

УДК 681.518

Вопросы разработки инерциальных пешеходных навигационных систем на основе МЭМС-датчиков

Маринушкин П. С.^{1,*}, Бахтина В. А.¹,
Подшивалов И. А.¹, Стукач О. В.²

[*marinushkin_ps@mail.ru](mailto:marinushkin_ps@mail.ru)

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, Томск, Россия

Рассматриваются вопросы построения инерциальных пешеходных навигационных систем на основе МЭМС-датчиков. Анализируются особенности их состава и конфигурации и показываются преимущества тех или иных технических решений. С целью повышения точности определения местоположения пользователя предлагается архитектура навигационной системы, её аппаратный состав и адаптивный алгоритм совместной обработки разнотипной информации (инерциальной и магнитометрической) на основе расширенного фильтра Калмана. Приводятся результаты практических испытаний функционального прототипа разработанной пешеходной навигационной системы, свидетельствующие об улучшении качества процесса оценивания навигационных параметров по сравнению с системами, использующими только инерциальные датчики.

Ключевые слова: инерциальная навигация, микроэлектромеханические системы (МЭМС), пешеходная навигация, носимая электроника

Введение

Несмотря на широкое распространение индивидуальных средств навигации на основе GPS/ГЛОНАСС, на рынке существует потребность в альтернативных системах позиционирования. Дело в том, что как для военных, так и для гражданских потребителей значительный интерес представляет возможность определения координат в помещениях, в условиях плотной городской застройки, в густой лесистой местности, под землёй. Спутниковая навигационная аппаратура не позволяет реализовать данную возможность. Не вполне решают задачу автономной навигации и радионавигационные системы на основе

A-GPS, Cell-ID, Wi-Fi, Bluetooth и RFID-технологий, так как их использование требует наличия дополнительной инфраструктуры (антенн).

Обеспечить полную независимость определения местоположения пешехода от наличия внешних сигналов возможно за счет использования инерциальных МЭМС-

датчиков – гироскопов и акселерометров, характеризующихся малыми габаритами и невысокой стоимостью. В то же время выполнение указанного требования при существующем уровне развития микросистемных технологий является непростой задачей. Дело в том, что из-за низкой точности инерциальных МЭМС-датчиков технические характеристики навигационных систем на их базе получаются явно недостаточными для продолжительного автономного передвижения. Поэтому представляются актуальными как проблемы разработки пешеходных навигационных систем на основе МЭМС-датчиков, так и задачи синтеза алгоритмов коррекции инерциальных данных с целью улучшения качества навигационной информации.

1. Особенности архитектуры инерциальных пешеходных навигационных систем

Среди известных систем позиционирования инерциальные навигационные системы являются единственными, которые по совокупности показателей в наибольшей мере удовлетворяют таким важным требованиям как универсальность, полная автономность, помехозащищённость и помехоустойчивость, а также скрытность работы [1]. Вместе с тем, как известно, недостатком инерциальных систем является наличие систематического ухода в режиме автономной навигации, что значительно ограничивает их технические характеристики и возможности практического применения. Поэтому в настоящее время имеются лишь отдельные примеры реализации систем пешеходной навигации на основе МЭМС-датчиков [2 – 5].

Обеспечить приемлемую точность позиционирования можно за счёт комплексной обработки показаний различных датчиков. Такая возможность достигается в архитектуре, включающей помимо гироскопов и акселерометров дополнительные источники навигационной информации. В известной литературе [6 – 9] описан ряд подходов к решению задач комплексирования потоков разнотипной информации. Однако данные работы не учитывают специфику навигационных систем рассматриваемого класса при формировании их алгоритмического обеспечения, тогда как, приняв во внимание биомеханические особенности походки человека, становится возможным ограничить рост погрешностей при вычислении его скорости и координат. Дело в том, что основные формы локомоций человека, ходьба и бег, состоят из чередующихся фаз опоры и движения (для бега характерно также наличие фазы полёта). Опорная фаза (рис. 1, *а*), во время которой скорость пользователя $v = 0$, может быть использована для периодической корректировки показаний измерительного модуля (рис. 1, *б*). Такой вид коррекции получил название коррекции по нулевой скорости (ZUPT, Zero velocity UPdaTe).

Принципы построения пешеходной навигационной системы, базирующиеся на использовании методов инерциальной навигации и ZUPT-коррекции, определяют её аппаратный состав. Базовым элементом системы служит инерциальным измерительный модуль (ИИМ), определяющий кажущееся линейное ускорение f^b и угловую скорость ω^b . ИИМ может располагаться на ноге (руке), на груди (спине), поясе или на голове пользователя [10]. Отдельно следует упомянуть вариант, реализации всех компонентов

системы в едином конструктивном исполнении, например в составе телефона или портативного компьютера, что не подразумевает фиксации ИИМ относительно тела пользователя [11].

Выбор конкретного варианта расположения ИИМ производится с учётом используемого метода счисления координат. Так применение традиционных алгоритмов бесплатформенных инерциальных навигационных систем возможно при условии расположения ИИМ на ноге пользователя (рис. 1, б). При этом измеренные на ноге сигналы ускорения имеют наиболее выраженные признаки, характеризующие фазы ходьбы (рис. 1, а), что позволяет надёжно и эффективно детектировать опорную фазу [10]. Поэтому с точки зрения точности расположение ИИМ на ноге является наиболее предпочтительным. Возможен и другой подход к задаче определения текущего местоположения пешехода, подразумевающий обнаружение шага путем определения пиков вертикального ускорения (принцип шагомера) и дальнейший расчёт траектории на основе модели, связывающей частоту шагов и их длину. Такая техника менее эффективна с точки зрения точности и надёжности определения местоположения (точность $\sim 10\%$), но обеспечивает большую гибкость при выборе варианта расположения ИИМ.

