

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ПРИ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО СУДОХОДСТВА

Евсюков П.С., Андреева О.Н., Ханьчев В.В.

Центральный научно-исследовательский институт «Курс», Кирпичная улица, д. 34а, г. Москва 105187, Российская Федерация, e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru, nauka@concern-agat.ru, mail@kyrs.ru

Цели: Системный анализ функциональности и надежности навигационной системы автономного надводного судна, основное внимание уделяется исследованию и моделированию состояния судна в процессе его движения, включая положение, скорость и угол курса, путем анализа и объединения данных, предоставляемых датчиками освещения обстановки, осуществляется переход от измерений к представлению состояния судна в двумерной навигационной системе координат. Частью анализа является изучение способов преобразования данных из инерциальной системы координат в навигационную, что связано с учетом угловых параметров и нелинейной динамики системы. Исследование акцентируется на оценке эффективности алгоритмов фильтрации данных, таких как сигма-точечный фильтр Калмана (UKF), и их способности адекватно отражать состояние судна в условиях сложных и изменяющихся внешних воздействий. Целью статьи является проведение системного анализа процессов получения и обработки данных навигационной системы, выявление возможных факторов ошибок и разработка подходов, обеспечивающих точность оценки и устойчивость управления судном в различных эксплуатационных условиях.

Методы: Основные результаты работы получены с использованием методов математического анализа и моделирования.

Результаты: Рассмотрена навигационная система автономного судна с акцентом на системный анализ ее основных компонентов и алгоритмов. Уточнена модель движения в навигационной системе координат, основанная на данных об ускорении и угловой скорости, предоставляемых инерциальными датчиками. Показана целесообразность преобразования измерений через матрицу поворота, использующую угол курса, что позволило снизить ошибки и улучшить представление параметров движения. Проанализирована эффективность применения сигма-точечного фильтра Калмана (UKF) в условиях нелинейности и внешних возмущений, подтверждена его способность обеспечить устойчивую и точную оценку состояния судна.

Выводы: Предложенная модель движения с использованием сигма-точечного фильтра Калмана (UKF) объединения сенсорных данных для повышения навигационной безопасности.

Ключевые слова: Объединение данных, автономное судно, навигация, сенсоры, сигма-точечный фильтр Калмана.

SENSOR SYSTEM INFORMATION PROCESSING IN UNMANNED NAVIGATION APPLICATIONS

Evsyukov P.S., Andreeva O.N., Khanychev V.V.

Central Research Institute «Kurs» 34a Kirpichnaya Street, Moscow 105187, Russian Federation, e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru, nauka@concern-agat.ru, mail@kyrs.ru

Objectives: System analysis of the functionality and reliability of the navigation system of an autonomous surface vessel. The main focus is on the study and modeling of the state of the vessel during its motion, including position, speed and heading angle, by analyzing the data provided by ambient light sensors, the transition from measurements to the representation of the state of the vessel in a two-dimensional navigation coordinate system is carried out. Part of the analysis is the study of how to convert the data from the inertial coordinate system to the navigational coordinate system, which is related to the consideration of angular parameters and nonlinear dynamics of the system. In addition, the study focuses on evaluating the effectiveness of data filtering algorithms, such as the unfiltered Kalman filter (UKF), and their ability to adequately reflect the ship's state under complex and changing external influences. The aim of the article is to conduct a systematic analysis of the processes of receiving and processing navigation system data, to identify possible error factors and to develop approaches to ensure the accuracy of estimation and stability of ship control in various operating conditions.

Methods: The main results of the work were obtained using methods of mathematical analysis and modeling.

Results: The navigation system of an autonomous vessel is considered with emphasis on the system analysis of its main components and algorithms. The model of motion in the navigation coordinate system based on acceleration and angular velocity data provided by inertial sensors is specified. The feasibility of transforming the measurements through the rotation matrix using the heading angle is shown, which allowed to reduce errors and improve the representation of motion parameters. The effectiveness of the unfiltered Kalman filter (UKF) in conditions of nonlinearity and external disturbances is analyzed, and its ability to provide stable and accurate estimation of the ship's state is confirmed.

