

Технология полигонных испытаний навигационных средств автономного необитаемого подводного аппарата¹

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Предложена модифицированная технология натуральных испытаний автономных необитаемых подводных аппаратов для проверки точности их навигационных средств и отработки различных траекторий подводного передвижения.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, безэкипажное надводное судно, испытательный полигон, скоординированное движение, постобработка данных испытаний.

1. Введение

В настоящее время точность навигационных средств и состав навигационного оборудования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) обеспечиваются комплексированием данных счисления бортовой навигационной системы, включающей измеритель абсолютной скорости и инерциальную систему, с текущей коррекцией счисленных данных от внешних навигационных систем. Для коррекции используются спутниковые навигационные системы (СНС) на поверхности и гидроакустические – в подводном положении. Последние отличаются конфигурацией гидроакустического оборудования, реализованного в виде опорных маяков с известными или контролируруемыми геодезическими координатами.

При проектировании, изготовлении и отладке АНПА решаются задачи оценки точности как отдельных элементов навигационных систем, так и навигационных комплексов в целом. Необходимые для этой работы невозможно выполнить в полном объёме в лабораторных условиях, поэтому их значительная часть соотносится с натурными испытаниями на специально оборудованных морских полигонах.

Известен специализированный полигон Института проблем морских технологий ДВО РАН [1], оборудованный в мелководной бухте, координаты ключевых точек которого определены геодезическими методами. В этих ключевых точках размещены три маяка-ответчика и две управляющие антенны, которые являются абонентами гидроакустической навигационной системы (ГНС) с длинной базой. В ходе испытаний эти устройства реализуют функции постоянно действующих стационарных измерительных дальномерных трасс в акватории движения подводного аппарата, выполняющего проверку своих навигационных средств.

Накопление измеряемых дальномерных данных по трём трассам (антенна – маяки) с оценкой эффективных скоростей распространения сигналов по различным направлениям в акватории позволяет дать достаточно точную оценку координат объекта навигации. При точной координатной привязке ключевых точек в условиях такого полигона можно выполнить оценку точности всего бортового навигационного комплекса АНПА.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания № 071-03-2022-001.

Для коррекции численных координат АНПА используются данные от СНС и ГНС с длинной базой. Скорость звука на АНПА определяется в режиме реального времени измерителем параметров среды.

Запуск АНПА осуществляется на испытательном полигоне в условиях глубин от 6 до 20 метров. Программная траектория представляет собой циклическое движение по квадрату со стороной 300 метров с двухмерной координатной привязкой. Средняя скорость передвижения АНПА составляет порядка одного метра в секунду. Коррекция численных координат при движении осуществляется на АНПА по данным ГНС с периодом около 30 секунд. Оценка точности навигации выполняется после подъёма АНПА на поверхность в ходе постобработки полученных траекторных данных, которая включает в себя две процедуры: обработку данныхчисления пути навигационной системы АНПА для определения траектории его передвижения в процессе испытаний и оценку её отклонений от запрограммированной траектории, характеризующих точность проверяемых навигационных средств.

К недостаткам описанной трёхмаяковой технологии полигонной проверки навигационных средств АНПА следует отнести:

1) необходимость выполнения трудоёмких и продолжительных по времени работ, связанных с установкой и привязкой к геодезическим координатам акватории испытательного полигона местоположения подводных маяков-ответчиков и антенн ГНС с длинной базой перед соответствующим временным циклом испытаний АНПА;

2) достаточно большое время коррекции численных координат АНПА по данным ГНС во время движения, что ограничивает скорость и характер траекторий передвижения АНПА в акватории испытательного полигона во время испытаний;

3) отсутствие возможности оперативного визуального контроля с берегового поста или иного места наблюдения подводных перемещений АНПА, транспонированных на поверхность акватории испытательного полигона, в процессе проверки и отработки возможных траекторий его передвижения с использованием бортовых навигационных средств;

4) значительные затраты времени на постобработку полученных в процессе испытаний траекторных данных, снижающие оперативность используемой технологии.

Более перспективной в плане полигонных испытаний является одномаяковая [2] технология навигации АНПА, называемая ещё технологией синтезированной длинной базы. Суть технологии заключается в измерении на последовательных интервалах времени наклонного расстояния между мобильным надводным маяком и движущимся в подводном положении АНПА и использовании его для коррекциичисления местоположения АНПА по курсу и скорости, периодически измеряемых бортовыми средствами АНПА.

