

УДК 629.12 : 629.7.05 : 519.87

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ ПОДВОДНОГО
АППАРАТА НА ОСНОВЕ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ
НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ШИРОТ**

Куликова Ольга Юрьевна¹, магистрант

e-mail: kulickova.ol2013@yandex.ru

Хуторная Екатерина Викторовна¹, доцент, кандидат технических наук

e-mail: hutorianka@yandex.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье представлен алгоритмический анализ математической модели системы пространственной ориентации и навигации подводного аппарата на базе бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Акцент сделан на пошаговом описании вычислительных процедур, формирующих процесс определения пространственного положения и параметров движения подводного аппарата в условиях отсутствия внешних навигационных сигналов.

Ключевые слова: подводный аппарат, пространственная ориентация, навигация, бесплатформенная инерциальная навигационная система, средние широты, высокие широты.

**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR MODELING A SYSTEM OF SPATIAL
ORIENTATION AND NAVIGATION OF AN UNDERWATER VEHICLE BASED ON A
STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM IN MIDDLE AND HIGH
LATITUDES**

Olga Yu. Kulikova¹, Master's Degree student

e-mail: kulickova.ol2013@yandex.ru

Ekaterina V. Khutornaya¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

e-mail: hutorianka@yandex.ru

¹ Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. This article presents an algorithmic analysis of a mathematical model of an underwater vehicle's spatial orientation and navigation system based on a strapdown inertial navigation system. Emphasis is placed on a step-by-step description of the computational procedures that form the process of determining the underwater vehicle's spatial position and motion parameters in the absence of external navigation signals.

Keywords: underwater vehicle, spatial orientation, navigation, strapdown inertial navigation system, middle latitudes, high latitudes.

Введение

Понятия ориентации и навигации подводных аппаратов (ПА) связаны с определением их положения, направления движения и параметров ориентации (курса, крена, дифферента) в подводной среде. Эти процессы критически важны для выполнения комплекса подводных операций, включая исследование рельефа и поисково-позиционные работы. Таким образом, эффективность выполнения задач ПА и его безопасность напрямую определяются точностью системы навигации и позиционирования.

Инерциальные навигационные системы (ИНС) определяют текущие координаты движущегося объекта, параметры его движения и углового положения. При этом используются только сведения о начальных координатах, угловом положении объекта и результаты обработки показаний, входящих в состав ИНС чувствительных элементов [1]. В бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС), в отличие от ИНС не требуется гиростабилизирующая платформа. В БИНС акселерометры и гироскопы устанавливаются непосредственно на борту ПА [2].

Моделирование системы пространственной ориентации и навигации ПА на основе БИНС посредством разработки алгоритма позволит отладить математическую модель движения подводного аппарата и визуализировать результаты работы модели. В основе построения алгоритма лежат математические модели, представленные в работе [3].

Структурная схема алгоритма системы пространственной ориентации и навигации ПА на основе БИНС

Общая структурная схема алгоритма, представленная на рисунке 1, включает следующие вычислительные функции:

1. Инициализация начальных значений, необходимых для моделирования;
2. Формирование заданного движения ПА;
3. Вычисление правых частей системы дифференциальных уравнений, определяющую математическую модель БИНС ПА для средних и высоких широт;
4. Метод решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ);
5. Вывод результирующих параметров моделирования.

Блок «Инициализация начальных значений» позволяет задать параметры начального положения ПА, а также переменные для моделирования значений вектора кажущегося линейного ускорения и вектора абсолютной угловой скорости. К параметрам начального положения ПА относим продольное, боковое смещение ПА и глубину погружения относительно географической стартовой системы координат, а также начальную широту и долготу местоположения ПА.

Моделирование значений вектора кажущегося линейного ускорения происходит посредством определения значений амплитуды синусоидальных колебаний и угловых частот колебаний ускорения по соответствующим осям связанной с ПА системы координат (СК).

Вектор абсолютной угловой скорости при равномерном прямолинейном движении ПА описывается набором синусоидальных функций с параметрами, задаваемыми пользователем: начальными значениями, амплитудами и частотами изменения углов ориентации. На основе этих зависимостей проекции угловой скорости вычисляются через систему кинематических связей.