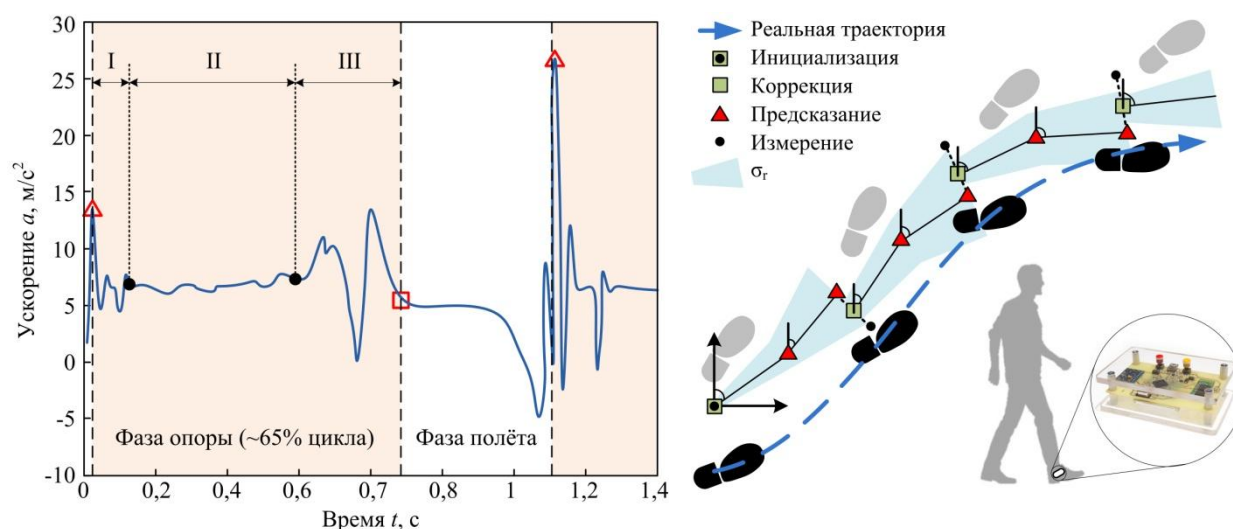


Рис. 1. Принцип работы пешеходной инерциальной навигационной системы: а – характерные показания акселерометра при ходьбе (I – контактный период, II – опорный период, III – пропульсивный период); б – схема ZUPT – коррекции

Таким образом, проведенный анализ показывает, что основой системы инерциальной пешеходной навигации должен быть ИИМ, дополненный системой коррекции навигационных данных на основе метода ZUPT. Требования, предъявляемые к точности работы систем пешеходной навигации [1] диктуют необходимость использования магнитометра для осуществления коррекции по курсу. Кроме того, для вычисления навигационного решения в системе необходимо иметь процессорный модуль. Соответственно минимально необходимый аппаратный состав системы должен включать три трёхосевых датчика: гироскоп, акселерометр и магнитометр, собранные в единый миниатюрный блок с цифровым интерфейсом, а также высокопроизводительный

маломощный микроконтроллер в качестве процессорного модуля (рис. 2). Отображение текущего местоположения может осуществляться непосредственно находящимся у пользователя навигатором.

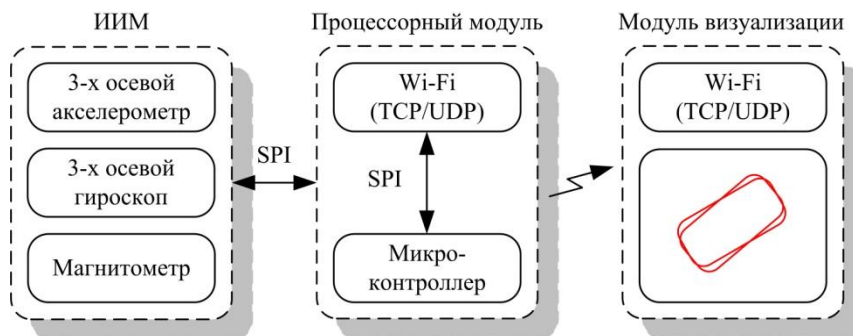


Рис. 2. Аппаратный состав инерциальной пешеходной навигационной системы

2. Особенности реализации алгоритмов обработки информации в инерциальных пешеходных навигационных системах

К специфическим алгоритмам функционирования инерциальных пешеходных навигационных систем относятся алгоритмы детектирования опорной фазы ходьбы. В простейшем варианте реализации алгоритма опорная фаза ходьбы считается обнаруженной тогда, когда сигнал гироскопа (акселерометра) пересекает пороговый уровень (рис. 3). Для этого на основании анализа предварительно записанных образцовых сигналов определяются амплитудные пороговые уровни угловой скорости (ускорения), которые впоследствии используются в качестве критериев определения опорной фазы:

$$|\tilde{\omega}_k^b| = \sqrt{\tilde{\omega}_k^b(1)^2 + \tilde{\omega}_k^b(2)^2 + \tilde{\omega}_k^b(3)^2} < Th,$$

где $\tilde{\omega}_k^b$ – вектор измеренных угловых скоростей в связанной с пользователем системе координат, k – порядковый номер временного интервала, Th – пороговый уровень угловой скорости, соответствующий фазе опоры.