Conclusions: A proposed motion model using Kalman filter (UKF) to combine sensor data to improve navigational accuracy.

Keywords: Data fusion, autonomous vessel, navigation, sensors, Kalman filter.

Введение

Развитие автономных систем управления транспортными средствами стремительно набирает обороты в морской отрасли. Беспилотные надводные транспортные средства представляют значительный интерес как для гражданских, так и для двойного назначения. Во всем мире наблюдается растущий интерес к развитию беспилотного судоходства (БЭС) благодаря их способности решать широкий спектр задач с использованием средств и методов автоматизации [1].

Морская навигация играет ключевую роль в создании новых коммерческих и гражданских судов, в Европе активно развивается проект AEGIS под эгидой ЕС. В России форуме KMZ представил вариант БЭС «Визир-М» в гидрографической конфигурации для использования в гражданской сфере, это комплекс, который можно использовать в качестве носителя гидролокационного оборудования, предназначен для обследования прибрежных зон и дна. Особое внимание беспилотным технологиям уделяют и военные ведомства, в последние годы ВМС Великобритании продемонстрировали интерес к проекту Madfox — морскому демонстрационному образцу, предназначенному для тестирования передовых технологий, используемых в различных военных операциях, включая наблюдение и защиту прибрежных зон. ВМС США, в свою очередь, ведут разработку крупного беспилотного надводного судна, рассматривая его в качестве потенциальной замены традиционным военным кораблям.

Развитие беспилотных технологий на море открывает новые горизонты для навигации, логистики и военных операций, ускоряя интеграцию автономных систем в глобальную морскую индустрию. Для успешного выполнения миссий все автономные БЭС должны обладать высокой позиционной точностью, ситуационной осведомленностью об окружающей среде и синтезом алгоритмов [2], необходимыми для конкретных задач. Эти задачи включают управление скоростью и направлением, планирование оптимального маршрута, а также избегание препятствий и потенциальных опасностей. Отсутствие экипажа обеспечивает значительную экономию ресурсов, эксплуатационные затраты, увеличивает вместимость судов, снижает влияние человеческого фактора на безопасность мореплавания [3].

При минимизации или полном исключении дистанционного управления человеком, успешное выполнение ряда работ потребует от БЭС высокой степени автономности. Специфика судового оборудования связана с тем, что требует от конструктора постоянного снижения массогабаритных показателей и увеличения удельной мощности при обеспечении приемлемой надежности [4]:

- Корпус БЭС и вспомогательные конструктивные элементы.
- Двигательные и энергетические системы.
- Система навигации, наведения и управления.
- Система связи и наземная станция.

Особое внимание уделяется системам навигации и планированию пути [5,6], поскольку их развитие является основой для повышения уровня автономности БЭС. Эти системы должны обеспечивать: точное определение местоположения самого БЭС; восприятие окружающей среды, включая статические и динамические объекты; генерацию безопасных маршрутов для выполнения миссии, по которым БЭС будет надежно перемещаться.

Находясь в море, точные измерения положения, скорости и курса жизненно важны для того, чтобы судно безопасно достигло пункта назначения. Необходимость в точной информации о положении становится критической, когда судно находится в пути. Другие опасности движения судов и водных путей могут повысить сложность маневрирования, которое может потребоваться, и риск несчастных случаев. Таким образом, модуль сбора данных, отвечающий за получение и обработку навигационных данных в реальном времени, является основным компонентом автономной навигационной системы.

В данной статье рассматривается алгоритм объединения данных нескольких датчиков для решения задачи навигации БЭС на основе технологии сигма-точечного фильтра Калмана (UKF) и численных методов фильтрации [7,8]. Предложенный алгоритм обрабатывает данные от разных типов датчиков: (инерциального измерительного блока (IMU), ГЛОНАСС (GPS), электронного компаса и др). В результате достигается значительное улучшение точности навигационных данных, необходимых для эксплуатации БЭС в реальных условиях при неопределенностях с интеграцией в систему АИС [9].

