

Юрий Юрьевич Протасов — д-р техн. наук, доцент кафедры “Газотурбинные и нетрадиционные установки” МГТУ им. Н.Э.Баумана. Автор более 100 научных работ в области фотонной энергетики.

Yu.Yu. Protasov — D.Sc. (Eng.), assoc. professor of “Gas-Turbine and Non-Traditional Facilities” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 publications in the field of photon power-engineering.



Владимир Владимирович Христофоров — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института спектроскопии РАН. Автор более 50 научных работ в области атомно-молекулярной спектроскопии.

V.V. Khristoforov — researcher of United Center for Photon Power-Engineering. Author of over 20 publications in the field of optics of condensed media.

НАВИГАЦИОННЫЕ И ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.054.07

В. В. Лукьянов

ПЕРСОНАЛЬНЫЙ НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

Рассмотрен первый отечественный малогабаритный персональный навигационный комплекс, разработанный в Лаборатории инерциальных геодезических систем МГТУ им. Н.Э.Баумана. Комплекс интегрирует показания инерциальных (акселерометров и гироскопов) и неинерциальных (приемника спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС, магнитометров, баровысотомера) измерительных датчиков и обеспечивает пользователю непрерывную навигационную информацию в течение всего времени функционирования в любом окружении.

В связи с изменением военно-политической обстановки в мире в ведущих зарубежных странах пересматриваются военные доктрины и принципы строительства вооруженных сил, интенсивно отрабатываются концепции ведения боевых действий армии XXI в. Так, в основе разрабатываемой новой военной доктрины США лежит принцип “быстроты и мобильности”, а во главу угла ставится “способность одновременной синхронизированной атаки на разные цели с применением

различных родов войск и видов вооруженных сил”. По мнению американских специалистов, в настоящее время США имеют “стратегическую паузу” продолжительностью, по крайней мере, до 2010–2015 гг., т.е. в этот период ни одна страна мира не будет способна бросить вызов глобальной роли США. Министерство обороны (МО) США намерено использовать эту паузу для совершенствования и модернизации своих сухопутных войск (концепция “21st Century Land Warrior” — “Пехотинец XXI в.”). По мнению военного руководства США, отличительными чертами армии XXI в. должны быть лучшая оперативная подвижность и применение рассредоточенного маневра на поле боя. Так, военные операции в условиях города — это среда, в которой необходимо применять небольшие военные единицы. При рассредоточенном маневре на поле боя, в частности в глубине обороны противника, необходимо обеспечить автономное ведение боевых действий в отрыве от системы материально-технического снабжения. Аналогичное видение армии XXI в. и в других странах НАТО. Для реализации новых военных доктрин в странах НАТО началась углубленная проработка концепции бойца XXI в. в рамках комплексных программ и проектов. Создана военно-промышленная консультационная группа, в которой участвуют 69 компаний из 11 стран. В Великобритании в рамках программы “Future Infantry Soldier Technology” (“Пехотинец будущего”) отрабатывается концепция боевой защиты одежды в экстремальных условиях. В ФРГ отрабатывается концепция индивидуального вооружения и боекомплекта бойца XXI в. Перспективную экипировку для горных условий и Крайнего Севера отрабатывают Норвегия и Дания. Национальная программа Австралии предусматривает отработку концепции экипировки бойца XXI в. для действий в условиях тропиков и джунглей. Франция отрабатывает концепцию перспективной экипировки по программе “The Soldier System Program” (“Солдат как боевая система”). Цель программ — резкое повышение боевой эффективности пехотинца XXI в. Но солдат, даже оснащенный новейшим вооружением, может быстро растерять свой боевой потенциал, если не будет обладать способностью оперативно определять собственное местоположение, собирать, упорядочивать и передавать навигационную информацию, осуществлять командование и управление. Основные моменты программ соответствуют стремлению превратить каждого пехотинца в самостоятельную боевую единицу и в то же время сделать подразделение единым боевым организмом. Перспективное средство решения указанных задач — создание персонального навигационного комплекса.

Адекватное развитие российских Вооруженных Сил требует создания отечественных персональных навигационных устройств, интегрированных с соответствующими средствами отображения и связи.

