

УДК 621.391.172.1
DOI 10.17285/0869-7035.0034

А. РЕХМАН, Х. ШАХИД, М. А. АФЗАЛ, Х. М. А. БХАТТИ

ПЕШЕХОДНАЯ НАВИГАЦИЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГНСС-ПРИЕМНИКА И МЭМС-ДАТЧИКОВ СМАРТФОНА С ПОМОЩЬЮ РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Описывается решение задачи пешеходной навигации по данным встроенных в смартфон приемника глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и инерциальных микроэлектромеханических датчиков в сложных с точки зрения приема сигналов ГНСС условиях. Для реализации метода предлагается использовать технологию определения длины шага и комплексирование спутниковых и инерциальных данных с применением расширенного фильтра Калмана. Приводятся результаты обработки натурных данных, демонстрирующие эффективность метода в неблагоприятных для работы ГНСС-приемника условиях.

Ключевые слова: пешеходная навигация, ГНСС, МЭМС, счисление пути, расширенный фильтр Калмана, многолучевость.

Введение

Возрастающий интерес к сервисам навигации и позиционирования связан с увеличением доступности и повышением точности измерений ГНСС. В условиях открытой верхней полусферы даже очень дешевые приемники, встроенные в смартфон, способны принимать их сигналы. Вместе с тем эффективность работы ГНСС может ухудшаться из-за воздействия нескольких факторов, таких как задержка сигналов в ионосфере и тропосфере, затухание, помехи и, главным образом, эффект многолучевости – попадание на антенну приемника переотраженных сигналов [1, 2]. Особенно уязвимы к влиянию многолучевости приемники смартфонов, которые оснащены упрощенными антеннами.

Для получения устойчивых навигационных решений в неблагоприятных условиях приема сигналов ГНСС можно использовать различные автономные датчики [3]. Наиболее полезными являются акселерометры и гироскопы, разработанные по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) [4]. Они удобны в использовании, обладают небольшими габаритами, невысокой стоимостью, малым потреблением электроэнергии и легко доступны. Вместе с тем систематические погрешности

Рехман Абдул. Научный сотрудник, Институт телеметрии и навигации, Шанхайский транспортный университет Цзяо Тун (Китай); Шанхайская лаборатория навигации и геолокационного сервиса, Шанхайский транспортный университет Цзяо Тун (Китай).

Шахид Хуснаин. Аспирант, Факультет электроники, Фуданьский университет (Китай).

Афзал Мухаммад Абрар. Аспирант, Шанхайская лаборатория навигации и геолокационного сервиса, Шанхайский транспортный университет Цзяо Тун.

Бхатти Хафиз Мухаммад Али. Студент магистратуры, Факультет информатики и вычислительной техники, Дунгуаньский университет (Китай).

МЭМС-акселерометров и гироскопов соответственно достигают уровней $0,03 \text{ м/с}^2$ и $100^\circ/\text{ч}$, что представляет проблему их применения [23, 24].

С момента появления ГНСС вопрос подавления многолучевости широко обсуждался в литературе. Некоторые из предложенных способов решения представлены в табл. 1. Большинство методов связано с усовершенствованием обработки корреляционных накоплений в приемнике и модификацией его аппаратной части [1]. В работе [27] погрешности, вызванные многолучевостью, уменьшены до 1-2 м за счет постоянного перемещения антенны.

Т а б л и ц а 1

Некоторые методы решения проблемы

Метод	Комментарии
Мультирежимное счисление пути пешехода [5]	Слежение за движением пешехода с помощью ИИМ с точностью определения местоположения, увеличенной на 95-99%
Комплексирование GPS/ИНС [6]	На основе комбинирования искусственного интеллекта с фильтром Калмана и нейронной сетью прямого распространения. Обеспечивает функционирование в течение 300 с перерыва в работе приемника GPS
Узкий коррелятор [7]	Коррелятор работает как контур слежения за задержкой, уменьшая погрешность до 10 м
Фильтр Калмана [8]	Комплексирование ГНСС/ИНС на основе фильтра Калмана для навигации беспилотного летательного аппарата
Счисление пути пешехода, WiFi, согласование с картой [13]	Определение местоположения внутри помещений при пяти различных сценариях использования смартфона с погрешностью около 3 м
Счисление пути пешехода, навигация на основе отпечатков (fingerprint) радиосигналов точек доступа WiFi [14]	Гибридное решение для определения местоположения по смартфону внутри помещения, но при более высоком потреблении мощности
Счисление пути пешехода, WiFi, маячки iBeacon [15]	Определения местоположения по смартфону в условиях помещения большого размера, но при дополнительной вычислительной нагрузке на устройство
Счисление пути пешехода, навигация на основе отпечатков (fingerprint) уровня принимаемого сигнала [16]	Метод основан на создании цифрового отпечатка уровня принимаемого сигнала и счислении пути пешехода для получения большей точности при более высоком энергопотреблении с использованием фильтра частиц
Счисление пути пешехода, ГНСС, трехмерная карта [17]	Данный метод может обеспечивать непрерывное решение при двигательной активности пешехода и гарантирует погрешность определения местоположения 1,5-5,5 м при наилучшей инициализации
ГНСС, ИНС, одометр [12]	Комплексирование данных от датчиков ГНСС/ИНС/одометр является недорогим решением для интеллектуальной транспортной системы в реальном масштабе времени

ИИМ – инерциальный измерительный модуль, ИНС – инерциальная навигационная система

В настоящее время возможность определения местоположения с помощью ГНСС очень помогает людям, которые путешествуют по миру. Однако значительное увеличение числа высоких сооружений при сложной инфраструктуре дорог, мостов, железнодорожных узлов и густых лесов становится большой проблемой для пешеходной навигации. Существует очень много альтернативных методов навигации внутри и вне помещений, но, к сожалению, все еще есть необходимость в точном, понятном и недорогом способе определения местоположения пешехода по смартфону в условиях многолучевого распространения сигналов. Погрешности, вызванные многолучевостью, влияют как на статические, так и на мобильные приемники, что, в свою очередь, негативно сказывается на точности навигации [28, 29]. Соотношение «сигнал–шум» увеличивается при конструктивной интерференции и уменьшается при деструктивной интерференции [19]. В настоящей статье предложен метод комплексирования процедуры счисления пути пешехода и ГНСС-решений в условиях многолучевости. Рис. 1 показывает пути распространения прямого и переотраженного сигнала от спутника к антенне приемника.