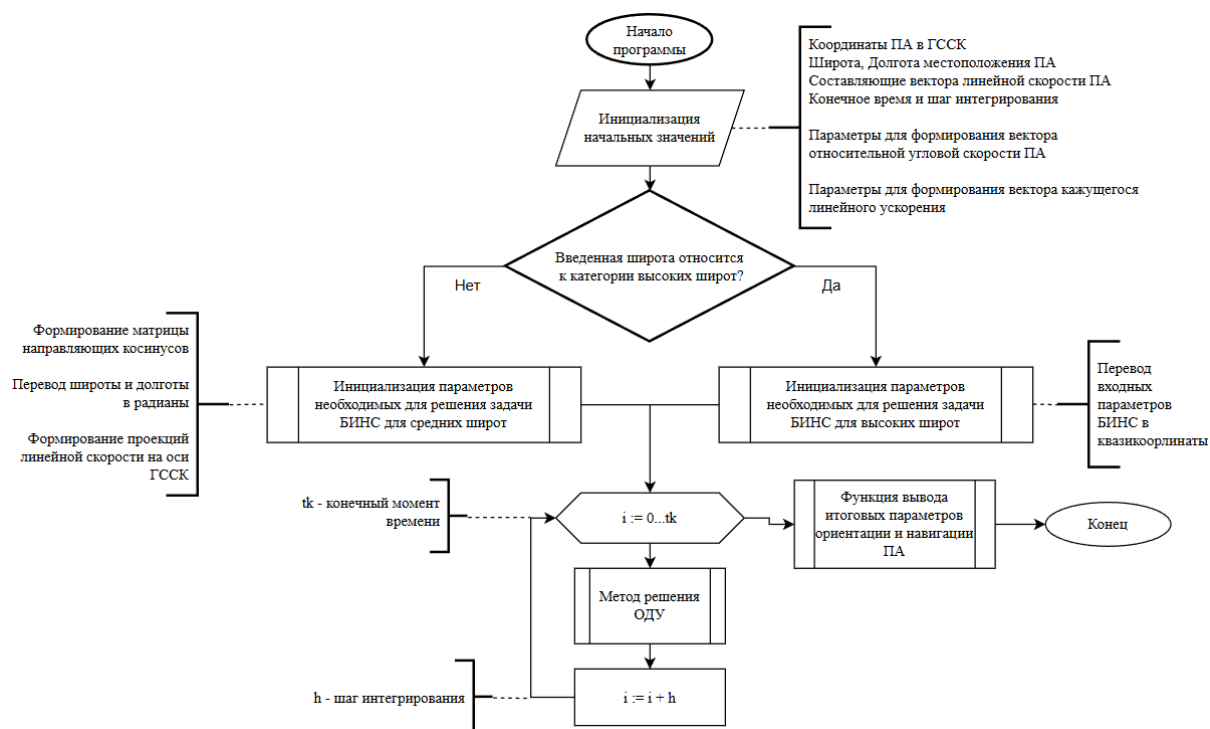


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма моделирования системы пространственной ориентации и навигации ПА на основе БИНС

Возвращаясь к описанию общей реализации алгоритма моделирования, стоит отметить, что вызов необходимой подпрограммы для корректного вычисления параметров ориентации и навигации происходит на основе начального значения широты местоположения ПА. Выходные данные блока «Инициализация начальных значений» используются для формирования матрицы направляющих косинусов, перевода начальных значений долготы и широты из градусов в радианы, формирования проекций вектора линейной скорости на оси ГССК. Для случая высоких широт в дополнение к перечисленным параметрам добавляются следующие переменные: квазидолгота, квазиширота, угол перехода, угол истинного курса в квазигеографической системе координат, матрица направляющих косинусов, характеризующая поворот связанной СК относительно квазигеографической системы, проекции линейной скорости движения ПА в квазигеографической СК.

Далее реализуется численное интегрирование системы дифференциальных уравнений выбранным методом для решения задач Коши. На каждом шаге интегрирования алгоритм получает текущее состояние системы, включающее матрицу ориентации, вектор линейной скорости, а также параметры навигации. Итоговые вычисленные значения сохраняются в объекте, созданном на этапе подготовки параметров, подготавливая систему к следующему шагу интегрирования. Такой подход обеспечивает баланс между точностью численного решения и вычислительной сложностью алгоритма.

Функция вывода результатов моделирования отвечает за наглядность представления итоговых значений в консольном приложении.

Математическое описание функции вычисления правых частей ОДУ для средних широт

Отдельно остановимся на рассмотрении функций вычисления правых частей ОДУ для случая средних и высоких широт, вызываемых из блока «Метод решения ОДУ». Данные

функции отвечают за последовательность реализации вычислений, лежащих в основе математического аппарата алгоритма.

На рисунке 2 представлена блок-схема последовательного вычисления правых частей ОДУ для случая средних широт. Подпрограмма «Функция формирования заданного движения» вычисляет значения вектора абсолютной угловой скорости, тем самым моделируя данные, считываемые с датчика угловой скорости. Функция также вычисляет смоделированные значения вектора кажущегося линейного ускорения, которые обычно регистрируются с помощью трех жестко установленных на борту ПА акселерометров.