В будущем подобные комплексы должны стать неременным атрибутом сотрудников спецподразделений МО, в частности, антитеррористических служб, оперативных сотрудников Министерства внутренних дел и Министерства по чрезвычайным ситуациям, действующих в любом окружении (в лесу, в горах, в районах высотной городской застройки, а также в закрытых помещениях и под землей). При этом возможен пешеходно-автомобильный вариант исполнения комплекса (переключение режимов обеспечит непрерывность выдачи информации).

Персональные навигационные устройства пользуются большим спросом и у гражданских специалистов: работников коммунального хозяйства, ремонтных служб, природоохранных ведомств, геологов и других специалистов, а также как инструмент для создания геоинформационных систем (ГИС). В настоящее время выпускается большое количество спутниковых персональных навигационных устройств, однако для таких специалистов, как, например пожарные или шахтеры, обязательным требованием является возможность полностью автономной навигации. При этом предусматривается возможность интегрирования с электронными картами зданий или шахт. В перспективе пользователем может стать любой желающий.

Одним из самых популярных направлений за рубежом в настоящее время является создание персонального навигационного устройства для инвалидов по зрению (также с использованием электронных карт и звуковым интерфейсом). Емкость мирового рынка для такого типа изделий оценивается в десятки и сотни тысяч штук, в нескольких странах государством ведется финансирование исследовательских работ.

В дальнейшем с появлением сверхминиатюрных электронных компонентов возможна интеграция устройства в мобильный телефон.

Принципы навигации пешехода. Только на первый взгляд может показаться, что навигация пешехода — это всего лишь одна из разновидностей навигации подвижного объекта. На самом деле, это очень специфический процесс. Жесткие ограничения на стоимость (соответственно точность) чувствительных элементов, эргономические требования (в частности габаритные размеры и вес системы), разнообразие (походка каждого человека строго индивидуальна) и сложность движения носителя (резкие изменения направления и скорости, возможность бокового движения, угловые колебания и удары при ходьбе) делают применение классического инерциального метода определения приращения координат, или счисления пути, невозможным.

Персональный навигационный комплекс включает в себя инерциально-измерительную часть, или модуль автономных измерителей (акселерометры, гироскопы, магнитометры и баровысотометр), приемник

спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС, блок питания, а также устройство записи, отображения и совместной обработки сигналов измерителей (компьютер типа Notebook).

Блок акселерометров позволяет: 1. Вычислять горизонтальную составляющую вектора напряженности магнитного поля; 2. Определять вертикальное ускорение модуля. Превышение ускорения над некоторым пороговым значением позволяет определить количество сделанных шагов, а разность максимального и минимального значений ускорения — скорректировать длину текущего шага.

Гироскопы позволяют определить ориентацию инерциально-измерительного блока в пространстве. Блок магнитометров служит для определения вектора напряженности магнитного поля. Азимут устройства может быть определен как отдельно с помощью гироскопических датчиков либо магнитного компаса, так и интегрированием показаний двух систем. Преимущества и недостатки обоих устройств приведены в таблице.

| | Преимущества | Недостатки |
|-------------------------|--|--|
| Магнитный компас | Определяет абсолютное значение азимута Долговременная точность Повторяемость результатов | Реакция на локальные возмущения магнитного поля Земли |
| Гироскопические датчики | Отсутствуют внешние возмущения Высокая кратковременная точность | Большой дрейф (особенно у недорогих датчиков) Определяется не сам курсовой угол, а его приращение |

Принципиальная схема разработанного устройства приведена на рис. 1.

В качестве акселерометра используется стандартный недорогой двухосный датчик ускорения ADXL202 фирмы “Analog Devices” со следующими характеристиками: диапазон измеряемых ускорений $\pm 2g$, нелинейность масштабного фактора 0,2 %, температурный диапазон $-40 \dots 85^\circ\text{C}$, температурный дрейф $0,2 \text{ mg}/^\circ\text{C}$.

С учетом компенсаций погрешностей, при определении пройденного пути с помощью такого датчика ошибка составляет десятки и сотни метров за несколько минут, т.е. классический инерциальный метод счисления пути, основанный на двойном интегрировании ускорения движения, в данном случае не применим.

