

УДК 551.46.077:629.584

СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПОСТОБРАБОТКИ ДАННЫХ БОРТОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА

Ю.В. Ваулин
Ю.Р. Дубовой

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН¹
Дальневосточный государственный
университет²

Рассматривается система моделирования и постобработки данных навигационного комплекса АНПА. Описываются графический интерфейс и алгоритм работы программы. Приведены результаты тестирования работы навигационных алгоритмов АНПА в режиме имитации навигационных измерений и в режиме постобработки реальных навигационных данных. Исследованы алгоритмы, основанные на синтезировании длинной базы системы гидроакустической навигации и использовании фильтра Калмана.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в широком спектре задач, связанных с навигацией автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), прослеживается необходимость в универсальном средстве, позволяющем моделировать навигационные процессы, а также осуществлять постобработку уже имеющихся реальных навигационных данных [1,2]. Подобный инструмент может быть полезен для следующих применений:

- оценки характеристик имеющихся навигационных систем (точности, устойчивости к помехам, экономичности и т.п.);
- разработки, тестирования и сравнения новых навигационных технологических комплексов и алгоритмов;
- постобработки и статистического анализа реальных навигационных данных (сглаживания

согласно процессной модели, выявления и устранения ошибок измерений и пр.);

- оценки характеристик и калибровки сенсоров;
- определения оптимального набора сенсоров под конкретную задачу.

Вопросам разработки подобных систем моделирования придается большое значение в зарубежных центрах, специализирующихся на создании навигационных средств объектов различного назначения. Например, в Норвежском исследовательском департаменте обороны была создана система NavLab (навигационная лаборатория), предназначенная для решения комплекса аналогичных задач, среди которых основной упор сделан на постобработку полученных ранее данных [3]. В данной статье рассматривается система моделирования и постобработки

бортовых навигационных данных «Кормчий», являющаяся совместной разработкой ИПМТ ДВО РАН и кафедры подводной робототехники ДВГУ [4].

В отличие от NavLab система «Кормчий» предполагает более широкие возможности в области моделирования навигационных алгоритмов. Система позволяет в интерактивном и текстовом режимах задавать различные траектории движения АНПА, задавать структуру навигационного комплекса, моделировать инструментальные ошибки сенсоров, внешние факторы, а также визуализировать и сохранять результаты моделирования. Для оценивания работы навигационных алгоритмов в различных условиях в системе «Кормчий» используется упрощенная модель среды, позволяющая имитировать различные ситуации, в т.ч. – подводное течение, сбой гидроакустической навигационной системы (ГАНС), вызванные многолучевостью или пропаданием акустического сигнала от маяков-ответчиков и т.п. Система моделирования «Кормчий» включает в себя библиотеку навигационных алгоритмов, таких как простое счисление, специализированные фильтры и фильтр Калмана, алгоритмы синтеза длинной базы (СДБ). Библиотека может расширяться и дополняться новыми алгоритмами, предоставляя тем самым разработчику возможность отладки, настройки и исследования характеристик разрабатываемых систем, а также производить постобработку реальных навигационных данных.

¹ 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел.: (4232)432416, e-mail: vaulin@marine.febras.ru

² 690091, Владивосток, ул. Суханова, 8, ИФИТ, тел.: 432706, e-mail: ifitow@mail.ru

■ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Для реализации системы моделирования «Кормчий» были выбраны язык MatLab и визуальная среда разработки Borland C++ Builder. В частности, пакеты расширения MatLab C/C++ Library и MatLab Compiler использовались для создания автономных программных модулей, основанных на шаблонах MatLab, и библиотек функций (dll), которые затем применялись уже в визуальной среде разработки Borland C++ Builder (рис.1). При выборе в пользу MatLab учитывалось то, что в MatLab интегрирована обширная библиотека математических функций.

Структура «Кормчего» состоит из двух структурно-функциональных блоков: блока моделирования и блока пост-обработки. Система позволяет осуществлять взаимодействие между блоками, например, из блока моделирования можно напрямую (без записи в файл) передавать навигационные данные в блок постобработки, что ускоряет процесс исследований.

При запуске системы указывается, с какой частью необходимо работать с возможностью последующего подключения другого модуля (рис. 2).