Технология имеет ряд разновидностей использования. Применительно к полигонным испытаниям она состоит в том, что АНПА сопровождает безэкипажное надводное судно (БНС), например, мини катер или глайдер, который периодически определяет своё местоположение в акватории с использованием СНС и передаёт свои текущие координаты на АНПА. Во время гидроакустического модемного обмена сигналами определяется время распространения сигнала от БНС до АНПА. На АНПА по времени распространения акустического сигнала между БНС и АНПА и предварительно измеренной скорости звука в акватории испытательного полигона рассчитывается наклонное расстояние между БНС и АНПА, затем с учётом измеренной глубины погружения АНПА вычисляется горизонтальное расстояние между БНС и АНПА, которое совместно с курсом, скоростью АНПА и переданными геодезическими координатами БНС используется для коррекции пути АНПА в акватории испытательного полигона. Оценка точности навигации выполняется также после подъёма АНПА на поверхность в ходе постобработки полученных траекторных данных.

Технология одномаяковой полигонной навигации лишена первого, весьма существенного, недостатка трёхмаяковой навигации, второй недостаток которой может быть устранён уменьшением интервала времени между измерениями геодезических координат БНС с использованием СНС, но остаются третий и четвёртый функционально значимые недостатки технологии, снижающие её технико-эксплуатационную эффективность.

Предлагаемая модифицированная технология позволяет расширить функциональные возможности одномаяковой технологии, обеспечивая визуальный контроль подводных перемещений АНПА при проверке траекторных возможностей подводного передвижения, и повысить её эффективность, сокращая время постобработки траекторных данных при проверке точности навигационных средств, позволяя причислить её к категории среднетратных технологий натурных испытаний автономных подводных аппаратов.

2. Базовые процессы модифицированной технологии

АНПА с автономными средствами управления и движительным комплексом, гидроакустическим модемом и бортовыми средствами навигации, включающими в себя инерциальную навигационную систему, гидроакустический доплеровский лаг, датчик глубины дополнительно оснащается гидроакустическим маяком-пингером, а на БНС с автономной системой управления и движителем, приёмником сигналов СНС и гидроакустическим модемом дополнительно устанавливаются съёмное устройство хранения данных, инерциальная навигационная система и гидроакустический фазовый пеленгатор с четырёхэлементной антенной диаметрально-ортогональной геометрии. Возможное размещение антенн средств навигации и информационного обмена АНПА и БНС иллюстрируется рис. 1.

