

КОРРЕКЦИЯ КУРСОВЫХ ПОКАЗАНИЙ ПЕШЕХОДНЫХ ИНС ПО ДАННЫМ МАГНИТОМЕТРОВ

Проанализировано влияние частоты коррекций по курсу с использованием данных магнитометра на точность недорогих пешеходных инерциальных навигационных систем (ПИНС). Приводятся и анализируются результаты реальных натурных испытаний, которые показывают, что частота проведения коррекций существенным образом влияет на точность определения местоположения.

1. Введение

Недорогие пешеходные инерциальные навигационные системы (ПИНС), описанные, например, в [1], часто включают трехосные МЭМС акселерометры, гироскопы и магнитометры. Для этих датчиков характерен дрейф измерителей, и со временем в ПИНС происходит накопление ошибок в определении местоположения. Широко применяемые в пешеходной навигации коррекции по нулевой скорости [2] уменьшают ошибки выработки скорости, определяемой по данным акселерометров, и коррелированные с ними ошибки углов ориентации вокруг осей x и y , определяемых по данным гироскопов. Для проведения этих коррекций инерциальный измерительный блок (ИИБ) устанавливается на обуви пешехода. В недорогих ПИНС такая коррекция заметно повышает точность определения местоположения. Однако ошибки в определении ориентации вокруг оси z сохраняются значительными [3]. Поэтому для дальнейшего повышения точности часто используются недорогие магнитометры. В ПИНС магнитометр считается наиболее практичным датчиком для снижения ошибок курса, так как абсолютные измерения магнитного поля, которые далее переводятся в измерения курса, не имеют временного дрейфа. Кроме того, недорогие инерциальные блоки с акселерометрами и гироскопами [4–6] часто производятся и корпусируются совместно с трехосными магнитометрами. Применение магнитометров очень удобно, так как это избавляет от необходимости использования дополнительных датчиков. Поэтому в ПИНС данные магнитометров часто комбинируются с данными от гироскопов [7–13].

При использовании магнитометров для решения проблемы повышения точности определения курса в ПИНС обычно применяются два метода. С помощью первого метода курсовые измерения получают непосредственно от магнитометров [11, 14, 15], а с помощью второго курсовые измерения магнитометров интегрируются с дополняющими их гироскопическими измерениями угла рыска-

Абдулрахим Хаири. Доктор наук Научного исламского университета Малайзии, г. Бандар Бару Нилаи, Малайзия.

Семан Камаруззаман. Доктор наук, профессор Научного исламского университета Малайзии.

Отман Маринах. Доктор наук Научного исламского университета Малайзии.

Шуиб Фарах Мазитах Мд. Сотрудница Научного исламского университета Малайзии, Малайзия.

Мур Терри. Профессор, директор Геопространственного института Университета Ноттингема, Великобритания.

Хайд Крис. Сотрудник Геопространственного института Университета Ноттингема,

Хилл Крис. Ведущий исследователь Геопространственного института Университета Ноттингема,

Научный редактор перевода д.т.н. О.А.Степанов.

ния [12, 16]. В первом методе измеренные магнитометрами горизонтальные компоненты используются для выработки магнитного курса, который затем напрямую используется в навигационной системе. Во втором методе относительные гироскопические измерения рыскания, содержащие достаточно большие ошибки, компенсируются с помощью абсолютных курсовых измерений от магнитометра. Измерения магнитометров затем можно использовать, например, в фильтре Калмана (ФК) для оценивания ошибок рыскания, что улучшает точность выработки курса.

Кроме того, существует еще один подход к использованию показаний магнитометра для повышения точности ПИНС – метод отпечатка пальца – «фингепринтинга» (fingerprinting). Суть этого метода заключается в формировании картографической базы данных значений магнитного поля с привязкой к координатам и последующего ее использования для уточнения местоположения путем сопоставления показаний магнитометра и данных карты [10]. Этот метод широко используется в навигации и известен так же, как map-matching или map-aided navigation [28–30]. Следует иметь в виду, что при таком подходе речь идет лишь об уточнении местоположения, курс при этом не уточняется. Для реализации такого метода в ПИНС была предпринята попытка создать базу данных с использованием искусственных магнитных аномалий [17].

Настоящая статья посвящена проблеме использования магнитометров для повышения точности определения курса. Но надо принять во внимание, что при использовании магнитометров для решения этой проблемы применение показаний магнитометров имеет смысл только в среде, где нет магнитных возмущений. В противном случае, например, в зданиях, где такие возмущения присутствуют, велика вероятность искажения измерений магнитометров. Поэтому исследователи пытаются найти методы выявления возмущений магнитных измерений в недорогих ПИНС, см. напр. [11, 12, 18]. Для этого вводятся специальные фильтры, с помощью которых определяются измерения, не содержащие возмущений. Например, в работе [11] говорится, что измерения отфильтровываются с помощью одного трехосного магнитометра, а в работе [19] – что используется несколько магнитометров. Следует иметь в виду, что в результате отбраковки число приемлемых для использования измерений может существенно сокращаться. Важно подчеркнуть, что этому вопросу в литературе должного внимания не уделялось.