Основное назначение блока моделирования – это формирование искусственных измерений навигационных параметров при движении АНПА по запрограммированному сценарию с учетом заданных свойств среды, модели ошибок навигационных устройств и динамики АНПА. Программирование сценария осуществляется путем детального описания траектории АНПА и формирования структуры навигационного комплекса.

Траекторию движения АНПА можно задавать в интерактивном и текстовом режимах, используя язык задания миссий (для формирования миссии в текстовом режиме можно использовать любой текстовый редактор). Имеется возможность использовать библиотеку готовых модулей, описывающих наиболее употребительные траектории движения АНПА. Кроме траектории необходимо сформировать структуру навигационного

комплекса. Выбор навигационных датчиков производится из заранее определенного списка. Список включает в себя навигационные сенсоры и устройства, применяемые на сегодняшний день на аппаратах ИПМТ, и по мере необходимости может расширяться [5].

Каждый навигационный датчик из списка устройств имеет модель ошибок и ряд параметров, определяющих его точностные характеристики. При выборе устройства

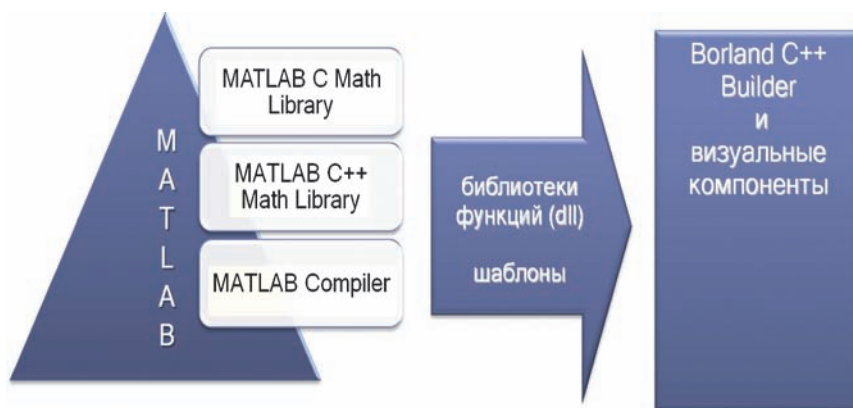


Рис. 1. Состав среды программирования

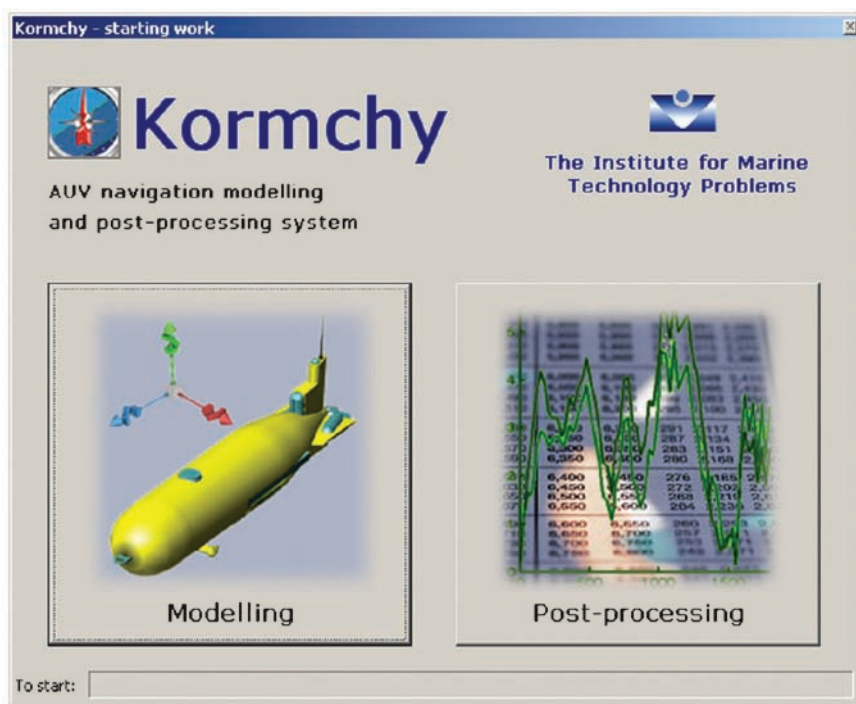


Рис. 2. Базовое окно системы «Кормчий»