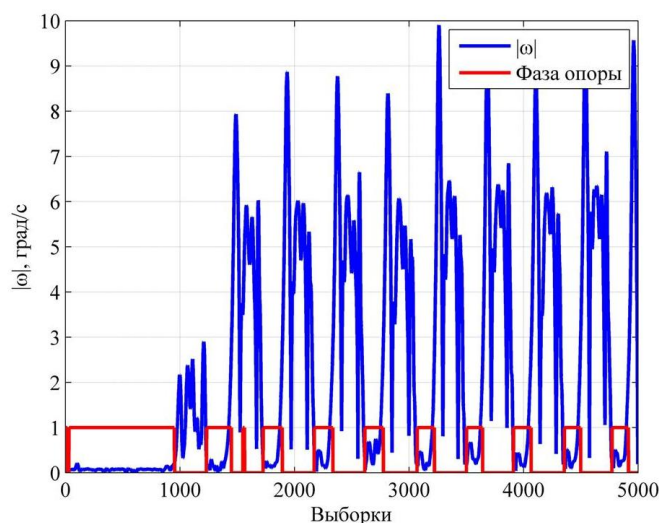


Рис. 3. Результаты работы алгоритма детектирования опорной фазы ходьбы

При разработке алгоритмического обеспечения инерциальных пешеходных навигационных систем большое внимание должно быть уделено выбору конкретного алгоритма комплексирования измерительных данных. В задаче оценки координат подвижных объектов по результатам зашумлённых измерений хорошо зарекомендовал себя рекурсивный фильтр Калмана, позволяющий в реальном времени отслеживать состояние системы при условии, что уравнения состояния и измерения линейны, а статистические характеристики шумов гауссовские. В случае систем описываемых нелинейными уравнениями известны такие методы аппроксимации байесовского фильтра как расширенный фильтр Калмана (EKF – extended Kalman filter), сигма-точечный фильтр Калмана (UKF – unscented Kalman filter), кубатурный фильтр Калмана (CKF – cubature Kalman filter) и модифицированный кубатурный фильтр Калмана с использованием квадратного корня (SRKF – square-root cubature Kalman filter) [12, 13].

Вообще говоря, алгоритм SRKF обладает преимуществом перед другими алгоритмами, главным образом благодаря тому, что в нём обеспечивается положительная определенность ковариационной матрицы, что исключает возникновение численной неустойчивости решения [12]. С другой стороны, существенное значение имеет вычислительная реализуемость методов. Алгоритмы UKF и SR-UKF работают медленнее, чем EKF, поэтому и их нецелесообразно использовать для комплексирования данных в мультисенсорных навигационных системах при высокой частоте обновления. Указанные обстоятельства определяет выбор в пользу алгоритма EKF, в котором для прогноза и коррекции оценок используется разложение нелинейных функций в уравнениях состояния и наблюдений в ряды Тейлора при ограничении линейными членами.

В терминах марковской теории фильтрации задача комплексирования формулируется как задача оценивания вектора состояния $\mathbf{x}_k$ по результатам зашумлённых измерений $\mathbf{z}_k$. В качестве оцениваемого вектора состояния выбирается вектор ошибок навигационной системы в определении координат $\delta \mathbf{r}_k$, скорости $\delta \mathbf{v}_k$ и углов ориентации $\delta \boldsymbol{\varphi}_k$:

$$\delta \mathbf{x}_k = [\delta \mathbf{r}_k \quad \delta \mathbf{v}_k \quad \delta \boldsymbol{\varphi}_k]^T, \quad (1)$$

где $(\dots)^T$ – операция транспонирования.

Вектор измерений $\mathbf{z}_k$ можно сформировать по разности псевдоизмерений скорости пользователя во время опорной фазы ходьбы/бега и значений скорости, вычисленных в навигационной системе. Курсовые измерения можно сформировать путём вычитания из показаний магнитометрического компаса ($\Psi_{\text{маг}_k}$) значений курса, вычисленных навигационной системой ($\Psi_{\text{инс}_k}$):

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} \Psi_{\text{маг}_k} - \Psi_{\text{инс}_k} \\ 0 - v_{x_k} \\ 0 - v_{y_k} \\ 0 - v_{z_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{\text{маг}_k} \\ \Delta v_{x_k} \\ \Delta v_{y_k} \\ \Delta v_{z_k} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для организации процедуры калмановского оценивания требуется создать математическую модель оцениваемого вектора и определить его связь с измерениями. Причём в общем случае математическая модель навигационной системы нелинейна, что обусловлено наличием в ней тригонометрических функций от углов Эйлера.

Для рассматриваемой системы модель априорного изменения параметров вектора состояния (модель динамики) имеет вид:

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} \mathbf{w}_{k-1}, \quad (3)$$

где Φ_k – матрица состояния, описывающая эволюцию вектора состояния в отсутствие шумов; Γ_k – матрица случайных воздействий; $\mathbf{w}_k$ – шум процесса, представляющий собой случайный вектор, имеющий нормальное распределение с нулевым средним и ковариационной матрицей $\mathbf{Q}_k$.

Матрицы модели (3) имеют следующий вид.

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \Delta t & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{S}_k \Delta t \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} 0 & -f_z^n \Delta t & f_y^n \Delta t \\ f_z^n \Delta t & 0 & -f_x^n \Delta t \\ -f_y^n \Delta t & f_x^n \Delta t & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\Gamma_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\mathbf{C}_{n_k}^b \Delta t & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_{n_k}^b \Delta t \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{f}^b \\ \delta \boldsymbol{\omega}^b \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{I}_{n \times n}$ – единичная диагональная матрица размера $(n \times n)$; $\mathbf{0}_{n \times n}$ – нулевая матрица размера $(n \times n)$; Δt – шаг интегрирования; f_x^n, f_y^n, f_z^n – компоненты вектора кажущихся ускорений; $\mathbf{C}_{n_k}^b$ – матрица поворота (матрица направляющих косинусов); $\delta \mathbf{f}^b$ и $\delta \boldsymbol{\omega}^b$ – шумы по ускорению и угловой скорости соответственно.

Связь вектора состояния с измерениями определяется моделью измерений (наблюдений):

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \quad (5)$$

где $\mathbf{H}$ – матрица измерения, связывающая оцениваемый вектор состояния $\mathbf{x}_k$ с данными измерений; $\mathbf{v}_k$ – случайный вектор (шум наблюдения), имеющий нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей $\mathbf{R}_k$.