Для измерения пройденного человеком расстояния существует другая доступная информация. При каждом шаге тело человека совершает вертикальные перемещения вверх-вниз. Простой, но достаточно

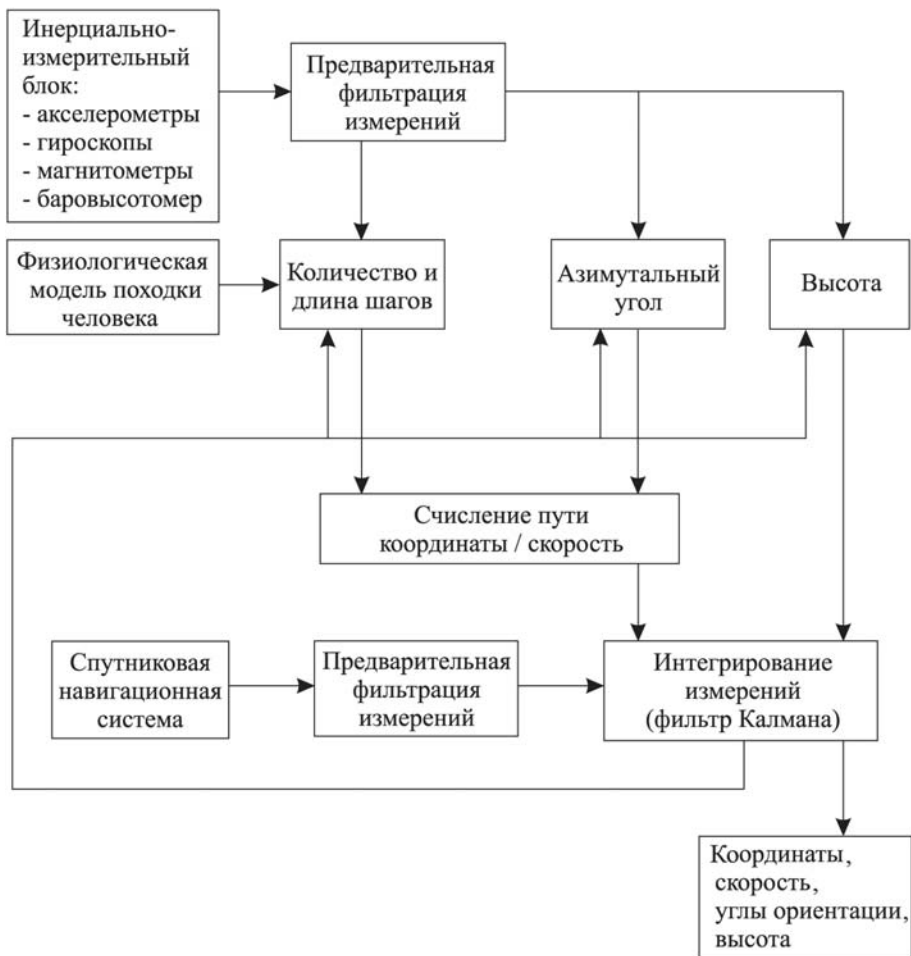


Рис. 1. Функциональная схема персонального навигационного комплекса

надежный метод счисления пути заключается в измерении этих перемещений и подсчете на их основе количества сделанных шагов, т.е. блок акселерометров фактически используется как шагомер. Пройденный путь приблизительно можно определить как произведение этого количества на среднюю длину шага. Измерения осуществляются с частотой 10...20 Гц, затем частота понижается осреднением до 2...3 Гц для сглаживания измерительного шума.

Существует также ряд методик расчета длины шага. Рассмотрим одну из наиболее робастных, которая не требует большого объема вычислений. Главная идея заключается в определении максимумов на кривой ускорения. На графике вертикального ускорения каждому шагу соответствует два близко расположенных максимума (рис. 2). Первый соответствует удару каблука об пол, второй — ступни. Удар каблука обычно сильнее при движении в горизонтальной плоскости или с небольшим уклоном, хотя индивидуальные характеристики могут