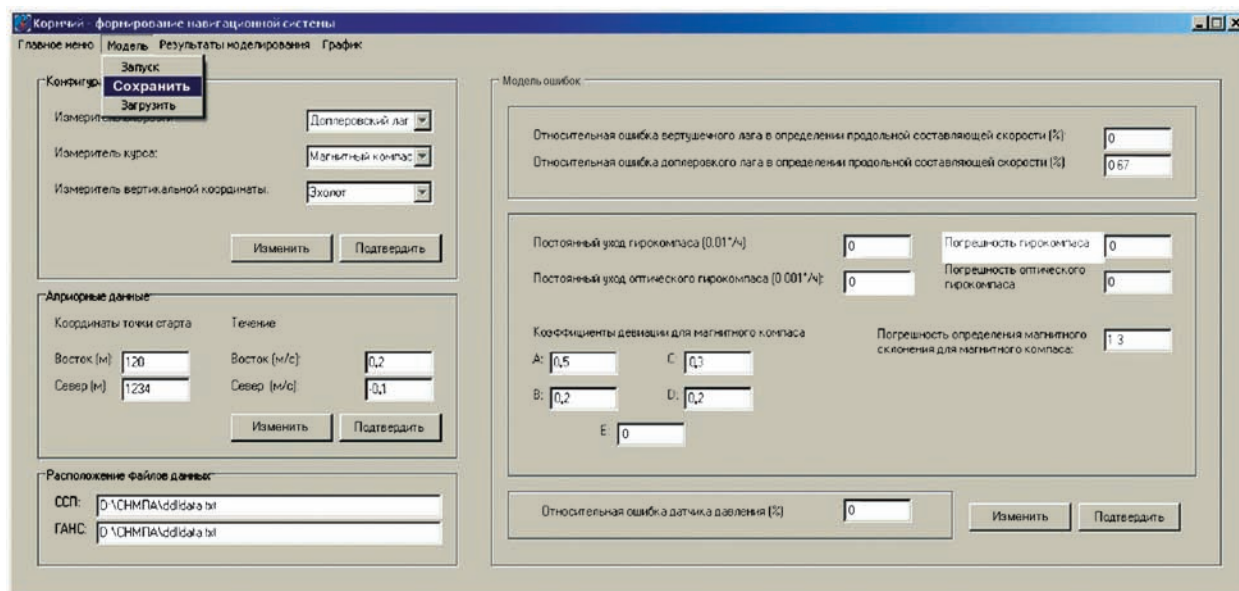


Рис. 3. Формирование набора навигационных приборов и задание их характеристик

значения этих параметров устанавливаются системой по умолчанию. Но при желании пользователь может изменить характеристики датчиков по своему усмотрению (рис. 3). Например, для магнитного компаса указываются погрешность определения магнитного склонения и коэффициенты девиации. Для доплеровского лага задается параметр, определяющий ошибку, вызванную погрешностью калибровки и неточностью оценки скорости звука и т.п.

Схемы навигационных систем, сформированных в блоке моделирования сенсоров, равно как и траектории, сформированные в блоке моделирования траектории, можно сохранять для последующего применения.

Программное обеспечение блока моделирования состоит из трех частей. Первая часть – графический интерфейс, включающий в себя набор окон, содержащих меню, списки параметров с полями ввода, кнопки, индикаторы и прочие графические примитивы. Вторая

часть – программа, генерирующая траекторию АНПА в соответствии с заданным сценарием движения и динамической моделью аппарата. Третья часть – программа моделирования сенсоров, в которой формируются данные измерений навигационных датчиков и устройств АНПА. Здесь же происходит моделирование внешних искажающих факторов, таких как течение, погрешность определения точки старта, девиация, многолучевость акустических сигналов и т.п.