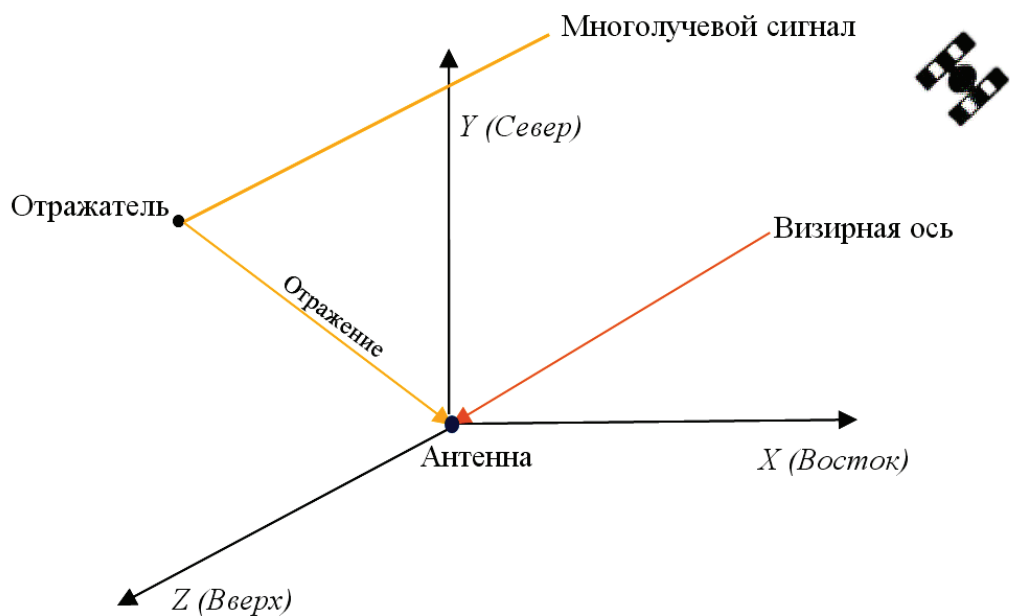


Рис. 1. Прямой и переотраженный сигналы спутника ГНСС

С одной стороны, перечисленные методы позиционирования и навигации внутри помещений достаточно эффективны, однако при их применении возникает ряд проблем, для решения которых необходимо дополнительное оборудование, в то время как потребители (пешеходы) предпочитают использовать одно и то же устройство для разных задач. В работе [18] приведены некоторые методы определения местоположения внутри помещений. Главным их недостатком является то, что инерциальные датчики нужно фиксировать на ноге или другой части тела.

Рассматриваемый в настоящей статье метод лишен этого недостатка и не требует ни дополнительного оборудования, ни финансовых затрат, ни повышенного энергопотребления и вычислительной нагрузки. Статья построена следующим образом.

В разделе 1 изложены принципы счисления пути пешехода (СПП). Раздел 2 посвящен комплексированию ГНСС/СПП на основе расширенного фильтра Калмана (РФК). В разделе 3 представлены результаты натуральных экспериментов. В конце сформулированы выводы и предложены направления дальнейшей работы.

1. Счисление пути пешехода

СПП предполагает оценку траектории движения пешехода по данным о перемещении и курсе при известных начальных условиях. СПП можно выполнить, например, с помощью инерциальных датчиков и магнитометров, встроенных в смартфон. Обычно это комбинированный метод, так как определение каждого нового местоположения зависит от предыдущего измерения, и время от времени требуется обновлять координаты. Алгоритм СПП состоит из трех частей: определение курса, распознавание шага и оценка пройденного расстояния. Методы, используемые при СПП, варьируются в зависимости от расположения датчика – на ноге, в кармане, на поясе и др. Точность СПП зависит от искажений магнитного поля, измеряемого магнитометрами.

Начальные координаты для пешеходной навигации оцениваются с помощью встроенного GPS-приемника, и их погрешность находится в пределах от 1 до 10 м в зависимости от условий радиовидимости спутников. Горизонтальные координаты в СПП вычисляются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} E \\ N \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} E \\ N \end{bmatrix}_{t-1} + SL_{t-1} \begin{bmatrix} \sin\psi \\ \cos\psi \end{bmatrix}_{t-1}. \quad (1)$$

Уравнение (1) применяется после распознавания шага в момент времени t , оценки длины шага по расстоянию, пройденному пешеходом с момента последнего шага (SL_{t-1}), и после определения курса пешехода (ψ) в течение времени от $t-1$ до t . Данные о новом местоположении можно получить только тогда, когда пешеход делает шаг, по которому оцениваются его длина и направление движения.

Распознавание шага

Для распознавания шага сигнал акселерометров обрабатывается с помощью низкочастотного фильтра для подавления нежелательного шума и выбросов, как показано на рис. 2.

Распознавание шага происходит очень быстро, если из триады акселерометров выбирается обладающий наибольшей чувствительностью. Сигнал ускорения зависит от положения ног и походки. Один выявленный шаг дает два положительных пиковых значения – когда пятка ступает на землю и когда нога поднимается.

После фильтрации применяется алгоритм обнаружения пикового значения. Когда определяется выброс, система проверяет следующие условия для распознавания шага:

1) находится ли абсолютное значение выброса (k -й пик) выше минимального порогового значения

$$|a_k| > a^{th}; \quad (2)$$

2) превысило ли время, прошедшее с момента распознавания последнего шага, некий минимальный период

$$|t_{a_k} - t_{a_{k-1}}| > \Delta t^{th}. \quad (3)$$

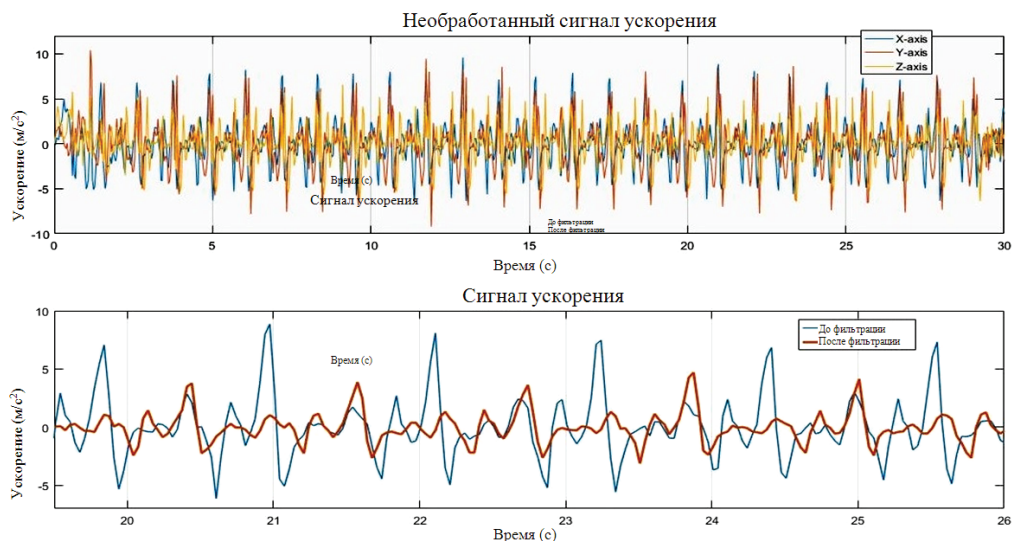


Рис. 2. Сигнал акселерометра

Частота среза низкочастотного фильтра – около 5 Гц, поэтому более частые пики ускорения будут отбраковываться. На рис. 3 показан результат распознавания шага.