Цель настоящей работы и заключается в исследовании влияния частоты использования магнитных курсовых измерений на точность ПИНС.

Статья построена следующим образом. В разделе 2 разъясняется принцип работы магнитометра для расчета курсовых измерений. В разделе 3 оценивается влияние частоты курсовых коррекций на решение, вырабатываемое ПИНС, с использованием результатов реальных испытаний.

2. Магнитометр

Трехосный магнитометр измеряет компоненты магнитного поля окружающей его среды, включая магнитное поле Земли. На основе этих измерений можно рассчитать магнитный курс [20]. Однако измеряемое магнитное поле подвержено влиянию внешних возмущений. К примеру, наличие стальных предметов значительно влияет на показания магнитометра. Поэтому измеряемое магнитное поле будет существенно отличаться от магнитного поля Земли, что, в свою очередь приведет к выработке неверных показаний магнитного курса [21].

Это является серьезным препятствием для использования магнитометров в недорогих ПИНС внутри помещений.

Как отмечалось во введении, есть два основных метода использования показаний магнитометров, предлагаемых в литературе для решения задачи навигации: фингерпринтинг и фильтрация измерений магнитометра.

Методом фингерпринтинга [7, 10, 22] производится картографирование магнитного поля в предполагаемой области навигации. В этом случае пользователь, имеющий магнитометр, привлекает базу данных для определения своего положения на основе измерений магнитного поля. Для решения этой задачи можно применять, например, вероятностный метод [23]. Метод фингерпринтинга использует измерения не рассчитанного магнитного курса, а компонентов магнитного поля. Существенно, что точность оценивания местоположения будет зависеть от качества базы данных магнитной карты.

В методе фильтрации, см., например [11, 12], фильтр отбраковывает «плохие» измерения (выбросы) магнитометра на основе заранее определенного условия. Затем осуществляется комплексирование принятых («хороших») измерений с дополняющими их курсовыми измерениями ИИБ, в целях получения наилучшей оценки курса. Комплексирование может быть проведено с использованием фильтра Калмана (ФК), как показано в данной статье. Вектор состояния, используемый в ФК, описан в [3].

Аналогичный метод фильтрации для обеспечения качественных магнитометрических измерений курса применяется и в [18, 19], но вместо одного используется шесть магнитометров. Метод основан на выявленном в [24] факте, связанном с тем, что при размещении трехосных акселерометров вблизи друг друга, но с разной ориентацией, можно получить информацию о наличии или отсутствии возмущений магнитного поля. Используя фильтр данных магнитометра и модель магнитного поля (например, Международную модель геомагнитного поля (IGRF)) [25], можно выявить измерения, искаженные возмущениями. После отбраковки с использованием оставшихся измерений рассчитывается магнитный курс. Примеры применения этих методов (с одним и несколькими магнитометрами) демонстрируют, что такая фильтрация позволяет в результате повысить точность определения местоположения пешеходной навигационной системы. Таким образом, использование показаний магнитометра, подверженных фильтрации, может быть эффективным внутри помещений со значительными магнитными возмущениями.

Предлагаемая работа посвящена двум вопросам, связанным с применением метода фильтрации показаний магнитных датчиков при их использовании для определения курса и которым до сих пор должного внимания в литературе не уделялось:

- что произойдет, если имеется малое количество надежных отфильтрованных курсовых измерений (наихудший сценарий для помещения);
- какое влияние на точность определения местоположения окажет наличие малого числа измерений при долговременном использовании недорогой ПИНС.

Магнитометрический курс

В идеальных условиях без магнитных возмущений трехосный магнитометр измеряет компоненты магнитного поля Земли в связанной с объектом системе координат $m_\theta = [m_x^b \ m_y^b \ m_z^b]^T$, где m_x , m_y , m_z — измерения магнитного поля Земли

в связанной с объектом системе координат хуз.

Магнитный курс в местной горизонтной системе координат (крен = 0°, дифферент = 0°), φ_m^{LL} можно рассчитать следующим образом [26]:

$$\varphi_m^{LL} = -\text{atan2}(m_y^{LL}, m_x^{LL}), \quad (1)$$

где m_y и m_x – измерения магнитного поля Земли при нулевых значениях углов крена и дифферента (в местной горизонтной системе координат).

Фильтрация показаний магнитометра

Для решения проблемы возмущений измерений магнитометров был выбран метод фильтрации. Известны два используемых для этих целей фильтра – Фолкнера и Берда [11, 12]. Используя порог γ , определенный эмпирическим путем, фильтр Фолкнера принимает магнитометрические измерения курса, если они проходят шаги 1 и 2 (или 3) – см. таблицу (где t_i и t_{i-1} представляют собой текущий и предыдущий интервал времени соответственно). Фильтр Берда принимает измерения, если они проходят все шаги. Затем эти отфильтрованные измерения используются для коррекции в ФК, описанном в [3]. В настоящей работе был выбран фильтр Фолкнера.