Материалы и методы

Движения БЭС изменяются во времени, что требует динамического обновления состояния навигационной системы на основе поступающих навигационных данных. Эти данные включают в себя позицию p , скорость v и угол курса θ , которые описываются дискретной моделью состояния системы в двумерной навигационной системе координат. Динамическое обновление позволяет учитывать изменения параметров системы в реальном времени, обеспечивая высокую точность и надежность навигационных расчетов [10]. Для вычисления моделей навигационных данных используются ускорение a и угловая скорость ω , которые могут измеряться инерциальными датчиками (IMU). Интегрирование ускорений позволяет повысить точность модели движения судна [11], что приводит к следующему описанию его динамики [12]:

Обновление позиции:

$$p(k) = p(k-1) + T \cdot v(k-1) + \frac{1}{2}T^2 \cdot a(k-1) \quad (1)$$

Обновление скорости:

$$v(k) = v(k-1) + T \cdot a(k-1) \quad (2)$$

Обновление угла курса:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + T \cdot \omega(k) \quad (3)$$

где: $p(k)$ — позиция судна в момент времени k ;

$v(k)$ — линейная скорость судна;

$\theta(k)$ — угол курса;

$a(k)$ — ускорение, измеряемое IMU;

$\omega(k)$ — угловая скорость, определяющая изменение курса;

T — шаг дискретизации.

Индексы k и $k-1$ указывают на текущий и предыдущий моменты времени соответственно.

Уравнения (1)–(3) можно рассматривать как модели перехода состояний, где p , v и θ представляют собой состояния системы, подлежащие оценке с помощью фильтра сигма-точек Калмана. Следовательно, вектор состояния x , содержащий необходимые данные, можно определить следующим образом:

$$x = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ v_x \\ v_y \\ \theta \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

где p_x и p_y — координаты;

v_x и v_y — скорости;

θ — угол курса БЭС.

С момента запуска БЭС его бортовой инерциальный измерительный блок начинает регистрировать параметры движения судна: акселерометр измеряет линейные ускорения, а гироскоп угловую скорость. Обычно ускорения, предоставляемые IMU, заданы в инерциальной системе координат, которая приближенно совпадает с системой корпуса судна. Однако остальные навигационные параметры представлены в навигационной системе координат.

Следовательно, для согласования данных необходимо преобразовать измерения IMU из инерциальной системы в навигационную с помощью матрицы поворота, учитывающей текущий угол курса судна:

$$\begin{bmatrix} a_{nx} \\ a_{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ix} \\ a_{iy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Угол курса, который можно получить с компаса, представляет собой положительный (по часовой стрелке) угол относительно северного направления. Следовательно, против часовой стрелки угол поворота от инерциальной рамки (i-frame) к навигационной рамке (n-frame) равен углу курса:

$$\begin{bmatrix} a_{nx}(k) \\ a_{ny}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta(k) & -\sin \theta(k) \\ \sin \theta(k) & \cos \theta(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{ix}(k) \\ a_{iy}(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Можно наблюдать, что преобразование между системами координат приводит к нелинейности системы. В этом случае для точной оценки состояния используется сигма-точечный фильтр Калмана (UKF) [7,8].

Модель измерений системы

Система управления, навигации и гиросtabilизации (GNC) получает абсолютные измерения положения и курса БЭС с ГЛОНАСС- и электронного магнитного компаса. Абсолютные измерения сопровождаются случайным шумом, который в руководствах датчиков описан как среднеквадратическая ошибка (RMS). Среднеквадратическая ошибка означает, что с вероятностью 68% измерение находится в пределах погрешности от истинного значения и в два раза больше этого значения с вероятностью 95%. Таким образом, модель сенсора GPS можно определить с аддитивным шумовым компонентом как:

$$p_o = p_i + n_g \quad (8)$$

где: p_o измеренная позиция судна по данным GPS;

p_i истинная позиция судна в навигационной системе координат;

n_g аддитивный шум, моделирующий ошибки GPS, вызванные атмосферными возмущениями, задержками сигналов, многолучевым распространением и внутренними погрешностями приемника.