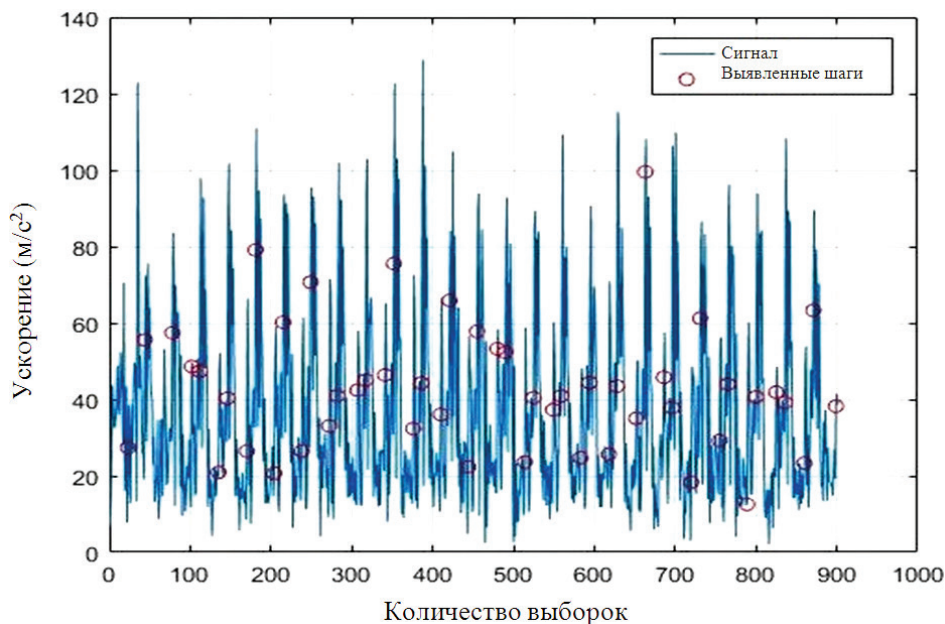


Рис. 3. Распознавание шагов с помощью акселерометра

Оценка длины шага

Длина шага – это расстояние между двумя касаниями пятки земли. В [21] длина шага SL оценивается по следующей формуле:

$$SL = \sqrt[4]{(a_{max} - a_{min})} \times M, \quad (4)$$

где a_{max} и a_{min} – максимальное и минимальное значения ускорения, а M – постоянная величина. Максимальное и минимальное значения ускорения легко вычисляются, но коэффициент M нужно определять отдельно каждый раз. По этой причине пешеход должен проходить при этом трассу определенной длины. При расчете коэффициента M длина шага и действительная длина заданного пути нормируются относительно 1, а затем определяется коэффициент M как отношение расчетной длины пути к реальной:

$$M = \frac{d_{est}}{d_{real}}, \quad (5)$$

где d_{est} – расстояние, оцененное по формуле (4), а d_{real} – реальное расстояние, пройденное пешеходом во время измерений.

Частота шагов определяется как

$$f_k = \frac{1}{t_k - t_{k-1}}, \quad (6)$$

где t_k, t_{k-1} – моменты распознавания шагов.

Оценка курса

Если ось чувствительности гироскопа зафиксирована в вертикальном положении, то изменение курса в зависимости от времени можно рассчитать путем интегрирования выходного сигнала гироскопа (ω) между моментами t_0 и t_1 :

$$\psi = \int_{t_0}^{t_1} \omega_{heading}(t) dt. \quad (7)$$

Чтобы наилучшим образом определить направление, ориентация гироскопа и акселерометра, которые используются при распознавании шага, должна быть одинаковой. В частности, если применяется акселерометр по оси z , то такую же ось z гироскопа можно использовать для оценки курса. Если же устройство установлено на теле человека наклонно, возникнет рассогласование между вычисленными сигналами гироскопа в системе координат, связанной с телом (B), и действительной ориентацией в трехграннике географической системы координат (L), которое нужно оценивать и учитывать. Преобразование «телесной» системы координат в локальную можно выполнить с помощью матрицы [22]

$$R_B^L = R_3(y) \cdot R_2(p) \cdot R_1(r), \quad (8)$$

где y, p и r – начальные углы рыскания продольного и бокового наклонов используемого устройства. Тогда можно преобразовать измеренный вектор угловой скорости

ω^B в локальную систему координат ω^L . Для определения абсолютного курса потребуются дополнительные данные – например, GPS или магнитометра. При этом результаты, полученные с использованием гироскопа, намного лучше, чем результаты, полученные с использованием магнитометра. Погрешность вырабатываемого курса также можно минимизировать путем введения поправки, но ее определение требует некоторых выборочных данных от разных пешеходов с различными способами крепления устройства на теле [30–32].

2. Комплексирование данных ГНСС/СПП

Метод оценки ориентации с помощью комплексирования позволяет получать точные и постоянные результаты определения местоположения пешехода в открытом пространстве [26, 33]. Методы же пешеходной навигации в условиях отсутствия сигналов ГНСС все еще находятся в стадии разработки. В данном разделе рассматривается определение курса по данным ГНСС и длины шага, вводятся характеристики погрешностей выработки курса. Затем анализируется задача синхронизации данных и предлагается РФК для комплексирования данных СПП и ГНСС.

Погрешности определения курса и длины шага

Для комплексирования с данными СПП показания ГНСС-приемника пересчитываются в вырабатываемые СПП длину шага и курс. Под курсом пешехода понимается путевой угол его движения.

Были проанализированы погрешности длины шага и курса, полученные по данным ГНСС-приемника, встроенного в смартфон. Для анализа выбран прямолинейный маршрут длиной 100 м (рис. 4). Видно, что курс пешехода отклоняется примерно на 30° из-за прохода под мостом длиной 30 м. Зеленым цветом показан эталонный путь, а желтым – траектория движения пешехода по данным ГНСС; кружком отмечена начальная точка.

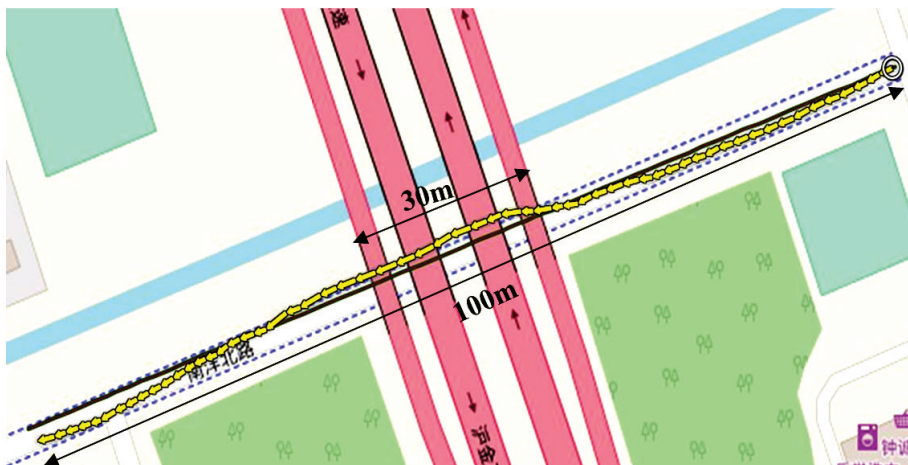


Рис. 4. Траектория движения пешехода по данным ГНСС и эталонная траектория

Введем обозначения:

$$\begin{cases} \varepsilon_k^{\psi-PDR} : \text{оценка погрешности курса от СПП на шаге } k; \\ \varepsilon_k^{SL-PDR} : \text{оценка погрешности длины шага от СПП на шаге } k; \\ \varepsilon_k^{\psi-GNSS} : \text{оценка погрешности курса от ГНСС на шаге } k; \\ \varepsilon_k^{SL-GNSS} : \text{оценка погрешности длины шага от ГНСС на шаге } k. \end{cases}$$