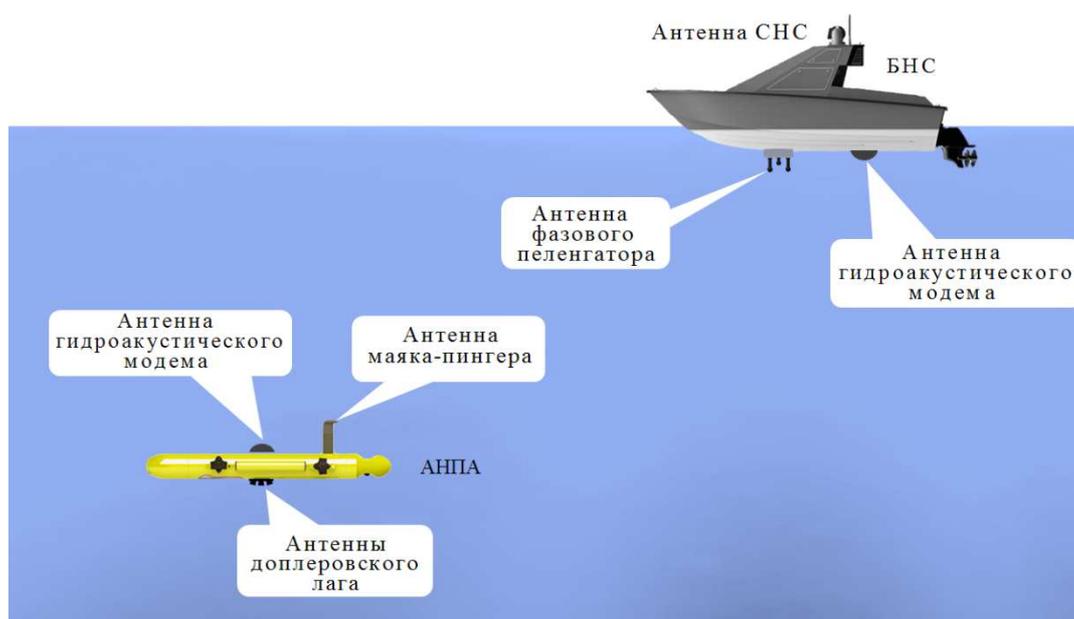


Рис. 1. Размещение антенн средств навигации и информационного обмена АНПА и БНС

С помощью вышеуказанных средств управления движением, навигации и информационного обмена осуществляется скоординированное передвижение АНПА (в подводном положении) и БНС (в надводном положении) по двумерной траектории между двумя реперными точками акватории испытательного полигона с известными геодезическими координатами предварительно запрограммированного в АНПА маршрута (рис. 2).

Навигация АНПА и скоординированное передвижение АНПА и БНС в акватории испытательного полигона реализуются следующим образом.

На АНПА посредством инерциальной навигационной системы, гидроакустического доплеровского лага и датчика глубины периодически оцениваются навигационные параметры движения АНПА – курс, курсовая и бортовая скорости, являющиеся ортогональными составляющими путевой скорости, и глубина погружения, которые используются для счисления его

пути по запрограммированному маршруту акватории испытательного полигона и передаются с помощью гидроакустического модема на БНС.

На БНС посредством гидроакустического фазового пеленгатора с четырёхэлементной антенной диаметрально-ортогональной геометрии периодически осуществляется позиционирование АНПА относительно БНС, в процессе которого оцениваются пеленг, угол места АНПА, горизонтальное расстояние по курсу между БНС и АНПА в системе координат его пеленгационной антенны.

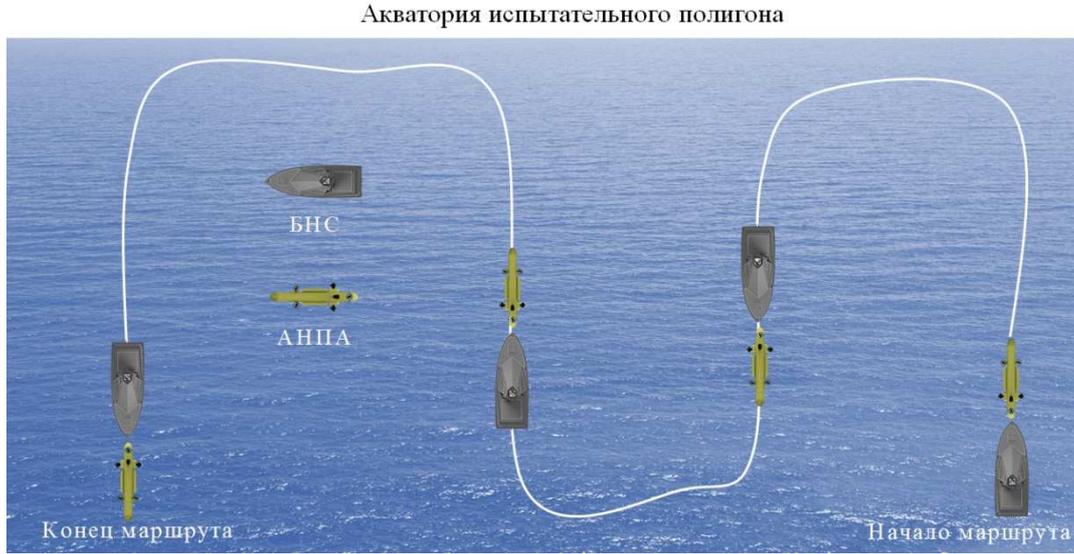


Рис. 2. Скоординированное передвижение АНПА и БНС в акватории полигона

Для гидроакустического позиционирования выбирается алгоритм [3, 4], позволяющий оценивать угловые координаты позиционируемого объекта с погрешностью менее одного градуса. Для антенны диаметрально-ортогональной геометрии [5] с соотношением размеров 2:1 (расстояние между парами приёмных гидрофонов в горизонтальной плоскости в два раза превышает расстояние между парами гидрофонов в вертикальной плоскости) в согласованной с курсом БНС системе координат (рис. 3) текущие пеленг $\varphi(t)$ и угол места $\theta(t)$ АНПА определяются по следующим тригонометрическим формулам:

