

АППАРАТНОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БИНС МОБИЛЬНОГО РОБОТА С МЕХАНИЗМОМ КОРРЕКЦИИ ПО НУЛЕВОЙ СКОРОСТИ

Песов В.М., Трипольский П.Э., Монахов И.С

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», e-mail: tripolski@mirea.ru

Одним из вариантов проектирования навигационной системы мобильного робота является использование бесплатформенной навигационной системы (БИНС) с механизмом коррекции по нулевой скорости (Zero-velocity Update – ZUPT). Данный подход может обеспечивать хорошую точность навигации мобильного робота при сильно зашумлённых измерениях. В методах пешеходной навигации у БИНС отсутствует связь с системой управления (СУ) объекта навигации, что обуславливает сложности в применении метода ZUPT-коррекции. В роботах же СУ присутствует, поэтому БИНС может получать явную информацию о динамическом состоянии объекта, что многократно увеличивает вероятность верного определения фазы покоя. В основе предлагаемого алгоритма работы БИНС лежат три базовых принципа: математическая модель робота как динамической системы основана на законах классической механики Ньютона; использование расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filter – EKF) для комплексирования данных и оценки состояния системы; применение метода коррекции навигационных данных ZUPT для уменьшения ошибки определения координат и ориентации объекта. Выполнение ZUPT-коррекции предполагает решение задач детектирования момента остановки (нулевой скорости) робота и непосредственно коррекции параметров состояния робота. Для детектирования нулевой скорости предлагается использовать сигнал от СУ робота об остановке. После достоверного определения момента остановки производится коррекция вектора состояния робота и корректировка ковариационной матрицы состояния. В работе представлен алгоритм функционирования БИНС мобильного робота и функциональная схема БИНС. Для проверки работоспособности алгоритма работы БИНС мобильного робота разработан измерительный модуль БИНС робота, в состав которого входят сенсоры низкого класса точности. Приведены результаты экспериментальных исследований синтезированного алгоритма работы БИНС, проведённых с использованием разработанного измерительного модуля, для движения и навигации мобильного робота по разным траекториям. В ходе экспериментальных исследований выяснено, что разработанный алгоритм при использовании измерений с разработанного измерительного модуля позволяет определять местоположение робота с ошибкой, не превышающей 5% от длины пройденного пути.

Ключевые слова: БИНС, инерциальная навигация, навигация мобильного робота, расширенный фильтр Калмана, ZUPT.

HARDWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT FOR SINS OF A MOBILE ROBOT WITH ZERO-VELOCITY UPDATE CORRECTION

Pesov V.M., Tripolskiy P.E. Monakhov I.S

MIREA – Russian Technological University, e-mail: tripolski@mirea.ru

One of the design options for a mobile robot's navigation system is to use a free-of-charge navigation system (BINS) with a Zero-velocity Update (ZUPT) mechanism. This approach can provide good navigation accuracy for a mobile robot with highly noisy measurements. In pedestrian navigation methods, the BINS has no connection with the control system (CS) of the navigation object, which makes it difficult to apply the ZUPT correction method. In robots, the CS is present, so the BEANS can receive explicit information about the dynamic state of the object, which greatly increases the probability of correctly determining the resting phase. The proposed BINS algorithm is based on three basic principles: the mathematical model of the robot as a dynamic system is based on the laws of classical mechanics of Newton; the use of the Extended Kalman Filter (EKF) for data aggregation and assessment of the state of the system.; the application of the ZUPT navigation data correction method to reduce the error in determining the coordinates and orientation of the object. Performing ZUPT correction involves solving the problems of detecting the moment of stopping (zero speed) of the robot and directly correcting the parameters of the robot's condition. To detect zero speed, it is proposed to use a stop signal from the CS of robot.

After reliably determining the moment of stopping, the robot's state vector is corrected and the covariance matrix of the state is adjusted. The paper presents an algorithm for the functioning of the BINS of a mobile robot and a functional scheme of the BINS. To test the operability of the mobile robot's BINS algorithm, the robot's BINS measuring module (MM) has been developed, which includes sensors of a low accuracy class. The results of experimental studies of the synthesized BINS operation algorithm conducted using the developed measuring module for the movement and navigation of a mobile robot along different trajectories are presented. In the course of experimental research, it was found that the developed algorithm, when using measurements from the one developed by the developed measuring module, allows determining the location of the robot with an error not exceeding 5% of the length of the traveled path.

Keywords: SINS, inertial navigation, mobile robot navigation, extended Kalman filter, ZUPT.

1 Введение

В настоящее время одной из основных проблем, возникающих при управлении движением автономных роботов, является определение местоположения и ориентации робота в пространстве. Для эффективного решения этой задачи часто применяются визуальная навигация, спутниковые навигационные системы (СНС), навигация с использованием маяков, ультразвуковых и лазерных сенсоров. Однако зачастую роботы функционируют в сложных информационных условиях, что не позволяет использовать данные методы определения местоположения. Для решения этой проблемы используют инерциальные системы навигации. Однако датчики, на которых строятся данные системы, имеют относительно низкую точность, и при интегрировании данных с них образуется ошибка, которая со временем накапливается, что не позволяет роботу осуществлять длительное движение автономно. Поэтому задача создания бесплатформенной инерциальной навигационной системы, позволяющей точно определять местоположение и ориентацию робота в пространстве, является весьма актуальной.

В настоящее время исследования в области разработки БИНС проводятся в двух направлениях: навигация технических средств (автомобилей, летательных аппаратов, роботов и т.д.) [1,2,3,4,14] и пешеходная навигация, которая предназначена для определения местоположения человека на местности [5,6,7,8,15,16]. Во многих работах кроме комплексующих фильтров для увеличения точности БИНС используются различные методы коррекции навигационного решения, такие как коррекция по сигналу СНС и ZUPT-коррекция. Наиболее перспективным из этих методов с точки зрения автономности является метод ZUPT-коррекции, который нашёл широкое применение в пешеходных навигационных системах. Как можно заметить, в работах, посвящённых пешеходной навигации, у БИНС отсутствует связь с системой управления (СУ) объекта навигации, поскольку СУ как таковой попросту нет, что обуславливает сложности в применении метода ZUPT-коррекции. В работах же СУ присутствует, поэтому БИНС может получать явную информацию о динамическом состоянии объекта, что многократно увеличивает вероятность верного определения фазы покоя. По этой причине ZUPT-коррекция имеет высокий потенциал применения в БИНС роботов, особенно шагающих, таких как «гексаподы» или антропоморфные роботы. В связи с этим, был разработан алгоритм работы БИНС мобильного робота на основе ЕKF с применением ZUPT-коррекции. Также был разработан измерительный модуль, позволяющий оценить работоспособность синтезированного алгоритма БИНС.