Матрицы модели (5) имеют следующий вид.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} \delta \psi_{\text{mag}} \\ \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Представленная формулами (1) – (6) модель является основой для формирования алгоритма калмановской фильтрации. Вычислительный цикл алгоритма состоит из двух шагов. На первом шаге вычисляется оценка текущих ошибок навигационной системы в определении координат, скоростей и углов ориентации. На втором шаге осуществляется коррекция базового навигационного решения на основе полученных поправок. В упрощённом виде работа алгоритма иллюстрируется рис. 4.

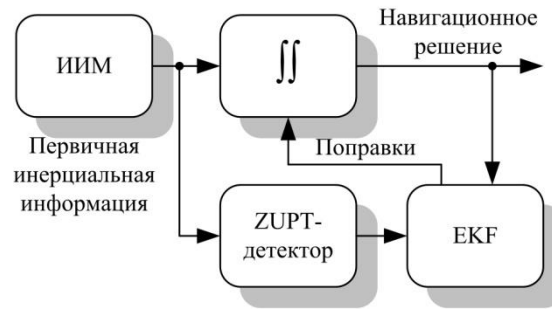


Рис. 4. Схема комплексирования навигационных данных

Веса поправок вычисляются алгоритмом на основе ковариационных матриц оценки состояния $\mathbf{P}_k$ и измерений $\mathbf{R}_k$. Ковариационная матрица $\mathbf{P}_k$ характеризует погрешность оценки состояния, элементы её главной диагонали представляют собой дисперсии ошибок оценок элементов вектора состояния, а недиагональные – ковариации, характеризующие взаимосвязь между каждой парой элементов [9]:

$$\mathbf{P}_k = E[\delta \mathbf{x}_k \delta \mathbf{x}_k^T] = \begin{Bmatrix} \delta \mathbf{r}_k & \delta \mathbf{v}_k & \delta \boldsymbol{\varphi}_k \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{r}_k \\ \delta \mathbf{v}_k \\ \delta \boldsymbol{\varphi}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_r^2 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \sigma_v^2 & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \sigma_\varphi^2 \end{bmatrix},$$

где $E\{\}$ – символ математического ожидания.

Элементами ковариационной матрицы шумов измерений (матрицы интенсивностей шумов измерений) $\mathbf{R}_k$ являются дисперсии ошибок измерения компонент вектора состояния, которые определяются в результате экспериментальных измерений статических шумов при неподвижном положении пешехода. Чем больше значения элементов $\mathbf{R}_k$, тем больше зашумлены измерения и тем ниже их информативность.

$$\mathbf{R}_k = E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T] = \begin{Bmatrix} \delta \psi_{\text{mag}} & \delta v_x & \delta v_y & \delta v_z \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \psi_{\text{mag}} \\ \delta v_x \\ \delta v_y \\ \delta v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{\psi_{\text{mag}}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{v_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{v_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{v_z}^2 \end{bmatrix}.$$

Веса поправок хранятся в матрице передачи фильтра $\mathbf{K}_k$. Причём вес измерения тем больше, чем меньше его погрешность по сравнению с оценкой состояния. Таким образом, расширенный фильтр Калмана помогает системе определить, показаниям каких датчиков можно больше доверять в тех или иных условиях.

Возможность искажения динамической модели (5) учитывается в алгоритме с помощью матрицы интенсивностей входных шумов системы (ковариационной матрицы процесса) $\mathbf{Q}_k$. Выбор значений элементов матрицы $\mathbf{Q}_k$ опирается на предположение о том, что шумы по ускорению $\delta \mathbf{f}^b$ и угловой скорости $\delta \boldsymbol{\omega}^b$ не коррелированы между собой. В таком случае элементы матрицы $\mathbf{Q}_k$, лежащие вне главной диагонали, равны нулю. На главной диагонали остаются дисперсии ошибок измерения инерциальных датчиков:

$$\mathbf{Q}_k = E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T] = \text{diag}\{\sigma_{f_x}^2 \quad \sigma_{f_y}^2 \quad \sigma_{f_z}^2 \quad \sigma_{\omega_x}^2 \quad \sigma_{\omega_y}^2 \quad \sigma_{\omega_z}^2\},$$

где $\text{diag}\{\}$ – диагональная матрица.

4. Функциональный алгоритм инерциальной пешеходной навигационной системы

Навигационная задача заключается в том, чтобы по ускорениям, измеренным в инерциальном пространстве, вычислять изменения положения пользователя относительно фиксированных точек на местности. Сразу следует отметить, что непосредственная реализация вычислений может быть выполнена по-разному. В частности, алгоритм решения навигационной задачи можно построить на использовании направляющих косинусов [8]. В такой постановке полная процедура вычислений такова.

0. Перед началом работы алгоритма инициализируются исходные данные: матрица измерения $\mathbf{H}$ (4x9), матрицы интенсивностей шумов $\mathbf{R}$ (4x4) и $\mathbf{Q}$ (9x9).

Начальные углы крена (φ_0), тангажа (θ_0) и рыскания (ψ_0), определяются следующими соотношениями (предполагается, что ось X ориентирована на север):

$$\varphi_0 = \arctan2\left(\frac{-\bar{g}_y}{-\bar{g}_z}\right), \theta_0 = \arctan\left(\frac{\bar{g}_x}{\sqrt{\bar{g}_y^2 + \bar{g}_z^2}}\right), \psi_0 = \frac{0 \cdot \pi}{180},$$

где горизонтальная черта над переменной обозначает арифметическое среднее.