Основными источниками ошибок магнитного измерения являются искажения магнитного поля Земли от близлежащих ферромагнитных материалов. Мягкие железные искажения изменяют форму магнитного поля, искажая его с идеального круга до эллипса. Это можно выразить следующим уравнением:

$$\theta_o = \theta_i + v_h \quad (9)$$

где: θ_i — истинное значение курса;

θ_o — измеренное значение курса;

v_h — аддитивный шум.

Модель измерений может быть записана в виде:

$$z(k) = \begin{bmatrix} p(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_g(k) \\ n_h(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

где: $p(k)$ — измеренные координаты положения,

$\theta(k)$ — измеренный курс;

$n_g(k)$ и $n_h(k)$ — шумы, связанные с координатами и курсом соответственно.

С учетом уравнения наблюдений в фильтре Калмана [13], уравнение измерений принимает вид:

$$z(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x(k) \\ p_y(k) \\ n_x(k) \\ n_y(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix} + n(k) \quad (11)$$

где: $n(k)$ — аддитивный шум измерений, который считается белым шумом с нулевым средним и стандартными отклонениями r_g и r_h .

Данный подход позволяет учитывать и компенсировать шумы и искажения в измерениях, что повышает точность определения курса и координат.

Ковариация шума измерений v определяется как:

$$R = \text{cov}(v) = \begin{bmatrix} r_g^2 & 0 & 0 \\ 0 & r_g^2 & 0 \\ 0 & 0 & r_h^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Сложности морской среды

Морская среда характеризуется неопределенностью и сложностью для навигации БЭС. Основные факторы, вызывающие смещение положения, включают: приливные течения, ветер и волны.

Эти факторы вызывают дрейф и отклонение судна от курса, делая траекторию сложной и нелинейной и требующие решения терминальной задачи движения [14], так как траектория БЭС не может быть просто представлена прямой линией или дугой фиксированного радиуса.

Роль нелинейных фильтров

Стандартный фильтр Калмана (KF) предполагает линейность системы и обычно использует приближение, игнорируя нелинейности при малых изменениях курса на каждом временном шаге. Однако такое упрощение может привести к значительным ошибкам, особенно в случае, когда траектория БЭС отклоняется от прямолинейного пути.

На основе измерений модель наблюдения описывается тем же линейным уравнением, что и уравнение (11). Для n -мерной случайной величины x со средним значением m и ковариационной матрицей P , сигма-точечный фильтр Калмана (UKF) использует несмещенное преобразование (Unscented Transformation) для формирования набора из $2n+1$ взвешенных точек, называемых сигма-точками. Алгоритм UKF также состоит из этапов прогноза и обновления, аналогично классическому фильтру Калмана (KF).

В автономной навигационной системе с вышеописанной динамической и измерительной моделью среднее значение и ковариация требуемых навигационных данных вычисляются с использованием следующих шагов [15]:

Шаг 1: Формирование $2n + 1$ сигма-точек вокруг состояния x на предыдущем шаге ($n = 5$, где размер вектора состояния x равен 5) с использованием уравнений (13)–(15):

$$\chi_0(k-1) = m(k-1) \quad (13)$$

$$\chi_i(k-1) = m(k-1) + \sqrt{n+\lambda} \cdot \sqrt{P_i(k-1)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (14)$$

$$\chi_{i+n}(k-1) = m(k-1) - \sqrt{n+\lambda} \cdot \sqrt{P_i(k-1)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (15)$$

где n — размерность вектора состояния (в данном случае $n = 5$);

$x(k)$ — вектор состояния системы на шаге k ;

$m(k)$ — апостериорное среднее состояние (оценка состояния на шаге k);

$P(k)$ — ковариационная матрица состояния на шаге k ;

$\chi_i(k)$ — сигма-точки;

λ — регулирует расхождения сигма-точек вокруг апостериорного состояния;

α — параметр, контролирующий расхождение сигма-точек;

κ — параметр, обеспечивающий дополнительное расхождение точек;

β — параметр, задающий априорные знания о распределении шума;

W_i^m, W_i^c — веса сигма-точек для расчета среднего состояния и ковариации, связанные с каждой сигма-точкой, вычисляются следующим образом:

$$W_0^m = \frac{\lambda}{n+\lambda} \quad (16)$$

$$W_0^c = \frac{\lambda}{n+\lambda} + (1 - \alpha^2 + \beta) \quad (17)$$

$$W_i^m = W_i^c = \frac{1}{2(n+\lambda)}, \quad i = 1, \dots, 2n \quad (18)$$

Параметры α и κ определяют распределение сигма-точек вокруг среднего значения, а β описывает дополнительную информацию о распределении данных. Оптимальное значение $\beta = 2$ для гауссовских распределений.