Блок постобработки предназначен для работы с реальными навигационными данными. На аппаратах ИПМТ ДВО РАН навигационные данные сохраняются во время каждого запуска на жесткий диск в текстовом виде. Каждая запись файла навигационных данных содержит ряд измеренных параметров, включая дальности до маяков-ответчиков, численные координаты и пр. Программа постобработки позволяет загружать в систему моделирования данные из навигационных файлов и производить над ними ряд

действий, в том числе пересчитывать координаты с использованием новых алгоритмов, уточнять координаты маяков, сглаживать траекторию.

Рассмотрим стандартную последовательность действий при работе с системой «Кормчий». Как упоминалось выше, сначала организуется траектория движения АНПА и задаются галсы или другие формы траектории. Для каждого галса устанавливаются направление, скорость и время движения, глубина/высота («невозможные» значения блокируются). Затем пользователем формируется перечень навигационных приборов, устанавливаются погрешности измерений для выбранных навигационных датчиков и параметры моделируемых факторов искажений (погрешность определения точки старта, скорости течения, многолучевость и т.п.). Расчет координат может производиться одновременно по трем алгоритмам из банка навигационных алгоритмов моделирующей системы (включая простое числение), что позво-

ляет сравнить результаты работы различных алгоритмов на одних и тех же модельных или реальных (в случае постобработки) данных.

По окончании процесса моделирования система выводит на экран заданную пользователем траекторию (рис. 4) и совокупность графиков с вычисленными траекториями. Кроме графиков с траекториями на экран выводятся графики погрешностей измерения координат для каждого алгоритма и значения математического ожидания и дисперсии погрешностей. Если работа ведется с модельными данными, погрешность измерения координат вычисляется относительно идеальной (модельной) траектории. Если проверка алгоритмов ведется с использованием реальных навигационных данных из файла накопителя - погрешность вычисляется относительно координат, вычисленных на борту АНПА.

Система позволяет сохранять результаты моделирования в графическом и текстовом форматах. Для более детальной визуализации в систему встроены средства масштабирования графиков. Вычисленные траектории можно вывести как на отдельных графиках, так и на одном общем графике.

■ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим ряд примеров работы с системой моделирования «Кормчий». Пример 1 посвящен сравнению двух навигационных алгоритмов на модельных данных. Первый алгоритм (назовем его фильтр «К1») применяется в настоящее время в бортовых навигационных системах (БНС) аппаратов ИПМТ ДВО РАН [5]. Второй алгоритм построен на основе

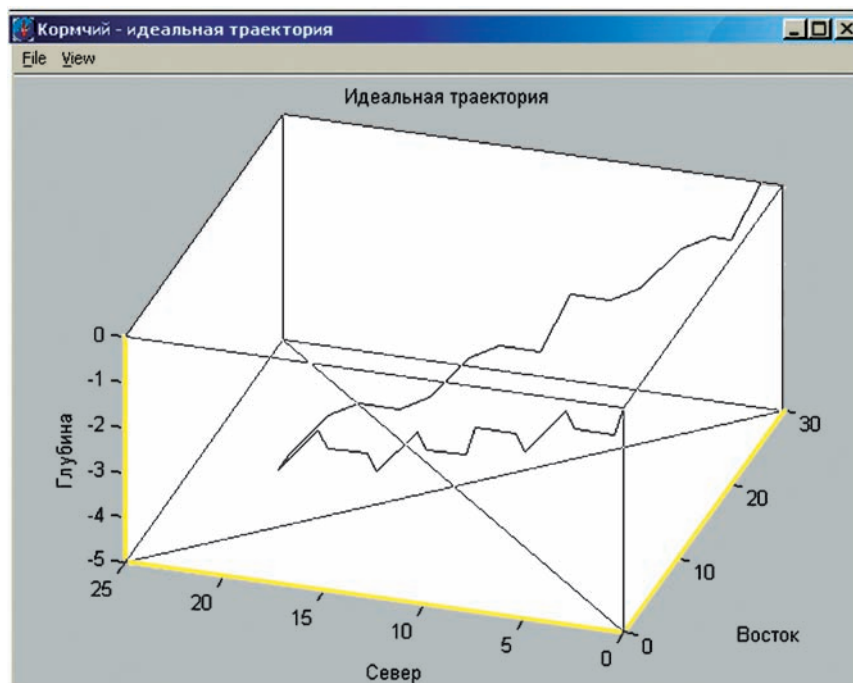


Рис. 4. Определенная пользователем траектория

фильтра Калмана [6]. Оба алгоритма используют данные от бортовой ГАНС с длиной базой (ГАНС ДБ) для коррекции системы счисления пути.