2 Алгоритм работы БИНС мобильного робота

Схемы построения БИНС определяются тем, какие измерители используются, сколько их и как они расположены. Как правило, выделяют три типовые схемы БИНС в зависимости от используемых датчиков [9, 10]:

- 1) на акселерометрах;
- 2) на акселерометрах и датчиках угловой скорости (ДУС);
- 3) на акселерометрах, ДУС и магнитометрах.

Часто в эти схемы включается барометр, который позволяет с большей точностью определить высоту объекта, однако при решении навигационных задач на плоскости он не требуется. Разработанный алгоритм предназначен для БИНС, построенной по третьей схеме.

В основе предлагаемого алгоритма работы БИНС лежат три базовых принципа:

- математическая модель робота как динамической системы основана на законах классической механики Ньютона;
- для комплексирования данных и оценки состояния системы используется расширенный фильтр Калмана;
- для уменьшения ошибки определения координат и ориентации объекта применяется метод коррекции навигационных данных ZUPT.

Все формулы в данной работе выведены для инерциальной и связанной систем координат (СК), которые являются правыми (рис. 1).

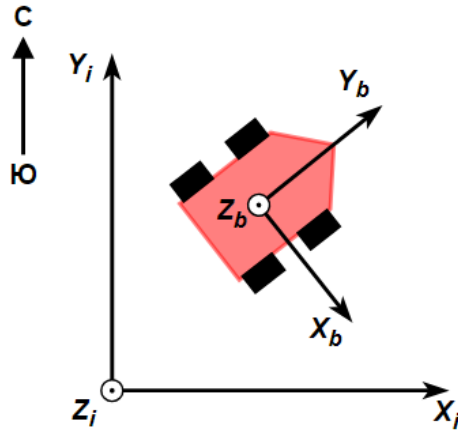


Рисунок 1 – Инерциальная местная ($O_i X_i Y_i Z_i$) и связанная ($O_b X_b Y_b Z_b$) системы координат

2.1 Структура расширенного фильтра Калмана

Для оценки вектора состояния системы в алгоритме работы БИНС используется расширенный фильтр Калмана [12,13]. Рассмотрим математическую модель робота как динамической системы. Вектор состояния динамической системы имеет вид:

$$\vec{x} = [x, y, z, v_x^i, v_y^i, v_z^i, a_x^i, a_y^i, a_z^i, \omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b, \gamma, \psi, \theta]^T, \quad (1)$$

где x, y, z – координаты робота в инерциальной СК;

v_x^i, v_y^i, v_z^i – проекции вектора скорости робота на оси инерциальной СК;

a_x^i, a_y^i, a_z^i – проекции вектора ускорения робота на оси инерциальной СК;

$\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$ – проекции абсолютной угловой скорости робота на оси связанной СК;

γ, ψ, θ – углы ориентации робота (крен, курс и тангаж соответственно).

Модель динамической системы описывается уравнениями (2-6). Делается допущение о том, что ускорение постоянно в течение малого промежутка времени:

$$\begin{cases} a_{x,t}^i = a_{x,t-1}^i \\ a_{y,t}^i = a_{y,t-1}^i \\ a_{z,t}^i = a_{z,t-1}^i \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} v_{x,t}^i = v_{x,t-1}^i + a_{x,t-1}^i \cdot dt \\ v_{y,t}^i = v_{y,t-1}^i + a_{y,t-1}^i \cdot dt \\ v_{z,t}^i = v_{z,t-1}^i + a_{z,t-1}^i \cdot dt \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_t = x_{t-1} + v_{x,t-1}^i \cdot dt + \frac{a_{x,t-1}^i \cdot dt^2}{2} \\ y_t = y_{t-1} + v_{y,t-1}^i \cdot dt + \frac{a_{y,t-1}^i \cdot dt^2}{2} \\ z_t = z_{t-1} + v_{z,t-1}^i \cdot dt + \frac{a_{z,t-1}^i \cdot dt^2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Также допускается, что угловая скорость в течение малого промежутка времени не изменяется:

$$\begin{cases} \omega_{x,t}^b = \omega_{x,t-1}^b \\ \omega_{y,t}^b = \omega_{y,t-1}^b \\ \omega_{z,t}^b = \omega_{z,t-1}^b \end{cases} \quad (5)$$

Углы крена, курса и тангажа находятся из следующих соотношений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_t = \gamma_{t-1} + \dot{\gamma}_{t-1} \cdot dt = \\ \gamma_{t-1} + \left(\omega_{y,t-1}^b + tg(\theta_{t-1}) \cdot \left(\omega_{x,t-1}^b \cdot \sin(\gamma_{t-1}) - \omega_{z,t-1}^b \cdot \cos(\gamma_{t-1}) \right) \right) \cdot dt \\ \psi_t = \psi_{t-1} + \dot{\psi}_{t-1} \cdot dt = \\ \psi_{t-1} + \left(\omega_{x,t-1}^b \cdot \sin(\gamma_{t-1}) - \omega_{z,t-1}^b \cdot \cos(\gamma_{t-1}) \right) \cdot dt \\ \theta_t = \theta_{t-1} + \dot{\theta}_{t-1} \cdot dt = \\ \theta_{t-1} + \left(\omega_{x,t-1}^b \cdot \cos(\gamma_{t-1}) + \omega_{z,t-1}^b \cdot \sin(\gamma_{t-1}) \right) \cdot dt \end{array} \right. \quad (6)$$

Модель наблюдения описывается семью уравнениями (12, 13), которые связывают параметры вектора состояния с измеряемыми величинами.

Вектор измерений имеет следующий вид:

$$\vec{z} = [n_{x,acc}^b, n_{y,acc}^b, n_{z,acc}^b, \omega_{x,avs}^b, \omega_{y,avs}^b, \omega_{z,avs}^b, \psi_{mag}]^T, \quad (7)$$

где $n_{x,acc}^b, n_{y,acc}^b, n_{z,acc}^b$ – измерения акселерометра;
 $\omega_{x,avs}^b, \omega_{y,avs}^b, \omega_{z,avs}^b$ – измерения ДУС;
 ψ_{mag} – курс, найденный по данным магнитометра.

Ускорения из вектора состояния связаны с измеряемыми ускорениями следующим образом:

$$\vec{a}^i = C^{bi} \cdot \vec{n}_{acc}^b + \vec{g}, \quad (8)$$

где C^{bi} – матрица перехода от связанных координат к координатам инерциальной СК.

Следовательно,

$$\vec{n}_{acc}^b = (C^{bi})^{-1} \cdot (\vec{a}^i - \vec{g}), \quad (9)$$

$$(C^{bi})^{-1} = C^{ib} = (C^{bi})^T. \quad (10)$$

В силу свойства (10) уравнение (9) может быть записано в виде следующей системы:

$$\begin{cases} n_{x,acc,t}^b = c_{11}a_{x,t}^i + c_{21}a_{y,t}^i + c_{31}a_{z,t}^i + c_{31}g \\ n_{y,acc,t}^b = c_{12}a_{x,t}^i + c_{22}a_{y,t}^i + c_{32}a_{z,t}^i + c_{32}g, \\ n_{z,acc,t}^b = c_{13}a_{x,t}^i + c_{23}a_{y,t}^i + c_{33}a_{z,t}^i + c_{33}g \end{cases} \quad (11)$$

где c_{ij} – элементы матрицы поворота C^{bi} .