$$\varphi(t) = \left\{ \begin{array}{l} \arccos \left(\frac{-\Delta\psi_{12}(t)}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2(t) + [\Delta\psi_{13}(t) - \Delta\psi_{14}(t)]^2}} \right), \text{ если } \Delta\psi_{13}(t) - \Delta\psi_{14}(t) \geq 0 \\ \pi + \arccos \left(\frac{\Delta\psi_{12}(t)}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2(t) + [\Delta\psi_{13}(t) - \Delta\psi_{14}(t)]^2}} \right), \text{ если } \Delta\psi_{13}(t) - \Delta\psi_{14}(t) < 0 \end{array} \right\}; \quad (1)$$

$$[0 \leq \varphi < 2\pi];$$

$$\theta(t) = \arccos \left(\frac{\Delta\psi_{12}(t) - \Delta\psi_{13}(t) - \Delta\psi_{14}(t)}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2(t) + [\Delta\psi_{13}(t) - \Delta\psi_{14}(t)]^2 + [\Delta\psi_{12}(t) - \Delta\psi_{13}(t) - \Delta\psi_{14}(t)]^2}} \right) - \frac{\pi}{2}; \quad (2)$$

$$[0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}],$$

где $\Delta\psi_{12}(t)$, $\Delta\psi_{13}(t)$, $\Delta\psi_{14}(t)$ являются текущими инструментально измеренными разностями фаз колебаний навигационного сигнала маяка-пингера АНПА для соответствующих пар

парциальных трактов приёма фазового пеленгатора БНС. Как видно из соотношений (1) и (2), для оценки угловых координат АНПА не требуется знание скорости звука в акватории испытательного полигона, что позволяет исключить погрешность измерения скорости звука при оценке пеленга и угла места АНПА, повышая точность позиционирования.

По рассчитанному углу места $\theta(t)$ и переданной с АНПА на БНС текущей глубине погружения $h_1(t)$ АНПА оценивается текущее горизонтальное расстояние $D(t)$ между БНС и АНПА:

$$D(t) = \frac{[h_1(t) - h_2]}{\operatorname{tg} \theta(t)}, \quad (3)$$

где h_2 – априорно известная глубина погружения антенны фазового пеленгатора БНС.

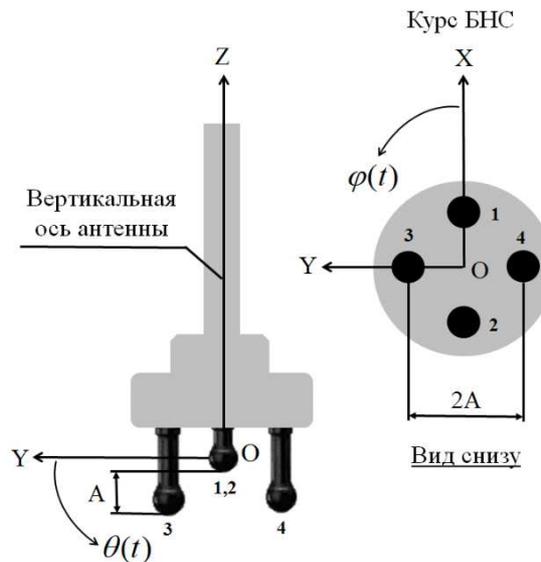


Рис. 3. Система координат антенны фазового пеленгатора БНС

Периодичность гидроакустического позиционирования АНПА относительно БНС согласовывается с периодичностью излучения навигационного сигнала маяка-пингера АНПА и периодичностью передачи с АНПА на БНС сообщений о курсе $k(t)$, курсовой $v_x(t)$ и бортовой $v_y(t)$ скоростях, являющихся ортогональными составляющими путевой скорости АНПА $v(t) = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t)}$, глубине погружения $h_1(t)$.

На БНС, используя СНС, периодически выполняется геодезическое позиционирование БНС в акватории испытательного полигона с оценкой геодезических координат, которые посредством гидроакустического модема передаются на АНПА, а с помощью инерциальной навигационной системы оцениваются курс $K(t)$, курсовая $V_x(t)$ и бортовая $V_y(t)$ скорости, являющиеся ортогональными составляющими путевой скорости БНС $V(t) = \sqrt{V_x^2(t) + V_y^2(t)}$.