На основании значений углов φ_0 , θ_0 , ψ_0 формируется начальное значение матрицы поворота, предназначенной для преобразования измерений из связанной с пользователем в навигационную систему координат:

$$\mathbf{C}_{n_0}^b = \begin{bmatrix} \cos\theta_0 & \sin\varphi_0\sin\theta_0 & \cos\varphi_0\sin\theta_0 \\ 0 & \cos\varphi_0 & -\sin\varphi_0 \\ -\sin\theta_0 & \sin\varphi_0\cos\theta_0 & \cos\varphi_0\cos\theta_0 \end{bmatrix}.$$

Задаются начальные значения вектора состояния $\mathbf{x}_k$ (9x1) и его ковариационной матрицы $\mathbf{P}_k$ (9x9).

$$\mathbf{x}_{0|0} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \varphi_0 \ \theta_0 \ \psi_0]^T, \mathbf{P}_{0|0} = \mathbf{0}_{9 \times 9}.$$

1. Решается навигационная задача.

1.1. Компенсируется смещение нуля гироскопа:

$$\tilde{\omega}_k^b = \omega_k^b - \delta\omega_{k-1}^b,$$

где $\delta\omega_{k-1}^b$ – смещение нуля гироскопа, определяемое с помощью предварительной калибровки.

1.2. Составляется кососимметрическая матрица, элементами которой являются измеренные гироскопами проекции абсолютных угловых скоростей:

$$\mathbf{\Omega}_k = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{\omega}_{z_k}^b & -\tilde{\omega}_{y_k}^b \\ \tilde{\omega}_{z_k}^b & 0 & -\tilde{\omega}_{x_k}^b \\ -\tilde{\omega}_{y_k}^b & \tilde{\omega}_{x_k}^b & 0 \end{bmatrix}.$$

1.3. Формируется базовое навигационное решение путём интегрирования навигационных данных при ступенчатой аппроксимации последних:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_k \\ \mathbf{v}_k \\ \mathbf{C}_{n_k}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{k-1} + \mathbf{v}_k \Delta t \\ \mathbf{v}_{k-1} + (\mathbf{C}_{n_k}^b \mathbf{f}_k^b - \mathbf{g}) \Delta t \\ \mathbf{C}_{n_{k-1}}^b e^{\mathbf{\Omega}_k \Delta t} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\mathbf{f}_k^b$ – вектор кажущихся ускорений в связанной с пользователем системе координат, $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ g]^T$ – вектор ускорения свободного падения.

Для расчёта матрицы поворота в (7) используется аппроксимация Паде экспоненциальной функции [4]:

$$\mathbf{C}_{n_{k|k-1}}^b = \mathbf{C}_{n_{k-1}}^b e^{\mathbf{\Omega}_k \Delta t} = \mathbf{C}_{n_{k-1}}^b \frac{2\mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{\Omega}_k \Delta t}{2\mathbf{I}_{3 \times 3} - \mathbf{\Omega}_k \Delta t}.$$

1.4. Магнитометрические измерения преобразуются из связанной с пользователем в навигационную систему координат. Рассчитывается курсовой угол:

$$\mathbf{m}_k^n = \mathbf{C}_{n_k}^b \mathbf{m}_k^b, \psi_{\text{mag}_k} = \arctan 2 \left(\frac{m_{y_k}^n}{m_{x_k}^n} \right),$$

где $\mathbf{m}_k^n = [m_{x_k}^n \ m_{y_k}^n \ m_{z_k}^n]^T$ – вектор напряжённости магнитного поля в навигационной системе координат.

1.5. Рассчитывается матрица состояния $\Phi_{k,k-1}$ в соответствии с (4).

1.6. Обновляется ковариационная матрица ошибок фильтрации:

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \mathbf{\Gamma}_{k,k-1} \mathbf{Q} \mathbf{\Gamma}_{k,k-1}^T.$$

2. Коррекция по нулевой скорости. В случае детектирования опорной фазы выполняется коррекция базового навигационного решения.

2.1. Находится матрица передачи (усиления) фильтра Калмана:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T / (\mathbf{H} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}).$$

2.2. Вычисляются поправки к базовому навигационному решению:

$$\delta \mathbf{x}_k = \mathbf{K}_k \tilde{\mathbf{z}}_k,$$

где $\tilde{\mathbf{z}}_k = \mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1}$ – невязка между поступившим измерением и его предсказанным значением $\hat{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$.

2.3. Рассчитывается кососимметрическая матрица Δ малых углов рассогласования предсказанной и истинной ориентации:

$$\Delta_k = \begin{bmatrix} 0 & -\delta \mathbf{x}_k(9) & \delta \mathbf{x}_k(8) \\ \delta \mathbf{x}_k(9) & 0 & -\delta \mathbf{x}_k(7) \\ -\delta \mathbf{x}_k(8) & \delta \mathbf{x}_k(7) & 0 \end{bmatrix}.$$

2.4. Корректируется матрица поворота:

$$\mathbf{C}_{n_k}^b = (\mathbf{I}_{3 \times 3} - \Delta) \mathbf{C}_{n_{k-1}}^b.$$

2.5. Корректируется базовое навигационное решение. Поправка складывается с предсказанной оценкой, в результате чего получается новая оценка вектора состояния:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \delta \mathbf{x}_k,$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ – оценка вектора состояния на k -м цикле, $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ – предсказанное значение вектора состояния на k -м цикле.

2.6. Обновляется ковариационная матрица ошибок фильтрации

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}).$$

5. Реализация адаптивной фильтрации

При синтезе рассмотренного алгоритма статистические характеристики шумов (матрицы $\mathbf{Q}$ и $\mathbf{R}$) полагались априорно известными и неизменными с течением времени. В реальных условиях предположение о постоянстве шумов измерений может привести к существенным ошибкам. Воздействие ускорений, внешних магнитных полей и других факторов приводят к значительным флуктуациям отношения сигнал/шум, а, следовательно, и к изменению ковариационной матрицы шумов измерений [11]. В итоге точностные характеристики навигационного алгоритма ухудшаются т. к. введенная в него матрица $\mathbf{R}$ не соответствует действительности.