Сравнение двух методов фильтрации измерений магнитометров

Шаг	Фильтр Фолкнера	Фильтр Берда
1	Разность измеряемого и предсказанного (по модели) вектора напряженности магнитного поля $< \gamma_1$ И	То же самое, И
2	Разность измеряемого изменения магнитометрического курса и изменения оценки курса, полученной в ФК в моменты времени t_τ и $t_{\tau-1} < \gamma_2$ ИЛИ	Разность магнитометрического курса и оценка курса ФК $< \gamma_4$, И
3	Шаг 2, но с другим периодом в моменты времени t_τ и $t_{\tau-1} < \gamma_3$	То же, что и фильтр Фолкнера, шаг 2, И
4	–	Разность изменений скорости вращения, полученной из показаний магнитометра и изменений скорости вращения, измеряемой гироскопом $< \gamma_5$

3. Испытания и результаты

Было проведено два вида испытаний: внутри и вне помещения. Задача испытаний заключалась в оценке работы магнитометров в помещении и на открытом пространстве (наружные испытания). Способ проведения испытаний и их результаты описаны ниже. ИИБ монтировался и закреплялся изолентой на обуви пешехода, который нес рюкзак с регистратором данных. Начальные значения крена и дифферента ИИБ были рассчитаны в течение 1 с путем вычисления разности измерений акселерометра и местного вектора силы тяжести. В качестве начального значения курса было использовано курсовое измерение магнитометра, откалиброванного в статике [20].

Наружные испытания. Пешеходное испытание проводилось на футбольном поле и занимало примерно 40 минут. Было пройдено примерно 10 кругов по линии подачи. В испытании применялась система с описанной выше конст-

рукцией, но с дополнительной системой GPS, работающей в сетевом кинематическом режиме реального времени (NRTK – Network Real Time Kinematic) и используемой как эталонная система. Точность такой системы по горизонтальному положению составляет порядка 2 см [27]. RTK-антенну пользователь переносил в рюкзаке, а приемник держал в руке. Начальное положение ИИБ было определено с помощью GPS (предполагалось, что навигация начинается в районе с хорошим приемом сигналов GPS). Измерения магнитометра с частотой 20 Гц обрабатывались по методу фильтрации на каждом шаге. Затем принятые измерения использовались для коррекции оценки курса в ФК.

Результаты наружных испытаний. Ниже приведены результаты для первых двух кругов. На рис. 1 представлен график напряженности результирующего магнитного поля. Четко видны стабильные измерения (сплошная линия) относительно измерения по модели IGRF (пунктирная линия), магнитные возмущения при этом очень малы. Максимальная напряженность магнитного поля была зарегистрирована на уровне 0,5367 G, что всего на 0,0470 G отличается от эталонной модели. Порог γ_1 для фильтра магнитометра (шаг 1) определялся эмпирическим путем (0,1 G). Таким образом, все измерения магнитометра прошли шаг 1 фильтра и были использованы на следующем шаге.

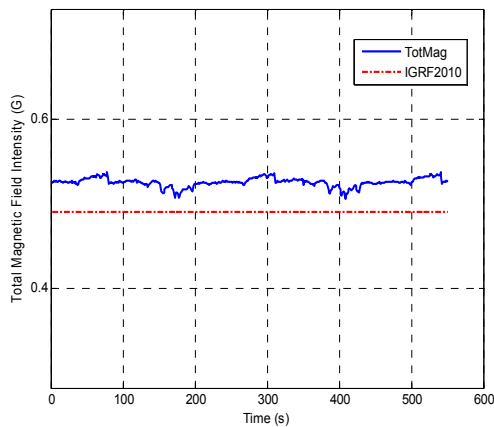


Рис. 1. Напряженность результирующего магнитного поля, измеренного магнитометром на каждом шаге при наружных испытаниях (TotMag), и напряженность, полученная по модели (IGRF2010)

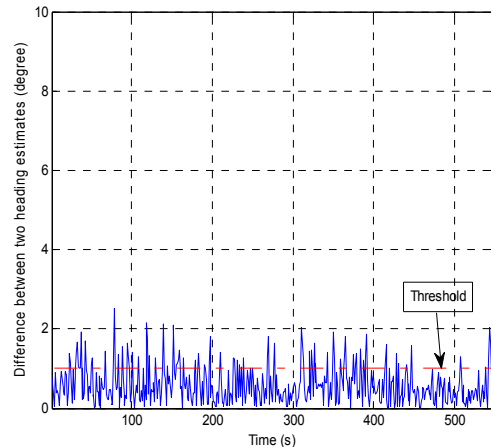


Рис. 2. Разности между изменениями курса (за текущий и предыдущий периоды) для значений курса, полученных от магнитометра и ФК. Threshold – порог, равный 1° .

На рис. 2 показаны абсолютные разности (за текущий и предыдущий периоды) между курсом от ФК и магнитным курсом от магнитометра. Эти разности невелики, что также указывает на крайне низкие магнитные возмущения. При использовании эмпирически определенного порога γ_2 на уровне 1° , большинство курсовых измерений от магнитометра прошли шаг 2 и были приняты для проведения коррекции ФК по курсу. Результат выполнения шага 3 фильтра магнитометра не показан, так как большинство измерений прошли шаг 2, и в шаге 3 необходимости не было.