При проведении вычислительного эксперимента в системе моделирования устанавливается следующая исходная информация:

- конфигурация системы счисления пути:
 - магнитный компас с девиационной погрешностью $1,5^\circ \dots 2,5^\circ$;
 - доплеровский лаг с погрешностью 1 %;
 - датчик глубины.
- конфигурация ГАНС ДБ:
 - число маяков-ответчиков – 3;
 - погрешность измерения координат и глубины установки маяков – 1м;
 - погрешность заданной скорости звука – 2 м/с;
 - инструментальная погрешность измерения времени распространения акустического сигнала – 5 мс;
- временные характеристики навигационной системы:

период работы системы счисления пути – 1 с;

период работы ГАНС ДБ – 30 с.

Для проведения эксперимента использовалась программа движения АНПА по траектории типа «меандр». На рис. 5 показаны траектории АНПА, полученные алгоритмом «счисления пути», алгоритмом «фильтр Калмана» (метод рекуррентного оценивания линейных динамических систем [7]) и алгоритмом «К1». На этом же графике для сравнения приведена истинная траектория АНПА (в этом заключается дополнительное преимущество использования смоделированных данных: в случае реальных данных нет информации об истинной траектории аппарата). На рис. 6, 7 выведены графики погрешностей измерения координат. Среднее отклонение вычисленных координат от истинных для фильтра Калмана составило 3,4 м, для фильтра «К1» – 2,7 м. Таким образом, оба алгоритма в ходе

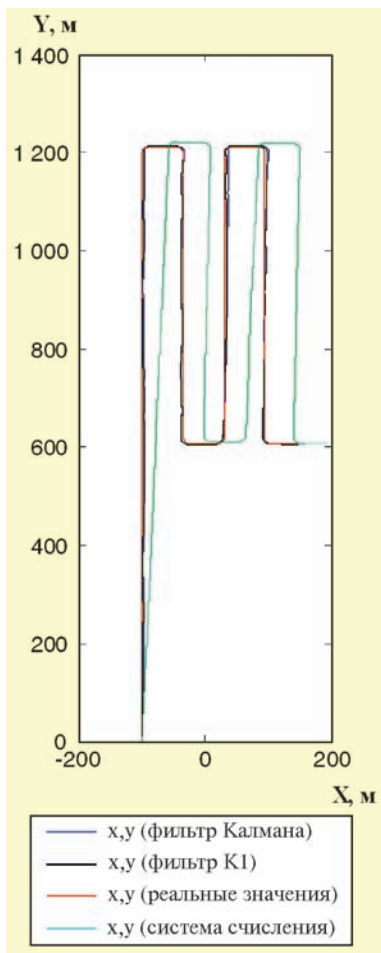


Рис. 5. Траектория движения АНПА

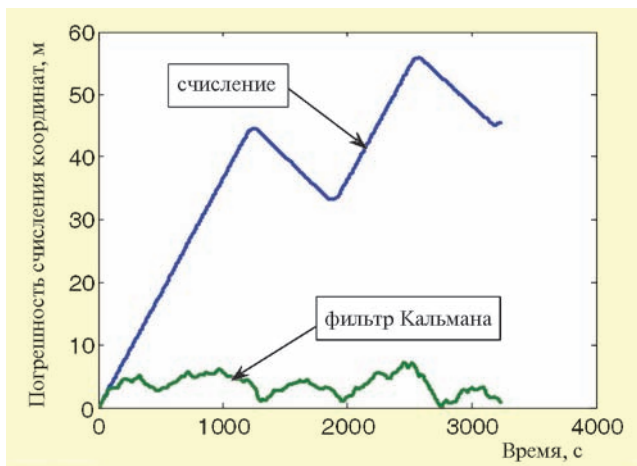


Рис. 6 Погрешность измерения координат для алгоритмов "счисление пути" и "фильтр Калмана"

