

Ю. ВАН, Ч.-Ш. ЦЗЯО, А. М. ШКЕЛЬ

ПЕШЕХОДНАЯ ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ С КОРРЕКЦИЕЙ ПО НУЛЕВОЙ СКОРОСТИ И КОМПЛЕКСИРОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ

К пешеходной навигации проявляют большой интерес во многих областях, включая мониторинг состояния здоровья человека, индивидуальную навигацию внутри помещений и системы определения местоположения для служб быстрого реагирования. По причине потенциально сложных условий окружающей среды предпочтение следует отдавать автономной навигации, например инерциальной, которая не зависит от внешних сигналов. Вместе с тем на точность инерциальных методов оказывают влияние шум и дрейф датчиков, поэтому сами по себе они не подходят для длительной пешеходной навигации. Чтобы ограничить рост навигационных погрешностей, была разработана методика коррекции по нулевой скорости стопы в опорной фазе, но обеспечение адаптивности алгоритмов, корректности используемой модели и робастности системы представляет собой серьезную проблему, если не отнестись к ней должным образом.

В статье сделана попытка выработать единый подход к решению задачи автономной пешеходной навигации с выявлением критических частей алгоритма, в наибольшей степени влияющих на общий результат. В первую очередь обсуждаются методы повышения точности навигации на каждом критически важном этапе реализации ее процедур, предложенные другими авторами. Приводятся результаты аналитических оценок и экспериментов,

Ван Юйшен. Доктор наук, Калифорнийский университет (Ирвайн, Калифорния, США), SiTime Corporation (Санга-Клара, Калифорния, США).

Цзяо Чи-Ши. Аспирант, Калифорнийский университет.

Шкель Андрей М. Профессор, Калифорнийский университет.

Статья по докладу на XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

Научные редакторы перевода: к.т.н. Б.С. Ривкин; чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. О.А. Степанов.

иллюстрирующие эффективность интегрирования процессов калибровки инерциального датчика, определения момента опорной фазы, выбора метода адаптации модели и комплексирования различных датчиков.

Ключевые слова: ZUPT-коррекция, пешеходная навигация, ИИМ, комплексирование датчиков.

1. Введение

Концепция коррекции по нулевой скорости (Zero-Velocity Update – ZUPT) была первоначально предложена для решения задач геодезии [1, 2] и в настоящее время стала одним из широко применяемых методов компенсации погрешностей пешеходной инерциальной навигации. Первые работы, в которых описываются ZUPT-коррекция и ее реализация и приводятся экспериментальные результаты, были опубликованы более 20 лет назад [3–5]; более подробно эти проблемы рассматриваются в [6]. Ключевой идеей ZUPT-коррекции является использование состояния «нулевой скорости», в котором периодически оказывается стопа человека во время ходьбы и бега. При этом, если система закреплена на ноге, информация о нулевой скорости во время опорной фазы может применяться в качестве дополнительного измерения для уменьшения погрешности навигации. Было показано, что при использовании инерциального измерительного модуля (ИИМ) тактического класса [7] достижимы навигационные погрешности порядка 30 м за 2 часа движения. Схема стандартного алгоритма пешеходной инерциальной навигации с ZUPT-коррекцией представлена на рис. 1.

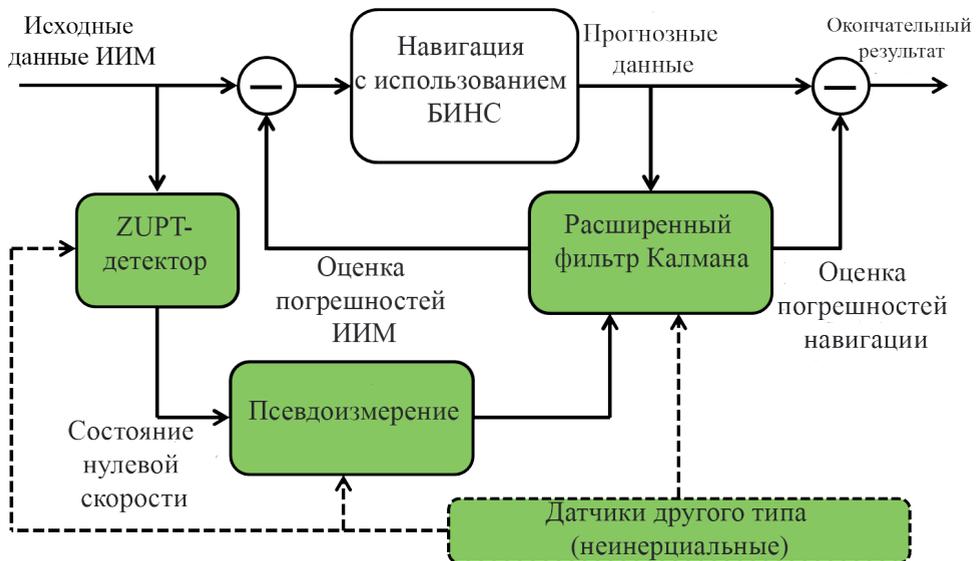


Рис. 1. Схема пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции

Алгоритм навигации на основе бесплатформенных инерциальных систем (БИНС) заключается в следующем. Сначала считываются данные ИИМ для прогнозирования текущих значений навигационных параметров (местоположение, скорость и углы ориентации). Затем на основе данных ИИМ алгоритмически решается задача обнаружения момента опорной фазы стопы, представляющая собой своеобразный

ZUPT-«детектор». После каждого определения момента опорной фазы в расширенный фильтр Калмана (РФК, Extended Kalman Filter – ЕФК) вводятся в качестве псевдоизмерения соответствующие прогнозные данные о движении стопы, на основе которых РФК оценивает погрешности навигации. Измерения, полученные датчиками другого типа (неинерциальными), являются опциональными и могут вводиться в РФК для повышения наблюдаемости системы, в ZUPT-детектор – для повышения точности обнаружения момента опорной фазы и в псевдоизмерения – для улучшения контроля состояния системы.

ZUPT-детектор, блок формирования псевдоизмерения, РФК и блок формирования неинерциальных измерений (зеленые блоки на рис. 1) являются ключевыми элементами алгоритма, и их усовершенствование позволяет повысить точность пешеходной инерциальной навигации. Рассмотрим упомянутые четыре блока отдельно.

ZUPT-детектор использует показания ИИМ для обнаружения факта нахождения стопы в опорной фазе. С математической точки зрения алгоритм обнаружения опорной фазы выполняет задачу проверки бинарной гипотезы [8]. Существуют две основные группы методов определения ZUPT. Первая использует обобщенный тест отношения правдоподобия (Generalized Likelihood Ratio Test – GLRT), в котором на основе показаний ИИМ строится тестовая статистика, сравниваемая с заранее определенным порогом. Ее формирование базируется на гипотезе о характеристиках выходных параметров ИИМ в момент опорной фазы. При этом наиболее часто используются ZUPT-детекторы, анализирующие дисперсии ускорения при движении [9], амплитуды ускорения [10] или интенсивности угловой скорости [11], а также оптимального прогнозирования фазы опоры (Stance Hypothesis Optimal Detector – SHOЕ) [12].

Вместе с тем главная проблема таких методов – это определение порогового значения, на которое влияют разные стили ходьбы. В некоторых исследованиях пороговое значение устанавливалось априори применительно к конкретному случаю [13], в других его параметры корректировались в зависимости от периода цикла походки (или скорости ходьбы), полученного путем предварительной оценки скорости ходьбы [14], или за счет применения преобразования Фурье к показаниям ИИМ [15]. Другая группа методов предполагает использование для выявления опорной фазы машинного обучения. При этом нет необходимости устанавливать определенное пороговое значение, но метод требует значительного объема вычислений и наличия обучающей выборки. Для распознавания походки человека и выявления опорной фазы наиболее часто используется метод опорных векторов (Support Vector Machine – SVM) [16, 17]. Были исследованы также другие методы, такие как алгоритм принятия решений на основе некоторых правил [18], автомат с конечным числом состояний (Finite-State Machine – FSM) [19], адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – ANFIS) [20], скрытая марковская модель (Hidden Markov Model – НММ) [21] и искусственные нейронные сети [22]. Сравнение различных методов было проведено в [23, 24].

После определения момента опорной фазы в блоке формирования псевдоизмерений в зависимости от типа движения стопы во время опорной фазы могут быть сформированы различные типы псевдоизмерений, которые затем передаются в РФК. Из них наиболее часто востребованной является информация о нулевой скорости, т.е. скорость в системе просто устанавливается равной нулю. Псевдоизмерение соответствует линейной модели измерения, поэтому системе не требуются дополнительные параметры [25].

Была предложена также коррекция по нулевой угловой скорости (*Zero-Angular-Rate-Update – ZARU*), когда во время опорных фаз в качестве псевдоизмерения используется нулевая угловая скорость стопы [26]. *ZARU* обеспечивает большую наблюдаемость угла рыскания системы, однако *ZARU*-коррекция оказывается достаточно точной только тогда, когда человек стоит на месте [5]. Предлагались и более сложные модели. Например, в [7] рассматривается простой поворот передней части стопы во время опорной фазы, а в [27] смоделировано положение, при котором одновременно происходят поворот стопы и перемещение точки поворота. Большая точность навигации была достигнута при использовании более сложных моделей, однако при этом приходилось учитывать нелинейную модель измерения или расширение пространства состояний параметров системы.

Фильтр Калмана представляет собой оптимальную линейную оценку для линейных систем с аддитивным независимым белым шумом [28]. Тем не менее на практике большинство систем являются нелинейными, и для линеаризации нелинейной системы относительно оценки текущего среднего и ковариации применяется РФК [29]. В настоящей статье для достижения наилучших результатов навигации в качестве инструмента оценивания и обобщения данных, полученных от различных датчиков, используется РФК, при этом основное внимание уделяется настройке параметров РФК, таких как уровень шума измерений, порождающего шума и неопределенности начального состояния системы [30]. Общие методы настройки параметров заключаются в использовании многоуровневых моделей [31] и нейросети [32].

Чтобы повысить точность пешеходной инерциальной навигации с помощью *ZUPT*-коррекции, используются различные способы формирования и комплексирования измерений от неинерциальных датчиков, что позволяет реализовать преимущества, которыми обладают эти измерения. На рис. 1 пунктирными линиями показано, что данные от таких датчиков могут применяться с тремя целями – расширения состава измерений, повышения качества обнаружения фазы опоры в *ZUPT*-детекторе и усовершенствования РФК.

Расширение состава измерений достигается за счет добавления данных неинерциальных измерений, что улучшает наблюдаемость вектора состояний. Эти измерения обычно добавляются к *ZUPT*-псевдоизмерениям с целью формирования расширенного вектора измерения для РФК. Например, чтобы уменьшить погрешность позиционирования в вертикальном направлении, можно совместно с алгоритмом *ZUPT*-коррекции использовать данные барометрических высотомеров [33, 34]. Для решения задачи обеспечения наблюдаемости угла рыскания в алгоритме *ZUPT*-коррекции нередко применяются магнитометры, которые комплексированы с пешеходной системой навигации [35–38]. Было показано, что измерения относительного расстояния между двумя ботинками, полученные с помощью пары установленных на них ультразвуковых датчиков, обеспечивают компенсацию угла рыскания и расширяют возможности применения ИНС с *ZUPT*-коррекцией [7, 39]. Изучались также результаты, полученные при задействовании систем технического зрения [40].

Вторая цель применения неинерциальных датчиков – повысить качество *ZUPT*-детектора. Для этого могут использоваться такие типы датчиков, как магнитометры [41], электромиографы (ЭМГ) [42], помещенные в обувь датчики давления [43] и направленные вниз радиочастотные (РЧ) датчики [44, 45].

Третья цель, для достижения которой применяется комплексирование датчиков, – это улучшение настроек параметров в РФК, таких как матрица ковариации начального состояния, порождающего шума и шума измерений, в результате повышаются точность и согласованность оценок. Например, в [46], чтобы улучшить оценку статистики погрешностей ИНС с помощью адаптивной оценки множественных моделей (Multiple Model Adaptive Estimation – ММАЕ) и, таким образом, повысить точность навигации [47], использовался сигнал GPS.

В работе рассматриваются несколько подходов к повышению точности пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции, особое внимание уделяется экспериментам, проведенным в лаборатории микросистем Калифорнийского университета, Ирвайн, США (MicroSystems Laboratory of the University of California, Irvine, USA). Статья построена следующим образом. В разделе II рассматриваются стандартные алгоритмы реализации пешеходной инерциальной навигации с помощью ZUPT-коррекции. В разделе III анализируются основные факторы, вызывающие погрешности навигации. В разделе IV описываются различные способы уменьшения навигационных погрешностей и повышения робастности системы. В разделе V показывается, что накопления навигационных погрешностей обусловлены погрешностями ИИМ. В разделе VI обобщаются результаты проведенного исследования.