Решением этой проблемы является использование адаптивных фильтров, которые позволяют алгоритму настраиваться в соответствии с изменившимися внешними условиями. Одним из возможных вариантов реализации обозначенного подхода является плавная регулировка ковариационной матрицы шумов измерений в режиме реального времени на основе параллельного анализа характеристик внешних воздействий: ускорения $\mathbf{f}_k^b$ и напряжённости магнитного поля $\mathbf{m}_k^b$ [11]. В условиях высокодинамических воздействий, или в условиях магнитных искажений значения дисперсии наблюдений повышаются, чтобы процесс фильтрации в большей степени определялся выходными сигналами гироскопа. Для этого на вход блока адаптации подаются вектора измеренных кажущихся ускорений и напряжённости магнитного поля в связанной с телом системе координат. Затем адаптивный фильтр подстраивается под параметры входных сигналов путем изменения компонент, входящих в состав ковариационной матрицы $\mathbf{R}_k$.

В окончательном виде структурная схема предлагаемой системы обработки сигналов инерциального измерительного модуля с контуром подстройки параметров фильтра представлена на рис. 5.

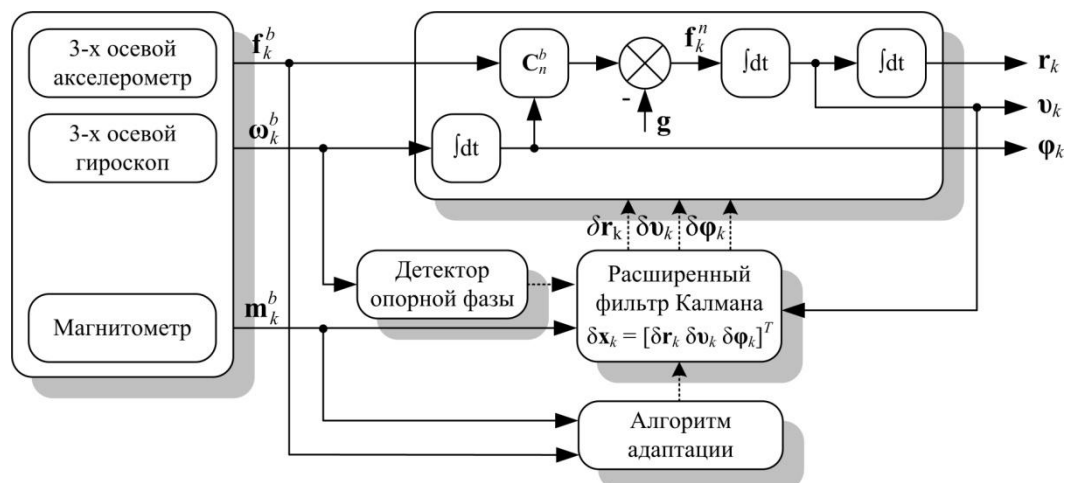


Рис. 5. Структурная схема инерциальной пешеходной навигационной системы

6. Экспериментальное исследование эффективности разработанных алгоритмов оценивания навигационных параметров

Проведённое исследование принципов и алгоритмов системы позволило сформировать необходимую базу для создания функционального прототипа инерциальной пешеходной навигационной системы, реализованного в виде аппаратно-программного комплекса в среде Matlab.

Аппаратная часть комплекса состоит из двух блоков: IMU и Host. IMU (рис. 6) включает в себя четыре измерительных датчика: трехосевой акселерометр BMA180, трехосевой гироскоп L3GD20, трехосевой магнетометр HMC5983 и цифровой датчик давления (MS5611-01-BA03). Блок Host состоит из отладочной платы STM32F4 DISCOVERY, а также Wi-Fi и GPS модулей. IMU закрепляется на обуви пользователя и соединяется с хостом экранированным кабелем. Передача данных между ними осуществляется через последовательный периферийный интерфейс (SPI). Микроконтроллер отладочной платы отвечает за сбор, предварительную обработку и передачу данных на компьютер. Разработанное в соответствии с представленным алгоритмом программное обеспечение осуществляет комплексирование потоков данных инерциальных датчиков и магнитометрических измерений и позволяет определять параметры движения.

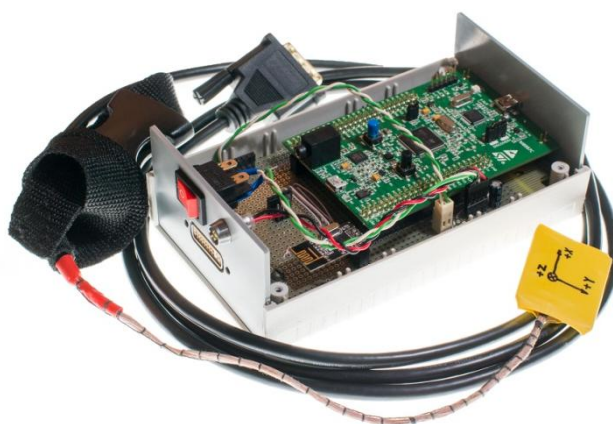


Рис. 6. Прототип инерциальной пешеходной навигационной системы

Оценка работоспособности представленных решений выполнялась в ходе серии тестов, включавших ходьбу со средней скоростью по замкнутой траектории (рис. 7). Измерения датчиков первичной информации, записанные в ходе тестов, сохранялись на компьютере, а затем обрабатывались в соответствии с разработанным алгоритмом.