Уравнения (11) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} n_{x,acc,t}^b = (\cos(\gamma_t) \cos(\psi_t) + \sin(\gamma_t) \sin(\psi_t) \sin(\theta_t)) \cdot a_{x,t}^i + \\ + (\sin(\gamma_t) \cos(\psi_t) \sin(\theta_t) - \cos(\gamma_t) \sin(\psi_t)) \cdot a_{y,t}^i - \\ - (\cos(\theta_t) \sin(\gamma_t)) \cdot (a_{z,t}^i + g) \\ n_{y,acc,t}^b = \cos(\theta_t) \sin(\psi_t) \cdot a_{x,t}^i + \cos(\theta_t) \cos(\psi_t) \cdot a_{y,t}^i + \\ + \sin(\theta_t) \cdot (a_{z,t}^i + g) \\ n_{z,acc,t}^b = (\cos(\psi_t) \sin(\gamma_t) - \sin(\psi_t) \cos(\gamma_t) \sin(\theta_t)) \cdot a_{x,t}^i - \\ - (\sin(\psi_t) \sin(\gamma_t) + \cos(\gamma_t) \cos(\psi_t) \sin(\theta_t)) a_{y,t}^i \\ + \cos(\theta_t) \cos(\gamma_t) \cdot (a_{z,t}^i + g) \end{cases} \quad (12)$$

Остальные величины из вектора измерения связаны с элементами вектора состояния следующим образом:

$$\begin{cases} \omega_{x,avs,t}^b = \omega_{x,t}^b \\ \omega_{y,avs,t}^b = \omega_{y,t}^b \\ \omega_{z,avs,t}^b = \omega_{z,t}^b \\ \psi_{mag,t} = \psi_t \end{cases} \quad (13)$$

Методика расчёта курса ψ_{mag} по показаниям магнитометра приведена в следующем подразделе.

Последовательность вычислений в одном цикле работы EKF такова:

1. *Инициализация*. В начале работы навигационного алгоритма выполняется инициализация параметров фильтра. Задаются начальные значения вектора состояния, ковариационной матрицы состояния P_0 , ковариационной матрицы входных шумов измерения R и ковариационной матрицы входных шумов системы Q .

Координаты вводятся в соответствии с положением на местности. Угловая и линейные скорости, а также ускорения принимаются равными нулю.

Из следующих соотношений находятся начальные углы крена и тангажа (по ним же производится сброс ошибки ориентации во время ZUPT-коррекции):

$$\theta = \arctg \left(\frac{\bar{n}_{y.acc}^b}{\sqrt{(\bar{n}_{x.acc}^b)^2 + (\bar{n}_{z.acc}^b)^2}} \right), \quad (14)$$

$$\gamma = -\arctg \left(\frac{\bar{n}_{x.acc}^b}{\bar{n}_{z.acc}^b} \right). \quad (15)$$

По начальным углам крена и тангажа находится начальный курс робота, методика расчёта изложена в пункте 2.2. Рассчитывается начальная матрица направляющих косинусов C_0^{bi} . Также вычисляются якобианы F_t и H_t .

2. *Предсказание.* Рассчитывается матрица Якоби F_t . Затем производится предсказание вектора состояния:

$$\hat{\vec{x}}(t|t-1) = \vec{f}(\hat{\vec{x}}(t-1|t-1)). \quad (16)$$

Предсказание пространственной ориентации робота осуществляется численным методом посредством решения уравнения Пуассона:

$$C_t^{bi} = C_{t-1}^{bi} \cdot e^{\Omega_{b,t-1}^{bi} \cdot dt}, \quad (17)$$

$$\Omega_{b,t-1}^{bi} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z^b(t-1|t-1) & \omega_y^b(t-1|t-1) \\ \omega_z^b(t-1|t-1) & 0 & -\omega_x^b(t-1|t-1) \\ -\omega_y^b(t-1|t-1) & \omega_x^b(t-1|t-1) & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

После рассчитывается ковариационная матрица для предсказанного вектора состояния:

$$P(t|t-1) = F_t \cdot P(t-1|t-1) \cdot F_t^T + Q. \quad (19)$$

3. *Коррекция.* Рассчитывается матрица Якоби H_t . Затем вычисляется усиление Калмана:

$$K_t = P(t|t-1) \cdot H_t^T \cdot (H_t \cdot P(t|t-1) \cdot H_t^T + R)^{-1}. \quad (20)$$

Далее по показаниям магнитометра рассчитывается курс робота и корректируется оценка вектора состояния с учётом измерений (делается апостериорная оценка вектора состояния):

$$\hat{\vec{x}}(t|t) = \hat{\vec{x}}(t|t-1) + K_t \left(\vec{z}_t - \vec{h}(\hat{\vec{x}}(t|t-1)) \right). \quad (21)$$

Рассчитывается ковариационная матрица для апостериорной оценки вектора состояния:

$$P(t|t) = (E - K_t \cdot H_t) \cdot P(t|t-1). \quad (22)$$

На этом цикл работы EKF заканчивается, а следующий цикл начинается со 2-го пункта.

2.2 Расчёт курса робота

Для вычисления курса определяются проекции горизонтальной составляющей магнитного поля (МП) Земли на оси X и Y связанной СК, выровненной с плоскостью $Y_i O_i X_i$ (рис. 2).

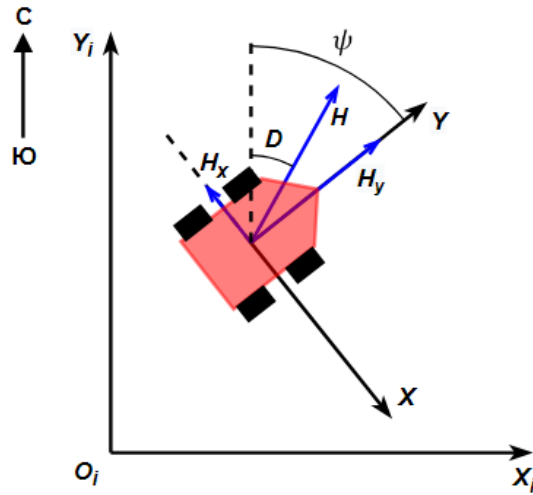


Рисунок 2 – Проекция горизонтальной составляющей вектора напряжённости МП

Проекция горизонтальной составляющей вектора напряжённости МП Земли на оси X и Y вычисляются по следующим формулам:

$$H_y = H_y^b \cdot \cos(\theta) + H_x^b \cdot \sin(\gamma) \sin(\theta) - H_z^b \cdot \cos(\gamma) \sin(\theta), \quad (23)$$

$$H_x = H_x^b \cdot \cos(\gamma) + H_z^b \cdot \sin(\gamma), \quad (24)$$

где H_x, H_y – проекции горизонтальной составляющей МП Земли на оси X и Y связанной СК, выровненной с плоскостью $Y_i O_i X_i$.