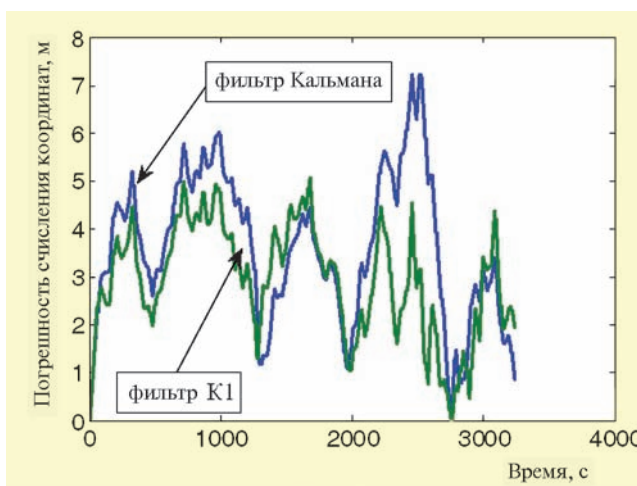


Рис. 7 Погрешность измерения координат для алгоритмов "К1" и "фильтр Калмана"

эксперимента показали относительно идентичные результаты.

ПОСТОБРАБОТКА

Рассмотрим ряд примеров практического применения системы «Кормчий» для постобработки реальных навигационных измерений, накопленных во время одного из запусков АНПА. В примере №1 целью вычислительного эксперимента являлось изучение работы алгоритма синтеза длинной базы в ГАНС с одним маяком. Для проверки алгоритма на реальных данных был выбран один из запусков АНПА в конфигурации ДБ ГАНС с тремя маяками. Заданная траектория пред-

ставляла собой серию смещенных относительно друг друга квадратов (рис. 8). Продолжительность пуска составляла 7 часов. Погрешность измерения скорости во время запуска превышала 1% в связи с тем, что использовался относительный лаг, не учитывающий скорость течения. Скорость накопления ошибки счисления координат для системы счисления пути в этом запуске составила около 60 м/ч. В процессе работы аппарат дважды всплывал на поверхность и производил коррекцию координат по GPS. В качестве входных данных для СДБ ГАНС кроме данных от датчиков системы счисления пути (относительного лага, гирокомпа) использовались

данные измерений дальностей до одного из трех маяков-ответчиков (маяк №1). Во время движения АНПА случались периоды, когда прием откликов от маяка-ответчика №1 носил нестабильный характер или на время прекращался. На рис. 9. приведен график погрешности измерений координат АНПА по данным бортовой автономной навигационной системы (БАНС) (система счисления пути) и по данным СДБ ГАНС. Погрешности измерялись относительно траектории, полученной ДБ ГАНС с тремя маяками, погрешность которой составляет 5-10 м. По результатам вычислительного эксперимента накопленная на момент окончания пуска погрешность из-

мерения координат составила 270,1 м для системы счисления пути и 30,6 м - для СДБ ГАНС с одним маяком.

В примере №2 приведены результаты применения алгоритма СДБ ГАНС и алгоритма с фильтром Калмана для измерения координат по данным, накопленным во время одного из запусков АНПА в декабре 2009 г. Целью данного запуска являлась фотосъемка заданного района размером 300 x 300 м. Запрограммированная траектория представляла собой последовательность галсов в виде сжимающейся спирали. Продолжительность запуска - 20 часов. На рис. 10 приведена траектория АНПА, полученная средствами БАНС. В данном запуске в отличие от примера №1 в состав БАНС входил доплеровский лаг (ДЛ). Поскольку траектория носила замкнутый характер, погрешности счисления координат, вызванные неточностью калировки ДЛ, частично компенсировались на встречных галсах. Итоговая погрешность счисления координат средствами БАНС к концу запуска достигла 60 м. На рис. 10 видно, что из-за накопленной погрешности завершающая центральная часть спирали смещена в левый нижний угол.