Для проведения экспериментов и анализа характеристик вышеуказанных погрешностей необходимо наличие множества контрольных точек. Для СПП эксперименты можно упростить. Например, пешеход может идти шаг за шагом вдоль дороги по прямой линии по наземным контрольным точкам, расположение которых фиксируется в программе постобработки. Мы получили характеристики вышеуказанных четырех погрешностей после проведения большого количества испытаний в контрольных точках; погрешности СПП возрастают при увеличении значения k , а погрешности ГНСС можно считать гауссовским шумом с нулевым средним значением и постоянной дисперсией (см. рис. 5, а). В качестве статистической характеристики погрешности определения курса используем среднюю накопленную курсовую погрешность – Mean Cumulative Heading Error (MCHE) [26]:

$$MCHE(k) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \varepsilon_i^{\psi-SYS}, \quad (9)$$

где SYS может быть либо ГНСС, либо СПП. При увеличении k MCHE для ГНСС стремится к нулю, а для СПП ее уровень растет, что и отражено на рис. 5, б. Аналогичным образом определяется накопленная погрешность длины шага – Cumulative Step Length Error (CSLE):

$$CSLE(k) = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i^{SL-SYS}. \quad (10)$$

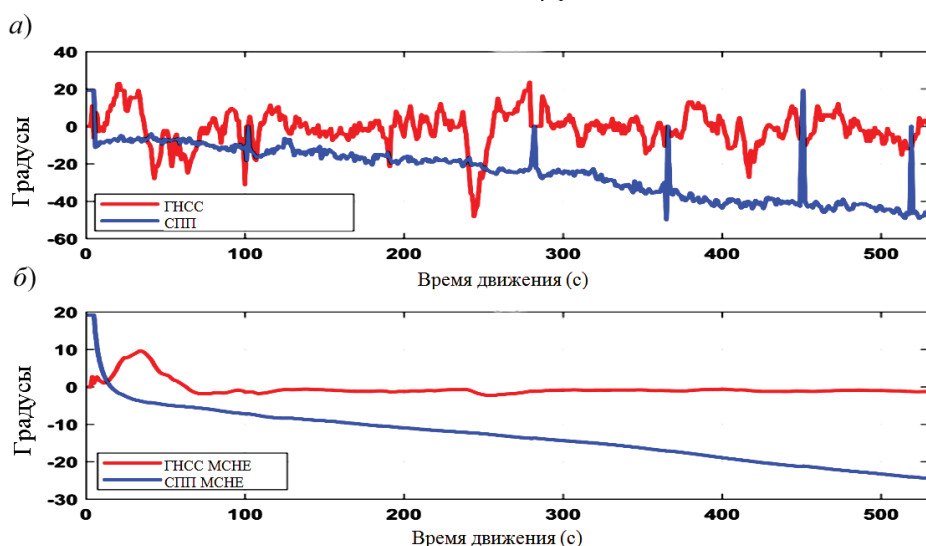


Рис. 5. Погрешности курса для СПП и ГНСС (а) и средняя накопленная курсовая погрешность (б)

Синхронизация данных

Выходные данные СПП о длине шага и курсе нерегулярны из-за случайного характера ходьбы пешехода. Выходные данные СПП вырабатываются по мере того, как происходит выявление шага. Данные ГНСС, напротив, поступают с постоянной частотой, обычно это 1 Гц. Ввиду этого нужно синхронизировать выходные данные обеих систем, особенно когда человек идет быстро или медленно, как показано на рис. 6. Как правило, человек шагает быстро в нормальных условиях или в случае спешки и медленно при повороте. Временная задержка происходит, когда пешеход останавливается.

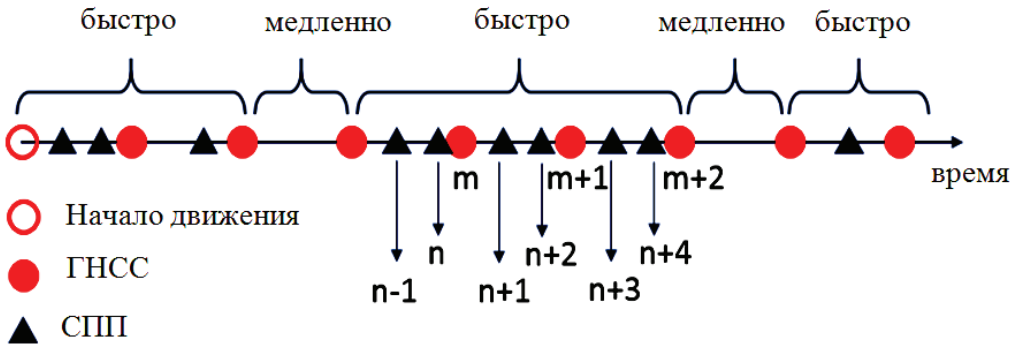


Рис. 6. Синхронизация данных СПП и ГНСС

На рис. 6 можно увидеть, что между моментами m и $m + 1$ по шкале времени ГНСС есть два момента $n + 1$ и $n + 2$, в которые вырабатываются данные СПП $\{\psi_{n+1}, SL_{n+1}\}$ и $\{\psi_{n+2}, SL_{n+2}\}$. По ним формируются приведенные к моменту времени m для ГНСС показания курса и длины шага:

$$\begin{cases} \psi_m = \frac{\psi_{n+1} + \psi_{n+2}}{2} \\ SL_m = \sqrt{SL_{n+1}^2 + SL_{n+2}^2 + 2C} \\ C = SL_{n+1}SL_{n+2} \times \cos(\psi_{n+1} - \psi_{n+2}) \end{cases} \quad (11)$$

Выражения (11) используются только для конкретизации понятия длины шага в соответствии с рис. 6 и могут быть использованы для вычисления синхронизированного курса и длины шага от СПП в конкретный момент времени. Длина шага – это расстояние между первой выходной координатой от СПП после момента времени m и первой выходной координатой от СПП после момента $m + 1$.

Расширенный фильтр Калмана

Для комплексирования ГНСС и СПП целесообразно использовать фильтр Калмана [20]. Фильтр Калмана широко применяется для комплексирования ИНС/ГНСС, причем как в «прямом» (вектор состояния описывает истинные значения параме-

тров), так и в «косвенном» (вектор состояния описывает погрешности ИНС) вариантах [9–11]. Здесь используется прямой вариант, который имеет следующие преимущества [25]:

- (а) уравнения навигационной системы и фильтра объединены в одно целое, что позволяет избежать повторяющихся вычислений;
- (б) по сравнению с косвенным вариантом полнее учитываются особенности движения объекта.

Вместе с тем классический фильтр Калмана не может быть непосредственно использован из-за нелинейности моделей, и здесь приходится применять РФК, который предполагает их линеаризацию. Линеаризация может выполняться относительно априорных параметров. В этом случае говорят о комплексировании по разомкнутой схеме, но более точной является линеаризация моделей относительно полученных на данный момент оценок параметров. Именно этот подход и применяется в настоящей работе. О нем говорят как о комплексировании по замкнутой схеме.