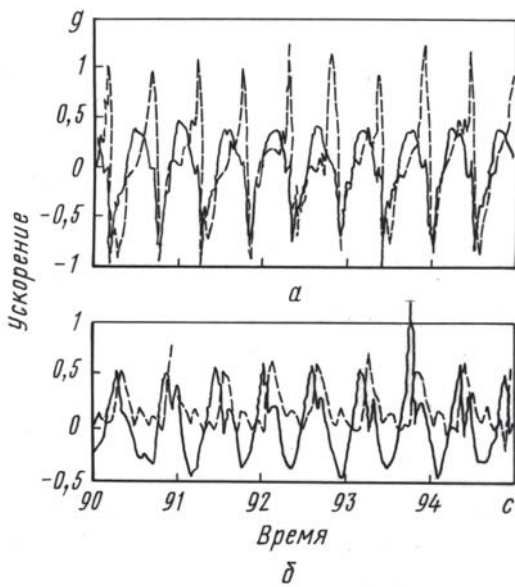


Рис. 2. Продольное и вертикальное ускорения при разных вариантах крепления датчиков:

a — на спине, *б* — на груди; - - - продольное ускорение, — вертикальное ускорение

вергается многократной обработке последовательными фильтрами и разделяется на низко- и высокочастотные составляющие. На рис. 3 представлен сигнал акселерометра до и после обработки.

Измерение длины шага. Использование длины шага как фиксированной величины может существенно снизить точность определения пройденного пути (рис. 4 и 5).

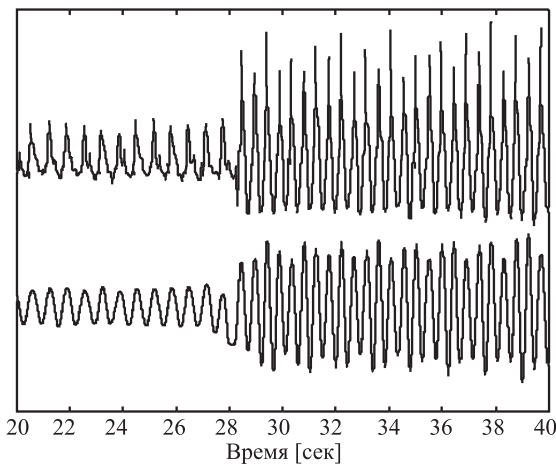


Рис. 3. Сигнал акселерометра до (верхний) и после обработки (нижний)

сильно отличаться (характер походки кардинально изменяется при наклоне свыше 10%). Продольное ускорение имеет один ярко выраженный максимум, соответствующий удару каблука (см. рис. 2). Физически он соответствует перемещению тела вперед. Дважды интегрируя этот сигнал после определения угловой ориентации блока чувствительных элементов, можно измерить длину шага.

Для того чтобы четко определить число шагов, осуществляется фильтрация сигнала по ускорению таким образом, чтобы каждому шагу соответствовал один максимум. Сигнал при этом под-

вергается многократной обработке последовательными фильтрами и разделяется на низко- и высокочастотные составляющие. На рис. 3 представлен сигнал акселерометра до и после обработки.

На самом деле, длина шага у разных людей может изменяться в диапазоне $\pm 40\%$ средней величины и зависит в основном от длины ноги. В некоторых шагомерных устройствах пользователю предлагается самому занести длину своего шага. Однако и у одного человека эта длина может изменяться вплоть до $\pm 50\%$ среднего значения, что, в частности, зависит от скорости ходьбы (при неболь-

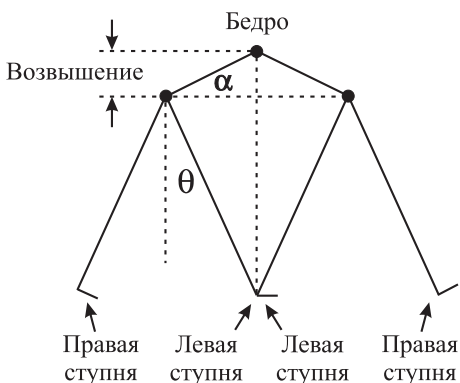


Рис. 4. Перемещения тела человека во время ходьбы

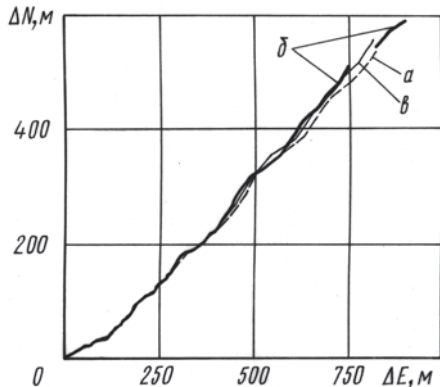


Рис. 5. Маршрут, протяженность которого была измерена:

a — с помощью спутниковой системы (эталонная); *b* — при фиксированной длине шага; *v* — по вертикальному ускорению

шой скорости человек старается делать короткие шаги и т.д.). И знание средней длины шага никак не решает эту проблему. Для ее решения рассмотрим геометрическую интерпретацию процесса ходьбы (см. рис. 4).