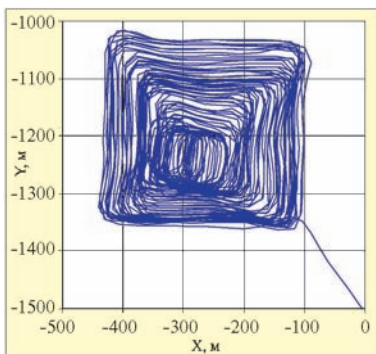


Рис. 10. Алгоритм БАНС

Рис. 8
Траектории движения АНПА по данным трехмаяковой ГАНС, системы счисления пути и СДБ ГАНС

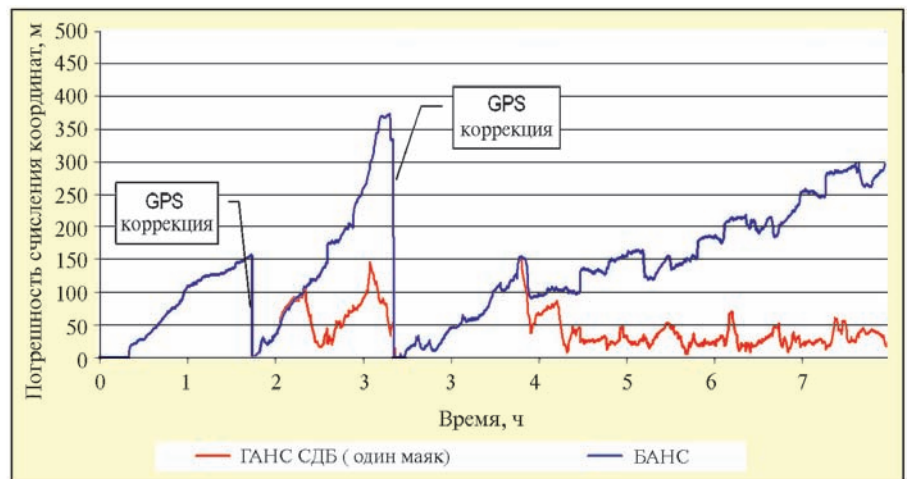
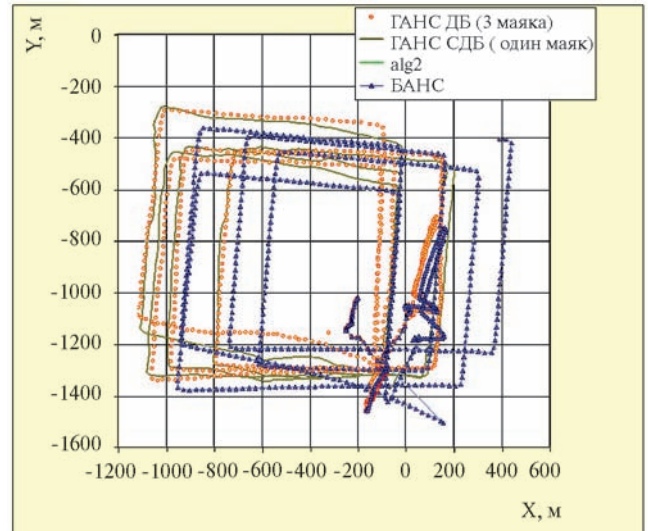


Рис. 9. Погрешность измерения координат для системы счисления пути и СДБ ГАНС

На рис. 11 показана траектория АНПА, полученная системой «Кормчий» с использованием алгоритма СДБ ГАНС. В приведенном примере кор-

рекция численных координат производилась по измеренным дальностям до маяка-ответчика №1 (рис. 13). На рис. 12 приведена траектория, вычисленная

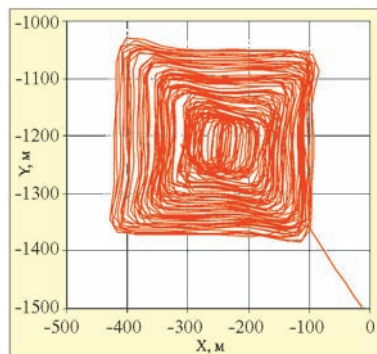


Рис. 11. Алгоритм СДБ ГАНС

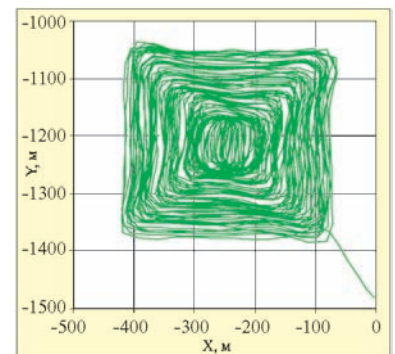


Рис. 12. Алгоритм "фильтр Калмана"