II. Стандартные алгоритмы реализации

При стандартном алгоритме навигации с использованием БИНС в некоторой навигационной системе координат (СК) [48] ориентация, скорость и местоположение оцениваются на основе показаний ИИМ [49]:

$$\begin{aligned}\omega_{nb}^b &= \omega_{ib}^b - C_n^b (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n), \\ \dot{C}_b^n &= C_b^n [\omega_{nb}^b \times], \\ \dot{v}_e^n &= C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v_e^n + g_l^n, \\ \dot{p}_e^n &= v_e^n,\end{aligned}\tag{1}$$

где C_b^n – матрица направляющих косинусов (Direction Cosine Matrix – DCM), определяющая ориентацию СК, связанной с телом человека (b -СК), относительно навигационной СК (n -СК); f^b – показания акселерометра в b -СК; v_e^n и p_e^n – скорость и положение n -СК относительно земной СК (e -СК); g_l^n – локальная сила тяжести, определенная в n -СК, а $[\cdot \times]$ – кососимметрический оператор векторного произведения. В переменных вида ω_{ie}^n нижние индексы обозначают угловую скорость земной СК относительно инерциальной СК (i -СК), верхний индекс – опорную СК, в которой задан вектор. Например, ω_{ib}^b – это угловая скорость b -СК относительно i -СК, выраженная в b -СК, то есть показания гироскопа.

Для оценки и компенсации навигационных погрешностей БИНС используется РФК. В большинстве случаев вектор состояния РФК содержит не собственно навигационные параметры, а погрешности их определения [50]. Причина в том, что изменение навигационных параметров происходит нелинейно в отличие от их погрешностей в предположении, что последние малы. Если не учитывать вращение Земли, изменения масштабных коэффициентов и рассогласования инерциальных датчиков, рост навигационных погрешностей можно смоделировать следующим образом [51]:

$$\delta\dot{\vec{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -C_b^n & 0 \\ \vec{f}^n \times & 0 & 0 & 0 & C_b^n \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \delta\vec{x} + \begin{bmatrix} C_b^n \cdot \epsilon_{ARW} \\ C_b^n \cdot \epsilon_{VRW} \\ 0 \\ \epsilon_{RRW} \\ \epsilon_{AcRW} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В этой модели погрешностей вектор состояния – $\delta\vec{x} = [\delta\vec{\theta}_n^T, \delta\vec{v}_n^T, \delta\vec{s}_n^T, \delta\vec{b}_g^T, \delta\vec{b}_a^T]^T$, где $\delta\vec{\theta}_n$ – погрешность определения ориентации по трем осям в n -СК; $\delta\vec{v}_n$ и $\delta\vec{s}_n$ – векторы погрешностей знания скорости и координат по осям, направленным на север, восток и вниз в n -СК; $\delta\vec{b}_g$ и $\delta\vec{b}_a$ – смещения нулей трех акселерометров и гироскопов соответственно; ϵ_{ARW} – случайный дрейф гироскопов по углу (ARW); ϵ_{VRW} – случайный дрейф акселерометров по скорости (VRW); ϵ_{RRW} – случайный дрейф гироскопов по угловой скорости (RRW); ϵ_{AcRW} – случайный дрейф акселерометров по ускорению (AcRW).

Для определения момента опорной фазы, как указывалось ранее, необходим ZUPТ-детектор. В стандартной реализации алгоритм определения нулевой скорости сводится к бинарному критерию проверки гипотезы, когда выбирается один из двух вариантов: ИИМ движется (H_0) или неподвижен (H_1). Распространенный способ – воспользоваться при этом теоремой Неймана–Пирсона и сравнить отношение правдоподобия L с заданным пороговым значением γ [52]: выбрать H_1 , если

$$L(z_n) = \frac{p(z_n | H_1)}{p(z_n | H_0)} > \gamma, \quad (3)$$

где $z_k = \{y_k\}_{k=n}^{n+N-1}$ – N последовательных показаний ИИМ между n и $n+N-1$ моментами времени, а $L(\times)$ можно определить на основании предположения о характере движения ног в опорной фазе.

На шаге прогнозирования РФК матрица ковариации состояния вычисляется следующим образом:

$$P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + Q_k, \quad (4)$$

где $P_{k+1|k}$ – матрица ковариации оценивания погрешностей на $(k+1)$ -м временном шаге по всем измерениям, в том числе и на k -м шаге, F_k – матрица динамики, Q_k – ковариационная матрица помехи.

Всякий раз, когда фиксируется опорная фаза, для компенсации погрешностей оценивания в РФК в качестве псевдоизмерения вносится информация о нулевой скорости:

$$\vec{v}_k = [0 \quad I_{3 \times 3} \quad 0 \quad 0 \quad 0] \cdot \delta\vec{x}_k + \vec{w}_k, \quad (5)$$

где k – индекс времени, а \vec{w}_k – шум измерений.

На шаге коррекции вектор состояния системы обновляется следующим образом:

$$\delta\vec{x}_{k+1|k+1} = \delta\vec{x}_{k+1|k} + K_{k+1} \cdot \vec{v}_{k+1}, \quad (6)$$

где $\delta\bar{x}_{k+1|k+1}$ – апостериорная оценка погрешности, K_{k+1} – коэффициент усиления фильтра Калмана:

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1}. \quad (7)$$

Апостериорная ковариационная матрица имеет вид

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1|k}. \quad (8)$$

Результат коррекции по нулевой скорости представлен на рис. 2. Из-за погрешностей ИИМ без ZUPT-коррекции наблюдается дрейф оценки скорости (кривая голубого цвета), в то время как ZUPT-коррекция помогает свести оценку погрешности скорости в опорной фазе практически к нулю, что значительно снижает погрешности навигации, вызванные погрешностями ИИМ. Таким образом, исходная траектория в форме «8» может быть получена только с применением ZUPT-коррекции. Как видно из рис. 2, без ZUPT-коррекции оценка погрешности в выработке координат существенно смещается, исключая возможность воспроизведения эталонной траектории.

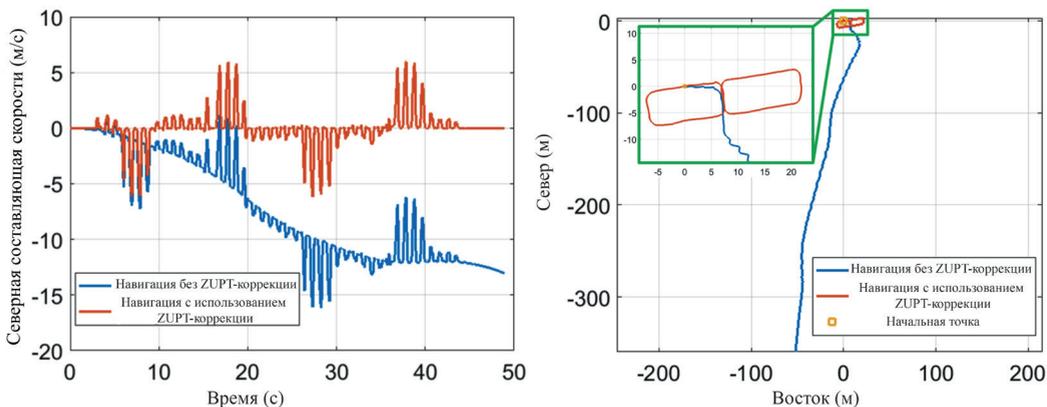


Рис. 2. Сравнение оценок скорости (слева) и координат (справа) с использованием алгоритма коррекции по нулевой скорости и без него. Исходные данные ИИМ получены из [53].

Видно, что точность навигации при использовании алгоритма коррекции по нулевой скорости возрастает

III. Основные источники погрешностей

Несмотря на то что ZUPT-коррекция позволяет значительно уменьшить погрешности пешеходной инерциальной навигации, последняя подвержена влиянию других типов погрешностей, которые будут рассмотрены ниже.

A. Движение стоп

Ключевую роль в пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции играет предположение, что в опорной фазе скорость стопы равна нулю. Вместе с тем, учитывая динамику походки человека, даже в опорной фазе стопа совершает сложное движение с линейной скоростью порядка 0,01 м/с и угловой скоростью около 2°/с, что наблюдалось в ходе экспериментов, описанных в [54, 55]. Кроме того, будет отличаться и остаточная скорость стопы в различных опорных

фазах, поскольку ходьба совершается по разным типам поверхностей, неодинаковы движения тела и т.п. [56].

Систематические погрешности обусловлены разницей между прогнозом движения стопы в опорной фазе и реальной ситуацией: например, нередко недооценивается длина шага или преувеличивается высота подъема стопы при движении [57, 58]. Навигационная погрешность, вызванная преуменьшением длины шага, может достигать 2% от общей длины траектории [59]. Таким образом, при использовании в РФК упомянутого псевдоизмерения необходим более точный прогноз движения стопы в опорной фазе.

Б. Определение опорной фазы

ZUPT-детектор должен определить момент опорной фазы в процессе движения до начала применения ZUPT-коррекции. С одной стороны, ложные сигналы определения фазы ошибочно установят скорость стопы равной нулю, с другой – обнаружение опорной фазы приведет к уменьшению возможности скомпенсировать навигационные погрешности, и накопленные пропуски определения опорных фаз приведут к смещению расчетной траектории [14]. Таким образом, точное определение опорных фаз имеет решающее значение для получения точной оценки.

Поскольку во время реальной ходьбы нога находится в постоянном движении, не существует четкого различия между опорной фазой и фазой переноса конечности [60, 61]. Кроме того, движение стопы не является неизменным даже в опорной фазе. И наконец, определение опорной фазы зависит от множества факторов, включая частоту шагов, особенности походки и тип поверхности. Если ZUPT-детектор не сможет адаптироваться к этим факторам, то результаты, полученные с помощью алгоритма пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции, нельзя считать достоверными. Например, в [62] продемонстрировано, что в навигационном сценарии, куда входит и ходьба, и бег, погрешность навигации достигает 20% от длины траектории.

В. Наблюдаемость параметров

Практически все переменные состояния системы РФК, приведенные в (2), кроме координат, угла рыскания (или угла курса) и смещения нуля гироскопа по оси Z [63], наблюдаемы с использованием ZUPT-псевдоизмерений. Данные о местоположении ненаблюдаемы в силу специфики решения задачи счисления [64], а угол рыскания – из-за того, что он параллелен кажущемуся ускорению (specific force), определяемому ИИМ во время псевдоизмерения. В результате накопленная погрешность оценивания угла рыскания, которая как раз и является одним из главных источников погрешности в пешеходной инерциальной навигации, не компенсируется за счет использования только ZUPT-коррекции [6]. Было продемонстрировано, что недостаточная наблюдаемость угла рыскания ведет к росту неопределенности оценки угла рыскания как $t^{1.5}$, в то время как неопределенности для углов качки ограничены [51].

Г. Резкие изменения условий окружающей среды

Во время ходьбы в наиболее интенсивной динамике находится нога человека, поэтому не всегда практично прикреплять на нее инерциальные датчики потреби-

тельского класса [65]. Как было установлено, даже при ходьбе с нормальной скоростью ускорение составляет более 10 g, а угловая скорость – 800°/с [59]. При беге эти значения могут превышать 20 g и 1500°/с. Чтобы избежать выхода за пределы возможного диапазона измерения, для крепления на ногах необходимо использовать инерциальные датчики с большим диапазоном измерений – в отличие от других типов навигации, например автомобильной, где требования к диапазонам измерений ИИМ можно смягчить. Более того, предъявляются повышенные требования к ширине полосы пропускания инерциальных датчиков, которые крепятся к ноге, поскольку датчик подвергается сильному ударному воздействию, когда пятка касается земли. В работе [58] было показано, что даже полосы пропускания 330 Гц недостаточно, чтобы зафиксировать некоторые параметры во время касания.

Д. Чувствительность гироскопа к линейному ускорению (G-Sensitivity)

Чувствительность гироскопа к линейному ускорению (*g*-чувствительность) приводит к его ошибочной реакции на внешнее ускорение [66]. Типичное значение дрейфа гироскопов потребительского класса из-за *g*-чувствительности достигает 0,3°/c/g [67]. Из-за большой величины ускорения стопы в процессе движения влияние *g*-чувствительности становится существенным. Например, в работе [7] продемонстрировано, что погрешность измерений угла курса накапливается при угловой скорости 135°/ч даже в том случае, когда нестабильность смещения нуля гироскопа составляла всего 3°/ч. Поскольку погрешность оценки угла рыскания ненаблюдаема, погрешность, вызванная *g*-чувствительностью гироскопа, будет накапливаться, суммироваться с углом рыскания и приведет к систематическому дрейфу по курсу оцениваемой траектории [58].