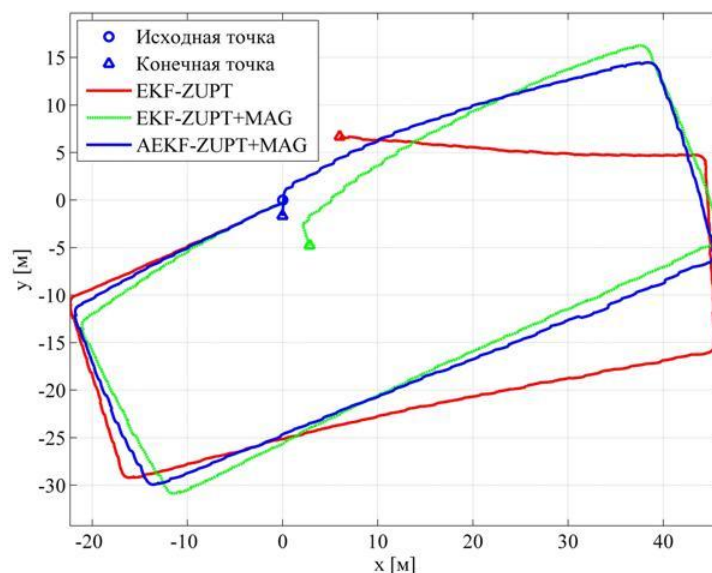


Рис. 7. Результаты тестов

Табл. 1 демонстрирует повышение точности выработки оценок навигационных параметров с помощью разработанного адаптивного алгоритма (AEKF-ZUPT+MAG) по сравнению с алгоритмом, использующим только инерциальную информацию (EKF+ZUPT) и по сравнению с алгоритмом неадаптивным алгоритмом комплексирования инерциальной и магнитометрической информации (EKF-ZUPT+MAG). Указанные в таблице абсолютные погрешности возвращения в исходное положение (в плоскости xy) рассчитывались как:

$$\delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2},$$

где Δx , Δy – погрешности возвращения пользователя в исходное положение по осям X и Y соответственно.

Относительная погрешность возвращения в исходное положение ε рассчитывалась как отношение δ к длине пройденного пути L .

Таблица 1. Результаты экспериментов

	$\Delta x_{\text{е}}, \text{ м}$	$\Delta y_{\text{е}}, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$\delta, \text{ м}$	$\varepsilon, \%$
EKF-ZUPT	5,992	6,692	180,5	8,9826	4,9765
EKF-ZUPT+MAG	2,829	-4,771	188,7	5,5467	2,9394
AEKF-ZUPT+MAG	-0,01405	-1,649	188,9	1,3165	0,8716

Заключение

В результате экспериментальных исследований предложенного адаптивного алгоритма интеграции навигационных данных на основе расширенного фильтра Калмана установлено, что ошибка определения местоположения разработанной инерциальной пешеходной навигационной системой не превышает 1 %. Таким образом, можно сделать заключение, что синтезированный алгоритм комплексирования данных, полученных от

ИИМ и магнитометра, позволяет получить удовлетворительную точность расчёта траектории движения даже при использовании инерциальных МЭМС-датчиков низкого класса точности. Разработанный алгоритм может быть реализован в индивидуальной навигационной аппаратуре, предназначенной для решения практических задач, требующих автономного позиционирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-38-50162.

Список литературы

1. Горенштейн И.А., Шульман И.А. Инерциальные навигационные системы. М.: Машиностроение, 1970. 232 с.
2. Beauregard S. Omnidirectional pedestrian navigation for first responders // Proceeding of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '07). IEEE Publ., 2007. P. 33-36. DOI: [10.1109/WPNC.2007.353609](https://doi.org/10.1109/WPNC.2007.353609)
3. Foxlin E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors // Computer Graphics and Applications, IEEE. 2005. Vol. 25, no. 6. P. 38-46. DOI: [10.1109/MCG.2005.140](https://doi.org/10.1109/MCG.2005.140)
4. Jiménez A.R., Granja F.S., Prieto J.C., Guevara J. Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU // Proceeding of the 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '10). IEEE Publ., 2010. P. 135-143. DOI: [10.1109/WPNC.2010.5649300](https://doi.org/10.1109/WPNC.2010.5649300)
5. Fischer C., Sukumar P.T., Hazas M. Tutorial: Implementing a Pedestrian Tracker Using Inertial Sensors // Pervasive Computing, IEEE. 2013. Vol. 12, no. 2. P. 17-27. DOI: [10.1109/MPRV.2012.16](https://doi.org/10.1109/MPRV.2012.16)
6. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: пер. с англ. / под ред. проф. Б.П. Левина. М.: Связь, 1976. 496 с. [Sage A., Melsa J. Estimation Theory with Applications to Communications and Control. New York: McGraw-Hill, 1971.]
7. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М.Н. Красильщикова и Г.Г. Себрякова. М.: Физматлит, 2003. 280 с.
8. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем : учеб. пособие / под общ. ред. д.т.н. В.Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009. 280 с.
9. Неусыпин К.А., Фам Суан Фанг. Алгоритмические методы повышения точности навигационных систем ЛА. М.: Мир, 2009. 126 с.
10. Hardegger M., Mazilu S., Caraci D., Hess F., Roggen D., Troster G. ActionSLAM on a Smartphone: At-Home Tracking with a Fully Wearable System // Proceedings of the 4th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). IEEE Publ., 2013. P. 1-8. DOI: [10.1109/IPIN.2013.6817874](https://doi.org/10.1109/IPIN.2013.6817874)

11. Tian Z., Zhang Y., Zhou M., Liu Y. Pedestrian dead reckoning for MARG navigation using a smartphone // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2001. Vol. 65, no. 1. DOI: [10.1186/1687-6180-2014-65](https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-65)
12. Конаков А.С., Шаврин В.В., Тисленко В.И., Савин А.А. Сравнительный анализ среднеквадратической погрешности определения координат объекта в бесплатформенной инерциальной навигационной системе при использовании различных алгоритмов нелинейной фильтрации // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). 2012. № 1 (25), ч. 1. С. 9-5.
13. Benzerrouk H., Salhi H., Nebylov A. Adaptive “Cubature and Sigma Points” Kalman Filtering Applied to MEMS IMU/GNSS Data Fusion during Measurement Outlier // Journal of Sensor Technology. 2013. Vol. 3, no. 4. P. 115-125.
14. Podshivalov I.A., Marinushkin P.S. Micromechanical system for pedestrian attitude estimation // 2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). IEEE Publ., 2013. P. 1-3. DOI: [10.1109/SIBCON.2013.6693576](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2013.6693576)