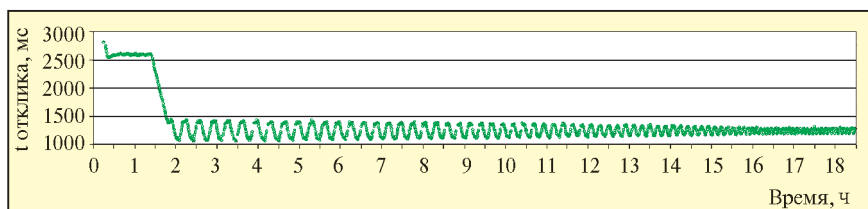


Рис. 13. Временные задержки прохождения сигнала до маяка-ответчика №1

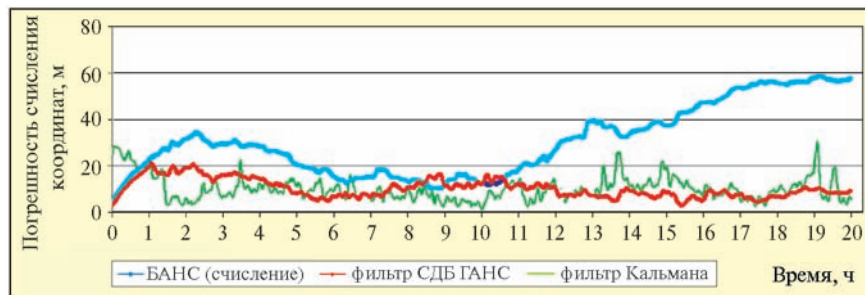


Рис. 14. Погрешность измерения координат

с применением фильтра Калмана. Матрица априорных оценок формировалась на основе данных БАНС, а матрица апостериорных оценок вычислялась по данным измерений дальностей до трех маяков-ответчиков ДБ ГАНС.

На рис. 14 приведен график погрешностей измерения координат для системы счисления (БАНС), алгоритма СДБ ГАНС (один маяк) и алгоритма с фильтром Калмана. Среднее значение погрешности измерения координат для алгоритма

с фильтром Калмана составило - 11 м, а для алгоритма СДБ ГАНС - 13 м. При моделировании обоих алгоритмов не было отмечено ни одного сбоя, что характеризует их устойчивость. В целом тестируемые алгоритмы подтвердили свою работоспособность и по результатам моделирования можно рекомендовать данные алгоритмы для испытаний на АНПА в реальных условиях.

В настоящее время завершён только первый этап создания системы моделирования и постобработки данных для АНПА «Кормчий». Система является открытой и требует дальнейшего развития. Это касается расширения базы алгоритмов, усовершенствования динамической модели АНПА и моделей датчиков. В будущем предполагается включить в модель внешней среды возможность генерирования искусственного рельефа дна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. М.: Наука, 2005. 400 с.
2. Vaulin Y.V., Scherbatyuk A. Ph. Simulation of Integrated Navigation System for the Autonomous Underwater Vehicle. BLACK SEA '90: Technical Conference on Ocean and Marine Engineering, Ship-building and Maritime Technology, Sept. 17-21, 1990, Varna, Bulgaria. Varna, 1990.
3. Gade K. NAVLAB, a Generic Simulation and Post-processing Tool for Navigation // European Journal of Navigation. 2004. Vol. 2, № 4.
4. Ваулин Ю.В., Дубовой Ю.Р. Автоматизация моделирования и постобработки данных бортовых навигационных систем АНПА // Материалы докл. III Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 433-439.
5. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В. Навигация и управление в подводном пространстве // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. №11.
6. Simon D. Kalman Filtering // Embedded Systems Programming. 2001. June. P. 72-79.
7. Balakrishnan A.V. Kalman Filtering Theory. Optimization Software. New York: Inc. publications Division, 1984. 220 p.