Шаг 2: Прогнозирование сигма-точек через динамическую модель:

$$\hat{\chi}_i(k) = f(\chi_i(k-1)), \quad i = 0, \dots, 2n \quad (19)$$

Шаг 3: Вычисление предсказанного среднего значения $m^-(k)$ и предсказанной ковариации $P^-(k)$. Эти параметры вычисляются путем умножения каждого веса на соответствующую сигма-точку следующим образом:

$$m^-(k) = \sum_{i=0}^{2N} W_i^m \hat{\chi}_i(k) \quad (20)$$

$$P^-(k) = \sum_{i=0}^{2N} W_i^c (\hat{\chi}_i(k) - m^-(k))(\hat{\chi}_i(k) - m^-(k))^T + Q(k-1) \quad (21)$$

где N — размерность расширенного пространства состояний, которая равна:

$$N = N_x + N_w + N_v$$

N_x — размерность исходного пространства состояний, которая равна n ;

N_w и N_v — размерности белого шума w и v , соответственно.

Для линейной модели наблюдений сигма-точки на этапе коррекции не требуются. Это снижает вычислительные затраты и повышает точность алгоритма.

Коэффициент усиления Калмана, используемый для коррекции априорного состояния и уменьшения среднеквадратической ошибки, рассчитывается по следующему уравнению:

$$K(k) = P^-(k)H^T S(k)^{-1} \quad (22)$$

где: $P^-(k)$ — априорная ковариация состояния системы на шаге k ;

H^T — транспонированная матрица наблюдения, $S(k)^{-1}$ — обратная матрица ковариации измерений $S(k)$.

Уравнение для ковариации измерений $S(k)$:

$$S(k) = HP^-(k)H^T + R \quad (23)$$

где: $HP^-(k)H^T$ — модель ковариации измерений, основанная на априорной оценке состояния и связи между состоянием и измерениями.

R — ковариация шума измерений.

Оптимальная оценка системы навигации

Оптимальные оценки $\hat{x}(k)$ и $P(k)$ обновляются с использованием коэффициента усиления Калмана, как показано в следующих уравнениях:

Оценка состояния:

$$\hat{x}(k) = \hat{x}^-(k) + K(k)[z(k) - H\hat{x}^-(k)] \quad (24)$$

где: $\hat{x}(k)$ — оптимальная оценка состояния системы на шаге k , после коррекции на основе измерений;

$\hat{x}^-(k)$ — априорная оценка состояния (до коррекции);

$K(k)$ — коэффициент усиления Калмана на шаге k ;

$z(k)$ — вектор измерений, полученных на шаге k ;

H — матрица наблюдения, отображает зависимость между состоянием системы и измерениями.

Обновленная ковариация ошибки:

$$P(k) = (I - K(k)H)P^-(k) \quad (25)$$

Моделирование алгоритма объединения данных из нескольких сенсоров на основе UKF

Для моделирования навигации БЭС была использована миссия обхода путевых точек на карте среды. БЭС рассчитывает расстояние и азимут до следующей точки и движется к ней, пока не достигнет зоны допуска вокруг точки. Условие допуска определено как:

$$|p_{USV} - p_{wp}| = \sqrt{(p_{xUSV} - p_{xwp})^2 + (p_{yUSV} - p_{ywp})^2} < d \quad (26)$$

где: $p_{USV} = (p_{xUSV}, p_{yUSV})$ — текущая позиция БЭС;

$p_{wp} = (p_{xwp}, p_{ywp})$ — координаты целевой путевой точки;

d — заранее заданный радиус зоны допуска.

