУРА

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 общ. ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.
3. 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.
4. Матвиенко Ю.В. Навигация подводного робота. Гидроакустические системы с ультракороткой базой. Саарбрюкен, Германия: Palmarium, 2013. 199 с.
5. Пат. 2378663 Российская Федерация, МПК G01S 15/06. Способ определения горизонтальных координат неподвижного подводного источника навигационных сигналов / Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И., Рылов Р.Н.; ИПМТ ДВО РАН. – № 2008123343/28; заявл. 09.06.2008; опубл. 10.01.2010, Бюл. №1, ил. 1.
6. Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2(8). С. 44–49.