Design Issues for MEMS-Based Pedestrian Inertial Navigation Systems

P.S. Marinushkin^{1,*}, V.A. Bakhtina¹,
I.A. Podshivalov¹, O.V. Stukach²

[*marinushkin_ps@mail.ru](mailto:marinushkin_ps@mail.ru)

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Keywords: inertial navigation, microelectromechanical systems (MEMS), pedestrian navigation, wearable electronics

The paper describes design issues for MEMS-based pedestrian inertial navigation systems. By now the algorithms to estimate navigation parameters for strap-down inertial navigation systems on the basis of plural observations have been already well developed. At the same time mathematical and software processing of information in the case of pedestrian inertial navigation systems has its specificity, due to the peculiarities of their functioning and exploitation. Therefore, there is an urgent task to enhance existing fusion algorithms for use in pedestrian navigation systems. For this purpose the article analyzes the characteristics of the hardware composition and configuration of existing systems of this class. The paper shows advantages of various technical solutions. Relying on their main features it justifies a choice of the navigation system architecture and hardware composition enabling improvement of the estimation accuracy of user position as compared to the systems using only inertial sensors. The next point concerns the development of algorithms for complex processing of heterogeneous information. To increase an accuracy of the free running pedestrian inertial navigation system we propose an adaptive algorithm for joint processing of heterogeneous information based on the fusion of inertial information with magnetometer measurements using EKF approach. Modeling of the algorithm was carried out using a specially developed functional prototype of pedestrian inertial navigation system, implemented as a hardware/software complex in Matlab environment. The functional prototype tests of the developed system demonstrated an improvement of the navigation parameters estimation compared to the systems based on inertial sensors only. It enables to draw a conclusion that the synthesized algorithm provides satisfactory accuracy for calculating the trajectory of motion even when using low-grade inertial MEMS sensors. The developed algorithm can be implemented in the individual navigation equipment designed to solve practical tasks requiring autonomous positioning.

References

1. Gorenshtein I.A., Shul'man I.A. *Inertsial'nye navigatsionnye sistemy* [Inertial navigation systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 232 p. (in Russian).
2. Beauregard S. Omnidirectional pedestrian navigation for first responders. *Proceeding of the 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '07)*. IEEE Publ., 2007, pp. 33-36. DOI: [10.1109/WPNC.2007.353609](https://doi.org/10.1109/WPNC.2007.353609)
3. Foxlin E. Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 2005, vol. 25, no. 6, pp. 38-46. DOI: [10.1109/MCG.2005.140](https://doi.org/10.1109/MCG.2005.140)
4. Jiménez A.R., Granja F.S., Prieto J.C., Guevara J. Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU. *Proceeding of the 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC '10)*. IEEE Publ., 2010, pp. 135-143. DOI: [10.1109/WPNC.2010.5649300](https://doi.org/10.1109/WPNC.2010.5649300)
5. Fischer C., Sukumar P.T., Hazas M. Tutorial: Implementing a Pedestrian Tracker Using Inertial Sensors. *Pervasive Computing, IEEE*, 2013, vol. 12, no. 2, pp. 17-27. DOI: [10.1109/MPRV.2012.16](https://doi.org/10.1109/MPRV.2012.16)
6. Sage A., Melsa J. *Estimation Theory with Applications to Communications and Control*. New York, McGraw-Hill, 1971. (Russ. ed.: Sage A., Melsa J. *Teoriya otsenivaniya i ee primeneniye v svyazi i upravlenii*. Moscow, Svyaz' Publ., 1976. 496 p.).
7. Krasil'shchikov M.N., Sebryakov G.G., eds. *Upravlenie i navedenie bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologii* [Control and guidance of unmanned maneuverable aerial vehicles on the basis of modern information technologies]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 280 p. (in Russian).
8. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem* [Fundamentals of building strapdown inertial navigation systems]. St. Petersburg, State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC Publ., 2009. 280 p. (in Russian).
9. Neusypin K.A., Fam Suan Fang. *Algoritmicheskie metody povysheniya tochnosti navigatsionnykh sistem LA* [Algorithmic methods for improving accuracy of navigation systems of aircraft]. Moscow, Mir Publ., 2009. 126 p. (in Russian).
10. Hardegger M., Mazilu S., Caraci D., Hess F., Roggen D., Troster G. ActionSLAM on a Smartphone: At-Home Tracking with a Fully Wearable System. *Proceedings of the 4th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. IEEE Publ., 2013, pp. 1-8. DOI: [10.1109/IPIN.2013.6817874](https://doi.org/10.1109/IPIN.2013.6817874)
11. Tian Z., Zhang Y., Zhou M., Liu Y. Pedestrian dead reckoning for MARG navigation using a smartphone. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011, vol. 65, no. 1. DOI: [10.1186/1687-6180-2014-65](https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-65)
12. Konakov A.S., Shavrin V.V., Tislenko V.I., Savin A.A. Comparative analysis of a standard error of determining the coordinates of the object in the strapdown inertial navigation system using

- different algorithms for nonlinear filtering. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1 (25), pt. 1, pp. 9-5. (in Russian).
13. Benzerrouk H., Salhi H., Nebylov A. Adaptive “Cubature and Sigma Points” Kalman Filtering Applied to MEMS IMU/GNSS Data Fusion during Measurement Outlier. *Journal of Sensor Technology*, 2013, vol. 3, no. 4, pp. 115-125.
14. Podshivalov I.A., Marinushkin P.S. Micromechanical system for pedestrian attitude estimation. *2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. IEEE Publ., 2013, pp. 1-3. DOI: [10.1109/SIBCON.2013.6693576](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2013.6693576)