При ходьбе колено человека сгибается только в тот момент, когда ступня находится на земле. В это время ногу можно рассматривать как рычаг фиксированной длины. Из рис. 4 видно, как тело человека совершает перемещения в вертикальном направлении. Из геометрических соображений следует, что $\alpha = \theta$ и соответственно

$$\text{Длина шага} = \frac{2}{\alpha} \times \text{Возвышение},$$

где “Возвышение” — вертикальное перемещение тела человека — можно рассматривать как второй интеграл вертикального ускорения; α — малый угол, который очень трудно измерить, но без существенной потери точности можно принять постоянным.

Эмпирическим путем получена следующая формула для пройденного расстояния [1]:

$$\text{Путь} \approx \sqrt[4]{A_{\max} - A_{\min}} nK, \quad (1)$$

где A_{\min} и A_{\max} — минимальное и максимальное вертикальные ускорения на текущем шаге; n — количество сделанных шагов; K — константа для определения размерности (футы, метры и т.д.)

На рис. 5 приведены траектории одного и того же маршрута, построенные разными способами: по показаниям спутниковой навигационной системы (сплошная жирная кривая) и в автономном режиме

методом счисления пути (при постоянной длине шага (в данном случае, равной 85 см — сплошная тонкая линия), а также по формуле (1), учитывающей вертикальные ускорения (штриховая кривая). По прошествии некоторого времени для азимутальной выставки магнитного компаса имитируется пропадание спутниковых сигналов. Вплоть до последних метров счисление пути осуществляется в автономном режиме. Скачок в показаниях обусловлен возобновлением приема спутниковых измерений.

Индивидуальные различия. Характеристики походки (длина и частота шагов) могут сильно отличаться как у разных людей, так и у одного человека в зависимости от внешних (наклон дороги) и внутренних факторов (эмоциональное и физическое состояние). Была исследована походка 14 человек (9 мужчин, 5 женщин) в возрасте от 20 до 40 лет со следующими данными (среднее значение \pm СКО): возраст $30,6 \pm 5,4$ года, вес $73,9 \pm 11,9$ кг (вместе с комплексом), рост 174 ± 9 см. Испытательный маршрут представлял собой замкнутую траекторию, по которой каждый проходил дважды своей обычной походкой. Длина маршрута составляла 1310 м с общим перепадом по высоте 67 м. Маршрут состоял из горизонтальных участков и из участков с наклоном 17%. Точные координаты местоположения, скорость движения и наклон дороги (отношение перепада высоты к пройденному пути) фиксировались по показаниям приемника GPS. Все характеристики проанализированы для 5 видов движения на маршруте: крутой спуск ($< -9\%$), умеренный спуск ($-3 \dots -9\%$), горизонтальный ($\pm 3\%$), умеренный подъем ($+3 \dots +9\%$), крутой подъем ($> 9\%$). Цель эксперимента — исследование изменения походки человека в зависимости от угла наклона дороги. Результаты показывают (рис. 6), что

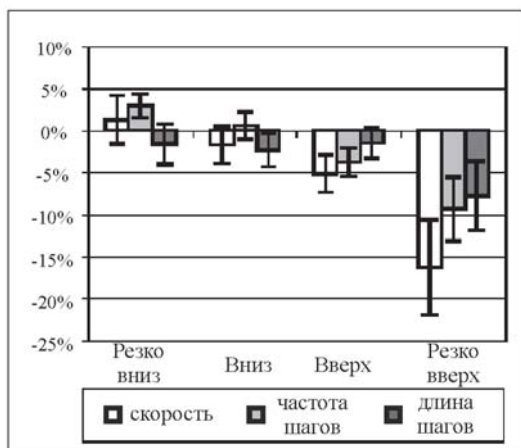


Рис. 6. Зависимость характеристик походки от наклона дороги

параметры походки претерпевают существенное изменение (до 15%) только во время крутого ($> 10\%$) подъема. Такая коррекция может быть введена в алгоритм счисления пути.