Е. Настройка параметров РФК

РФК требует настройки множества параметров, таких как шум измерений, порождающий шум и неопределенность начального состояния системы. Использование ZUPТ-коррекции не является фактическим измерением скорости, и поэтому весьма сложно определить уровень шума соответствующих измерений [56]. Помимо этого, уровень шума измерений изменяется при разной частоте шагов и типах поверхностей. Если в соответствии с этим не скорректировать параметры РФК, мы неминуемо столкнемся с большими навигационными погрешностями [68].

Ж. Коррелированные шумы

При реализации стандартного ФК предполагается, что инновационная последовательность представляет собой белый гауссовский шум. Вместе с тем в работе [58] отмечалось, что она может быть сильно коррелированной, в силу чего при оценивании возникают погрешности моделирования, порожденные отличием расчетной модели, используемой в ФК, от действительной. Считается, что коррелированность возникает не из-за смещения нулей датчиков, а из-за погрешностей моделирования.

IV. Методы уменьшения навигационных погрешностей

В данном разделе приводится обзор некоторых методов уменьшения навигационных погрешностей пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции, которые были разработаны лабораторией микросистем Калифорнийского университета.

А. Калибровка погрешности датчика

Помимо ZUPT-коррекции, которая позволяет уменьшить погрешности навигации, обусловленные погрешностями инерциальных датчиков, целесообразно также использовать в алгоритме другие виды обработки данных, что дает возможность дальнейшего повышения точности навигации.

Как упоминалось в предыдущем разделе, g -чувствительность гироскопов приводит к систематическому дрейфу оцениваемой траектории, поэтому требуются соответствующие калибровка и компенсация. В работе [54] описаны характеристики g -чувствительности гироскопов и способы ее компенсации. Сначала с помощью вращающегося стенда и поворотного стола осуществлялась калибровка смещения нуля, масштабного коэффициента и неортогональности чувствительных элементов ИИМ (рис. 3, а). Затем с помощью вибростенда проверялась g -чувствительность гироскопа в широком диапазоне частот внешнего ускорения (рис. 3, б). Было установлено, что g -чувствительность гироскопа, возникающую под влиянием внешнего ускорения до 140 Гц, можно аппроксимировать так же, как в состоянии неподвижности. Испытания показали, что g -чувствительность гироскопа составляет $0,0041^\circ/\text{с}$, $0,0025^\circ/\text{с}$ и $-0,0022^\circ/\text{с}$ по осям x , y , z соответственно. Систематический дрейф оцениваемой траектории был устранен компенсацией g -чувствительности гироскопа (см. рис. 3, в).

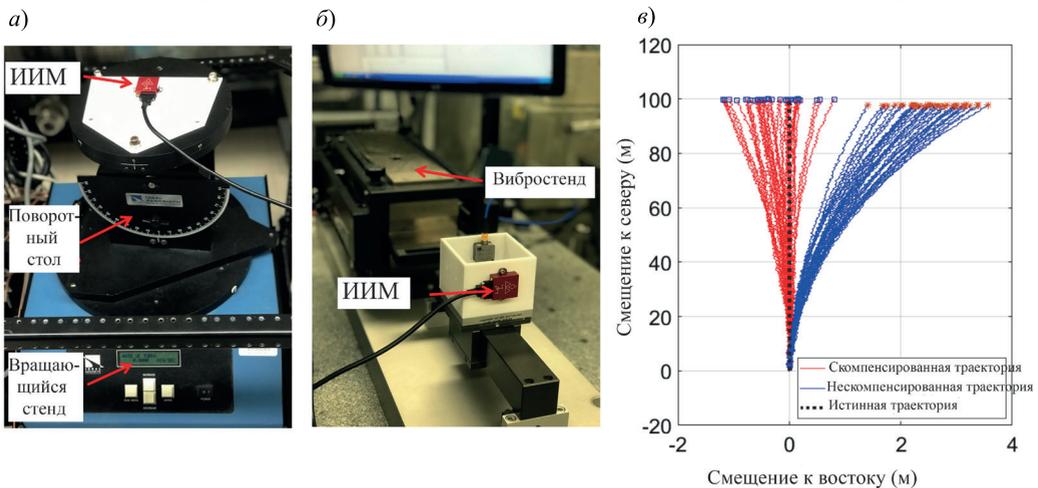


Рис. 3. Компенсация g -чувствительности гироскопа.

Экспериментальная установка для калибровки ИИМ под воздействием (а) статического внешнего ускорения и (б) переменного внешнего ускорения; в – результат компенсации g -чувствительности гироскопа

Смещение нуля инерциального датчика меняется в процессе движения по причине его нестабильности. В связи с этим, чтобы снизить навигационную погрешность,

необходимо оценить смещения нулей инерциальных датчиков в режиме реального времени, особенно ненаблюдаемое смещение нуля гироскопа по оси z . В [69] описана система калибровки с использованием ИИМ, закрепленных на голове и на ноге (см. рис. 4, а). Впервые распознавание динамики человека при ходьбе было осуществлено с помощью сверточной нейронной сети, идентифицировавшей различные навигационные сценарии, в том числе те, при которых человек неподвижен, идет, поднимается и спускается по ступеням, встает и садится, прыгает и бежит. Достоверность определения этих категорий движений составила около 90% (см. рис. 4, б). После этого измерения, полученные от закрепленного на голове ИИМ, были откалиброваны в соответствии с результатами распознавания характера движений человека (см. рис. 4, в).

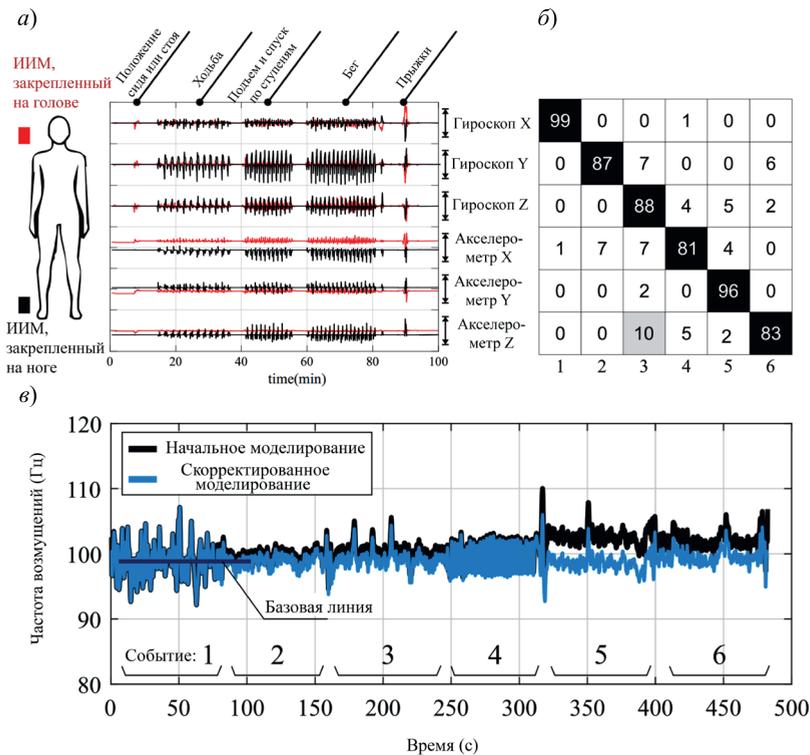


Рис. 4. Калибровка инерциального датчика с использованием метода распознавания динамики человека при движении: а – показания ИИМ, закрепленных на голове и на ноге во время различных видов движения; б – матрица несоответствий классификации; в – результаты калибровки гироскопа

Б. Уменьшение погрешности моделирования

Погрешность моделирования, или системная погрешность, обусловлена различием между моделью, которая используется алгоритмом, и реальными данными и является еще одним источником погрешностей навигации помимо погрешностей датчиков. Алгоритм пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции исходит из предположения, что нога в опорной фазе неподвижна.

В результате малейшее движение ноги в опорной фазе будет порождать навигационную погрешность. Движение ноги можно разложить на систематическое и стохастическое. Каждое из них следует рассматривать отдельно.

Систематическая составляющая в основном связана с движением стопы и деформацией обуви в опорной фазе. Для компенсации этой составляющей необходимо точно определить ее с помощью других методов позиционирования. Например, в работе [59] для оценки движения стопы в опорной фазе использовалось магнитное устройство слежения за перемещением (см. рис. 5, в). Средняя скорость ноги на траектории составила 0,02 м/с. Было подтверждено, что основной причиной недооценки длины шага являлась невязка по скорости, ее компенсация значительно повысила точность навигации (см. рис. 5, з).

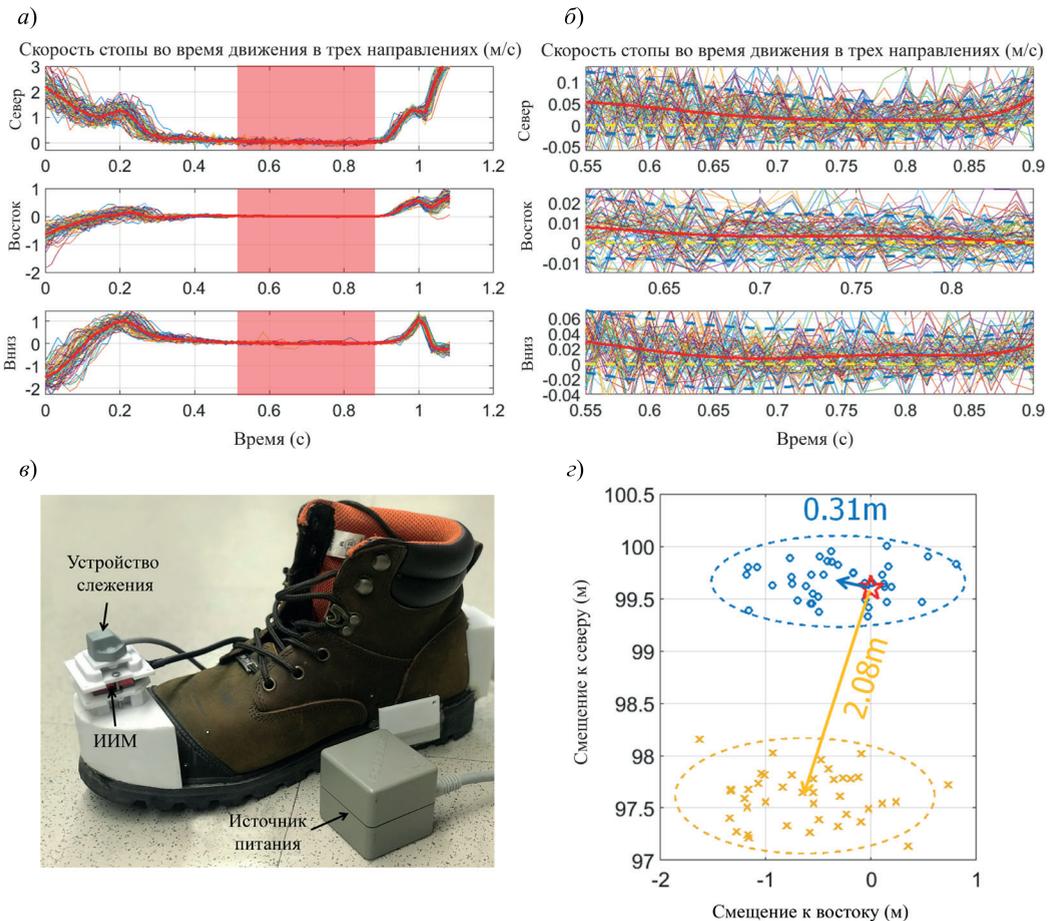


Рис. 5. Уменьшение систематической погрешности моделирования:

а – скорость стопы, измеренная с помощью магнитного устройства слежения за перемещением, во время цикла походки;

б – скорость стопы во время опорной фазы крупным планом;
в – схема эксперимента;

з – средняя погрешность навигации была уменьшена с 2,08 м до 0,31 м в ходе 40 испытаний, проведенных на прямой траектории длиной 99,6 м

Стохастическая составляющая движения ноги порождается различиями в его характере между опорными фазами, и ее можно интерпретировать как шум при измерениях РФК. В работе [56] был предложен метод, позволяющий оценить шум при измерениях на основе показаний ИИМ, закрепленного только на стопе. Сравнивались результаты при креплении ИИМ в двух местах – на носке и на заднике ботинка (см. рис. 6, а). Оказалось, что ИИМ, закрепленный на носке ботинка, в меньшей степени подвергается ударному воздействию, при этом уровень шума при измерениях оказался ниже, опорная фаза – более длительной, однако угловая скорость – выше. Было показано, что круговая вероятная погрешность (КВП) в определении координат у ИИМ, закрепленного на носке ботинка, ниже на 45% по сравнению с ИИМ, установленным на заднике (см. рис. 6, б).