Логика управления БЭС

Направление движения корректируется в зависимости от разницы между текущим курсом (heading) и азимутом (bearing):

– Если $heading - bearing < \omega * T$:

БЭС поворачивает по часовой стрелке с угловой скоростью ω :

$$heading = heading + \omega * T$$

– Если $heading - bearing > \omega * T$:

БЭС поворачивает против часовой стрелки:

$$heading = heading - \omega * T$$

– Если $heading - bearing = \omega * T$:

БЭС сохраняет текущее направление:

$$heading = heading$$

где:

- ω — угловая скорость БЭС;
- T — время дискретизации (1 с для GPS и компаса).

Таблица 1: Предопределенные шумы сенсоров для практической среды

Сенсор	Измерение	Смещение	Дисперсия
IMU	Ускорение a_x	0.03 м/с ²	0.004 м/с ²
	Ускорение a_y	0.02 м/с ²	0.004 м/с ²
	Скорость поворота ω	0.28°/с	0.033°/с ²
GPS	Позиция p_x	0	8 м ²
	Позиция p_y	0	7 м ²
Электронный компас	Курс ψ	0	1°

Таблица 2: Среднеквадратичные ошибки (СКО) для различных методов и скоростей

Метод	СКО (0.5 м/с)	СКО (0.3 м/с)	СКО (0.15 м/с)	Единицы
UKF позиция p_x	4.9720	4.7460	3.8618	м ²
UKF позиция p_y	4.4747	4.2782	3.7013	м ²
GPS позиция p_{gpsx}	66.6812	56.5433	63.4131	м ²
GPS позиция p_{gpsy}	51.0834	48.0087	48.4819	м ²
UKF курс ψ	0.1109	0.0926	0.0892	град ²
Компас ψ_c	0.9261	0.9469	1.0015	град ²

Результаты и их обсуждение

Сценарий моделирования: траектория с водными потоками и препятствиями, влияющие на траекторию и направление движения беспилотного судна, максимальное значение приливного потока достигает 0.7 м/с при подъеме и 1.0 м/с при спаде. Основными компонентами течений являются скорость и направление. В рамках симуляции предполагается постоянный поток с заданной скоростью v вдоль направления течения, что вызывает дрейф позиции БЭС, для вычисления скорости БЭС относительно береговой основы:

$$\begin{pmatrix} v_{rx} \\ v_{ry} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{ux} + v_c \cdot \cos \alpha \\ v_{uy} + v_c \cdot \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (27)$$

где: v_{rx} v_{ry} , v_{ux} v_{uy} компоненты скорости;

v_c скорость течения воды (или другой внешней среды, действующей на БЭС);

α угол направления течения, уравнение позволяет учитывать движение БЭС и внешние факторы.

Фактическая длина карты составляет до 800 м * 800 м в этой симуляции. Задача БЭС — следовать к конечной точке (800, 800 м) от начальной точки (0, 0 м), следуя прямой траектории (рисунок 1).

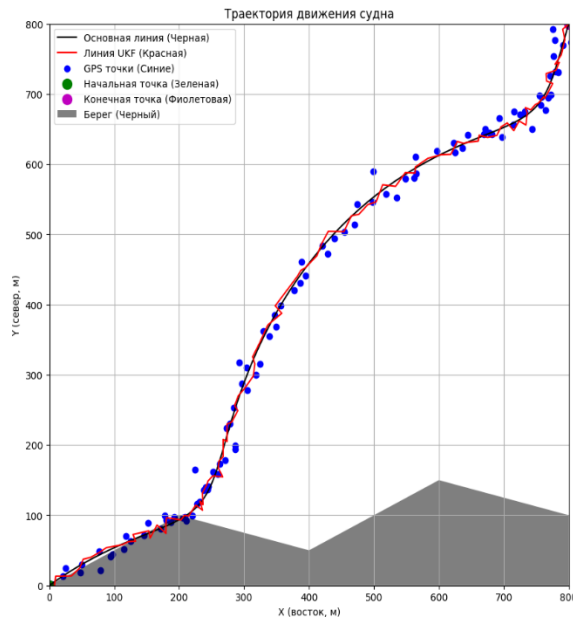


Рисунок 1. Моделирование сценария, объединения данных и фильтрации с системы освещения обстановки.