Значение курса рассчитывается следующим образом:

$$\psi_{mag} = \begin{cases} \arctg\left(-\frac{H_x}{H_y}\right) + D, & \text{если } H_y > 0 \\ 90^\circ + D, & \text{если } H_y = 0 \text{ и } H_x < 0 \\ -90^\circ + D, & \text{если } H_y = 0 \text{ и } H_x > 0 \\ 180^\circ - \arctg\left(\frac{H_x}{H_y}\right) + D, & \text{если } H_x < 0 \text{ и } H_y < 0 \\ -180^\circ - \arctg\left(\frac{H_x}{H_y}\right) + D, & \text{если } H_x > 0 \text{ и } H_y < 0 \end{cases}. \quad (25)$$

2.3 ZUPT-коррекция

Выполнение ZUPT-коррекции предполагает решение двух задач:

1. Детектирования момента остановки (нулевой скорости) робота.
2. Непосредственно коррекции параметров состояния робота.

Для детектирования нулевой скорости предлагается использовать сигнал от СУ робота об остановке. При поступлении такого сигнала производится проверка на отсутствие внешних сил, действующих на робота, которые приводят его в движение. Проверка заключается в необходимости удовлетворения данных с инерциального измерительного модуля (ИИМ) условиям (26, 27).

$$\left| \sqrt{(n_{x,acc}^b)^2 + (n_{y,acc}^b)^2 + (n_{z,acc}^b)^2} - g \right| < a_{max}^{ZUPT}, \quad (26)$$

$$\sqrt{(\omega_{x,avs}^b)^2 + (\omega_{y,avs}^b)^2 + (\omega_{z,avs}^b)^2} < \omega_{max}^{ZUPT}, \quad (27)$$

где a_{max}^{ZUPT} – пороговое значение модуля отклонения кажущегося ускорения от величины ускорения свободного падения в момент остановки;

ω_{max}^{ZUPT} – пороговое значение модуля вектора угловой скорости в момент остановки.

После достоверного определения момента остановки производится коррекция параметров состояния робота, которая заключается в двух операциях:

а) *Корректировка вектора состояния.* Значения линейных и угловых скоростей, а также ускорения принимаются равными нулю. Таким образом положение и ориентация робота во время остановки не изменяются. Также по формулам (14, 15, 23-25) уточняются значения углов ориентации робота в пространстве.

б) *Корректировка ковариационной матрицы состояния.* Дисперсии линейных и угловых скоростей, а также ускорений принимаются равными нулю. Дисперсии углов ориентации устанавливаются изначальными, а дисперсии координат не изменяются.

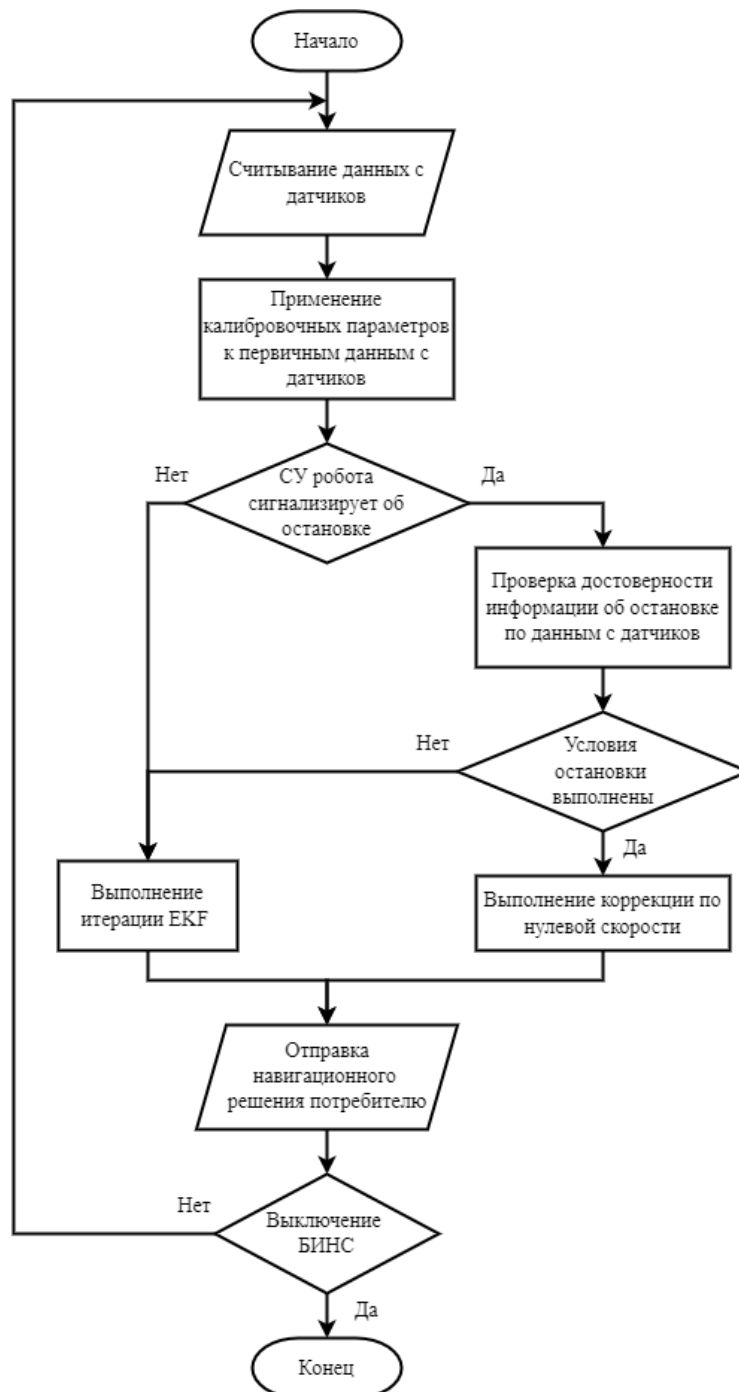


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма работы БИНС мобильного робота

2.4 Описание функционирования разработанного алгоритма БИНС робота

Блок-схема разработанного алгоритма работы БИНС представлена на рисунке 3. В начале производится считывание данных с датчиков, после чего к ним применяются калибровочные параметры. Далее, если СУ робота сигнализирует об остановке, производится проверка данного события и в случае подтверждения выполняется

коррекция по нулевой скорости. Если СУ робота не посылает сигнал об остановке или данные с датчиков не удовлетворяют условиям проверки, то выполняется один цикл расширенного фильтра Калмана. В конце полученное навигационное решение отправляется потребителю. Цикл повторяется до момента выключения навигационной системы.