В РФК учитываются кинематические уравнения, связывающие координаты, составляющие скорости и ориентации с составляющими ускорения и угловой скорости. Эти уравнения в англоязычной литературе обозначают термином «механизация». В инерциально-спутниковых системах это уравнения работы ИНС. В данном случае речь идет об уравнениях СПП. Показания используемых в СПП датчиков: акселерометров, гироскопов и магнитометров – проходят калибровку, фильтрацию, выполняется традиционное в таких случаях понижение частоты съема их показаний. Калибровка датчиков заключается в компенсации постоянных смещений в их измерениях и уточнении масштабных коэффициентов.

В РФК используется уравнение формирующего фильтра вида

$$x_k = \Phi_{k-1}x_{k-1} + w_{k-1}, \quad (12)$$

где x_k – вектор состояния, Φ_{k-1} – переходная матрица, w_k – вектор порождающего белого шума. Вектор состояния содержит пять компонент:

$$x_k = (E_k \ N_k \ V_k \ \psi_k \ \dot{\psi}_k)^T, \quad (13)$$

где E , N – перемещения по восточной и северной осям; V – путевая скорость; ψ , $\dot{\psi}$ – курс (путевой угол) и скорость его изменения. Векторное уравнение (12) определяется скалярными:

$$E_{k+1} = E_k + V_k \times \sin \psi_k \times \Delta t_k + w_k^1, \quad (14)$$

$$N_{k+1} = N_k + V_k \times \cos \psi_k \times \Delta t_k + w_k^2, \quad (15)$$

$$V_{k+1} = V_k + w_k^3, \quad (16)$$

$$\psi_{k+1} = \dot{\psi}_k \times \Delta t_k + \psi_k + w_k^4, \quad (17)$$

$$\dot{\psi}_{k+1} = \dot{\psi}_k + w_k^5, \quad (18)$$

где Δt_k – интервал дискретности, $w_k^1 \dots w_k^5$ – порождающие шумы. Отсюда для переходной матрицы имеем

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin \psi_{k-1} \Delta t_k & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cos \psi_{k-1} \Delta t_k & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Вектор измерений при наличии всех данных от ГНСС и СПП имеет вид

$$z_k = \left[E_k^{GNSS} N_k^{GNSS} V_k^{GNSS} V_k^{PDR} \dot{\psi}_k^{PDR} \right]^T, \quad (20)$$

где индексы GNSS, PDR указывают на получение соответствующей величины из данных ГНСС или СПП. Значения V_k^{PDR} , $\dot{\psi}_k^{PDR}$ определяются по длине шага SL_k (см. (4) и (6)) и курсу от СПП как

$$V_k^{PDR} = SL_k \times f_k, \quad (21)$$

$$\dot{\psi}_k^{PDR} = \frac{(\psi_k - \psi_{k-1})}{\Delta t_k}. \quad (22)$$

Уравнения для измерений имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} E_k^{GNSS} \\ N_k^{GNSS} \\ V_k^{GNSS} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccc} 1 & 0 & 00 & 0 \\ 0 & 1 & 00 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} E_k \\ N_k \\ V_k \\ \psi_k \\ \dot{\psi}_k \end{array} \right] + v_k^{GNSS} \\ \\ \left[\begin{array}{l} V_k^{PDR} \\ \dot{\psi}_k^{PDR} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 00 & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{l} E_k \\ N_k \\ V_k \\ \psi_k \\ \dot{\psi}_k \end{array} \right] + v_k^{PDR} \end{array} \right., \quad (23)$$

где v_k^{GNSS} и v_k^{PDR} – белые шумы. Вектор измерений может быть сокращенным, когда есть только данные ГНСС

$$z_k = \left[E_k^{GNSS} N_k^{GNSS} V_k^{GNSS} \right]^T \quad (24)$$

или СПП

$$z_k = \left[V_k^{PDR} \dot{\psi}_k^{PDR} \right]^T. \quad (25)$$

В условиях открытой верхней полусферы проблем с доступностью достоверных данных ГНСС нет. Трудности в их получении возникают в стесненных условиях радиовидимости спутников и при сильном влиянии многолучевости. Точность данных СПП зависит от качества датчика, калибровки и предварительной обработки. Погрешности местоопределения уменьшаются после реализации вышеописанного метода комплексирования данных СПП и ГНСС.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

Оборудование

Аппаратное обеспечение. В эксперименте использовались данные акселерометров, магнитометров, гироскопов и приемников ГНСС, встроенных в смартфон (Samsung), обрабатываемые под управлением последней версии системы Android. В качестве эталонного средства использовалась инерциально-спутниковая система SBG (IG-500N). Во время эксперимента смартфон помещался в карман, а модуль SBG крепился на ступне пешехода. GPS-антенна, связанная со встроенным в модуль SBG приемником, располагалась над головой пешехода. Чтобы компенсировать погрешности, возникающие из-за разнесения модуля SBG и gps-антенны, использовался дополнительный ГНСС-приемник типа u-blox, антенна которого была привязана к месту расположения модуля SBG. Для уменьшения влияния многолучевости и выбросов проводилось сглаживание исходных данных. Три указанных устройства показаны на рис. 7.



Рис. 7. Используемое оборудование: а – смартфон, б – модуль SBG, в – ГНСС-приемник u-blox

Программное обеспечение. Для сбора данных, их предварительной и постобработки использовалась программа Matlab, разработанная сотрудниками Центра прикладных технологий искусственного интеллекта (Brain-Inspired Application Technology Center – BATIC). Кроме того, применялись программы Google Earth Pro, Open Street Map и GPS Track Editor для построения финальных траекторий. Для определения длины шага в СПП использовались наиболее чувствительные к движению пешехода акселерометры смартфона.

На рис. 8 показаны траектории, построенные по данным GPS-приемника смартфона (рис. 8, а) и инерциальных датчиков SBG (рис. 8, б) и по результатам комплексирования инерциальных датчиков SBG и GPS-приемника u-blox (рис. 8, в) в режиме реального времени без предварительной обработки и фильтрации. Красной линией отмечена эталонная траектория, полученная в камеральном режиме по данным SBG и u-blox. Кружком обозначена начальная точка. Далее демонстрируются результаты комплексирования данных смартфона с помощью изложенного ранее метода.