С помощью автономной системы управления движением БНС совмещаются курсы $k(t) = K(t)$, $\varphi(t) = 0$ и выравниваются путевые скорости БНС и АНПА $v(t) = V(t)$ на основе сопоставления курсовых $k(t)$ и $K(t)$, скоростных $v(t)$ и $V(t)$ и траекторных параметров $\varphi(t)$ и $D(t)$ их передвижения (рис. 4) в акватории испытательного полигона.

Скоординированное движение АНПА и БНС описывается системой из пяти интегральных уравнений, используемых в итеративном алгоритме автономной системы управления движением БНС:

$$\begin{cases} \int_0^T V_x(t) dt - \int_0^T v_x(t) dt = 0 ; \int_0^T V_y(t) dt - \int_0^T v_y(t) dt = 0 ; \\ \int_0^T K(t) dt - \int_0^T k(t) dt = 0 ; \int_0^T \frac{h_1(t) - h_2}{\operatorname{tg} \theta(t)} dt - D_0 = 0 ; \\ \int_0^T \varphi(t) dt = 0 . \end{cases} \quad (4)$$

Здесь T – время усреднения курсовых, скоростных и траекторных параметров движения АНПА и БНС; D_0 – установочное минимально допустимое горизонтальное расстояние между АНПА и БНС, которое выбирается с учётом мест размещения антенн маяка-пингера АНПА и фазового пеленгатора БНС и поддерживается постоянным $D_0 = D(t)$ в процессе скоординированного передвижения АНПА и БНС в акватории испытательного полигона.

В процессе скоординированного движения АНПА и БНС по запрограммированному маршруту с БНС на АНПА посредством гидроакустического модема с периодичностью геодезического позиционирования БНС передаются сообщения о горизонтальном расстоянии $D(t)$ по курсу между БНС и АНПА, которое совместно с переданными геодезическими координатами БНС, ортогональными составляющими путевой скорости $v(t)$ и курсом $k(t)$ АНПА используются для коррекции счисления его пути в акватории испытательного полигона.

