

Ю. ЛЮ, Т. ЦАЙ, Х. ЯН, Ч. ЛЮ, Ц. СУН, М. ЮЙ

ПЕШЕХОДНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА С МИКРОИИМ/GPS/МАГНЕТОМЕТРОМ/БАРОАЛЬТИМЕТРОМ

В статье представлена пешеходная интегрированная навигационная система (ПИНС), содержащая микроинерциальный измерительный модуль (ИИМ), модуль GPS, магнетометр и бароальтиметр, данные которых обрабатываются с помощью обобщенного фильтра Калмана (ОФК).

Ключевые слова: пешеходная интегрированная навигационная система, микроинерциальный измерительный модуль, модуль GPS, магнетометр, бароальтиметр, обобщенный фильтр Калмана

Введение

Обычно ПИНС, определяющая положение пешехода в реальном времени, передает данные о его движении в центр управления его перемещением через беспроводные устройства связи [1]. Она способна не только ускорить реакцию солдат и спасателей на события, но и обеспечить безопасность пешеходов [2]. В последнее время таким системам уделяется большое внимание вследствие таких их преимуществ, как малый размер, низкая стоимость и мобильность [3-9].

Для расчета местоположения пешехода в реальном времени с высокой точностью как в помещении, так и на улице, рассматриваемая ПИНС оснащена микроИИМ, модулем GPS, магнетометром и бароальтиметром. Система размещается на талии пешехода и при движении определяет его местоположение, скорость и вертикальное перемещение, адаптируясь к походке.

Аппаратура ПИНС

ПИНС состоит из микрогироскопа, акселерометра, магнетометра, модуля питания, навигационного компьютера, бароальтиметра и модуля GPS. Аппаратура ПИНС показана на рис. 1.

Лю Юн. Научный сотрудник 26-го института Китайской корпорации электронных технологий (Китай).

Цай Тицзин. Профессор Юго-восточного университета (Китай).

Ян Хун. Научный сотрудник 26-го института Китайской корпорации электронных технологий.

Лю Чэн. Сотрудник 26-го института Китайской корпорации электронных технологий.

Сун Цзюнь. Сотрудник 26-го института Китайской корпорации электронных технологий.

Юй Минбао. Сотрудник Юго-восточного университета.

Научный редактор д.т.н. Б. С. Ривкин.

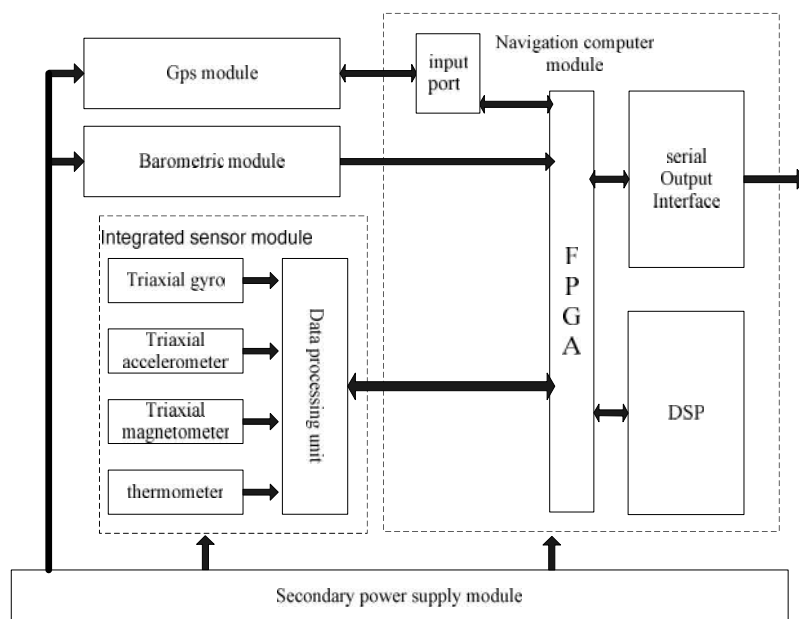


Рис. 1. Аппаратная часть системы.

Сверху вниз, слева направо: модуль GPS, барометрический модуль, ИИМ: трехосный гироскоп, трехосный акселерометр, трехосный магнетометр, термометр, блок обработки данных, входной порт, модуль навигационного компьютера, ППВМ, серийный выходной интерфейс, ЦСП, модуль вторичного питания.