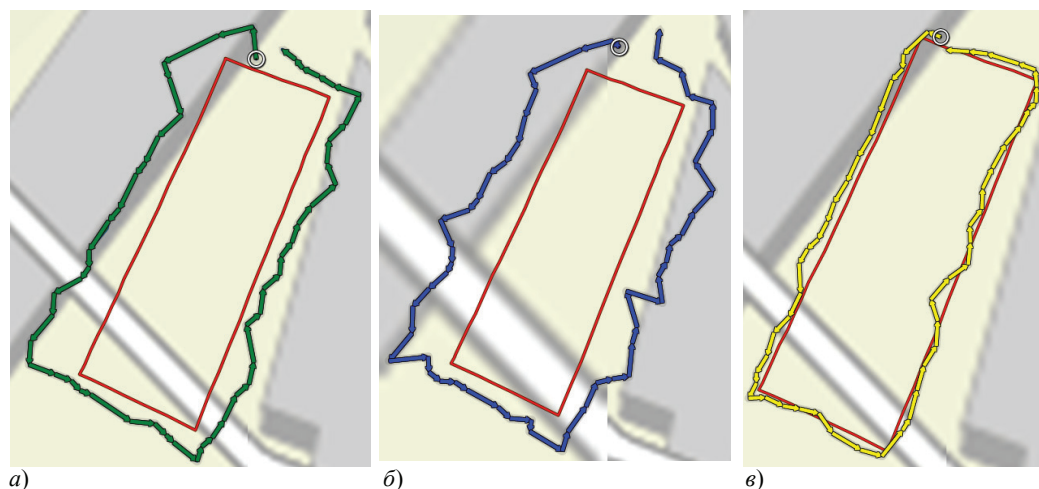


Рис. 8. Траектории GPS-приемника смартфона (зеленая), инерциальных датчиков SGB (синяя), SGB+GPS (желтая) и эталонная (красная)

Условия эксперимента. Эффективность предложенного метода комплексирования ГНСС/СПП оценивалась в режиме реального времени. В ходе экспериментов пешеход двигался по прямоугольному контуру со средней скоростью 6 миль/час в неблагоприятных для приема сигналов ГНСС условиях (ограниченная видимость спутников, многолучевость) из-за наличия высоких зданий (рис. 9, в).

Пешеход держал смартфон в кармане в вертикальном положении на протяжении всего эксперимента. Первые несколько секунд решения игнорировались, поскольку для того чтобы разместить телефон в правильном положении, требовалось некоторое время. На рис. 9, а показано положение смартфона в кармане во время эксперимента, а на рис. 9, б – положение модуля SGB.

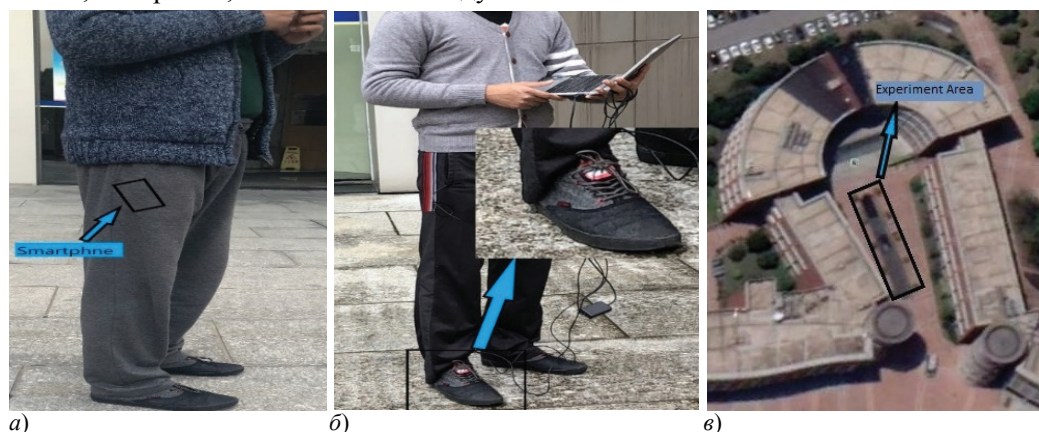


Рис. 9. Смартфон в кармане (а), модуль SGB (б); траектория и окружающая обстановка (в)

Результаты эксперимента. На рис. 10 показаны траектории, полученные в ходе экспериментов с данными смартфона. Кружок – это начальная и она же конечная точка, красная линия – эталонная траектория, зеленая линия – траектория, полученная с помощью ГНСС-приемника смартфона, синяя линия – траектория СПП. Очевидно, что последние два результата отличаются от эталонной траектории. Следует

отметить, что погрешности ГНСС-решений ограничены и зависят от окружающей среды, тогда как погрешность СПП растет со временем из-за систематических погрешностей датчиков [20].

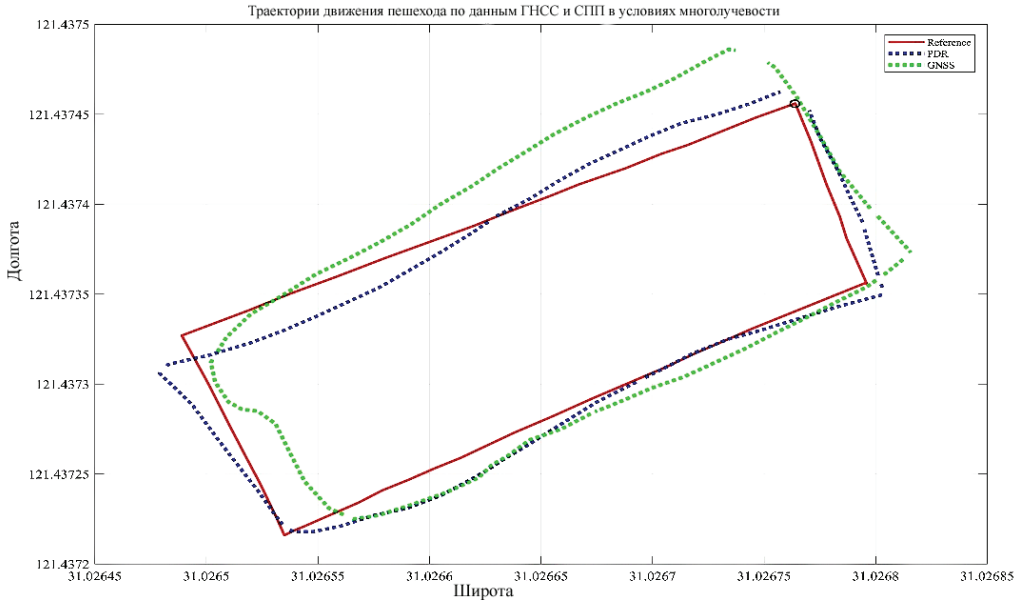


Рис. 10. Траектории по данным ГНСС (зеленая), СПП (синяя) и эталонная (красная), °

Результаты комплексирования

Комплексирование ГНСС и СПП на основе РФК, как показывает рис. 11, позволяет ограничить рост погрешностей определения координат.