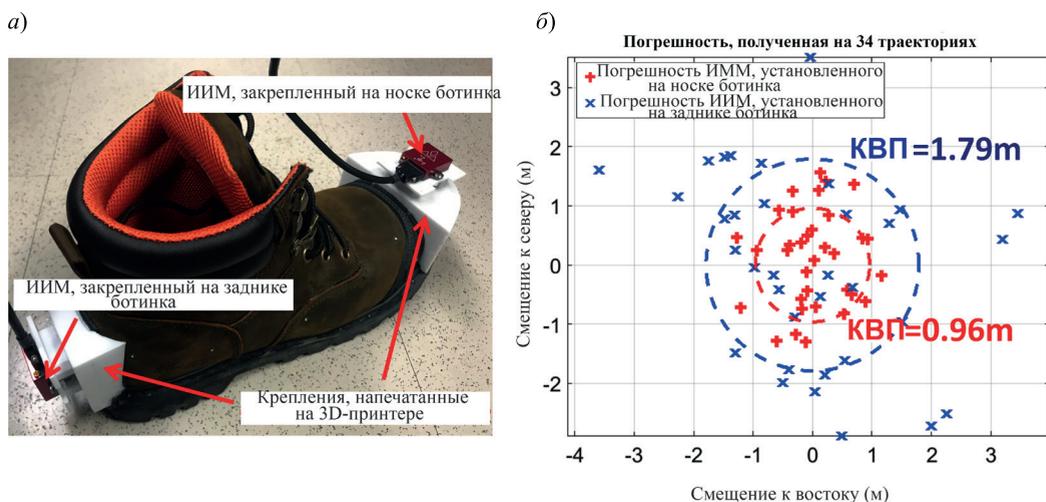


Рис. 6. Уменьшение стохастической погрешности моделирования:
 а – схема эксперимента для сравнения двух положений крепления ИИМ;
 б – круговая вероятная погрешность, полученная на 34 одинаковых траекториях при установке ИИМ на носке и на заднике ботинка

В. Повышение адаптивности алгоритма

Пешиеходная инерциальная навигация предполагает наличие различных навигационных сценариев и необходимость адаптивной настройки различных параметров, наибольшее влияние на которые оказывают два основных фактора – тип поверхности и скорость ходьбы. Если алгоритм сможет к ним адаптироваться, точность навигации существенно возрастет, особенно при реализации сложных навигационных сценариев.

Тип поверхности, по которому движется объект, необходимо идентифицировать заранее перед адаптивной настройкой алгоритма. Для этого мы воспользовались методом машинного обучения, схема алгоритма которого представлена на рис. 7, а [68]. Сначала данные ИИМ делились на группы по циклам походки (шаг 1). При условии что типичная частота ходьбы составляет 90 шагов в минуту, а частота опроса ИИМ – 800 Гц, каждая группа содержала порядка 3200 данных. Затем был применен метод главных компонент для уменьшения размерности входных данных с более

чем 3000 до 10 (шаг 2). Далее данные систематизировались, для чего использовалась искусственная нейронная сеть (шаг 3). В результате с вероятностью 99,5% были идентифицированы пять различных типов поверхностей: твердая поверхность, трава, песок, лестница вверх и вниз (см. рис. 7, б). После этого соответствующие параметры настраивались с помощью многоуровневой модели РФК согласно различным установленным навигационным сценариям (шаг 4) [70]. Повышение точности навигации для различных траекторий, включая ходьбу по песку, по твердой поверхности и подъем по лестнице, показано на рис. 7, в.

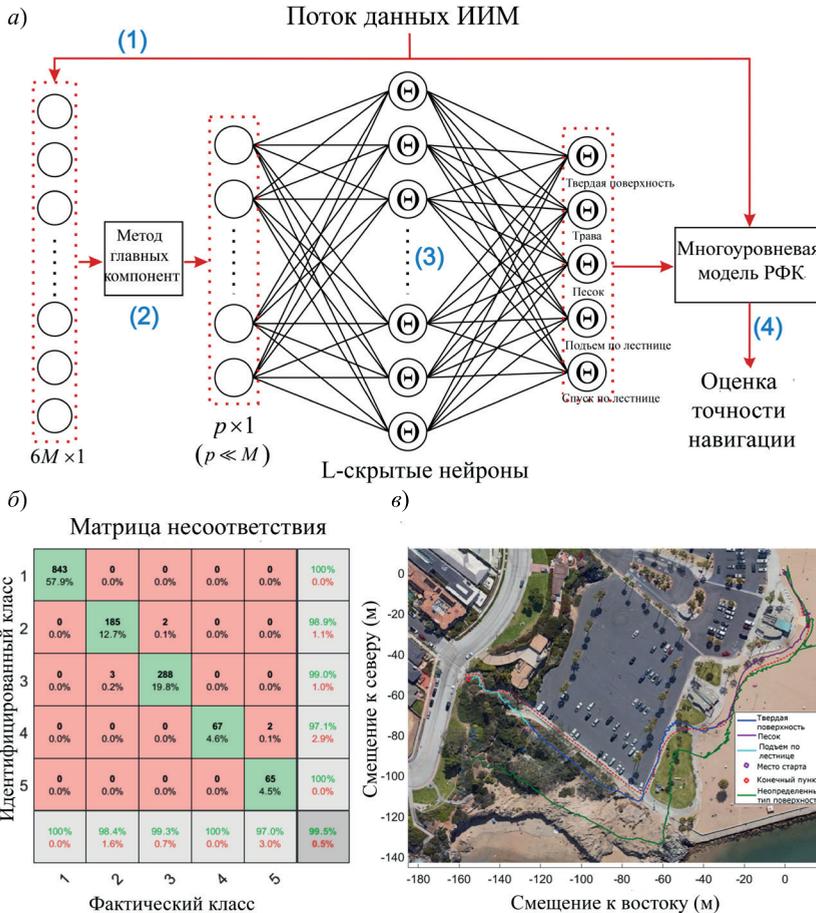


Рис. 7. Результаты определения типа поверхности: а – схематическое изображение алгоритма определения типа поверхности, используемого в пешеходной инерциальной навигации с ZUPT-коррекцией; б – матрица несоответствия при классификации типа поверхности, где в каждом столбце представлен фактический класс, а в каждой строке – идентифицированный; классификационный признак для каждого типа поверхности приведен в нижней части матрицы, а интегральная вероятность классификации указана в нижнем правом углу; в – влияние типа поверхности на снижение навигационной погрешности. Пунктирной красной линией обозначена эталонная траектория (ground truth), сплошной зеленой линией – результаты навигации без определения типа поверхности, сплошной линией других цветов – оценка траектории для конкретного типа поверхности

Помимо типа поверхности, алгоритм должен уметь адаптироваться к частоте шагов. В работе [62] для адаптации алгоритма к переменной частоте шагов в реальном времени был использован байесовский подход. Пороговое значение для ZUPT-детектора можно представить как

$$\gamma = \frac{p(H_0)}{p(H_1)} \cdot \frac{c_{10} - c_{00}}{c_{01} - c_{11}}, \quad (9)$$

где $p(H_0)/p(H_1)$ – априорная вероятность гипотезы; c_{00} , c_{11} , c_{10} и c_{01} – функции стоимости правильного обнаружения фазы переноса конечности, опорной фазы, ложного обнаружения и пропуска обнаружения соответственно. Были приняты равномерная априорная вероятность и нулевые значения функций стоимости для верного распознавания. Таким образом, пороговое значение определялось только отношением функций стоимости ложного обнаружения и пропуска обнаружения. Тогда функция стоимости настраивается в соответствии с частотой шагов, которая коррелирует с силой толчка при ударе пятки о поверхность. В итоге адаптивный ZUPT-детектор продемонстрировал более высокую точность, чем любой неадаптивный метод, при использовании на траектории, содержащей как ходьбу, так и бег (рис. 8).

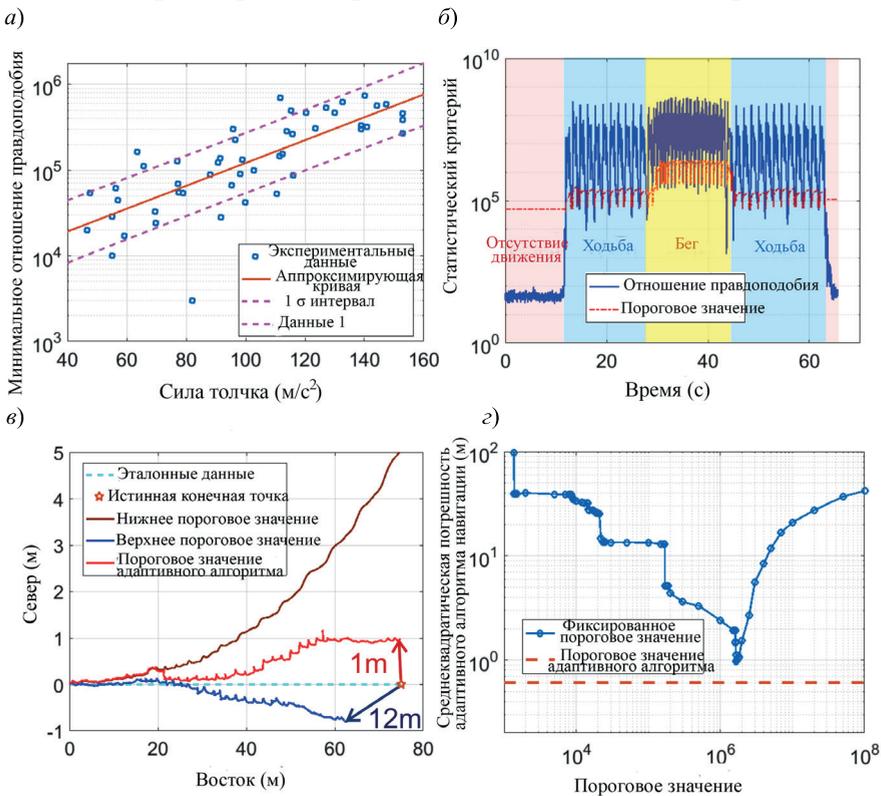


Рис. 8. Результаты адаптации алгоритма к частоте шагов (прямой линией обозначена заданная траектория):
 а – соотношение между силой толчка и отношением правдоподобия;
 б – эффективная работа ZUPT-алгоритма при различной частоте шагов;
 в – оценка траектории при использовании различных ZUPT-детекторов;
 з – среднеквадратическая погрешность адаптивного алгоритма и алгоритмов с фиксированными пороговыми значениями [71]

Г. Комплексирование датчиков

Комплексирование датчиков является общепринятым методом, позволяющим повысить точность пешеходной инерциальной навигации за счет увеличения на-

блюдаемости системы. В данном разделе рассматриваются успешные результаты применения метода комплексирования датчиков как в отношении алгоритмов, так и аппаратуры, разработанных MicroSystems Laboratory.

Чтобы оценить эффективность применения неинерциальных датчиков в ИНС с использованием ZUPТ-коррекции, для экспериментов с пешеходами была разработана платформа перестраиваемого состава, получившая название «лаборатория на ботинке» [72] (рис. 9), на которой установлен локальный процессор, подсоединенный к соответствующим датчикам, закрепленным на обуви, и по беспроводной связи передающий собранные данные на удаленный компьютер для их визуализации и решения задачи навигации в закрытом помещении в режиме реального времени. В состав платформы могут входить различные ИИМ, ультразвуковые датчики, барометры, камеры с КМОП-структурой и динамические видеодатчики.