На рис. 3 показаны разности между курсом, выработанным ИНС с коррекцией по магнитометру и ИНС с коррекцией по NRTK (эталон).

Видно, что ошибка курса относительно небольшая ($< 5^\circ$). Это говорит о том, что при наружных испытаниях большинство курсовых измерений при коррекции по магнитометру достаточно надежны для использования на шаге коррекции ФК. Действительно, большинство измерений магнитометра были приняты, что привело к частым коррекциям ФК. На рис. 4 показаны точки, когда принимались магнитометрические измерения курса. Можно видеть, что из-за низких магнитных возмущений (см. рис. 1 и 2) большинство измерений принимаются фильтром магнитометра. Интервал между принятыми измерениями составлял порядка 1 с (см. рис. 5). Это означает, что курсовые измерения магнитометра подаются в ФК практически на каждом шаге в течение всего времени испытаний.

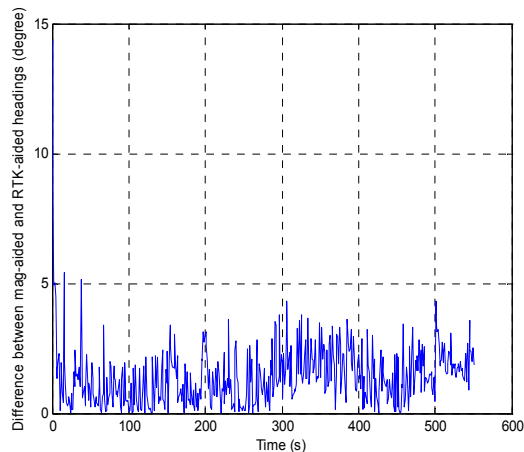


Рис. 3: Курсовая ошибка ИНС при коррекции по фильтрованным измерениям магнитометра

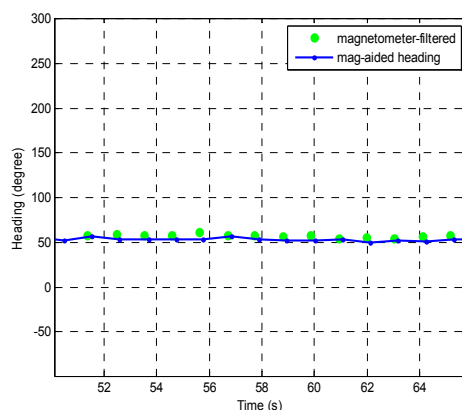


Рис. 4: Курс ИНС при коррекции по магнитометру (mag-aided heading) и используемые отфильтрованные измерения (magnetometer-filtered)

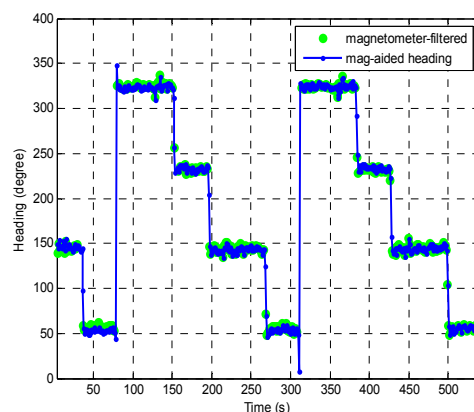


Рис. 5: Измерения курса по отфильтрованным показаниям магнитометра (принимаются в фильтре с большой частотой)

За счет использования частых курсовых измерений магнитометра ошибка определения местоположения недорогой ПИНС с магнитометрической коррекцией была снижена. На рис. 6 показано сравнение горизонтальной ошибки положения при использовании коррекции и без нее. Сравнение проводилось с данными NRTK. Если магнитометр не использовался, ПИНС корректировалась только по измерениям нулевой скорости. По результатам наблюдений, без использования магнитометра максимальная горизонтальная ошибка положения была значительной – порядка 50 м после 9 минут навигации. В то же время при использовании магнитометра максимальная ошибка была заметно снижена и составила всего порядка 14 м. Это показывает важность использования магнитометра: при наличии частых надежных магнитометрических курсовых измерений они существенно снижают ошибку положения недорогой ПИНС.

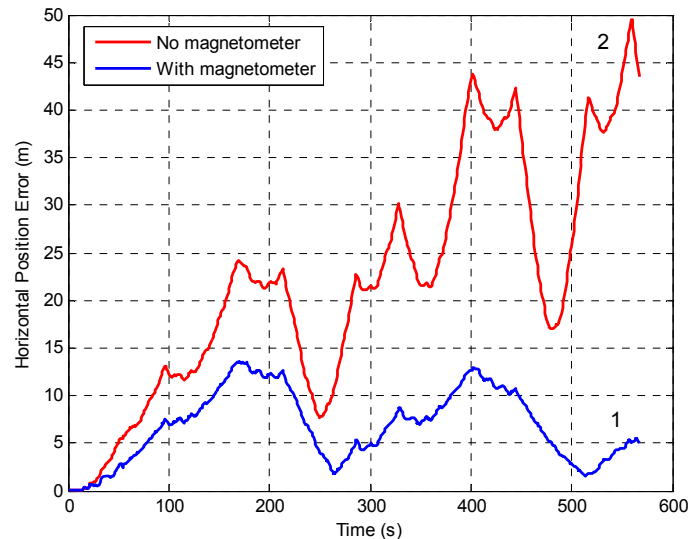


Рис. 6: Сравнение горизонтальной ошибки положения недорогой ПИНС при коррекции по данным магнитометра (1) и без коррекции (2)