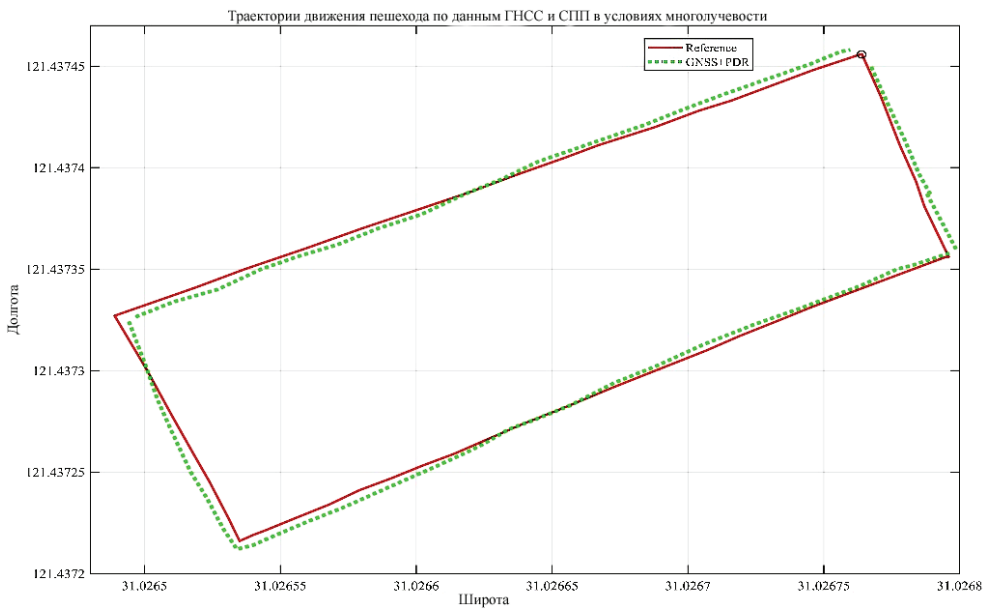


Рис. 11. Траектории как результат комплексирования ГНСС/СПП (зеленая линия) и эталонная (красная линия), °

Как видно из рис. 11, результаты комплексирования (зеленая линия) намного точнее, чем в случае использования ГНСС и СПП по отдельности. Отметим, что данные ГНСС были сглажены до комплексирования с данными СПП. Кроме того, данные ГНСС и СПП были синхронизированы, как это описано в разделе 2.

Оценка эффективности. Среднеквадратическая погрешность (СКП) – классическая характеристика отклонения оценок D_{est} некоторой величины от ее истинных значений D_{true} :

$$СКП = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (D_{true,k} - D_{est,k})^2}{n}}, \quad (26)$$

где n – общее число измерений. В табл. 2 представлены СКП горизонтальных координат для девяти проходов с использованием только ГНСС, только СПП и при комплексировании ГНСС/СПП. В предпоследнем столбце приведены общие по всем прохождениям значения СКП. В последнем столбце приведены значения СКП, полученные по ковариационной матрице РФК, – расчетная характеристика точности. Из таблицы видно, что комплексирование позволяет достичь существенно более высокой точности позиционирования, чем использование ГНСС и СПП независимо друг от друга. СКП при комплексировании находится на уровне 0,6-0,8 м. При этом РФК вырабатывает адекватную реальным погрешностям характеристику точности.

Т а б л и ц а 2

СКП горизонтальных координат, м

Способ	1 ^й проход	2 ^й проход	3 ^й проход	4 ^й проход	5 ^й проход	6 ^й проход	7 ^й проход	8 ^й проход	9 ^й проход	По всем проходам	СКП из РФК
ГНСС	3,79	3,65	3,51	3,92	3,96	3,00	3,57	3,43	3,73	3,62	3,63
СПП	2,26	2,34	2,48	2,33	2,31	2,30	2,34	2,40	2,30	2,34	2,34
ГНСС/СПП	0,70	0,66	0,59	0,67	0,78	0,59	0,63	0,67	0,77	0,67	0,68

Аналогичным образом были получены СКП для курса. При этом эталонное значение курса определялось как результат комплексирования SBG + u-blox в камеральном режиме. СКП курса приведены в табл. 3. Видно, что с точки зрения курса комплексирование ГНСС/СПП имеет еще большее преимущество перед отдельными ГНСС и СПП-решениями, чем это было для горизонтальных координат. При комплексировании СКП курса находится на уровне 2-3°.

Т а б л и ц а 3

СКП курса, град

Способ	1 ^й проход	2 ^й проход	3 ^й проход	4 ^й проход	5 ^й проход	6 ^й проход	7 ^й проход	8 ^й проход	9 ^й проход	По всем проходам	СКП из РФК
ГНСС	23,45	20,32	28,51	18,59	13,62	15,30	16,77	23,51	16,93	19,67	20,17
СПП	12,26	15,67	12,48	9,00	15,64	9,30	12,19	13,52	15,16	12,80	13,02
ГНСС/СПП	2,13	1,99	1,92	2,67	3,29	1,93	1,83	2,60	2,45	2,31	2,36

Выводы и дальнейшая работа

Рассмотрен метод пешеходной навигации с помощью встроенных в смартфон ГНСС-приемника и автономных датчиков. Метод основан на комплексировании данных СПП и ГНСС на основе РФК с включением в вектор состояния координат, путевой скорости, курса и азимутальной угловой скорости. Метод предусматривает определение длины шага по данным акселерометров, а также алгоритмическую синхронизацию показаний автономных датчиков и измерений ГНСС. Результаты натурной апробации продемонстрировали, что, несмотря на применение дешевых, грубых датчиков, встроенных в смартфон, при комплексировании они позволяют обеспечить пешехода навигационными решениями с точностями порядка 1 м в неблагоприятных условиях приема сигналов ГНСС (блокировка сигналов зданиями, многолучевость). Планируются дальнейшие исследования в части совершенствования фильтров и более корректного учета погрешностей инерциальных датчиков, которые предполагается проводить при большем разнообразии сценариев и на более протяженных интервалах времени.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Китайского стипендиального совета по программе «Один пояс и один путь» (грант № 17B8ECC74F). Авторы выражают благодарность рецензентам за их полезные комментарии и замечания, а также хотели бы поблагодарить Шанхайскую лабораторию навигации и геолокационного сервиса за их поддержку и услуги.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bhuiyan, M.Z.H., and Lohan, E.S.**, Multipath mitigation techniques for satellite-based positioning applications, *Global Navigation Satellite Systems: Signal, Theory and Applications*, InTech Publisher, 2012.
2. **Braasch, M.S.**, Multipath effects, *Global Positioning System: Theory and Applications*, Volume 1, Eds. B.W. Parkinson and J.J. Spiker Jr., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996, pp. 547–566.
3. **Chen, K.Y., Janz, K.F., Zhu, W., and Brychta, R.J.**, Redefining the roles of sensors in objective physical activity monitoring, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2012, vol. 44, no. 15, pp. 513–523.
4. **McGrath, M.J., Ni Scanaill, C., and Nafus, D.**, *Sensor Technologies: Healthcare, Wellness, and Environmental Applications*, Apress Open Publisher, 2013.
5. **Tian, Q., Salcic, Z., Wang, K.I-K., and Pan, Y.**, A multi-mode dead reckoning system for pedestrian tracking using smartphone, *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 7, pp. 2079–2093.
6. **Yao, Y., Xu, X., Zhu, C., Zhu, C., and Chan, C.-Y.**, A hybrid fusion algorithm for GPS/INS integration during GPS outages, *Measurement*, 2017, vol. 103, pp. 42–51.
7. **Van Dierendonck, J., Fenton, P.J., and Ford, T.J.**, Theory and performance of narrow correlator spacing in GPS receiver, *Journal of the Institute of Navigation*, 1992, vol.39, no. 3, pp. 265–283.
8. **Wang, G. et al.**, A GNSS/INS integrated navigation algorithm based on Kalman filter, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 17, pp. 232–237.
9. **Qi, H., and Moore, J.B.**, Direct Kalman filtering approach for GPS/INS integration, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, vol. 38, no. 2, pp. 687–693.
10. **Quan, W., Li, J., Gong, X., and Fang, J.**, *INS/CNC/GNSS Integrated Navigation Technology*, Beijing: National Defense Industrial Press, 2011.
11. **Yang, B., Qin, Y.-Y., and Chai, Y.**, Application of UKF in direct method of Kalman filter for INS/GPS, *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, vol. 20, no. 4, pp. 842–846.