Определение азимута пешехода. Определение азимута идущего человека с помощью носимой навигационной системы — нетривиальная задача. Главная трудность заключается в том, что человек при ходьбе совершает очень

сложные и непредсказуемые движения. При решении задача разбивается на несколько задач: определение направления движения; фильтрация измерений азимутального угла и угловой скорости; определение смещения продольной оси навигационного комплекса относительно направления движения; повторяемость траектории; использование различных сценариев движения носителя (быстрый поворот, возвращение и т.д.); определение различных возмущений интегрированной системы (смещение нуля и дрейф гироскопов, магнитные возмущения компаса).

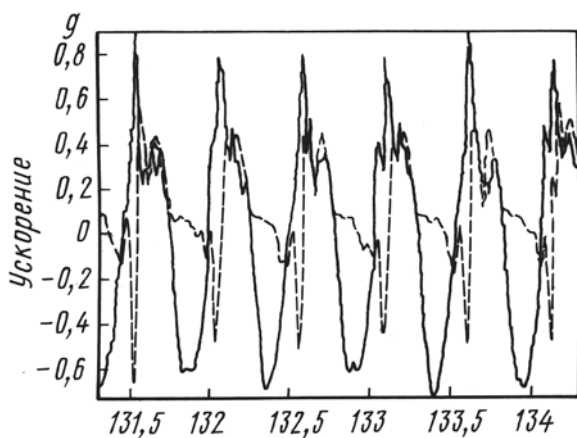
Определение направления движения. Достаточно надежное решение этой задачи дает изучение физиологических особенностей походки человека. Например, в работе [2] рассматривается некий цикл ходьбы, т.е. интервал между двумя последовательными шагами (или ударами) ноги. Цикл включает в себя два состояния: нога находится в соприкосновении с полом и нога переносится на другое место. Центр масс пешехода совершает при этом колебания в вертикальном направлении: при ускорении движется вверх, а при торможении – вниз. Торможение обусловлено связью центра масс с точкой контакта ноги с землей, находящейся напротив центра масс. Интересно отметить [3], что во время бега наблюдается обратная картина: при ускорении центр масс движется вверх, а при торможении — вниз.

Анализируя график изменения ускорения, его характерных точек, можно сделать вывод о направлении движения человека: вперед, назад, влево, вправо. При этом необходимо обеспечить частоту съема информации не менее 15 Гц [4]. На рис. 7 приведены графики изменения горизонтальных и вертикальных ускорений при движении вперед и назад.

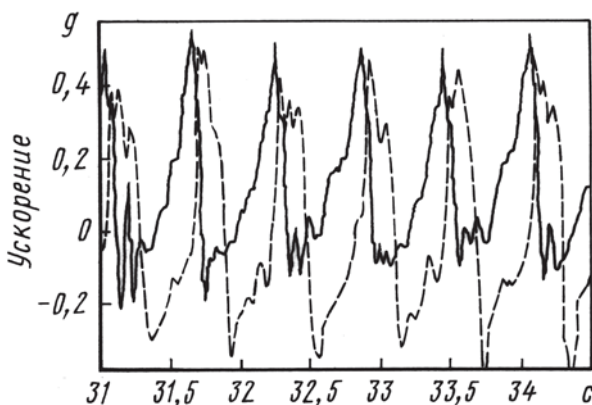
При движении влево и вправо наблюдается аналогичная картина в соответствующих измерительных каналах. Компас и/или гироскоп, закрепленный на теле пешехода, обеспечивает информацию только о его азимутальном угле, т.е. угле между направлением вперед и направлением на север. Для того чтобы учесть в алгоритме движение назад, к азимутальному углу просто прибавляют 180° .

Специальные модели разработаны и испытаны для незрячих людей, так как их походка сильно отличается от походки обычного человека.