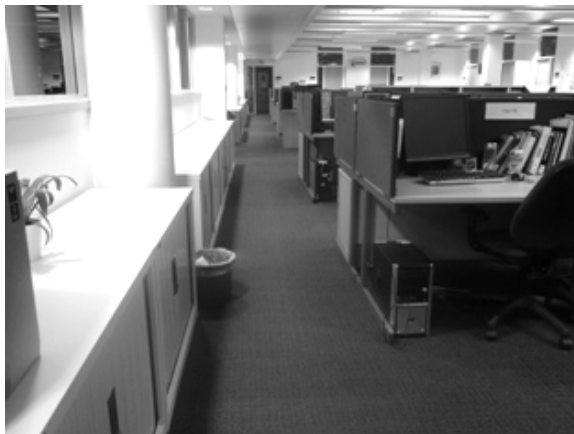


Рис. 7. Офисная среда с предметами из искусственных материалов, вызывающих возмущения в измерениях магнитометра

Внутренние испытания.

Пешеходные испытания были проведены также внутри помещения в офисном здании Геопро пространственного института Ноттинггема (рис. 7). Пешеход дважды прошел по офису. Следует отметить, что некоторые предметы порождали возмущения в измерениях магнитометра: металлические шкафы слева и бетонные колонны слева, компьютеры справа.

Результаты внутренних испытаний. Напряженность результирующего магнитного поля показана на графике на рис. 8. Видны большие измене-

ния значений напряженности, связанные с магнитными возмущениями, вызванными вышеуказанными предметами. Максимальная напряженность поля была зарегистрирована на уровне 1,034 G, что на 0,544 G отличается от эталонной модели IGRF2010. Такая разница гораздо выше, чем при наружных испытаниях (см. рис. 1), где были получены более стабильные измерения.

Напомним, что в разделе 2 сформулированы два вопроса. Для их корректного обсуждения при исследовании использовались данные наружных испытаний, которые подвергались предварительной обработке, моделирующей условия, соответствующие работе внутри помещений. Это сделано в связи с возможностью сопоставления с эталоном, который внутри помещений отсутствует.

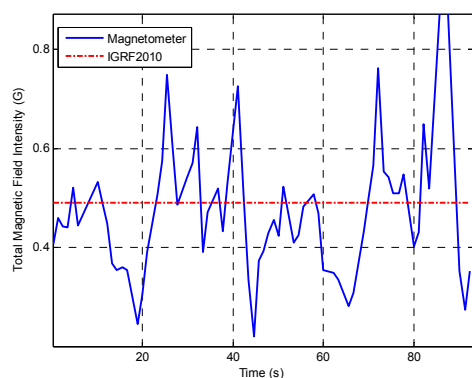


Рис. 8. Напряженность результирующего магнитного поля в здании Геопространственного института

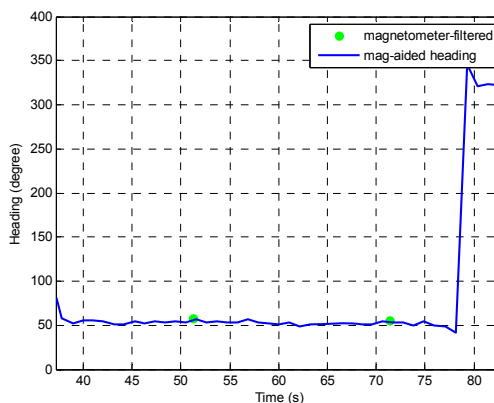


Рис. 9: Отфильтрованные курсовые измерения от магнитометра (редко принимаемые в фильтре)

Что касается первого вопроса, ранее уже был получен результат, подтверждающий, что частые коррекции по надежным курсовым измерениям магнитометра способствуют снижению ошибки положения недорогой ПИНС. Однако в реальности это можно осуществить только в условиях с минимальными магнитными возмущениями. Маловероятно, что в помещении такие возмущения будут минимальными. Чтобы исследовать этот вопрос, надо рассмотреть вариант редких курсовых коррекций. Такой вариант считается достаточно трудным при использовании реальных измерений при внутренних испытаниях, так как в помещениях магнитные возмущения могут быть неуправляемыми (например, может вообще не быть курсовых показаний от магнитометра). Таким образом, было решено использовать данные наружных испытаний. Для этого снижался порог, используемый в фильтре магнитометра. В этом случае принимается меньшее количество измерений, что позволяет имитировать среду внутри помещения, где значительные магнитные возмущения вызывают высокие ошибки в измерениях магнитометра (которые, соответственно, отбраковываются в фильтре).