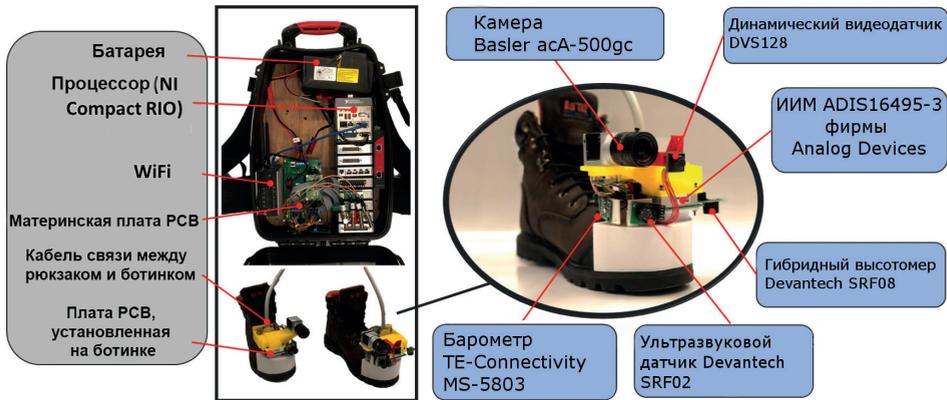


Рис. 9. Платформа «лаборатория на ботинке»

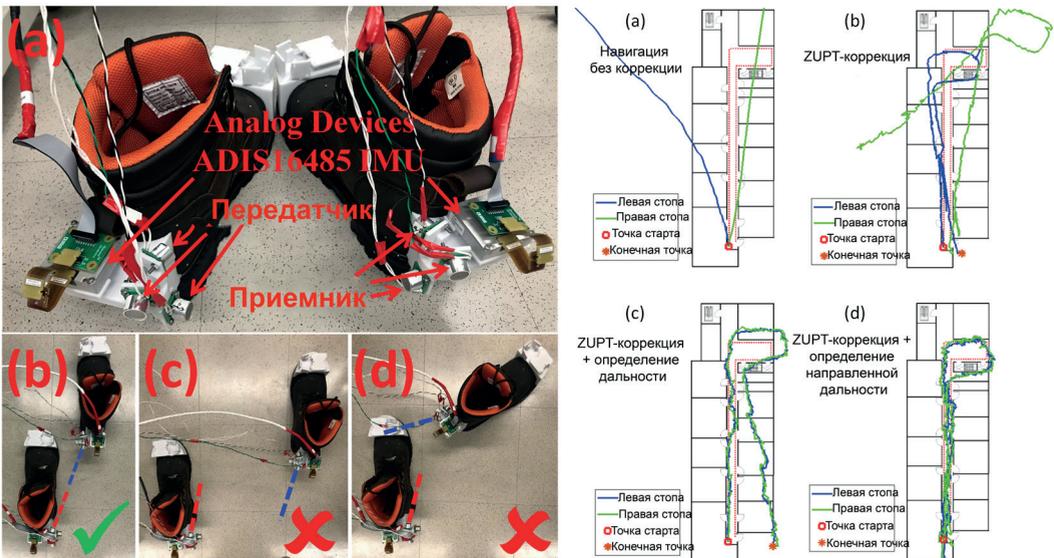


Рис. 10. Результаты определения направленной дальности (directional ranging).

Слева показана схема эксперимента для определения направленной дальности и типичные сценарии, когда относительное расстояние может и не может быть измерено.

Справа показано влияние определения направленной дальности на точность навигации

Ультразвуковые датчики расстояния широко применяются для измерения дистанции между стопами в пешеходной навигации [7]. Вместе с тем от этих датчиков можно получить гораздо больше информации, чем просто относительное расстояние между передатчиком и приемником. В работе [73] предлагается так называемый метод определения «направленной дальности», в котором используется тот факт, что сигнал ультразвукового передатчика распространяется в пределах некоторого конуса. Всякий раз, когда приходит сигнал, мы получаем не только данные о расстоянии, но и можем принять во внимание, что передатчик и приемник ориентированы друг относительно друга. В результате можно вычленить данные об их относительной ориентации и тем самым улучшить наблюдаемость системы, особенно по углу рыскания. Было продемонстрировано, что погрешности навигации, обусловленные дрейфом по углу рыскания, за счет применения метода определения направленной дальности можно существенно уменьшить.

Помимо определения относительного взаимного положения стоп и ориентации между двумя ботинками, установленный на обуви ультразвуковой датчик, если он направлен вниз, может показать, на какой высоте находится ботинок относительно земли. В работе [74] измерения этой высоты использовались в алгоритме оптимального прогнозирования фазы опоры (АОПФО) и для более точного определения нулевой скорости. Применение направленного вниз датчика расстояния позволяет получить данные о том, находится ли нога на земле. АОПФО, использующий показания ультразвукового датчика, выберет гипотезу H_1 , если

$$T_h(z_n) = \frac{1}{N} \sum_{k \in \Omega_n} \left(\frac{1}{\sigma_\alpha^2} \left\| y_k^\alpha - g \frac{\bar{y}_k^\alpha}{\|\bar{y}_k^\alpha\|} \right\|^2 + \frac{1}{\sigma_\omega^2} \|y_k^\omega\|^2 + \frac{1}{\sigma_h^2} \|y_k^h - h\|^2 \right) < \gamma, \quad (10)$$

где $z_n = \{y_k\}_{k=n}^{k=N-1}$ – это N последовательных показаний ИИМ между временным индексом n и $n+N-1$; y_k^α – показания акселерометра в момент времени k ; y_k^ω – показания гироскопа в момент времени k ; y_k^h – показания направленного вниз датчика расстояния в момент времени k ; h – высота ботинка относительно земли, когда он находится на земле; $\Omega_n = \{l \in \mathbb{N}, n \leq l < N-1\}$ – множество индексов измерений датчика в момент времени n с окном измерений длины N ; γ – пороговые значения, определяемые пользователем; σ_α^2 , σ_ω^2 , σ_h^2 – дисперсии шумов акселерометра, гироскопа и ультразвукового датчика соответственно. На рис. 11, а представлена «лаборатория на ботинке» с направленным вниз ультразвуковым датчиком, а на рис. 11, б приведены результаты навигационных измерений с использованием АОПФО и данных ультразвукового датчика.

Направленный вниз датчик дальности, установленный на ноге, позволяет получить информацию не только о том, находится ли ботинок на земле, но и о высоте его расположения относительно земли. В [75] показано, что данные о высоте ботинка относительно земли в случае расположения его на плоской поверхности при перемещении по лестнице можно преобразовать в высоту относительно исходного положения путем одновременного оценивания высоты ботинка и высоты расположения поверхности. С этой целью используется ультразвуковой высотомер. Для более широкого применения прибора, например в таких местах, как лифты и лестничные пролеты, в работе [75] была предложена гибридная система, позволяющая комплексировать показания барометра и ультразвукового высотомера.

а)



б)

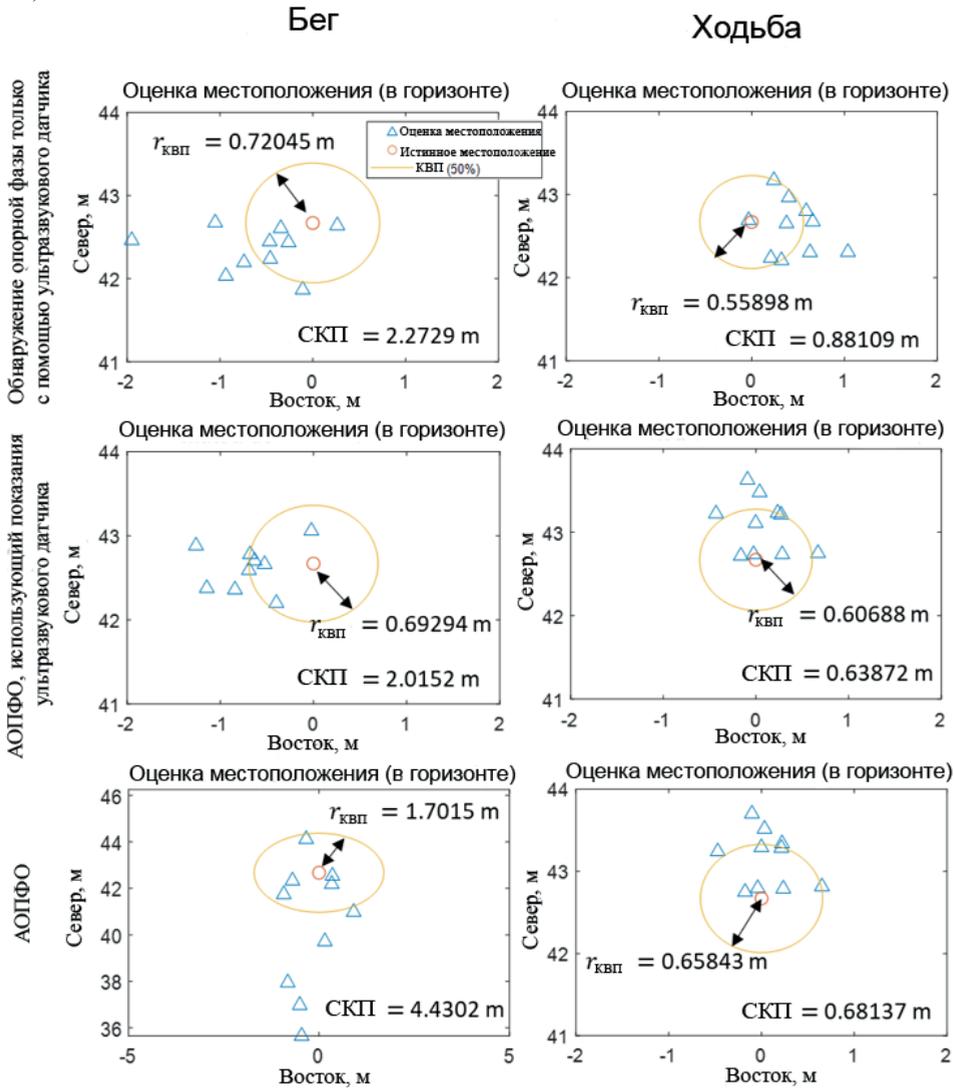


Рис. 11: а – платформа «лаборатория на ботинке» с установленным на ней ультразвуковым датчиком, направленным вниз;

б – результаты измерений, полученных с использованием АОПФО и данных ультразвукового датчика.

Результаты, полученные при использовании данных ИНС с ZURT-коррекцией, а также АОПФО и показаний ультразвукового датчика, сравнивались с результатами, полученными при использовании лишь АОПФО, и результатами, полученными при обнаружении опорной фазы только с помощью ультразвукового датчика

Благодаря этому гибриднему высотомеру удалось свести к минимуму использование барометрического высотомера, который чувствителен к колебаниям атмосферного давления. Приведенные в [75] результаты экспериментов показали, что гибридный высотомер способен функционировать на плоских поверхностях, ступенях, лестничных пролетах и в лифтах, кроме того, он менее восприимчив к изменениям температуры и атмосферного давления окружающей среды, чем барометр. На рис. 12 сравнивается точность навигации в вертикальном направлении для ИНС с ZUPT-коррекцией, ИНС с ZUPT-коррекцией и с использованием барометра и ИНС с ZUPT-коррекцией и с использованием гибридного высотомера.

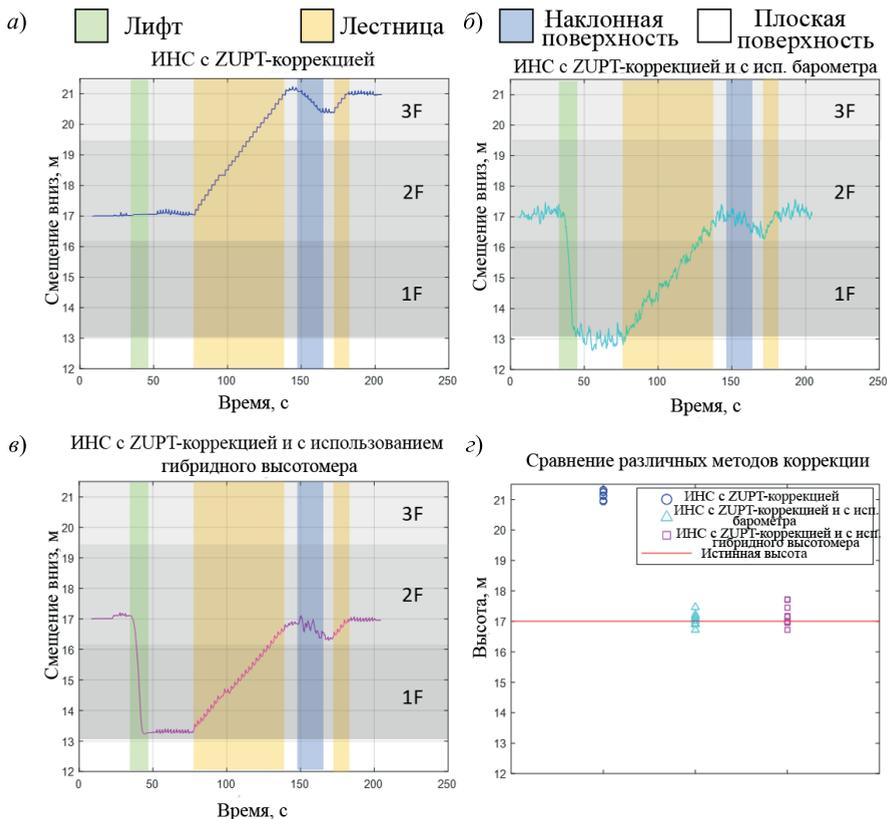


Рис. 12: а, б и в – высоты, определенные с помощью ИНС с ZUPT-коррекцией, ИНС с ZUPT-коррекцией и с использованием барометра и ИНС с ZUPT-коррекцией и с использованием гибридного высотомера [75]; з – итоговые вертикальные отклонения для трех навигационных решений

Таким образом, результаты навигации можно улучшить, если дополнить показания ИНС с ZUPT-коррекцией измерениями относительной дистанции между стопами и ориентации посредством ультразвуковых датчиков расстояния. Вместе с тем измерения относительного расстояния не позволяют последовательно обновлять состояния системы в РКФ, а ультразвуковое определение относительной ориентации фиксирует лишь диапазон положений объекта по причине узкой области направленности ультразвуковых датчиков. Следовательно, больше информации можно получить из конфигурации взаимного расположения стоп. В работе [76] показания ИНС с ZUPT-коррекцией было предложено дополнить определением относительного взаимного

расположения стоп, выполненным на основе сопоставления эталонного изображения (feature pattern) на одном ботинке с изображением, полученным с помощью камеры, установленной на другом ботинке (рис. 13, а). Результаты навигационных измерений для ИНС с ZUPT-коррекцией, дополненные измерениями относительного расстояния между стопами, приведены на рис. 13, б. Таким образом, проведенный эксперимент [76] продемонстрировал, что описанный метод позволяет уменьшить накопленную навигационную погрешность на 55% и 22% для левой и правой стоп по сравнению с использованием только ZUPT-коррекции и на 30% и 31% – по сравнению с использованием ZUPT-коррекции и измерений относительной дистанции.