Модуль питания обеспечивает необходимое энергообеспечение всей системы. Навигационный компьютер включает в себя входные и выходные интерфейсы, программируемую вентильную матрицу (ППВМ) и цифровой сигнальный процессор (ЦСП). Данные от гироскопа и акселерометра по угловой скорости и ускорению, а также данные магнетометра передаются в навигационный компьютер по интерфейсу SPI. Навигационный компьютер обрабатывает эти данные, после чего корректирует положение и ориентацию пешехода по данным GPS и бароальтиметра. Выходные данные ПИНС передаются в дистанционный центр управления движением пешехода беспроводным способом или по последовательному интерфейсу. Внешний вид системы показан на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид ПИНС

В системе используются гироскоп ADXRS620, акселерометр ADXL346 и магнетометр HMC5883L. Основные параметры этих датчиков приведены в Табл. 1. Ядром системы является навигационный компьютер, который состоит из ЦПС TMS320F6713 и ППВМ SPARTA II Xilinx. На рис. 3 показан принцип работы навигационного компьютера. Бароальтиметр MS5561C производства INTERSEMA (рис. 4) обеспечивает эталонные данные по высоте при работе в помещении, его параметры приведены в Табл. 2. С учетом компенсации относительная погрешность измерения при этом составляет менее 1 м,

в качестве GPS-модуля используется SKG12D производства SKYLAB, его параметры приведены в Табл. 3.

Таблица 1

Параметры гироскопа, акселерометра и магнетометра

Гироскоп	
Параметр	Значение
Диапазон измерений	± 300 °/с
Дрейф нуля	-5 °/с $\sim$ $+5$ °/с
Линейность	$\leq 0,01\%$
Акселерометр	
Параметр	Значение
Диапазон измерений	± 8 g
Разрешение	$\leq 1 \times 10^{-4}$ g
Смещение	≤ 20 mg
Стабильность нуля	1×10^{-3} g (1σ)
Линейность	$\leq 0.5\%$
Магнетометр	
Параметр	Значение
Диапазон измерений	± 8 гаусс
Разрешение	≤ 5 мгаусс
Линейность	$\leq 0.1\%$

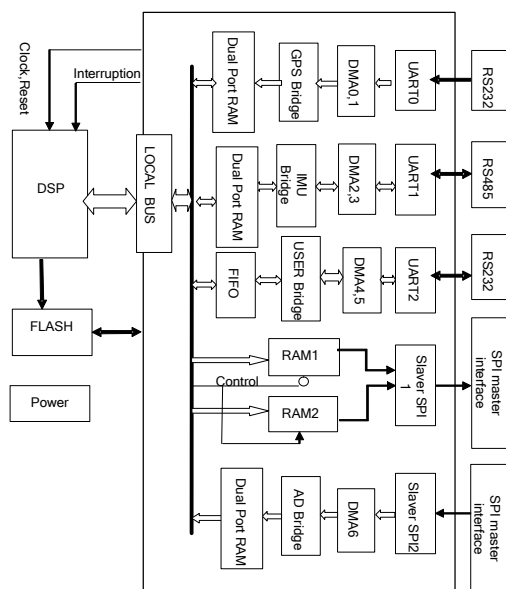


Рис. 3. Навигационный компьютер



Рис. 4. Бароальтиметр MS5561C

Т а б л и ц а 2

Параметры MS5561C

Параметры	Ед. изм.	Значение
Диапазон измерений	мБар	10~1100
Напряжение	В	$3.3 \pm 5\%$
Температура	°	$\pm 5\%$

Т а б л и ц а 3

Параметры SKG12D

Параметр	Точность выработки
Положение	3 м, круговое вероятное отклонение
Скорость	0,1 м/с
Холодный старт	23 с в условиях открытого неба
Рабочее напряжение	3 В пост. тока

Метод расчета положения и азимута

ПИНС размещается на талии пешехода. Характеристики походки пешехода определяются акселерометром в составе ИИМ. При движении пешехода ПИНС обеспечивает определение его положения, скорости и азимута. На рис. 5 показан принцип работы навигационной системы.

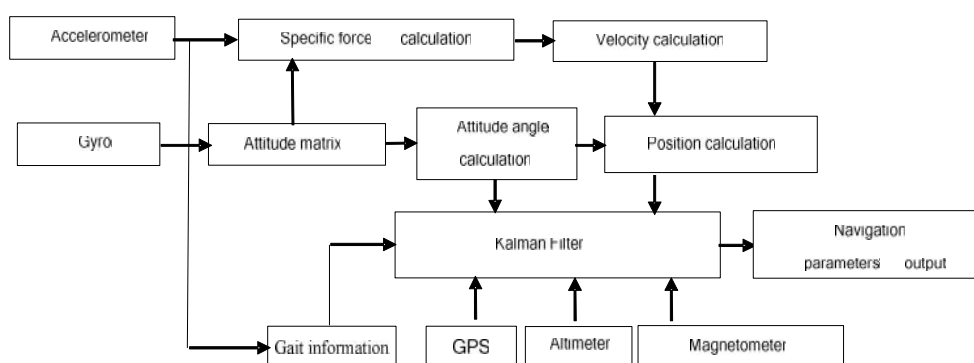


Рис. 5. Принципиальная схема работы ПИНС

Сверху вниз, слева направо: акселерометр, гироскоп, расчет кажущегося ускорения, расчет скорости, матрица параметров ориентации, расчет углов ориентации, расчет положения, фильтр Калмана, выдача навигационных параметров, информация о походке, GPS, альтиметр, магнетометр

ПИНС может работать в двух режимах: при наличии GPS-сигналов и при их отсутствии. При наличии сигналов GPS положение, скорость и азимут движения пешехода рассчитываются ОФК по данным ИИМ, GPS и магнетометра, а при их отсутствии – по данным ИИМ, магнетометра, бароальтиметра, а также анализа походки.