Порог γ_2 на шаге 2 в фильтре магнитометра был снижен с 1 до $0,1^\circ$. Интервал между измерениями курса от магнитометра показан на рис. 9, где точками отмечены принятые курсовые измерения магнитометра. Видно, что этот интервал увеличился до 20 с по сравнению с 1 с на рис. 5. Соответственно в ФК для коррекции курсовые измерения используются менее часто.

На рис. 10 показана горизонтальная ошибка положения недорогой ПИНС с частыми (1) и редкими (2) курсовыми коррекциями. График построен с использованием разностей между положением по системе NRTK GPS и по ИНС с магнитометрической коррекцией. При редких курсовых коррекциях ошибка положения в недорогой ИНС растет. Напомним, что, если принимается большое количество магнитометрических курсовых измерений, максимальная горизонтальная ошибка положения составляет 14 м. В то же время при принятии только нескольких курсовых измерений максимальная ошибка увеличивается до 35 м.

Далее рассмотрим, как большая длительность испытаний (с редкими курсовыми коррекциями) влияет на точность решения недорогой ПИНС. Для этого построим график горизонтальной ошибки положения за весь период наружных испытаний. Реальное испытание длилось 40 минут, а представленные до сих

пор результаты охватывали период порядка 10 минут. Таким образом, анализируя более длительный период, можно определить влияние данного фактора.

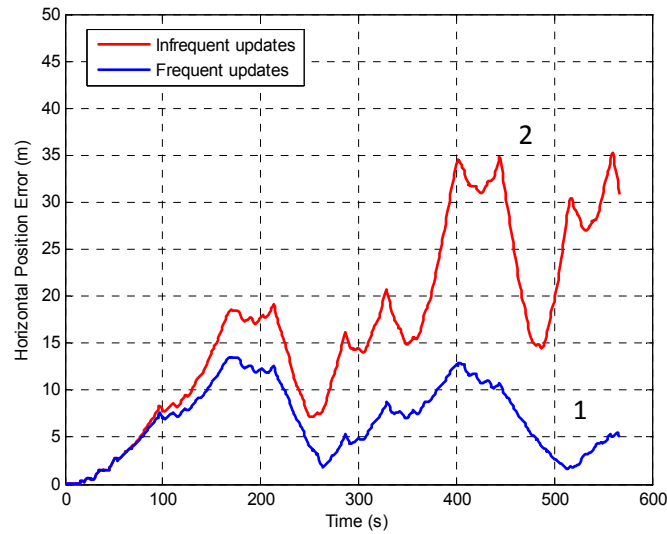


Рис. 10. Сравнение горизонтальной ошибки положения недорогого ПИНС с частыми (1) и редкими (2) коррекциями

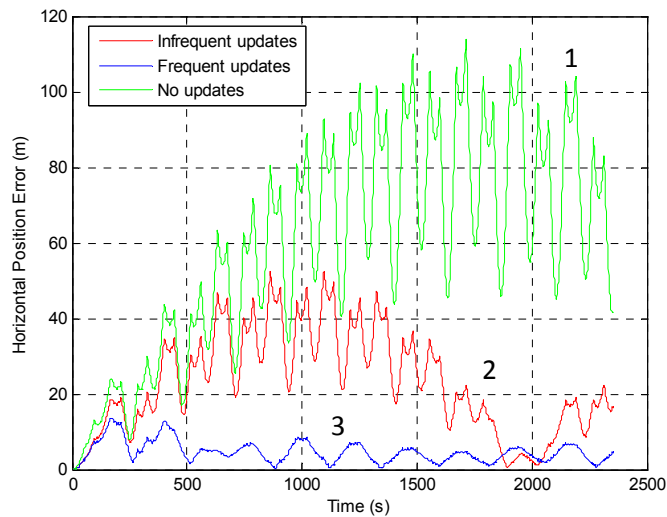


Рис. 11: Сравнение горизонтальной ошибки положения в трех случаях: без использования магнитометра (1), редкие коррекции по магнитометру (2) и частые коррекции по магнитометру (3)

На рис. 11 показана ошибка определения горизонтального положения для трех случаев: магнитометр не используется, курсовых коррекций нет (1), используются отфильтрованные измерения магнитометра с редкими курсовыми коррекциями (2) и используются отфильтрованные измерения магнитометра с частыми курсовыми коррекциями (3). Максимальная ошибка положения составила 114, 53 и 14 м соответственно. Эти результаты еще раз подтверждают, что применение магнитометра способствует снижению ошибки положения в ПИНС. Следует заметить, что интервал между курсовыми коррекциями весьма важен при анализе точности. В наихудшем случае, внутри помещений, где маг-

нитные возмущения могут быть достаточно велики, частые курсовые коррекции маловероятны. Это приводит к высоким ошибкам определения положения, так как они продолжают расти при отсутствии измерений курса (между коррекциями) вследствие корреляции между ошибками курса и координат. Более того, при отсутствии курсовых измерений уже накопленные ошибки координат не могут быть скорректированы, даже если позже появляются качественные курсовые измерения. Это связано с тем, что коррекция по курсовому измерению исправляет только курс ИНС и не влияет на накопленную ошибку положения. Поэтому при использовании недорогих ПИНС, долго работающих внутри помещения, требуются частые курсовые коррекции, если магнитометр используется в качестве единственного средства курсовых измерений.