Сглаживание измерений курсового угла. Принципиальное отличие магнитного компаса от гироскопа заключается в том, что компас определяет непосредственно азимут, а гироскоп — его угловую скорость (после интегрирования — приращение угла). Непосредственные измерения представляют собой сильно зашумленный сигнал (рис. 8 — отдельное окно). Учитывая, что частота полезного сигнала даже при



а



Время

б

Рис. 7. Характер изменения вертикального (---) и продольного (—) ускорений при ходьбе вперед (а) и назад (б)

быстрых поворотах не превышает 3 Гц, реализуется сглаживание измерений низкочастотным фильтром (в данном случае, фильтром Калмана второго порядка с соответствующими параметрами) (см. рис. 8).

При направлении движения, близком к северу, наблюдается эффект дополнительного шума (значения азимутального угла находятся то в первом, то в четвертом квадратах). Для устранения этого шума предусмотрена дополнительная операция: определяется мгновенный (с частотой 10 Гц) скачок азимутального угла более чем на 300° и в дальнейшем в измерениях учитывается коррекция на $\pm 360^\circ$.

Сглаживание измерений угловой скорости. Гироскоп, закрепленный на теле, совершает колебания как в вертикальном, так и в азимутальном направлении. В его показаниях содержатся сигналы: измерения направления движения, повороты тела, шум. Цель сглаживания

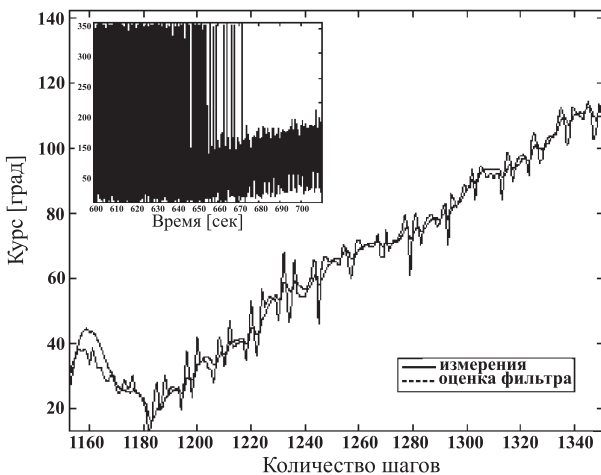


Рис. 8. Измерения курсового угла и их оценка низкочастотным фильтром

— оценить только изменения направления движения. Повороты тела и шум имеют более высокую частоту, чем изменение направления движения, и эффективно сглаживаются любым низкочастотным фильтром.

Ошибка установки навигационного комплекса. Навигационный комплекс закрепляется на теле пешехода, и, в общем случае, существует угол рассогласования между его продольной измерительной осью и направлением тела вперед (аналог угла невыставки в азимуте традиционной ИНС). Для того чтобы учесть это рассогласование, необходимо использовать показания приемника спутниковых сигналов. Точность этих показаний растет с увеличением скорости движения.

Повторяемость траектории. Одним из преимуществ магнитного компаса является то, что он непосредственно измеряет вектор напряженности магнитного поля в данной точке. В отсутствие магнитных возмущений этот вектор можно считать постоянным, но на реальном маршруте он искажен множеством локальных наводок от источников: “жесткого” магнитного возмущения — постоянных магнитов и источников электрического тока и “мягкого” возмущения — средоточия магнитных материалов.

Мощность источников и их месторасположение со временем изменяются незначительно, поэтому возможно создать карту магнитных возмущений для их компенсации. Если же пользователя интересует не столько абсолютное значение координат, сколько повторяемость траектории его движения на маршруте, никакой дополнительной компенсации не требуется. На рис. 9 представлены результаты нескольких проходов по одному и тому же маршруту. В целом, они практически совпадают. Небольшие расхождения обусловлены шириной пешеходных

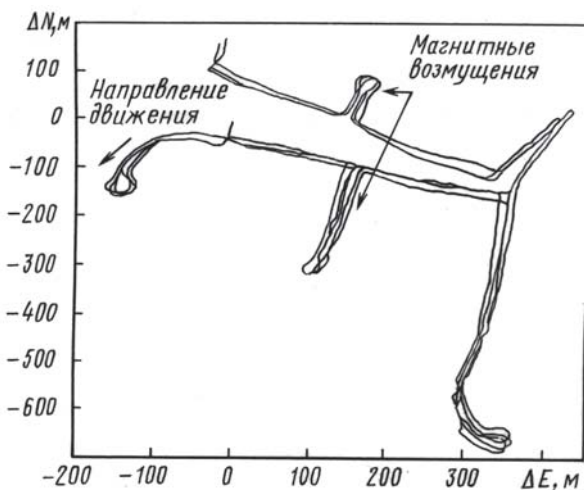


Рис. 9. Многократный проход маршрута по магнитному компасу

дорожек, а существенные отклонения (более 100 м) в середине прямолинейных участков “восток-запад” — залегающей непосредственно под покрытием дороги силовой электрической линией.