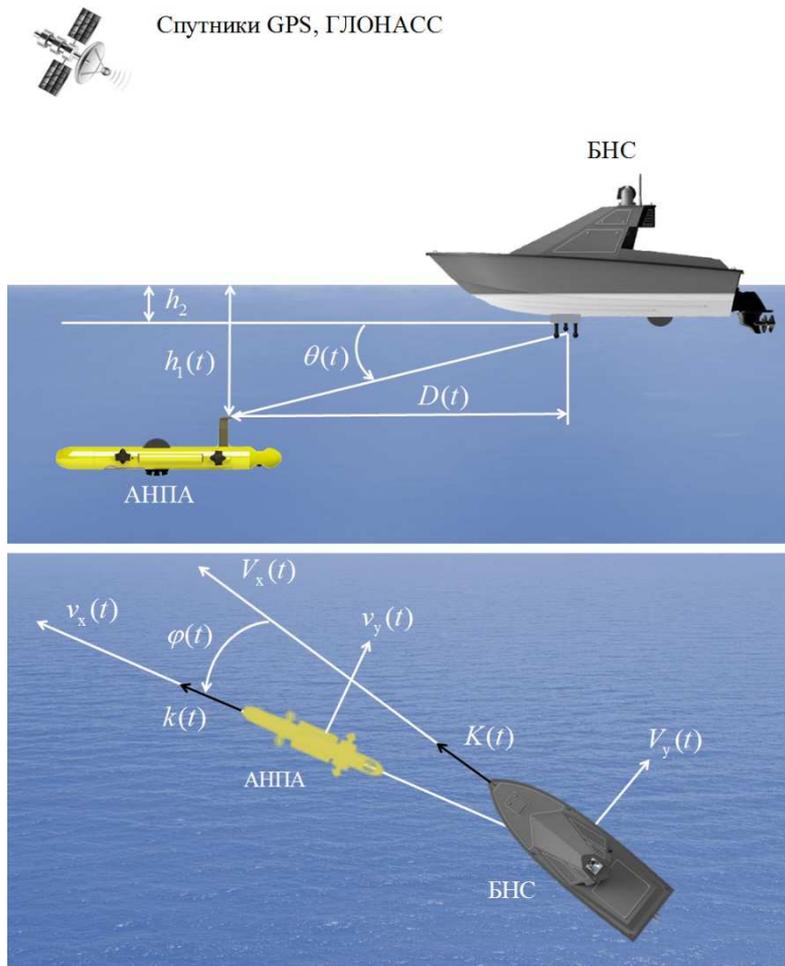


Рис. 4. Изменяемые параметры скоординированного передвижения АНПА и БНС

Периодичность геодезического позиционирования БНС выбирается кратно превышающей периодичность гидроакустического позиционирования АНПА с целью обеспечения завершения процессов итеративного корректирования движения БНС по результатам гидроакустического позиционирования АНПА и совмещения по времени оценок геодезических координат БНС и глубины погружения АНПА, которые записываются с периодичностью геодезического позиционирования в съёмное устройство хранения данных БНС в процессе скоординированного передвижения АНПА и БНС в акватории испытательного полигона.

После прибытия АНПА в конечную реперную точку запрограммированного маршрута по данным скоординированного движения АНПА и БНС, записанным в съёмное устройство хранения данных БНС, выстраивается трёхмерная или двухмерная (рис. 5) траектория движения АНПА в акватории испытательного полигона, при этом не требуются подъём АНПА на поверхность и процедура обработки данных счисления пути навигационной системы подводного аппарата, что значительно сокращает время постобработки траекторных данных.

Полученная таким образом траектория движения АНПА сравнивается с исходной запрограммированной, и по их расхождению оценивается точность навигационных средств АНПА при движении в акватории испытательного полигона.

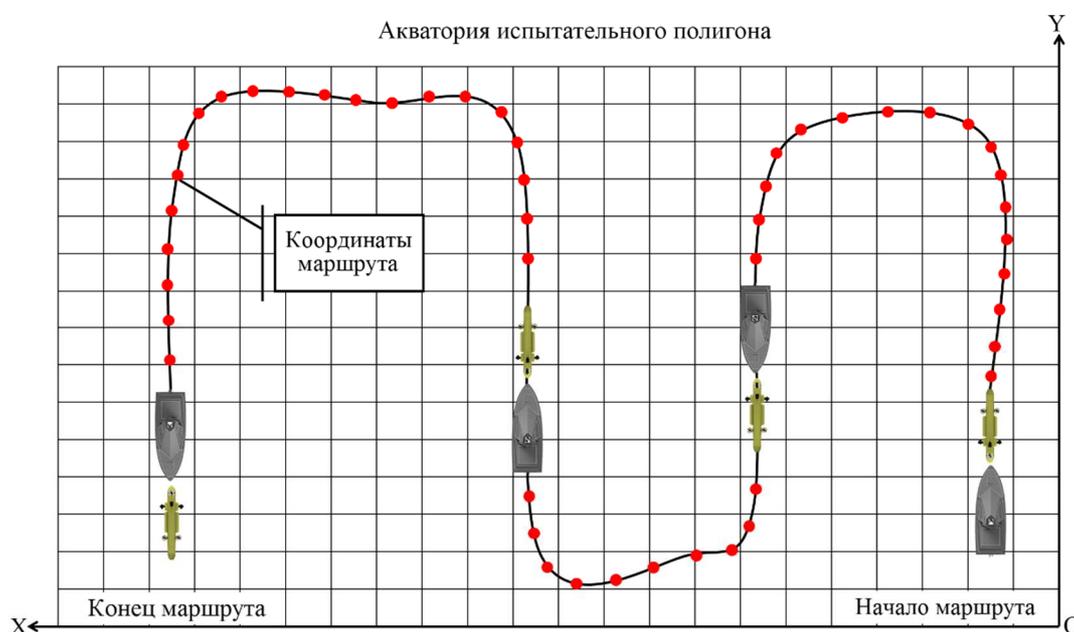


Рис. 5. Результат двухмерной обработки траектории передвижения АНПА

В ходе полигонных испытаний по предлагаемой технологии появляется возможность оперативного визуального контроля с берегового поста или иного места наблюдения подводных перемещений АНПА, транспонированных на поверхность акватории испытательного полигона в виде двухмерной траектории передвижения БНС, используемого в качестве поверхностного индикатора подводного перемещения АНПА, что облегчает процесс проверки и обработки возможных траекторий его передвижения.