4. Выводы

В помещениях часто наблюдаются сильные магнитные возмущения. Чтобы идентифицировать и отбраковать искаженные курсовые измерения, можно использовать различные методики фильтрации измерений магнитометра, например, фильтр, представленный в данной статье. Однако фильтрация ненадежных измерений магнитометра неспособна значительно снизить дрейф курса, чтобы уменьшить и ошибки определения координат. Это связано с зависимостью эффективности работы метода от частоты коррекций измерений курса, подаваемых на фильтр оценки.

При использовании метода фильтрации показаний магнитометра интервал между курсовыми коррекциями по измерениям магнитометра представляется важным, однако ему не уделено должного внимания в литературе. При работе в помещениях сильные магнитные возмущения могут приводить к значительным ошибкам в курсовых измерениях магнитометра. Поэтому при использовании метода фильтрации показаний магнитометра большая часть измерений всегда будет отбраковываться. Для коррекции ФК будет использоваться всего несколько измерений. Наличие длинного интервала между ними приводит к появлению значительных неустраняемых ошибок положения. При коротких интервалах (частые коррекции ФК) магнитометр можно использовать для коррекции курса в недорогой ПИНС, хотя такая возможность также может зависеть от качества используемых гироскопов.

При более продолжительных периодах навигации наличие длинных интервалов между курсовыми коррекциями еще больше влияет на точность решения ПИНС. Это является следствием того, что ошибку определения координат, накопленную между курсовыми коррекциями, невозможно исправить без использования измерений координат. То есть, даже если иногда и появляются качественные курсовые коррекции от магнитометра, ошибки положения, накопленные непосредственно перед коррекциями, исправить невозможно. При длительной навигации ситуация еще более ухудшается: ошибка положения будет значительной. Таким образом, в связи с использованием недорогих ПИНС возникает еще один вопрос – снижение точности позиционирования при долгих периодах автономной навигации – который, однако, не затрагивается в рамках данной статьи.

В статье рассмотрено влияние частоты коррекций курсовых оценок в недорогой ПИНС по измерениям магнитометра. Можно провести фильтрацию измерений магнитометра, что подробно описано в литературе, чтобы обеспечить надежные курсовые измерения и снизить дрейф курса. Однако при реальных

испытаниях выяснилось, что для этого требуются частые надежные курсовые измерения от магнитометра, что не всегда возможно. Этот момент не находит должного освещения при оценке точности недорогих ПИНС. В связи с этим следует иметь в виду, что если все же магнитометр применяется в недорогой ПИНС для курсовых измерений, что нередко бывает при использовании внутри помещений, особое внимание следует уделить итоговой оценке точности местоположения, выработанного ПИНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Foxlin, E.** (2005). Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 25(6), 38-46.
2. **Skog, I., Nilsson, J.-O. & Händel, P.,** 2010b. Evaluation of zero-velocity detectors for foot-mounted inertial navigation systems. In *Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN 2010)*. Zurich, Switzerland, 15-17 September 2010.
3. **Abdulrahim, K., Hide, C., Moore, T., & Hill, C.** (2011). Aiding Low Cost Inertial Navigation with Building Heading for Pedestrian Navigation. *Journal Of Navigation*, 64(2), 219-233.
4. **Xsens**, 2013. [Online] Available at: <www.xsens.com> [Accessed on 2 October 2013].
5. **Microstrain**, 2013. [Online] Available at: <www.microstrain.com> [Accessed on 2 October 2013].
6. **Intersense**, 2013. [Online] Available at: <www.intersense.com> [Accessed on 2 October 2011].
7. **Haverinen, J. & Kemppainen, A.,** 2009. Global indoor self-localization based on the ambient magnetic field. *Robotics and Autonomous Systems*, 57, 1028-1035.
8. **Huang, C., Liao, Z., & Zhao, L.,** 2010. Synergism of INS and PDR in self-contained pedestrian tracking with a miniature sensor module. *IEEE Sensors Journal*, 10 (8), 1349-1359.
9. **Glanzer, G. & Walder, U.,** 2010. Self-contained indoor pedestrian navigation by means of human motion analysis and magnetic field mapping. In *Proceedings of the 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNS 2010)*. Dresden, Germany, 11-12 March 2010.
10. **Storms, W. F., Raquet, J. F. & Shockley, J. A.,** 2010. Magnetic Field Navigation in an Indoor Environment. In *Proceedings of Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location Based Services (UPIN LBS 2010)*. Helsinki, Finland, 14-15 October 2010.
11. **Bird, J. & Arden, D.,** 2011. Indoor navigation with foot-mounted strapdown inertial navigation and magnetic sensors. *Wireless Communications, IEEE*, 18, 28-35.
12. **Faulkner, W. T., Alwood, R., Taylor, D. W. A. & Bohlin, J.,** 2010. GPS-denied pedestrian tracking in indoor environments using an IMU and magnetic compass. In *Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*. California, USA, 25-27 January 2010.
13. **Shin, S. H., Park, C. G. & Choi, S.,** 2010. New map-matching algorithm using virtual track for pedestrian dead reckoning. *ETRI Journal*, 32(6), 891-900.
14. **Sabatini, A. M.,** 2008. Adaptive filtering algorithms enhance the accuracy of low-cost inertial/magnetic sensing in pedestrian navigation systems. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 7, 351-361.
15. **Stirling, R., Fyfe, K. & Lachapelle, G.,** 2005. Evaluation of a new method of heading estimation for pedestrian dead reckoning using shoe mounted sensors. *The Journal of Navigation*, 58, 31-45.
16. **Mather, C. J., Groves, P. D. & Carter, M. R.,** 2006. A Man Motion Navigation System Using High Sensitivity GPS, MEMS IMU and Auxiliary Sensors. In *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2006)*. Texas, USA, 26-29 September 2006.
17. **Kemppi, P., Pajunen, J. & Rautiainen, T.,** 2010. Use of artificial magnetic anomalies in indoor pedestrian navigation. In *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference*. Ottawa, Canada, 6-9 September 2010.
18. **Renaudin, V., Afzal, M. & Lachapelle, G.,** 2010. New method for magnetometers based orientation estimation. In *Proceedings of ION/IEEE PLANS 2010*. California, USA, 4-6 May 2010.
19. **Afzal, M. H., Renaudin, V. & Lachapelle, G.,** 2011. Multi-magnetometer based perturbation mitigation for indoor orientation estimation. *Navigation*, 58, 279-292.
20. **Caruso, M.,** 2000. Applications of magnetic sensors for low cost compass systems. In *Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium (PLANS 2000)*. California, USA, 13-16 March 2000.
21. **Bachmann, E. R., Yun, X. & Brumfield, A.,** 2007. Limitations of attitude estimation algorithms for inertial/magnetic sensor modules. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 14, 76-87.