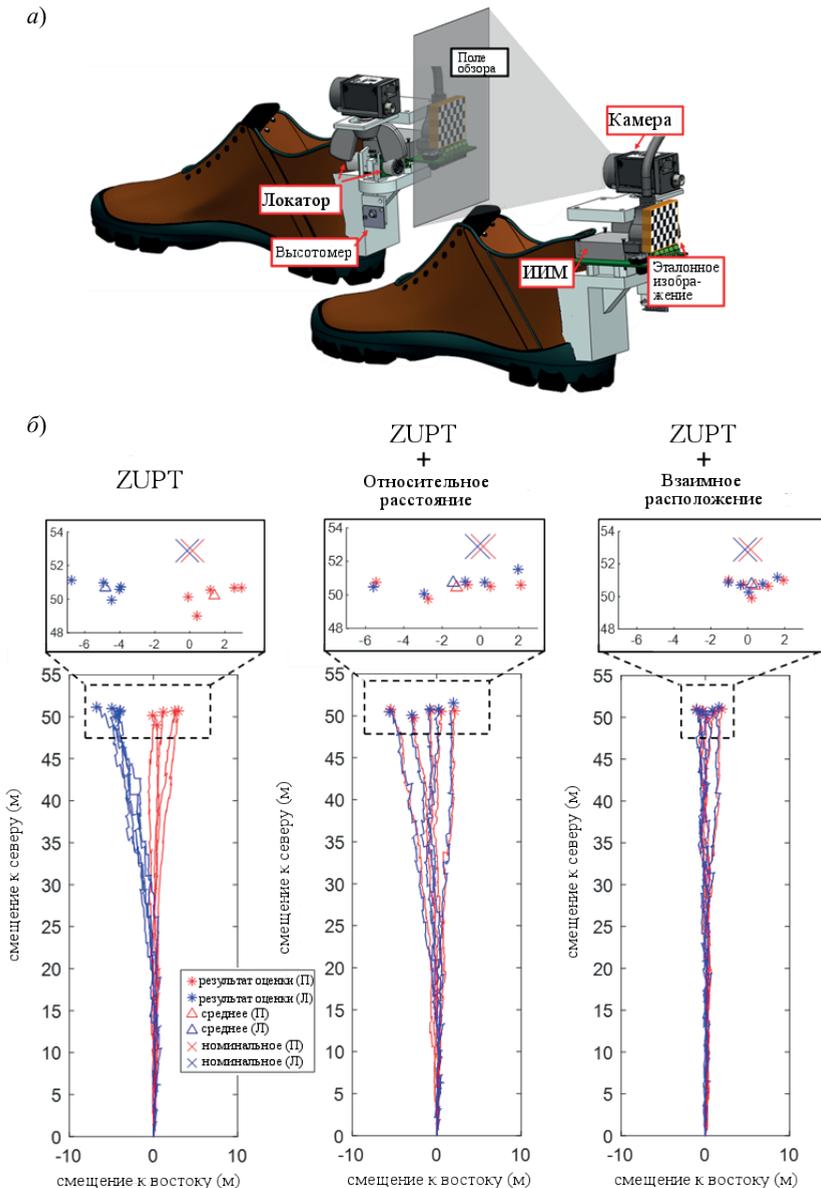


Рис. 13: а – «лаборатория на ботинке», оснащенная камерами и эталонным изображением; б – результаты экспериментов для ИНС с ZUPT-коррекцией, дополненные видеоизмерениями взаимного расположения стоп

V. Анализ изменения навигационной погрешности

Установлено, что в качестве основных источников погрешностей пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции [58] выступают погрешности моделирования и шумы ИИМ. В результате реализации всех описанных в предыдущем разделе методов большинство погрешностей моделирования оказываются скомпенсированными, и шум ИИМ станет преобладающим источником погрешностей. В работе [77] численно было изучено соотношение между белыми шумами ИИМ в измерениях акселерометров и гироскопов и среднеквадратической погрешностью пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции и сделаны качественные выводы. В этом разделе представлен обзор исследований аналитической модели изменения навигационных погрешностей при реализации алгоритма пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции.

В РФК ковариация состояния системы возрастает на шаге прогнозирования из-за наличия шума и резко снижается на этапе обновления благодаря вводу измерения. В пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции дисперсии всех наблюдаемых состояний системы достигают устойчивого уровня с небольшими флуктуациями в течение длительного периода времени [78]. Данное наблюдение показывает, что при полном цикле походки величина возрастания дисперсии на шаге прогнозирования равна величине ее снижения на шаге коррекции (рис. 14, а). Исходя из этого наблюдения, мы можем скомбинировать параметры ZUPT и ИИМ посредством выражений (4) и (8) для оценивания неопределенности полного навигационного решения. Чтобы упростить вычисления, возьмем для анализа прямолинейную траекторию движения в направлении на север. Движение стоп рассмотрим в двумерном пространстве, когда стопа движется только в направлении на север и вниз, а углы крена и азимута равны нулю.

На основании наблюдений при принятых допущениях неопределенность оценки горизонтального местоположения можно выразить следующим образом [51]:

$$\sigma_{\parallel} = \left[\left(2 - \frac{t_{stride}}{4} \right) \frac{r^2 \cdot t_{stride}}{f_s \cdot t_{stance}} \cdot t \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

$$\sigma_{\perp} = \left[\left(2 - \frac{t_{stride}}{4} \right) \frac{r^2 \cdot t_{stride}}{f_s \cdot t_{stance}} \cdot t + \frac{1}{3} ARW^2 s_N^2 \cdot t^3 + \frac{a_s^2}{12} \sigma_{gN}^2 s_N^2 \cdot t^4 + \left(\frac{1}{30} + \frac{a_c^2}{60} \right) RRW^2 s_N^2 \cdot t^5 \right]^{\frac{1}{2}},$$

где σ_{\parallel} и σ_{\perp} – неопределенности оценки горизонтального местоположения параллельно и перпендикулярно траектории; t_{stride} – продолжительность цикла походки; t_{stance} – усредненный интервал опорной фазы; a_c и a_s – усредненные значения косинуса и синуса угла наклона траектории соответственно в течение всего цикла походки, составляющие при нормальном стиле ходьбы около 0,84 и -0,25 [79]; f_s – частота дискретизации ИИМ; r – среднеквадратическое отклонение шума измерений; s_N – длина широкого шага при ходьбе; t – общее время навигации; σ_{gN} – неопределенность смещения нуля гироскопа вдоль траектории, которую можно выразить как

$$\sigma_{gN} = \left[\left(\frac{RRW \cdot ARW}{a_c} \right)^2 + \frac{2\sigma_v^2 RRW^3}{a_c \cdot g} \sqrt{\frac{f_s t_{stance}}{r^2 t_{stride}}} \right]^{\frac{1}{4}}, \quad (12)$$

где g – сила тяжести, а σ_v – неопределенность оценки скорости, которая является корнем биквадратного уравнения

$$ax^4 + bx^2 + cx + d = 0, \quad (13)$$

в котором коэффициенты представлены как

$$a = \left[\frac{f_s \cdot t_{stance}}{2gr^2 \cdot t_{stride}} \right]^2, \quad b = -\frac{f_s \cdot t_{stance} VRW^2}{2g^2 r^2 \cdot t_{stride}},$$

$$c = -2a_c \frac{RRW}{g} \sqrt{\frac{r^2 t_{stride}}{f_s t_{stance}}}, \quad d = \frac{VRW^4}{4g^2} - \frac{ARW^2 r^2 t_{stride}}{f_s t_{stance}}.$$

Если навигация занимает короткий промежуток времени, RRW гироскопа и $AcRW$ акселерометра можно пренебречь, и тогда выражения существенно упростятся [80]:

$$\sigma_{\parallel} = \left[\left(2 - \frac{t_{stride}}{4} \right) \frac{r^2 \cdot t_{stride}}{f_s \cdot t_{stance}} \cdot t \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

$$\sigma_{\perp} = \left[\left(2 - \frac{t_{stride}}{4} \right) \frac{r^2 \cdot t_{stride}}{f_s \cdot t_{stance}} \cdot t + \frac{1}{3} ARW^2 S_N^2 \cdot t^3 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Необходимо обратить внимание, что случайный дрейф гироскопов по угловой скорости RRW связан с временным интервалом навигации более высокого порядка, а случайный дрейф гироскопов по углу ARW , представляющий собой белый шум, – с временным интервалом низшего порядка. Таким образом, белый шум определяет погрешности кратковременной навигации, а смещение нулей – погрешности долговременной.

Чтобы численно подтвердить аналитические результаты, в [78] для имитации движения стопы во время ходьбы была разработана модель походки человека. Из рис. 14, б и в видно, что численные и аналитические результаты навигационной погрешности близки. Распределение 40 навигационных результатов приведено на рис. 14, г. Оно соответствует аналитическому прогнозу (зеленая пунктирная линия) с погрешностью менее 20%.

При комплексировании ИНС с ZUPT-коррекцией с высотомером погрешность оценки вертикального перемещения ограничена, т.к. высотомер измеряет абсолютную высоту в навигационной СК. На рис. 15, а представлено типичное изменение погрешностей в оценке перемещений на север, восток и вниз. В работе [81] было получено аналитическое выражение для оценки среднеквадратической погрешности по вертикали σ_D , в основу которого были положены результаты следующего наблюдения: рост погрешности позиционирования в вертикальном направлении достигает со временем стабильного уровня с незначительными флуктуациями. Аналитическое выражение для σ_D имеет вид

$$\sigma_D = \left(\sqrt{\frac{VRW^2 t_{stride} \omega^2}{N_{stance}} \frac{t_{ALT OFF}}{N_{ALT ON}} - \frac{VRW^2 t_{stride}}{3N_{ALT ON}} N_{stance} t_{ALT ON}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\sigma_{alt}}{\sqrt{dt}}, \quad (15)$$

где $t_{ALT\ ON}$ – общее время, в пределах которого высотомер получает данные за цикл походки, а $t_{ALT\ OFF}$ – остальное время цикла походки; σ_{alt} – среднеквадратическое отклонение шума для барометра; N_{stance} – количество замеров, использованных для коррекции ZUPT-алгоритмом; dt – частота опроса ИИМ. Исходя из аналитического выражения для σ_D можно сделать несколько выводов: 1) изменение оценки вертикального перемещения в РФК обусловлено VRW , но не зависит от ARW ; 2) частота опроса и разрешающая способность высотомера являются ключевыми факторами в оценке перемещения; 3) на оценку перемещения влияет отношение времени фазы переноса конечности ко времени опорной фазы во время цикла походки.