3. Заключение

Технико-эксплуатационным результатом предлагаемой модифицированной технологии, обладающей расширенными функциональными возможностями и повышенной эффективностью, является обеспечение оперативного визуального контроля с берегового поста или иного места наблюдения подводных перемещений АНПА по двухмерной траектории, транспонированной на поверхность акватории испытательного полигона, в процессе проверки и обработки

возможных траекторий его передвижения и сокращение времени постобработки траекторных данных испытаний за счёт реализации скоординированного движения БНС и АНПА по запрограммированному маршруту акватории испытательного полигона, основанного на сочетании процессов их геодезического и гидроакустического позиционирования, с записью на БНС в режиме реального времени текущих геодезических координат БНС в акватории испытательного полигона и глубины погружения подводного аппарата на маршруте передвижения. Существенными отличиями технологии являются: использование БНС в качестве поверхностного индикатора подводного перемещения АНПА, отсутствие необходимости измерения скорости звука в акватории испытательного полигона для осуществления навигации АНПА и исключение из постобработки траекторных данных испытаний процедуры определения траектории передвижения АНПА в акватории испытательного полигона, требующей обработки данных счисления его пути и подъёма АНПА на поверхность.

Литература

1. Ваулин Ю. В., Лантев К. З. Оценка точности плавания автономного необитаемого подводного аппарата в заданном районе // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. С. 74–86.
2. Машошин А. И. Исследование точности одномаяковой навигации автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2. С. 20–27.
3. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультракороткой базой // Вестник СибГУТИ. 2018. № 4. С. 66–75.
4. Патент РФ 2709100, МПК G01S 1/72. Способ определения местоположения подводного объекта / В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов, А. Е. Малашенко, Д. Д. Минаев. Заявка 2018122532, заявлено 19.06.2018, опубликовано 16.12.2019. Бюл. № 35.
5. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора // Вестник СибГУТИ. 2019. № 1. С. 92–101.

Статья поступила в редакцию 26.04.2022.

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51) тел. (383) 2-693-938, e-mail: viktor.arsentev.51@mail.ru.

Криволапов Геннадий Илларионович

к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, руководитель научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51) тел. (383) 2-693-942, e-mail: krivolapov@sibsutis.ru

Field testing technology of an autonomous uninhabited underwater vehicle navigation aids

Viktor G. Arsent'ev

Candidate of technical sciences, Leading researcher, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), viktor.arsentev.51@mail.ru.

Gennagy I. Krivolapov

Candidate of technical sciences, Head of laboratory, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), krivolapov@sibsutis.ru.

The modified technology of full-scale tests of autonomous uninhabited underwater vehicles for checking the accuracy of their navigation aids and various trajectories development of underwater movement is proposed.

Keywords: autonomous uninhabited underwater vehicle, unmanned surface vessel, test site, coordinated movement, post-processing of test data.

References

1. Vaulin YU.V., Laptev K.Z. Ocenka tochnosti plavaniya avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v zadannom rajone [Assessment of the accuracy of navigation of an autonomous uninhabited underwater vehicle in a given area]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2015, pp. 74-86.
2. Mashoshin A.I. Issledovanie tochnosti odnomayakovoj navigacii avtonomnyh neobitaemyh podvodnyh apparatov [Investigation of the accuracy of single-beacon navigation of autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika*, 2017, no. 2, pp. 20-27.
3. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. Pozicionirovanie ob"ektov v gidroakusticheskoy navigacionnoj sisteme s ul'trakorotkoj bazoj [Positioning of objects in a hydroacoustic navigation system with an ultrashort base]. *Vestnik SibGUTI*, 2018, no. 4, pp. 66-75.
4. Patent RF 2709100, MPK G01S 1/72. Sposob opredeleniya mestopolozheniya podvodnogo ob"ekta [RF Patent. Method of determining the location of an underwater object]. V.G. Arsent'ev, G.I. Krivolapov, A.E. Malashenko, D.D. Minaev. *Zajavka 2018122532, zajavleno 19.06.2018, opublikovano 16.12.2019.*
5. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. O vliyanii geometricheskikh parametrov anteny na harakteristiki gidroakusticheskogo fazovogo pelengatora [On the influence of the geometrical parameters of the antenna on the characteristics of the hydroacoustic phase direction finder]. *Vestnik SibGUTI*, 2019, no. 1, pp. 92-101.