Стратегия быстрых поворотов. Во время быстрых поворотов длина шага уменьшается вплоть до 80%. Особенно это сказывается на больших поворотах, например на 180°. С учетом данного эффекта погрешность определения длины шага составляет 0,1%, а без учета — 2,5%.

Детектирование возмущений. Главным недостатком магнитного компаса является его реакция на локальные возмущения магнитного поля, а главным недостатком гироскопических датчиков (особенно низкоточных) — необходимость периодической коррекции величины их дрейфа по внешней информации. Однако на коротком интервале времени гироскопы обеспечивают достаточно точную информацию об изменении азимутального угла; очевидна необходимость интегрирования показаний двух устройств. Магнитный компас при этом обеспечивает внешнюю информацию для коррекции параметров гироскопов, а гироскопы используются для детектирования магнитных возмущений. На рис. 10 хорошо виден эффект действия магнитных возмущений при сравнении курсов, полученных с помощью двух датчиков.

Заключение. Даже если для пешеходной навигации используются те же датчики, что и для механических подвижных объектов (автомобилей, самолетов), способы использования их измерений совершенно разные. Направление движения человека далеко не всегда совпадает с ориентацией его тела. Для коррекции азимутального угла при этом применяется физиологическая модель походки человека.

В условиях сильной возмущенности окружающего магнитного поля наблюдается хорошая повторяемость траекторий, полученных с помощью магнитного компаса. Компас позволяет определить начальное значение азимутального угла и смещение нулевого сигнала гироскопа. С другой стороны, гироскопические датчики позволяют определить участки магнитных возмущений, так как его показания к этим возмущениям нечувствительны. Интегрирование показаний двух типов датчиков позволяет калибровать параметры гироскопов в реальном масштабе времени даже в отсутствие показаний спутниковой системы.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование обработки показаний двух типов датчиков, чтобы обеспечить точное счисление пути даже в условиях сильных магнитных возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weinberg H. Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications. Analog Devices Publication on equipment, AN-602 Application Note, 2002.
2. Cavagna G. A. & Margaria R. Mechanics of walking. J. appl. Physiol. Paris, 21.01.1966. – P. 271–278.
3. Cavagna G. A., Willems P. A., Heglund N. C. The role of gravity in human walking: pendular energy exchange, external work and optimal speed. J. appl. Physiol. Paris, 21.01.2000. – P. 271–278.
4. Antonsson E. K. & Mann R. W. The frequency content of gait. J. Biomech., 1985. – P. 39–47.

Статья поступила в редакцию 29.06.2005

Вадим Викторович Лукьянов родился в 1966 г., окончил в 1989 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ информатики и систем управления МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 20 научных работ в области инерциальной навигации.

V.V. Lukiyarov (b. 1966) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1989. Ph. D. (Eng.), senior researcher of “Information Technology and Control Systems” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 20 publications in the field of inertial navigation.

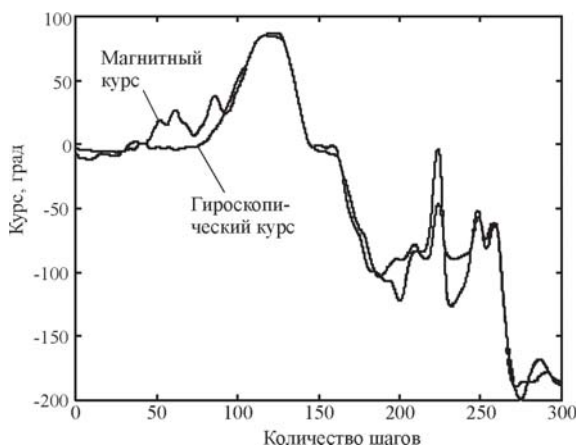


Рис. 10. Влияние возмущений на магнитный курс