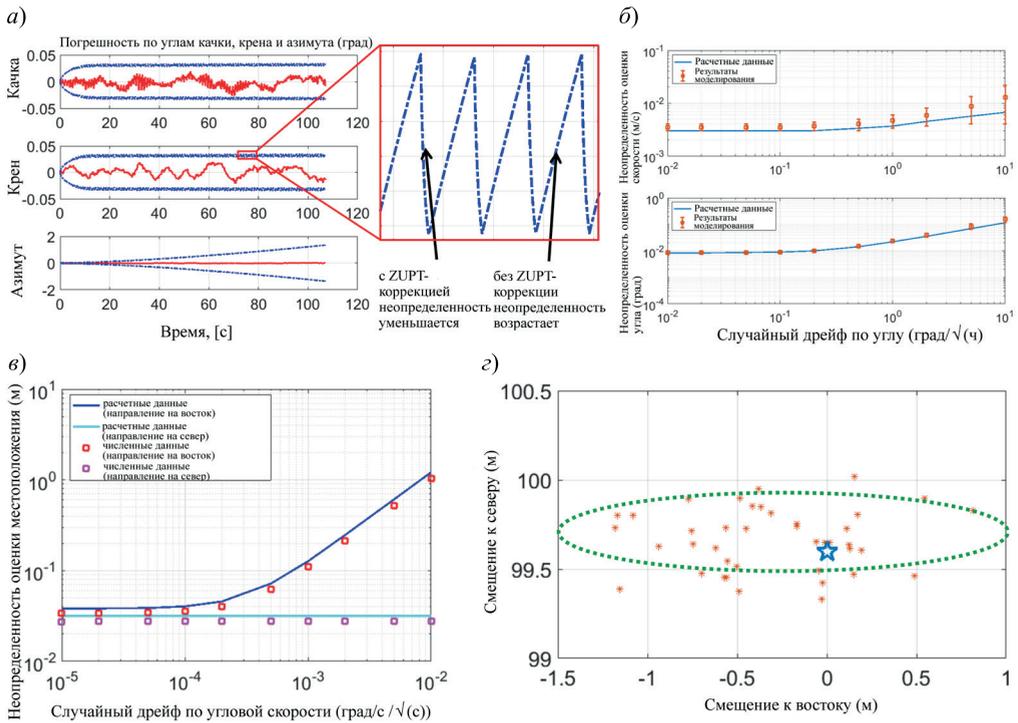


Рис. 14. Результаты, полученные на основе анализа навигационных погрешностей:

- а – типичное изменение оценки ковариации;
- б – соотношение между неопределенностью оценки угла и скорости и случайным дрейфом гироскопа по углу;
- в – соотношение между неопределенностью оценки местоположения и случайным дрейфом гироскопа по угловой скорости;
- г – сравнение экспериментальных результатов (красные точки) и расчетных данных (зеленая пунктирная линия)

Для подтверждения полученного аналитического соотношения в [81] приведены результаты моделирования и экспериментов. На рис. 15, б представлено соотношение разрешающей способности высотомера и среднеквадратического отклонения оценки перемещения в направлении вниз.

На рис. 15, в показано влияние частоты дискретизации показаний высотомера на среднеквадратическое отклонение оценки перемещения в направлении вниз. Результаты моделирования и экспериментов совпали с аналитическим прогнозом с погрешностью менее 20%.

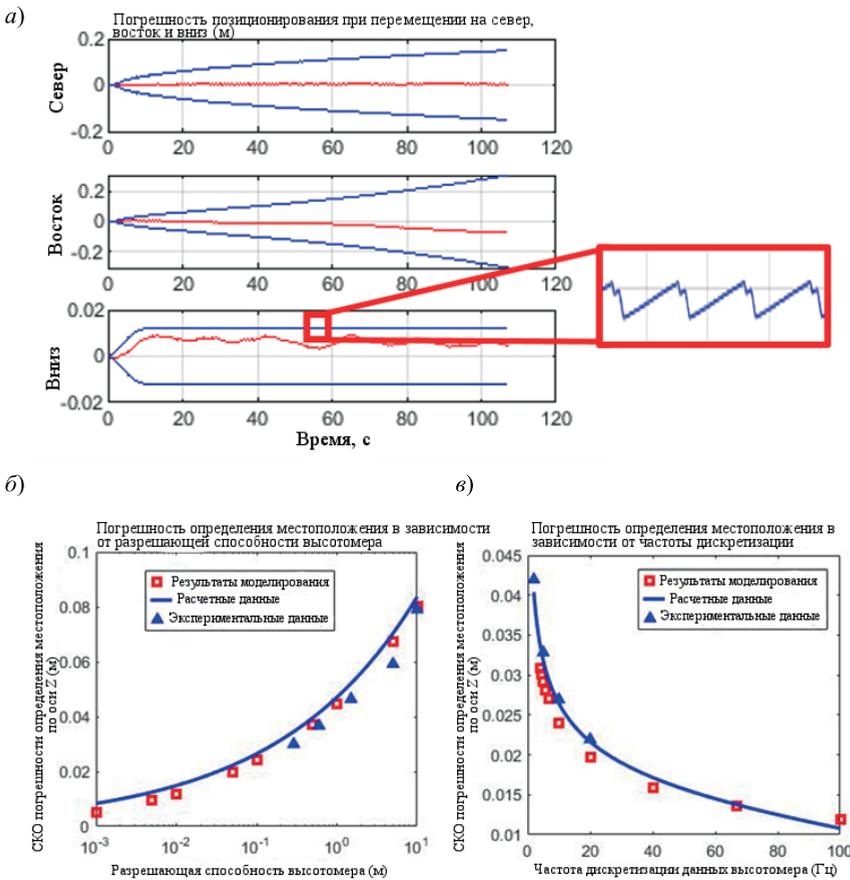


Рис. 15: *a* – типичное изменение погрешностей оценок перемещений для ИНС с ZUPT-коррекцией и высотомером. *N*, *E* и *D* – перемещения на север, восток и вниз соответственно. Красной кривой на каждом графике обозначено изменение погрешности, синей – 3σ -допуск на нее;
b – соотношение разрешающей способности высотомера и среднеквадратического отклонения погрешности оценки перемещения в направлении вниз;
c – соотношение частоты дискретизации данных высотомера и среднеквадратического отклонения погрешности оценки перемещения в направлении вниз

VI. Заключение

Алгоритм пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции привлек большое внимание, поскольку позволяет значительно уменьшить погрешности навигации при относительно простой реализации. Тем не менее предложенный метод сильно зависит от точности определения временного момента нулевой скорости и способности ограничивать рост погрешности как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Было показано, что момент нулевой скорости может быть правильно зафиксирован при корректной идентификации типа поверхности, определении частоты шагов и расстояния относительно земли. Точное определение момента нулевой скорости позволяет уменьшить погрешность навигации более чем в 10 раз. Было также продемонстрировано, что погрешность в определении расстояния относительно земли может быть снижена более чем в 5 раз с использованием высотомеров и ультразвуковых датчиков.

Мы выявили несколько основных проблем при реализации алгоритма пешеходной инерциальной навигации с использованием ZUPT-коррекции:

- 1) к динамическому диапазону закрепленных на ноге датчиков предъявляются гораздо более жесткие требования, чем в большинстве навигационных приложений. В определенной степени проблему можно решить путем тщательной их калибровки. Тем не менее необходимо улучшить характеристики датчика в части расширения динамического диапазона;
- 2) допущение при реализации ФК некоррелированности измерений требует дальнейшего исследования;
- 3) могут оказаться полезными и неинерциальные вспомогательные датчики, например для измерения расстояния между стопами, датчики компьютерного зрения, высотомеры, ультразвуковые дальномеры и т.д.;
- 4) применение таких датчиков было изучено с использованием «лаборатории на ботинке», продемонстрирована их эффективность.

Вместе с тем, хотя рассмотренная технология обладает многими преимуществами и осуществима, перевод ее в практическую плоскость потребует решения проблемы предельной миниатюризации используемых датчиков.

Благодарность

Работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства торговли США, Национального института стандартов и технологий (NIST), грант №70NANB17H192.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дмитриев С.П., Осипов В.А., Блажнов Б.А.** Оценка влияния шума акселерометра и вибраций основания на погрешности измерений в задачах инерциальной геодезии // Гироскопия и навигация. 1994. №1 (4). С. 65–76.
2. **Дмитриев С.П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1997. 208 с.
3. **Sher, L.**, Personal inertial navigation system (PINS), DARPA, 1996.
4. **Hutchings, L.J.**, System and method for measuring movement of objects, U.S. Patent No. 5,724,265, 1998.
5. **Elwell, J.**, Inertial navigation for the urban warrior, *AEROSENSE '99*, Apr. 5–9, 1999, Orlando, FL, USA, pp. 196–204.
6. **Foxlin, E.**, Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2005, vol. 25, no. 6, pp. 38–46.
7. **Laverne, M., George, M., Lord, D., Kelly, A., and Mukherjee, T.**, Experimental validation of foot to foot range measurements in pedestrian tracking, *ION GNSS Conference*, Portland, OR, USA, Sep. 19–23, 2011, pp. 1386–1393.
8. **Skog, I., Handel, P., Nilsson, J.O., and Rantakokko, J.**, Zero-velocity detection – An algorithm evaluation, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2010, vol. 57, no. 11, pp. 2657–2666.
9. **Godha, S., and Lachapelle, G.**, Foot mounted inertial system for pedestrian navigation, *Measurement Science and Technology*, 2008, vol. 19, no. 7, pp. 075202.
10. **Krach, B., and Robertson, P.**, Integration of foot-mounted inertial sensors into a Bayesian location estimation framework, *IEEE Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, Mar. 27, 2008, Hannover, Germany.
11. **Feliz, R., Zalama, E., and Garcia-Bermejo, J.G.**, Pedestrian tracking using inertial sensors, *Journal of Physical Agents*, 2009, vol. 3, no. 1, pp. 35–43.
12. **Skog, I., Nilsson, J.O., and Handel, P.**, Evaluation of zero-velocity detectors for foot-mounted inertial navigation systems, *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sept 15–17, 2010, Zurich, Switzerland.

13. 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, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2013, vol. 61, no. 3, pp. 892–899.
14. Wahlstrom, J., Skog, I., Gustafsson, F., Markham, A., and Trigoni, N., Zero-Velocity Detection – A Bayesian Approach to Adaptive Thresholding, *IEEE Sensors Letters*, 2019, vol. 3, no. 6, pp. 1–4.
15. Tian, X., Chen, J., Han, Y., Shang, J., and Li, N., A novel zero velocity interval detection algorithm for self-contained pedestrian navigation system with inertial sensors, *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 10, pp. 1578.
16. Wagstaff, B., Peretroukhin, V., and Kelly, J., Improving foot-mounted inertial navigation through real-time motion classification, *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sep. 18–21, 2017, Sapporo, Japan.
17. Park, S.Y., Ju, H., and Park, C.G., Stance phase detection of multiple actions for military drill using foot-mounted IMU, *Sensors*, 2016, vol. 14, pp. 16.
18. Williamson, R., and Andrews, B.J., Gait event detection for FES using accelerometers and supervised machine learning, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 2000, vol. 8, no. 3, pp. 312–319.
19. Кроненвегт Н., Руппельт Я., Троммер Г.Ф. Прецизионное позиционирование пешехода в помещении на основе контроля за стадиями его походки // Гироскопия и навигация. 2017. №1 (96). С. 33–48.
20. Zhang, R., Yang, H., Hoflinger, F., and Reindl, L.M., Adaptive zero velocity update based on velocity classification for pedestrian tracking, *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 7, pp. 2137–2145.
21. Mannini, A., and Sabatini, A.M., Gait phase detection and discrimination between walking–jogging activities using hidden Markov models applied to foot motion data from a gyroscope, *Gait & Posture*, 2012, vol. 36, no. 4, pp. 657–661.
22. Jung, J.-Y., Heo, W., Yang, H., and Park, H., A neural network-based gait phase classification method using sensors equipped on lower limb exoskeleton robots, *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 11, pp. 27738–27759.
23. Altun, K., Barshan, B., and Tuncel, O., Comparative study on classifying human activities with miniature inertial and magnetic sensors, *Pattern Recognition*, 2010, vol. 43, no. 10, pp. 3605–3620.
24. Kone, Y., Zhu, N., Renaudin, V., and Ortiz, M., Machine Learning based Zero-Velocity Detection for Inertial Pedestrian Navigation, *IEEE Sensors Journal*, doi: 10.1109/JSEN.2020.2999863.
25. Ramanandan, A., Chen, A., and Farrell, J.A., Inertial navigation aiding by stationary updates, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, vol. 13, no.1, pp. 235–248.
26. Rajagopal, S., Personal dead reckoning system with shoe mounted inertial sensors, Master dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2008.
27. Ju, H., and Park, C.G., A pedestrian dead reckoning system using a foot kinematic constraint and shoe modeling for various motions, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, vol. 284, pp. 135–144.
28. Kalman, R.E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
29. Bar-Shalom, Y., Li, X.-R., and Kirubarajan, T., *Estimation with applications to tracking and navigation: theory algorithms and software*, John Wiley & Sons, 2001.
30. Bolognani, S., Tubiana, L., and Zigliotto, M., Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 6, pp. 1741–1747.
31. Hanlon, P.D., and Maybeck, P.S., Multiple-model adaptive estimation using a residual correlation Kalman filter bank, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 393–406.
32. Korniyenko, O.V., Sharawi, M.S., and Aloï, D.N., Neural network based approach for tuning Kalman filter, *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, May 22–25, 2005, Lincoln, NE, USA.
33. Zhang, X., Zhang, R., Guo, M., Cheng, G., Niu, S., and Li, J., The performance impact evaluation on bias of gyro and accelerometer for foot-mounted INS, *12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, Sep. 24–27, 2015, Qingdao, China.
34. Duong, P.D. and Suh, Y.S., Foot pose estimation using an inertial sensor unit and two distance sensors, *Sensors*, 2015, vol. 15, pp. 15888–15902.
35. Robertson, P., Frassl, M., Angermann, M., Doniec, M., Julian, B.J., Garcia Puyol, M., Khider, M., Lichtenstern, M., and Bruno, L., Simultaneous Localization and Mapping for pedestrians using distortions of the local magnetic field intensity in large indoor environments, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Oct. 28–31, 2015, Montbeliard-Belfort, France.
36. Kok, M. and Solin, A., Scalable Magnetic Field SLAM in 3D Using Gaussian Process Maps, *21st International Conference on Information Fusion (FUSION)*, Cambridge, 2018.
37. Fourati, H., Heterogeneous Data Fusion Algorithm for Pedestrian Navigation via Foot-Mounted Inertial Measurement Unit and Complementary Filter, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2015, vol. 64, no. 1, pp. 221–229.