Далее следует вычисление основных параметров ориентации и навигации ПА – координат местоположения в географической стартовой системе координат (ГССК), широты и долготы, матрицы направляющих косинусов, на основе значений которой вычисляются параметры ориентации ПА: курс, крен и дифферент. Вычисление представленных параметров происходит на основе аналитического решения математической модели БИНС ПА для средних широт в виде системы дифференциальных уравнений.

Аналитическое решение уравнений имеет вид, представленный в выражении (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{V} = \int_0^t (\bar{a}_k - \bar{g} + \bar{V} \cdot \Omega_1) dt + \bar{V}_0 \\ \xi = \int_0^t V_\xi dt + \xi_0 \\ \eta = \int_0^t V_\eta dt + \eta_0 \\ \varsigma = \int_0^t V_\varsigma dt + \varsigma_0 \\ \varphi = \int_0^t \frac{V_\varsigma}{R} dt + \varphi_0 \\ \lambda = \int_0^t \frac{V_\varsigma}{R \cdot \cos(\varphi)} dt + \lambda_0 \\ B = \int_0^t (B \cdot \Omega) dt + B_0 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $V_\xi, V_\eta, V_\varsigma$ – составляющие вектора линейной скорости $\bar{V}$ в ГССК;

ξ, η, ς – координаты местоположения ПА в ГССК (северная, вертикальная и восточная направляющие);

φ, λ – географические широта и долгота места ПА;

B – матрица направляющих косинусов, характеризующая поворот связанной системы координат относительно ГССК;

Ω – кососимметричная матрица, состоящая из проекций вектора относительной угловой скорости вращения ПА в жестко связанной с ПА системой координат с началом в центре водоизмещения;

Ω_1 – кососимметричная матрица, сформированная на основе сложения вектора абсолютной угловой скорости ПА и вектора угловой скорости вращения Земли;

$\bar{a}_k$ – вектор кажущегося линейного ускорения;

$\bar{g}$ – вектор ускорения силы тяжести (УСТ);

R – радиус Земли.

Отметим, что для расчета проекций вектора линейной скорости ПА $\bar{V}$ в ГССК необходимо, чтобы все векторы в выражении (1) имели проекции на ГССК.

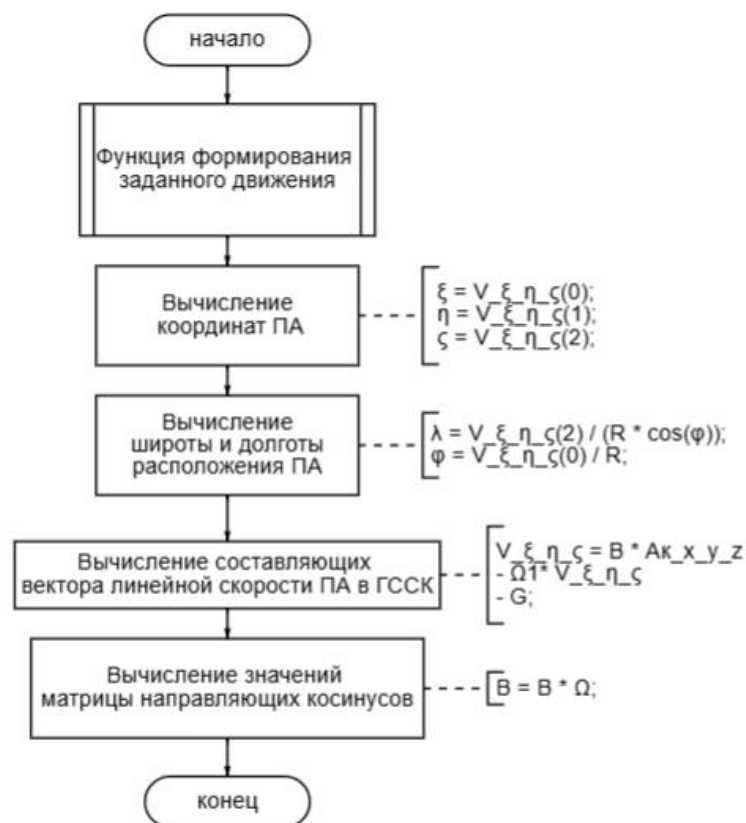


Рисунок 2 – Блок-схема последовательного вычисления правых частей ОДУ для случая средних широт

Математическое описание функции вычисления правых частей ОДУ для высоких широт

В рамках рассмотрения задачи вычисления параметров ориентации и навигации ПА при движении объекта в высоких широтах трудность вызывает общепринятая система координат, мысленно нанесенная на тело Земли. В зоне высоких широт меридианы начинают заметно сближаться, стремясь к точкам северного и южного полюсов. Это создает эффект, при котором СК перестает быть даже приблизительно прямоугольной, в связи с чем навигационная система не способна корректно определять положение подводного аппарата. В связи с этим при навигации в полярных районах применяют повернутую (квазигеографическую) систему координат [4].