12. Arribas, J., Moragrega, A., Fernandez-Predes, C., and Closas, P., Low-cost GNSS/INS/odometric sensor fusion platform for ground intelligent transportation systems, *Proc. 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017)* Portland, Oregon, 2017.
13. Khanh, N.-H., Lee, K.H., and Lee, S.-W., An indoor positioning system using pedestrian dead reckoning with WiFi and map-matching aided, *Proc. 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2017.
14. Bolad, U., and Akcakoca, M., A hybrid indoor positioning solution based on WiFi, magnetic field, and inertial navigation, *Proc. 14th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC)*, 2017.
15. Zou, H., Chen, Z., and Spanos, C.J., Accurate indoor localization and tracking using smartphone inertial sensors, WiFi and iBeacon, *Proc. 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2017.
16. Chen, Q., Ding, D., and Zheng, Y., Indoor pedestrian tracking with sparse RSS fingerprints, *Tsinghua Science and Technology*, 2018, vol. 23, no. 1, pp. 95–103.
17. Hsu, L.-T., Gu, Y., Huang, Y., and Kamijo, S., Urban pedestrian navigation using smartphone-based dead reckoning and 3-D map-aided GNSS, *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 1281–1293.
18. Langlois, C., Tiku, S., and Pasricha, S., Indoor localization with smartphones: Harnessing the sensor suite in your pocket, *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 70–80.
19. Groves, P., Jiang, Z., Rudi, M., and Strode, P., A portfolio approach to NLOS and multipath mitigation in dense urban areas, *Proc. 2013 Institute of Navigation Conference on GNSS*, Nashville, TN, USA, 2013.
20. Bullock, J.B., Foss, M., Geier, G., and King, M., Integration of GPS with other sensors and network assistance, *Understanding GPS: Principles and Applications*, E.D. Kaplan Ed., second edition, Mobile Communication Series, 2006, pp. 459–558.
21. Yun, X., Bachmann, E.R., and McGhee, R.B., A simplified quaternion-based algorithm for orientation estimation from earth gravity and magnetic field measurements, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 2008, vol. 57, no. 3, pp. 638–650.
22. Shin, E., Estimation techniques for low-cost inertial navigation, Ph.D. thesis, Calgary: Geomatics Eng., University of Calgary, 2005, UCGE Report 20207.
23. Groves, P.D., *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, Second edition, Artech House, 2013.
24. Liu, Q., Ying, R., Wang, Y., Qian, J., and Liu, P., Pseudorange double difference algorithm based on duty-cycled carrier phase smoothing on low-power smart devices, *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 Proceedings*, Lecture Notes in Electrical Engineering, Singapore: Springer, 2018, pp. 415–430.
25. Hu, G., Wang, W., Zhong, Y., Gao, B., and Gu, C., A new direct filtering approach to INS/GNSS integration, *Elsevier Aerospace Science and Technology*, 2018, vol. 77, pp. 755–764.
26. Rehman A., Liu, Q., Wu, Z., Zhu, H., Qian, J., Eang, Y., and Liu, P., PDR/GNSS fusion algorithm based on joint heading estimation, *China Satellite Navigation Conference 2019 Proceedings*, 2019, pp. 326–339.
27. Kubo, N., Kikuchi, R., and Higuchi, M., A unique approach to strong multipath mitigation in dense urban areas, *Proc. 28th International Technical Meeting of the ION Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*, Tampa, Florida, USA, 2015.
28. Farrell, J., and Givargis T., Differential GPS reference station algorithm-design and analysis, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, vol. 8, no. 3, pp. 519–531.
29. Yang, Y., Hatch, R.R., and Sharpe, R.T., GPS multipath mitigation in measurement domain and its application for high accuracy navigation, *Proc. 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Long Beach, USA, 2004, pp. 1124–1130.
30. Kim, J.W., Jang, H.J., Hwang, D.-H., and Park, C., A step, stride, and heading determination for the pedestrian navigation system, *Journal of Global Positioning Systems*, 2004, vol. 3, no. 1–2, pp. 273–279.
31. Wang, L., Dong, Z., Pei, L., Qian, J., Liu, C., Liu, D., and Liu, P., A robust context-based heading estimation algorithm for pedestrian using a smartphone, *Proc. 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION-GNSS+)*, Tampa, FL, USA, 2015, pp. 2493–2500.
32. Pei, L., Liu, D., Zou, D., Choy, R.L.F., Chen, Y., and He, Z., Optimal heading estimation based multidimensional particle filter for pedestrian indoor positioning, *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 49705–49720, DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2868792
33. Lan, H., Yu, C., El-Sheimy, N., An integrated PDR/GNSS pedestrian navigation system, *China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume III. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 342, Berlin: Springer, 2015, pp. 677–690.

Rehman, A. (Institute for Sensing and Navigation, Shanghai Jiao Tong University; Shanghai Key Laboratory of Navigation and Location-based Services, Shanghai Jiao Tong University, China), **Shahid, H.** (Department of Electronic Engineering, Fudan University, China), **Afzal, M.A.** (Shanghai Key Laboratory of Navigation and Location-based Services, Shanghai Jiao Tong University, China), **Bhatti, H.M.A.** (Department of Computer Science and Technology, Donghua University, China)

Accurate and Direct GNSS/PDR Integration Using Extended Kalman Filter for Pedestrian Smartphone Navigation, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 2 (109), pp. 91–108.

Abstract. According to well-described literature concerning the work history of multipath mitigation in the global navigation satellite systems (GNSS), multipath is still the most dominant factor in a challenging environment. There are unperturbed harsh circumstances where GNSS signals cannot reach and smartphone navigation is not possible. The main objective of this research is to find an accurate solution for pedestrian smartphone navigation in a multipath environment. Experiments are done with micro-electro-mechanical system (MEMS) sensors mounted on a smartphone, and no extra hardware is needed. The latest Android smartphone is used to log the data files of GNSS and MEMS sensors. This scheme has been classified in the synopsis, and a rectangular route with three perpendicular turns has been selected for a pedestrian walk. The data is preprocessed using a low pass filter to remove high-frequency noise and smooth the signal. The description of accumulative error produced by the heading and step size estimation has been reduced by implementing the indices of mean cumulative heading error and cumulative step length error, respectively. In the end, the suboptimal extended Kalman filter algorithm is used to fuse the data of GNSS and pedestrian dead reckoning (PDR) for final results. In this paper, we try to give a technique to provide accurate pedestrian smartphone navigation. The fusion results show that the prospective method explores the possibility to use smartphone navigation in any case when GNSS or PDR information is not available. Substantial simulations are implemented and corroborate that the schemed method is sturdier to use in a harsh environments. The aim is to achieve high-level accuracy with an ultra-low-cost solution.

Key words: smartphone navigation, MEMS sensors, PDR, extended Kalman filter, multipath.

Материал поступил 25.09.2019