38. Wang, Q., Yin, J., Noureldin, A., and Iqbal, U., Research on an Improved Method for Foot-Mounted Inertial/Magnetometer Pedestrian-Positioning Based on the Adaptive Gradient Descent Algorithm, *Sensors*, 2018, vol. 18, pp. 4105.
39. Placer, M. and Kovacic, S., Enhancing indoor inertial pedestrian navigation using a shoe-worn marker, *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 8, pp. 9836–9859.
40. Keßler, C., Ascher, C., Flad, M., and Trommer, G.F., Multi-sensor indoor pedestrian navigation system with vision aiding, *Gyroscopy and Navigation*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 79–90.
41. Norrdine, A., Kasmí, Z., and Blankenbach, J., Step detection for ZUPTaided inertial pedestrian navigation system using foot-mounted permanent magnet, *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 17, pp. 6766–6773.
42. Wang, Q., Zhang, X., Chen, X., Chen, R., Chen, W., and Chen, Y., A novel pedestrian dead reckoning algorithm using wearable EMG sensors to measure walking strides, *Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service*, Oct. 14–15, 2010, Kirkkonummi, Finland.
43. Ma, M., Song, Q., Gu, Y., Li, Y., and Zhou, Z., An adaptive zero velocity detection algorithm based on multi-sensor fusion for a pedestrian navigation system, *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 10, pp. 3261.
44. Zhang, R., Hoefflinger, F., Gorgis, O., and Reindl, L.M., Indoor localization using inertial sensors and ultrasonic rangefinder, *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP)*, Nov. 9–11, 2011, Nanjing, China.
45. Zhou, C., Downey, J., Stancil, D., and Mukherjee, T., A low-power shoe-embedded radar for aiding pedestrian inertial navigation, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, vol. 58, no. 10, pp.2521–2528.
46. Hide, C., Moore, T., and Smith, M., Multiple model Kalman filtering for GPS and low-cost INS integration, *ION GNSS*, Sep. 21–24, 2004, Long Beach, CA, USA.
47. Tang, K.-H., Wu, M.-P., and Hu, X.-P., Multiple model Kalman filtering for MEMS-IMU/GPS integrated navigation, *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, May 23–25, 2007, Harbin, China.
48. Titterton, D., and Weston, J., *Strapdown inertial navigation technology*, 2nd ed., vol. 207. AIAA, 2004.
49. Wang, Y., Pedestrian Inertial Navigation – Development of Sensors and Algorithms, Ph.D. dissertation, University of California, Irvine, 2020.
50. Savage, P.G., *Strapdown analytics*, 2nd ed., Maple Plain, MN: Strapdown Associates, 2007.
51. Wang, Y., Chernyshoff, A., and Shkel, A.M., Study on Estimation Errors in ZUPT-Aided Pedestrian Inertial Navigation Due to IMU Noises, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, vol. 56, no. 3, pp. 2280–2291.
52. Van Trees, H.L., *Detection, estimation, and modulation theory, part I: detection, estimation, and linear modulation theory*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2004.
53. OpenShoe Matlab Implementation. <http://www.openshoe.org/?page id= 362>
54. Wang, Y., Lin, Y.-W., Askari, S., Jao, C.-S., and Shkel, A.M., Compensation of Systematic Errors in ZUPT-Aided Pedestrian Inertial Navigation, *IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Apr. 20–23, 2020, Portland, OR, USA.
55. Bebek, O., Suster, M.A., Rajgopal, S., Fu, M.J., Huang, X., Cavusoglu, M.C., Young, D.J., Mehregany, M., Van Den Bogert, A.J., and Mastrangelo, C.H., Personal navigation via high-resolution gait-corrected inertial measurement units, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, vol. 59, no. 11, pp. 3018–3027.
56. Wang, Y., Askari, S., and Shkel, A.M., Study on mounting position of IMU for better accuracy of ZUPT-aided pedestrian inertial navigation, *IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems*, Apr. 1–5, 2019, Naples, FL, USA.
57. Peruzzi, A., Della Croce, U., and Cereatti, A., Estimation of stride length in level walking using an inertial measurement unit attached to the foot: A validation of the zero velocity assumption during stance, *Journal of Biomechanics*, 2011, vol. 44, no. 10, pp. 1991–1994.
58. Nilsson, J.O., Skog, I., and Handel, P., A note on the limitations of ZUPTs and the implications on sensor error modeling, *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nov. 13–15, 2012, Sydney, Australia.
59. Wang, Y., Lin, Y.-W., Askari, S., Jao, C.-S., and Shkel, A.M., Navigation Error Reduction in ZUPT-Aided Pedestrian Inertial Navigation, submitted to *IEEE Sensors Journal*.
60. Bamberg, S.J.M., Benbasat, A.Y., Scarborough, D.M., Krebs, D.E., and Paradiso, J.A., Gait analysis using a shoe-integrated wireless sensor system, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 2008, vol. 12, no. 4, pp. 413–423.

61. Wang, Z., Zhao, H., Qiu, S., and Gao, Q., Stance-phase detection for ZUPT-aided foot-mounted pedestrian navigation system, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, vol. 20, no. 6, pp. 3170–3181.
62. Wang, Y. and Shkel, A.M., Adaptive Threshold for Zero-Velocity Detector in ZUPT-Aided Pedestrian Inertial Navigation, 2019, *IEEE Sensors Letters*, vol. 3, no. 11, pp. 1–4.
63. Jimenez, A.R., Seco, F., Prieto, J.C., and Guevara, J., Indoor pedestrian navigation using an INS/EKF framework for yaw drift reduction and a foot-mounted IMU, *IEEE Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC)*, Mar. 11–12, 2010, Dresden, Germany.
64. Beauregard, S. and Haas, H., Pedestrian dead reckoning: A basis for personal positioning, *Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06)*, Mar. 16, 2006, Hannover, Germany.
65. Goyal, P., Ribeiro, V.J., Saran, H., and Kumar, A., Strap-down pedestrian dead-reckoning system, *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sep. 21–23, 2011, Guimaraes, Portugal.
66. Bancroft, J.B., and Lachapelle, G., Estimating MEMS gyroscope sensitivity errors in foot mounted navigation, *IEEE Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS)*, Oct. 3–4, 2012, Helsinki, Finland.
67. Hansen, J.M., Roháč, J., Šipoš, M., Johansen, T.A., Fossen, T.I., and Wang, G., Validation and Experimental Testing of Observers for Robust GNSS-Aided Inertial Navigation, *Recent Advances in Robotic Systems*, 2016. ISBN (print): 978-953-51-2570-9.
68. Wang, Y. and Shkel, A.M., Learning-based Floor Type Identification in the ZUPT-aided Pedestrian Inertial Navigation, submitted to *IEEE Sensors Letters*.
69. Askari, S., Jao, C.-S., Wang, Y., and Shkel, A.M., Learning-Based Calibration Decision System for Bio-Inertial Motion Application, *IEEE Sensors Conference*, Oct. 27–30, 2019, Montreal, Canada.
70. Wang, Y. and Shkel, A.M., Method and System for Adaptive Pedestrian Inertial Navigation, UC Case number 2020-681.
71. Wang, Y. and Shkel, A. M., A Review on ZUPT-Aided Pedestrian Inertial Navigation, *27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, May 25–27, 2020, Saint Petersburg, Russia.
72. Askari, S., Jao, C.-S., Wang, Y., and Shkel, A.M., A laboratory testbed for self-contained navigation, *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Apr. 1–5, 2019, Naples, FL, USA.
73. Wang, Y., Askari, S., Jao, C.-S., and Shkel, A.M., Directional Ranging for Enhanced Performance of Aided Pedestrian Inertial Navigation, *IEEE Inertial Sensors*, Apr. 1–5, 2019, Naples, FL, USA.
74. Jao, C.-S., Wang, Y., and Shkel, A. M., A Zero Velocity Detector for Foot-mounted Inertial Navigation Systems Aided by Downward-facing Range Sensor, accepted by *IEEE Sensors Conference*.
75. Jao, C.-S., Wang, Y., Lin, Y.-W., and Shkel, A.M., A Hybrid Barometric/Ultrasonic Altimeter for Aiding ZUPT-based Inertial Pedestrian Navigation Systems, accepted by *ION GNSS*.
76. Jao, C.-S., Wang, Y., and Shkel, A.M., Pedestrian Inertial Navigation System Augmented by Vision-Based Foot-to-foot Relative Position Measurements, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Apr. 20–23, 2020, Portland, OR, USA.
77. Nilsson, J. O., Skog, I., and Handel, P., Performance characterisation of foot-mounted ZUPT-aided INSs and other related systems, *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sept 15–17, 2010, Zurich, Switzerland.
78. Wang, Y., Chernyshoff, A., and Shkel, A.M., Error Analysis of ZUPTAided Pedestrian Inertial Navigation, *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Sep. 24–27, 2018, Nantes, France.
79. Murray, M.P., Drought, A.B., and Kory, R.C., Walking gait of normal man, *Journal of Bone & Joint Surgery*, 1964, vol. 46, pp. 335–360.
80. Wang, Y., Vatanparvar, D., Chernyshoff, A. and Shkel, A.M., Analytical Closed-Form Estimation of Position Error on ZUPT-Augmented Pedestrian Inertial Navigation, *IEEE Sensors Letters*, 2018, vol. 2, no. 4, pp. 1–4.
81. Jao, C.-S., Wang, Y., Askari, S., and Shkel, A. M., A Closed-Form Analytical Estimation of Vertical Displacement Error in Pedestrian Navigation, *2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, Portland, OR, USA, 2020.

Wang, Y., Jao, Ch.-Sh., and Shkel, A.M. (University of California, Irvine, CA, USA)

Scenario-Dependent ZUPT-Aided Pedestrian Inertial Navigation with Sensor Fusion, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 1 (112), pp. 3–31.

Abstract. Pedestrian navigation has been of high interest in many fields, such as human health monitoring, personal indoor navigation, and localization systems for first responders. Due to the potentially complicated navigation environment, self-contained types of navigation such as inertial navigation, which do not depend on external signals, are more desirable. Pure inertial navigation, however, suffers from sensor noise and drifts and therefore is not suitable for long-term pedestrian navigation by itself. Zero-velocity update (ZUPT) aiding technique has been developed to limit the navigation error growth, but adaptivity of algorithms, model fidelity, and system robustness have been major a concern if not properly addressed. In this paper, we attempt to establish a common approach to solve the problem of self-contained pedestrian navigation by identifying the critical parts of the algorithm that have a strong influence on the overall performance. We first review approaches to improve the navigation accuracy in each of the critical part of implementation proposed by other groups. Then, we report our results on analytical estimations and experiments illustrating effects of combining inertial sensor calibration, stance phase detection, adaptive model selection, and sensor fusion.

Key words: ZUPT, pedestrian navigation, IMU, sensor fusion.

Материал поступил 18.12.2020