Встает вопрос о модернизации алгоритма для случая средних широт, учитывая систему перехода к квазигеографической СК. Блок-схема алгоритма для случая высоких широт, представленная на рисунке 3, построена на основе аналитического решения математической модели БИНС ПА для высоких широт, которая аналогична системе для случая средних широт, но учитывает правила перехода из географических координат в квазикоординаты.

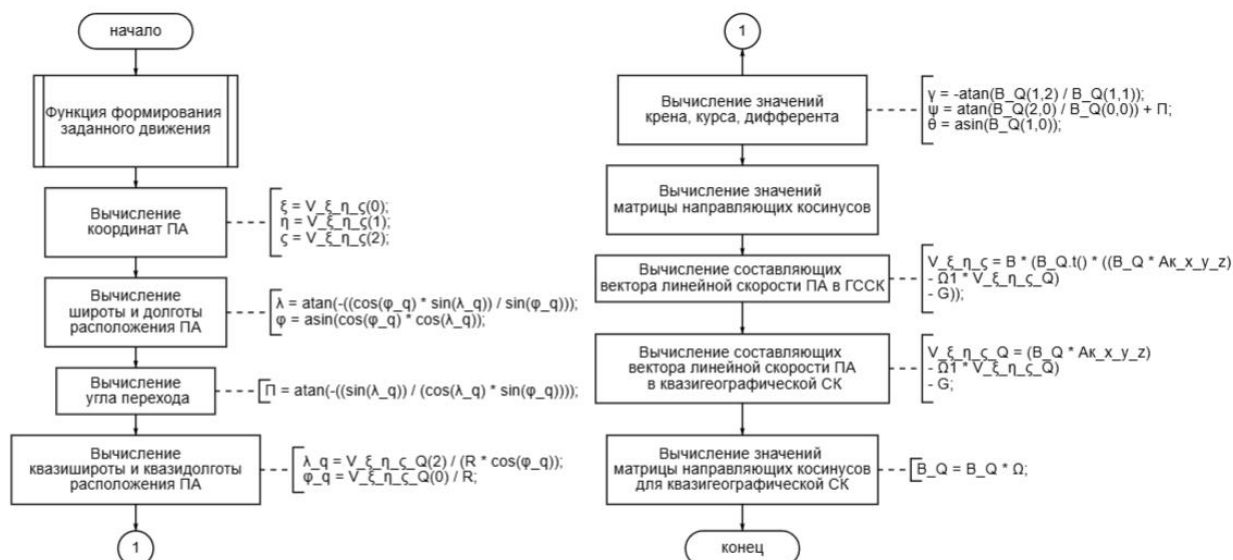


Рисунок 3 – Блок-схема последовательного вычисления правых частей ОДУ для случая высоких широт

Заключение

Тестирование итоговой реализации алгоритма на языке программирования C++ с использованием библиотеки «Armadillo» для эффективной реализации вычислений операций линейной алгебры проведено путём сравнения результатов консольного приложения с эталонной MATLAB/Simulink-моделью, приведенной в [3]. Тестирование подтвердило корректность моделирования: незначительные расхождения связаны с формальными особенностями вывода чисел, а динамика ключевых параметров (углы ориентации, координаты) полностью согласуется между реализациями.

Таким образом, разработанная структурная модель алгоритма удовлетворяет требованиям к системам пространственной ориентации и навигации АНПА: она универсальна, точна, физически обоснована и может служить основой для дальнейшей разработки программного обеспечения.

Список литературы:

1. Инерциальные навигационные системы морских объектов/Д.П. Лукьянов, А.В. Молчанов, А.А. Одинцов, И.Б. Вайсгант / Под ред. Д.П. Лукьянова. – Л.: Судостроение, 1989. 184 с.
2. Журба, Н. А. Организация высокопроизводительной вычислительной среды подводного аппарата / Н. А. Журба // Неделя науки СПбГМТУ-2019 : сборник докладов Всероссийского фестиваля науки «Nauka 0+» : в 2 т. — Т. 1. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГМТУ, 2019. — С. 271–278.
3. Жуков Ю.И., Сиек Ю.Л., Хуторная Е.В. Информационное моделирование пространственной ориентации и навигации подводных роботов: монография. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. — 124 с.
4. Хуторная Е. В., Гневашев Я. О. Разработка приложения для платформенной инерциальной навигационной системы подводных аппаратов // Труды СПбГМТУ. — 2022. — № 3 (октябрь). — С. 68–77.