22. Chung, J., Donahoe, M., Schmandt, C., Kim, I. J., Razavai, P. & Wiseman, M., 2011. Indoor location sensing using geo-magnetism. In Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. Washington, USA, 28 June – 1 July 2011.
23. Storms, W. F. & Raquet, J. F., 2009. Magnetic Field Aided Indoor Navigation. In Proceedings of European Navigation Conference (ENC-GNSS 09). Naples, Italy, 3-6 May 2009.
24. Afzal, M. H., Renaudin, V. & Lachapelle, G., 2010. Assessment of indoor magnetic field anomalies using multiple magnetometers. In Proceedings of ION GNSS 2010. Oregon, USA, 21-24 September 2010.
25. Finlay, C., Maus, S., Beggan, C., Bondar, T., Chambodut, A., Chernova, T., Chulliat, A., Golovkov, V., Hamilton, B. & Hamoudi, M., 2010. International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*, 183, 1216-1230.
26. Kaniewski, P. & Kazubek, J., 2009. Integrated system for heading determination. *Acta Physica Polonica A*, 116(3), 325-330.
27. Aponte, J., Meng, X., Hill, C., Moore, T., Burbidge, M. & Dodson, A., 2009. Quality assessment of a network-based RTK GPS service in the UK. *Journal of Applied Geodesy*, 3, 25-34.
28. Дмитриев С.П., Степанов О.А., Ривкин Б.С., Кошаев Д.А., Чанг Д. Оптимальное решение задачи автомобильной навигации с использованием карты дорог. // *Гироскопия и навигация*. - 2000. - № 2. - С. 58.
29. N. Bergman, Recursive Bayesian estimation. Navigation and tracking applications. Linkoping Studies in Science and Technology. Dissertations No. 579. Department of Electrical Engineering Linkoping University, SE-581-83 Linkoping, Sweden, 1999.
30. Степанов О.А., Торопов А.Б. Сопоставление метода сеток и методов Монте-Карло в задаче корреляционно-экстремальной навигации // XVII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2010.- С.-308-311.

Abstract. A magnetometer is often used to aid heading estimation of a low-cost Inertial Pedestrian Navigation System (IPNS) without which, the latter will not be able to accurately estimate heading for more than a few seconds, even with the help of Zero Velocity Update (ZVU). Heading measurements from the magnetometer are typically integrated with gyros heading in an estimation filter – such as the Kalman Filter (KF) – to best estimate the true IPNS heading, resulting in a greater positioning accuracy. When carried out indoors however, the reliability of these measurements are often questionable because of the magnetic disturbances that can disrupt the measurements. To solve this, a filtering method is often used to select the best measurements. However, the importance of the frequency of these measurement updates has not been highlighted.

In this paper, the impact of frequency of updates of a magnetometer to the overall accuracy of the navigation system is presented. The paper starts by discussing the use of a magnetometer in a low-cost IPNS. An exemplary filter to extract reliable heading measurements from the magnetometer is then described. From real field trial results, it will be shown that even if reliable heading measurements may be obtained indoors, it is still insufficient to increase the positioning accuracy of the low-cost IPNS unless it is reliable on every epoch.

Key words: magnetometer, low-cost Inertial Pedestrian Navigation System (IPNS), Kalman Filter

Материал поступил 07.11.13