Планируемая прямолинейная траектория изменяется под воздействием водного течения и обхода препятствий с использованием объединения данных с сенсорных устройств освещения обстановки. Чем выше скорость потока, тем большее влияние он оказывает, что приводит к дрейфу от заданного пути. Представление начального состояния системы:

$$x(1) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.5 \\ -0.866 \\ 150 \end{pmatrix}^T \quad (28)$$

где: $x(1)$ — вектор состояния БЭС в начальный момент времени.

Начальное состояние задает исходные параметры для вычислений в контексте моделирования и вычисления отклонений движения от идеальной траектории в зависимости от воздействия внешних потоков.

При моделировании БЭС, выполнило все задачи миссии, следуя к заранее заданным конечным точкам, достигло конечной точки в среде с тремя различными скоростями водных течений: 0.5, 0.3 и 0.15 м/с. Смоделированные GPS-измерения представлены синими точками, красные линии показывают траектории, полученные с помощью объединения данных. Предложенный алгоритм на основе сигма-точечного фильтра Калмана продемонстрировал более точные оценки позиций БЭС и уменьшить ошибку от необработанных измерений в реальной времени с воздействием модели водных течений и обхода препятствий. В таблице 2 представлены среднеквадратичные ошибки после того, как БЭС завершил свое движение по траектории движения.

Выводы

Рассмотрено влияние внутренних погрешностей навигационных датчиков на точность навигации беспилотных судов. Для повышения точности определения местоположения были исследованы методы интеграции данных от различных источников и метод их объединения, с целью минимизации влияния шумов (Таблица 1), изучено применение сигма-точечного фильтра Калмана, который демонстрирует эффективность в повышении навигационных данных.

Для модели измерений системы проведены имитационные испытания с добавлением шумов, что позволило оценить эффективность фильтрации и объединения данных с датчиков. Результаты моделирования показали корреляцию между фактическим положением беспилотного судна (БЭС) и предсказанным положением, что повышает точность прогнозирования и навигационную безопасность судна.

Список литературы

1. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении [Электронное учебное пособие] / Л.Л.Вагущенко -Москва: ОНМА, 2013.-135 с.
2. Дмитриев, С.П. Синтез безопасных траекторий расхождения судов с использованием методов искусственного интеллекта / С.П. Дмитриев, Н.В. Колесов, А.В. Осипов // Судостроение. – 2000. – №3. – С. 39-42.
3. Титов, А.В. Перспективы технологического развития и внедрения безэкипажных судов / А.В. Титов, Л. Баракат // Морские интеллектуальные технологии. – 2018.
4. Захаров, А.А. Формализованная оценка безопасности - универсальный инструмент для снижения риска на транспорте / А.А. Захаров // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2006. – №3. – С. 66–68.
5. Лю, В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) / В. Лю // Математика и математическое моделирование. – 2018. – №1. – С. 15–58.
6. Пузачев, А.Н. Использование технических средств для предотвращения столкновений судов / А.Н. Пузачев // учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. – 232 с.
7. Тележкин, В.Ф. Обработка информации с использованием фильтра Калмана в MATLAB SIMULINK/ В.Ф. Тележкин, Б.Б. Саидов // Системы анализа и обработки данных. – 2021.
8. М. В. Куликова, Г.Ю. Куликов, Численные методы нелинейной фильтрации для обработки сигналов и измерений //Вычислительные технологии -Том 21, № 4, 2016
9. Чен, Д. Исследование встраиваемой системы на основе АИС для предотвращения столкновения судов / Д. Чен, К. Дай, Х. Ван, Ж. Моу // Международная конференция по транспортной информации и безопасности.
10. Дэвис, П.В. Компьютерное моделирование морского движения с использованием доменов и арен / П.В. Дэвис, М.Дж. Дав, К.Т. Стокэл // Журнал навигации. - 1980. - Vol. 33. - P. 215-222.
11. N.C. Basjaruddin Hardware simulation of automotive braking system based on fuzzy logic control // Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology. – 2016. – Vol. 7, N 1. – P. 1–6
12. Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления судна 3-е изд., 2020 – 328 с
13. Васильев К.К., Павлыгин Э.Д. Гуторов А.С. Построение траекторий маневрирующих целей на основе сплайнов и фильтра Калмана // Автоматизация процессов управления. – 2016. – № 1 (43). – С. 68–75.
14. Костюков В.А., Маевский А.М., Гуренко Б.В. Математическая модель надводного миникорабля // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3 Ривкин Б.С. е-Навигации - десять лет // Гироскопия и навигация. 2015. №4. С. 173–191.
15. Frogerais P., Bellanger J.-J., Senhadji L. Various ways to compute the continuous-discrete extended Kalman filter. IEEE Trans. Autom. Control, 2012, vol. 57, no. 4, pp. 1000–1004. DOI: 10.1109/TAC.2011.2168129 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6018993>