Функциональная схема БИНС мобильного робота представлена на рисунке 4. В этой схеме наглядно разъясняются процессы, протекающие в вычислительном устройстве БИНС робота.

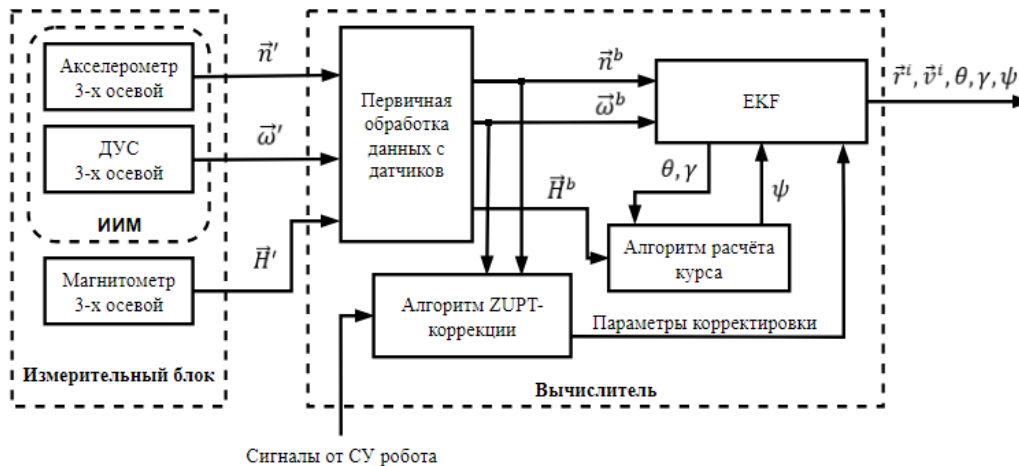


Рисунок 4 – Функциональная схема БИНС мобильного робота

3 Измерительный модуль БИНС мобильного робота

Для проверки работоспособности алгоритма работы БИНС мобильного робота был разработан измерительный модуль БИНС робота. Состав сенсоров ИМ определяется схемой построения БИНС, в данном случае используются три датчика: акселерометр, ДУС и магнитометр (рис. 5).

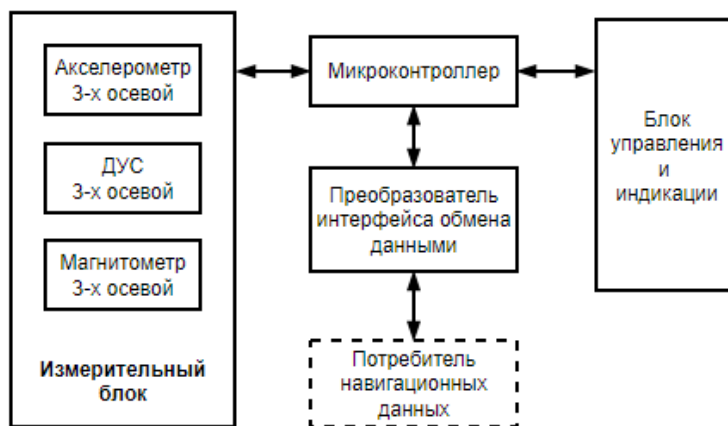


Рисунок 5 – Обобщённая структурная схема ИМ

В состав ИМ БИНС робота входят:

- **Измерительный блок**, в состав которого входят 3-х осевые акселерометр и ДУС, и 3-х осевой датчик магнитного поля;
- **Блок управления и индикации**, в состав которого входят кнопки и переключатели, предназначенные для управления ИМ, а также показывающие состояние ИМ светодиоды;
- **Микроконтроллер**, осуществляющий сбор данных с датчиков, анализ и обработку сигналов с «блока управления и индикации» и выдачу сигналов на его индикаторы, отправку пакетов навигационных данных на преобразователь интерфейса обмена данными;
- **Преобразователь интерфейса обмена данными**, обеспечивающий обмен информацией между микроконтроллером и персональным компьютером (ПК);
- **Потребитель навигационных данных**, в роли которого выступает ПК, на котором записывается лог навигационных данных.

В качестве ИИМ используется модуль GY-521 на базе чипа MPU-6050. Для измерения напряжённости магнитного поля в ИМ используется модуль GY-273 на базе микросхемы QMC5883L. В качестве вычислителя используется отладочная плата STM32 «Blue Pill». Так как потребителем навигационных данных является ПК, то в качестве преобразователя интерфейса обмена данными применяется преобразователь интерфейса USB в интерфейс UART на базе чипа CP2102. Таким образом функциональная схема ИМ БИНС робота имеет вид, представленный на рисунке 6. Внешний вид ИМ БИНС робота в сборе представлен на рисунке 7.

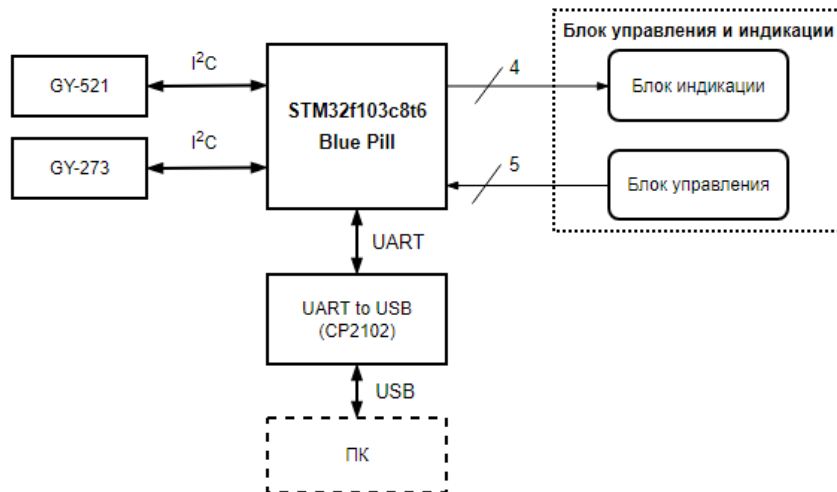


Рисунок 6 – Функциональная схема ИМ БИНС робота

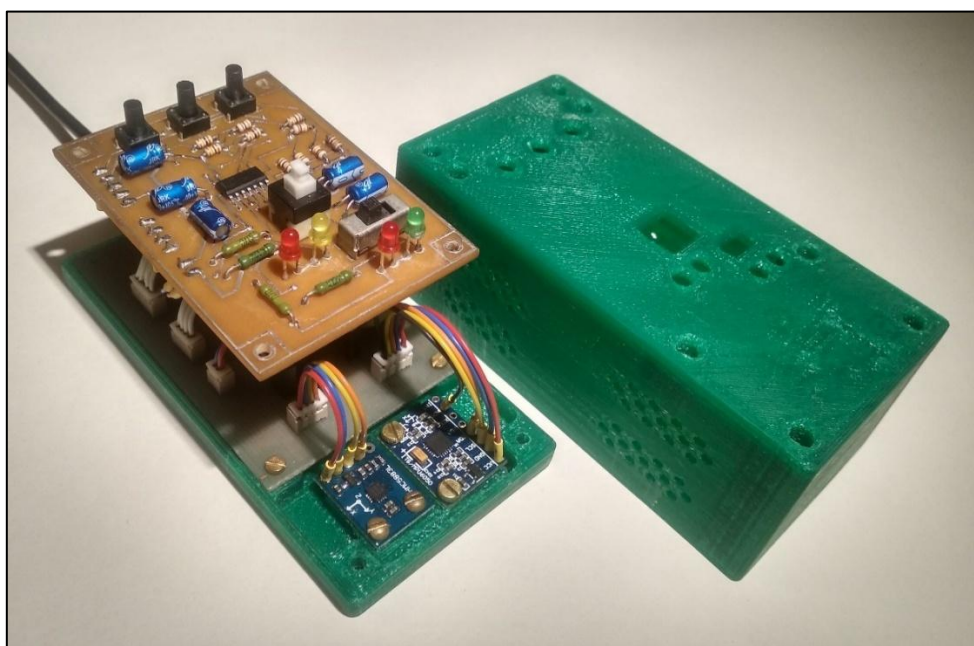


Рисунок 7 – Внешний вид ИМ БИНС мобильного робота

4 Экспериментальные исследования алгоритма работы БИНС мобильного робота

Перед проведением тестов с помощью специальных алгоритмов были определены калибровочные параметры каждого сенсора. Для калибровки акселерометра использовался 6-ти позиционный метод [11, 17, 18]. Ввиду отсутствия специального оборудования, для ДУС производилось компенсирование только смещения нуля. Для построения зависимостей смещения нуля осей ДУС от температуры использовалась методика, изложенная в [19]. Для калибровки сенсорного модуля GY-273 была применена программа «Magneto 1.2».

Для оценки качества разработанного алгоритма работы БИНС робота в программе «Scilab 6.1.0» было написано программное обеспечение (ПО), реализующее разработанный алгоритм навигации, блок схема которого представлена на рисунке 3. На вход данное ПО принимает файл формата «CSV» с логом навигационных данных, а на выходе выдаёт изображение рассчитанной алгоритмом траектории движения робота, на которой

чёрным маркером помечены точки остановки. Также на выходном изображении отмечается эталонная траектория и точки остановки. Кроме того, программа рассчитывает для каждой точки остановки ошибку по оси x (Δx) и y (Δy), ошибку положения (Δr), а также относительную ошибку (ε), равную отношению ошибки по положению к длине пройденного пути (L).

С помощью разработанного ИМ были получены данные для проверки алгоритма работы БИНС. При выборке данных ИМ перемещался по определённой траектории, при этом каждые 30 см пути делалась остановка и нажатием кнопки имитировался соответствующий сигнал от СУ робота. Всего было проведено два эксперимента.

В первом тесте траектория движения ИМ представляет собой квадрат $1,2 \times 1,2$ м. ИМ перемещался из точки (0;0) против часовой стрелки. Результат работы алгоритма при первом тесте представлен на рисунке 8 и в таблице 1.

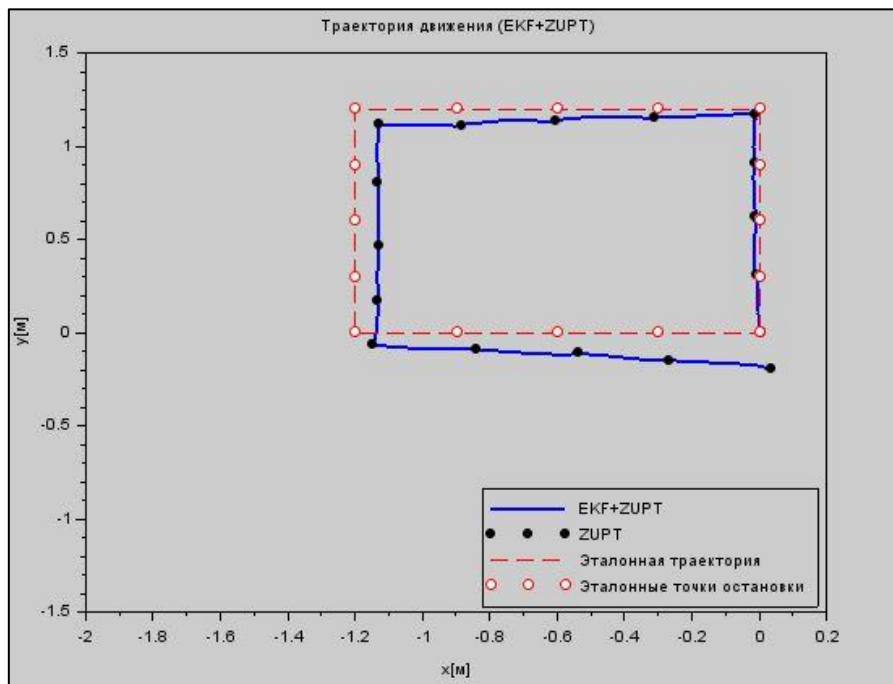


Рисунок 8 – Результат 1-го тестирования разработанного алгоритма

Таблица 1 – Ошибки определения координат объекта при тесте №1

Точка остановки	Δx , м	Δy , м	Δr , м	L , м	ε , %
1	0,0	0,0	0,0	0,0	-
2	0,0080	-0,0090	0,0120	0,3	4,01
3	0,0109	-0,0225	0,0250	0,6	4,17
4	0,0150	-0,0100	0,0180	0,9	2,00
5	0,0124	0,0270	0,0298	1,2	2,48
6	0,0089	0,0501	0,0509	1,5	3,39
7	0,0030	0,0686	0,0687	1,8	3,81
8	-0,0159	0,0886	0,0901	2,1	4,29
9	-0,0700	0,0784	0,1051	2,4	4,38
10	-0,0683	0,0994	0,1206	2,7	4,46
11	-0,0691	0,1324	0,1494	3,0	4,98
12	-0,0660	0,1345	0,1498	3,3	4,54
13	-0,0513	0,0629	0,0812	3,6	2,25
14	-0,0612	0,0908	0,1096	3,9	2,81
15	-0,0653	0,1115	0,1292	4,2	3,07
16	-0,0331	0,1489	0,1526	4,5	3,39
17	-0,0350	0,1928	0,1960	4,8	4,08

По данным таблицы 1, видно, что в 1-ом тесте экспериментального исследования алгоритма работы БИНС мобильного робота ошибка определения местоположения робота не превышает 4,98% от пройденного пути. Ошибка определения конечной координаты объекта составила 4,08% от величины пройденного пути.