References

1. Vagushchenko L.L. Modern information technologies in ship navigation [Electronic textbook] / L.L. Vagushchenko -Moscow: ONMA, 2013.-135 pp.
2. Dmitriev, S.P. Synthesis of safe ship divergence trajectories using the artificial intelligence methods / S.P. Dmitriev, N.V. Kolesov, A.V. Osipov // Shipbuilding. - 2000. - №3. - C. 39-42.
3. Titov, A.V. Prospects of technological development and implementation of crewless ships / A.V. Titov, L. Barakat // Marine Intelligent Technologies. - 2018.
4. Zakharov, A.A. Formalized safety assessment - a universal tool for risk reduction in transport / A.A. Zakharov // Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics. - 2006. - №3. - C. 66-68.
5. Liu, W. Methods of path planning in the environment with obstacles (review) / W. Liu // Mathematics and Mathematical Modeling. - 2018. - №1. - C. 15-58.
6. Puzachev, A.N. Use of technical means for the collision prevention of ships / A.N. Puzachev // textbook. - 2nd edition, revision and addendum - Vladivostok: Maritime State University, 2011. - 232 с.
7. Telezhkin, V.F. Information processing using Kalman filter in MATLAB SIMULINK / V.F. Telezhkin, B.B. Saidov // Data analysis and processing systems. - 2021.
8. M.V. Kulikova, G.Y. Kulikov, Numerical Methods of Nonlinear Filtering for Signal and Measurement Processing // Computing Technologies - Vol. 21, No. 4, 2016

9. Chen, D. Research of an AIS-based embedded system for ship collision avoidance / D. Chen, K. Dai, X. Wang, J. Mou // International Conference on Transportation Information and Security.
10. Davis, P. W. Computer modeling of maritime traffic using domains and arenas / P. W. Davis, M. J. Dove, K. T. Stoeckel // Journal of Navigation. - 1980. - Vol. 33. - P. 215-222.
11. N.C. Basjaruddin Hardware simulation of automotive braking system based on fuzzy logic control // Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology. - 2016. - Vol. 7, N 1. - P. 1-6
12. Vagushchenko L.L., Tsymbal N.N. Systems of Automatic Ship Control 3rd ed., 2020 - 328 c
13. Vasiliev K.K., Pavlygin E.D., Gutorov A.S. Trajectory construction of maneuvering targets on the basis of splines and Kalman filter // Automation of control processes. - 2016. - № 1 (43). - C. 68-75.
14. Kostyukov, V.A.; Maevskiy, A.M.; Gurenko, B.V. Mathematical model of the surface miniship (in Russian) // Engineering bulletin of Don. - 2015. - No. 3 Rivkin, B.S. e-Navigation - ten years // Gyroscopy and Navigation. 2015. №4. C. 173-191.
15. Frogerais P., Bellanger J.-J., Senhadji L. Various ways to compute the continuous-discrete extended Kalman filter. IEEE Trans. Autom. Control, 2012, vol. 57, no. 4, pp. 1000-1004. DOI: 10.1109/TAC.2011.2168129 URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6018993>