Во втором тесте траектория движения ИМ представляет собой отрезок длиной 6,6 м. ИМ перемещался из точки (0;0) в точку (0;6,6). Результат работы алгоритма при втором тесте представлен на рисунке 9 и в таблице 2.

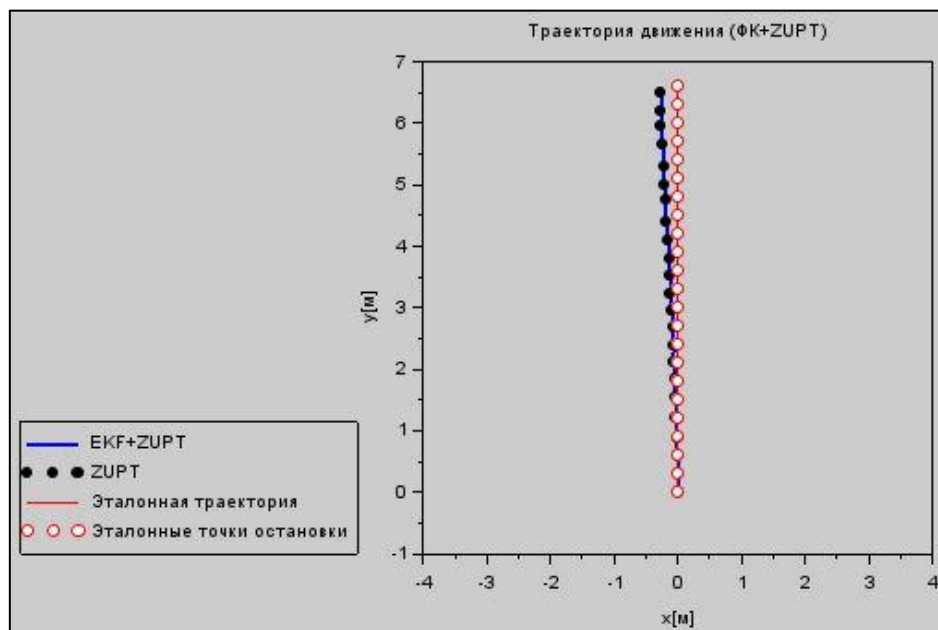


Рисунок 9 – Результат 2-го тестирования разработанного алгоритма

Таблица 2 – Ошибки определения координат объекта при тесте №2

Точка остановки	Δx , м	Δy , м	Δr , м	L , м	ϵ , %
1	0,0	0,0	0,0	0,0	-
2	-0,0023	0,0015	0,0027	0,3	0,91
3	0,0111	0,0007	0,0111	0,6	1,85
4	0,0180	0,0260	0,0316	0,9	3,52
5	0,0198	0,0062	0,0208	1,2	1,73
6	0,0342	-0,0389	0,0518	1,5	3,45
7	0,0422	-0,0242	0,0486	1,8	2,70
8	0,0596	-0,0070	0,0600	2,1	2,85
9	0,0654	0,0209	0,0686	2,4	2,86
10	0,0760	0,0127	0,0770	2,7	2,85
11	0,0957	0,0594	0,1126	3,0	3,75
12	0,1090	0,0846	0,1379	3,3	4,18
13	0,1219	0,0908	0,1520	3,6	4,22
14	0,1318	0,1154	0,1752	3,9	4,49
15	0,1454	0,1234	0,1907	4,2	4,54
16	0,1753	0,0979	0,2007	4,5	4,46
17	0,1872	0,0597	0,1965	4,8	4,09
18	0,2031	0,1012	0,2269	5,1	4,45
19	0,2164	0,1143	0,2448	5,4	4,53
20	0,2420	0,0478	0,2467	5,7	4,32
21	0,2581	0,0414	0,2613	6,0	4,35
22	0,2615	0,0956	0,2784	6,3	4,41
23	0,2619	0,1056	0,2824	6,6	4,27

По данным таблицы 2, видно, что во 2-ом тесте экспериментального исследования алгоритма работы БИНС мобильного робота ошибка определения местоположения не превышает 4,54% от пройденного пути. Ошибка определения конечной координаты объекта составила 4,27% от величины пройденного пути.

5 Заключение

В ходе экспериментальных исследований было выяснено, что разработанный алгоритм при использовании измерений с разработанного ИМ позволяет определять местоположение робота с ошибкой, не превышающей 5% от длины пройденного пути. Полученный результат является хорошим, особенно если учесть, что в состав измерительного модуля входят датчики низкого класса точности. Однако для практических целей, как правило, требуется более высокая точность навигации. Для повышения точности могут быть применены следующие решения:

- использование высокоточных датчиков;
- применение более точных методов определения начального положения и начальной ориентации робота;
- использование в качестве элементов вектора состояния системы не непосредственно величин, а их ошибок;
- осуществление тщательной калибровки датчиков с помощью специализированных стендов;
- увеличение наблюдаемости системы путём добавления в вектор измерений скорости (например, скорости вращения колёс мобильного робота).

Список литературы

1. В.А. Черноожкин, С.А. Половко Система локальной навигации для наземных мобильных роботов [Текст] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – № 57. – С. 13-22.
2. H. Hellmers, A. Norrdine, J. Blankenbach, A. Eichhorn An IMU/magnetometer-based Indoor positioning system using Kalman filtering [Text] // International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2013. – 9 p.
3. Ю.Л. Сиек, Е.В. Хуторная Бесплатформенная инерциальная навигация подводного робота в высоких широтах [Текст] // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. №4-1(26). – С. 122-129.
4. Паршин А.П. Исследование бесплатформенной инерциальной навигационной системы с неортогональным расположением чувствительных элементов [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации. – 2020. № 4. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/04/91917>
5. Ю. Ван, Ч.-Ш. Цзяо, А.М. Шкель Пешеходная инерциальная навигация с коррекцией по нулевой скорости и комплексированием датчиков [Текст] // Гироскопия и навигация. – 2021. Том 29. №1(112). – С. 3-31.
6. Abdulrahim K., Moore T., Hide C., Hill C. Understanding the Performance of Zero Velocity Updates in MEMS-based Pedestrian Navigation [Text] // International Journal of Advancements in Technology. – 2014. – Vol. 5, № 2. – P. 53-60.
7. Болотин Ю.В., Фатехрад М. Навигация пешехода с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), установленной на стопе [Текст] // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Том 19, № 1. – С. 25-36.
8. Маринушкин П.С., Бахтина В.А., Подшивалов И.А., Стукач О.В. Вопросы разработки инерциальных пешеходных навигационных систем на основе МЭМС-датчиков [Текст] // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 6. – С. 157-173.
9. Матвеев В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем [Текст] / Матвеев В.В., Распопов В.Я. / Под общ. Ред. д.т.н. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с. – ISBN 978-5-900780-73-3.
10. Бранец В.Н., Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем [Текст] / Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. –М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. – 280 с. – ISBN 5-02-014284-0.
11. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы [Текст]: учебн. пособие / Мелешко В.В., Нестеренко О.И. – Кировоград: ПОЛИМЕД - Сервис, 2011. – 171 с.
12. Ribeiro M. I. Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties [Text] // Lisbon, Portugal: Institute for Systems and Robotics, 2004. – 44 p.
13. H. Hellmers, A. Norrdine, J. Blankenbach, A. Eichhorn An IMU/magnetometer-based Indoor positioning system using Kalman filtering [Text] // International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2013. – 9 p.
14. Аль Битар Н., Гаврилов А.И. Сравнительный анализ алгоритмов комплексирования в слабосвязанной инерциально-спутниковой системе на основе обработки реальных данных [Текст] // Гироскопия и навигация. – 2019. – Том 27, № 3 (106). – С. 31-52.

15. Meng, X., Zhang, Z.-Q., Wu, J.-K., Wong, W.-C., and Yu, H., Selfcontained pedestrian tracking during normal walking using an inertial/magnetic sensor module [Text] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 892-899.
16. Wahlstrom, J., Skog, I., Gustafsson, F., Markham, A., and Trigoni, N., Zero-Velocity Detection – A Bayesian Approach to Adaptive Thresholding [Text] // IEEE Sensors Letters. – 2019. Vol. 3, № 6. – P. 1-4.
17. Холопов И.С. Калибровка цифровых трёхосных MEMS акселерометров по шести ортогональным положениям [Текст] // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2015. – № 2. – С. 61-65.
18. STMicroelectronics, “Application note: Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass”, 2010. – 34 с.
19. Калибровка датчиков для определения ориентации малого космического аппарата [Электронный ресурс] / Д.С. Иванов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2010 № 28. 30 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-28>

References

1. V.A. Chernozhkin, S.A. Polovko Sistema lokal'noj navigacii dlya nazemnyh mobil'nyh robotov [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. – 2008. – № 57. – S. 13-22.
2. H. Hellmers, A. Norrdine, J. Blankenbach, A. Eichhorn An IMU/magnetometer-based Indoor positioning system using Kalman filtering [Text] // International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2013. – 9 p.
3. Yu.L. Siek, E.V. Hutornaya Besplatformennaya inercial'naya navigaciya podvodnogo robota v vysokih shirotah [Tekst] // Morskie intellektual'nye tekhnologii. – 2014. №4-1(26). – S. 122-129.
4. Parshin A.P. Issledovanie besplatformennoj inercial'noj navigacionnoj sistemy s neortogonal'nym raspolozheniem chuvstvitel'nyh elementov [Elektronnyj resurs] // Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. – 2020. № 4. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2020/04/91917>
5. Yu. Van, Ch.-Sh. Czyao, A.M. Shkel' Peshekhodnaya inercial'naya navigaciya s korekciej po nulevoj skorosti i kompleksirovaniem datchikov [Tekst] // Giroskopiya i navigaciya. – 2021. Tom 29. №1(112). – С. 3-31.
6. Abdulrahim K., Moore T., Hide C., Hill C. Understanding the Performance of Zero Velocity Updates in MEMS-based Pedestrian Navigation [Text] // International Journal of Advancements in Technology. – 2014. – Vol. 5, № 2. – R. 53-60.
7. Bolotin Yu.V., Fatekhrad M. Navigaciya peshekhoda s ispol'zovaniem besplatformennoj inercial'noj navigacionnoj sistemy (BINS), ustanovlennoj na stole [Tekst] // Rossijskij zhurnal biomekhaniki. – 2015. – Tom 19, № 1. – S. 25-36.
8. Marinushkin P.S., Bahtina V.A., Podshivalov I.A., Stukach O.V. Voprosy razrabotki inercial'nyh peshekhodnyh navigacionnyh sistem na osnove MEMS-datchikov [Tekst] // Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn. – 2015. – № 6. – S. 157-173.
9. Matveev V.V. Osnovy postroeniya besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem [Tekst] / Matveev V.V., Raspopov V.Ya. / Pod obsch. Red. d.t.n. V.Ya. Raspopova. – SPB.: GNC RF OAO «Koncern «CNII «Elektropribor», 2009. – 280 s. – ISBN 978-5-900780-73-3.
10. Branec V.N., Vvedenie v teoriyu besplatformennyh inercial'nyh navigacionnyh sistem [Tekst] / Branec V.N., Shmyglevskij I.P. –M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1992. – 280 s. – ISBN 5-02-014284-0.
11. Besplatformennye inercial'nye navigacionnye sistemy [Tekst]: uchebn. posobie / Meleshko V.V., Nesterenko O.I. – Kirovograd: POLIMED - Servis, 2011. – 171 s.
12. Ribeiro M. I. Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties [Text] // Lisbon, Portugal: Institute for Systems and Robotics, 2004. – 44 p.
13. H. Hellmers, A. Norrdine, J. Blankenbach, A. Eichhorn An IMU/magnetometer-based Indoor positioning system using Kalman filtering [Text] // International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2013. – 9 p.
14. Al' Bitar N., Gavrilov A.I. Sravnitel'nyj analiz algoritmov kompleksirovaniya v slabosvyazannoj inercial'no-sputnikovoj sisteme na osnove obrabotki real'nyh dannyh [Tekst] // Giroskopiya i navigaciya. – 2019. – Tom 27, № 3 (106). – С. 31-52.
15. Meng, X., Zhang, Z.-Q., Wu, J.-K., Wong, W.-C., and Yu, H., Selfcontained pedestrian tracking during normal walking using an inertial/magnetic sensor module [Text] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 892-899.
16. Wahlstrom, J., Skog, I., Gustafsson, F., Markham, A., and Trigoni, N., Zero-Velocity Detection – A Bayesian Approach to Adaptive Thresholding [Text] // IEEE Sensors Letters. – 2019. Vol. 3, № 6. – P. 1-4.
17. Holopov I.S. Kalibrovka cifrovnyh tryhosnyh MEMS akcelerometrov po shesti ortogonal'nym polozheniyam [Tekst] // Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. – 2015. – № 2. – С. 61-65.

18. STMicroelectronics, “Application note: Using LSM303DLH for a tilt compensated electronic compass”, 2010. – 34 c.

Kalibrovka datchikov dlya opredeleniya orientacii malogo kosmicheskogo apparata [Elektronnyj resurs] / D.S. Ivanov [i dr.] // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha. 2010 № 28. 30 s. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-28>