Данные магнетометра и определение характеристик походки имеют большое значение при отсутствии сигналов GPS. Магнетометр, обеспечивающий данные об азимуте, подвержен влияниям окружающей среды, в связи с чем сначала нужно его откалибровать.

Интенсивности горизонтального магнитного поля H_{nx}, H_{ny} в навигационных координатах представляют собой окружности, чьи центры расположены в начале системы координат (см. рис. 6(a)). На показания магнетометра, установленного на талии пешехода, может влиять даже одежда пешехода. Возмущение магнитного поля в общем случае состоит из двух компонент: жесткого магнитного возмущения и мягкого. В первом случае центр окружности смещается, но значение интенсивности поля остается неизменным (см. рис. 6b), во втором случае и центр окружности смещается, и интенсивность изменяется [10] (см. рис. 6c). Эффект воздействия одновременно жесткого и мягкого магнитного возмущения показан на рис. 6d.

В общем случае протяженность пути пешехода составляет несколько километров, в силу чего интенсивность магнитного поля меняется незначительно. Введем эллиптическое уравнение, позволяющее учесть эффекты магнитного возмущения:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} H_{nx} - H_{nx0} \\ H_{ny} - H_{ny0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H'_{nx} \\ H'_{ny} \end{bmatrix}, \\ (H'_{nx})^2 + (H'_{ny})^2 = 1 \end{cases}$$

где H_{nx0}, H_{ny0} – смещение, вызванное жестким магнитным возмущением в направлениях x и y ; α – угол поворота, вызванного мягким магнитным возмущением; C_x, C_y – масштабные коэффициенты. Когда эти параметры определены, можно рассчитать H'_{nx}, H'_{ny} по эллиптическому уравнению, а также определить направление. Метод определения вышеуказанных параметров приведен в [11].

Магнетометр калибруется при размещении ПИНС на талии, для чего пешеход ходит по кругу и данные о H_{nx}, H_{ny} фиксируются каждые 0,1 с. После фиксации 200 наборов величин H_{nx}, H_{ny} определяются пять искомых параметров, упомянутых ранее. Полученные параметры калибровки для примера приведены в Табл. 4.

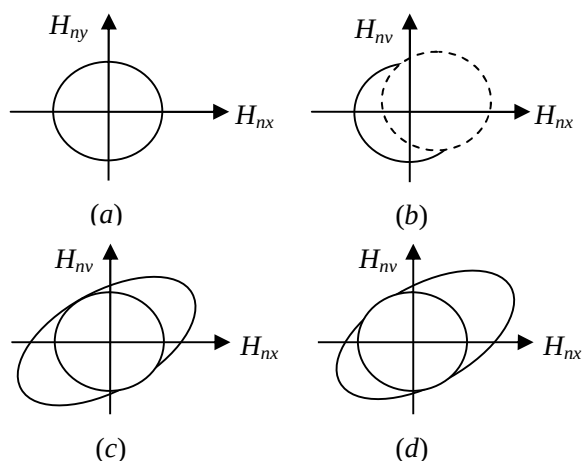


Рис. 6. Возмущение магнитного поля

Параметры калибровки

$H_{nx0}/\text{гаусс}$	0.010552
$H_{ny0}/\text{гаусс}$	-0.181690
C_x	0.305770
C_y	0.303363
$\alpha/^\circ$	4.862129

На рис. 7 приведен график соответствующей интенсивности горизонтального магнитного поля.

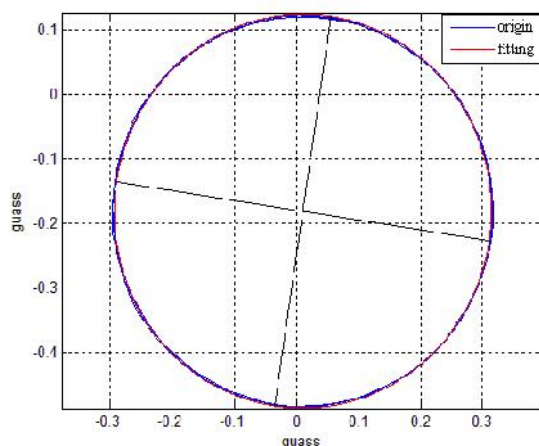


Рис. 7. Интенсивность горизонтального магнитного поля.

origin – эталонное значение

fitting – результат калибровки

Точность определения максимального ускорения можно повысить за счет использования данных акселерометра в направлении z , адаптивного временного окна, применения адаптивной границы для величины ускорения, фиксирующей наличие шага, и динамической коррекции. Высокочастотные данные и шум можно отфильтровать с помощью фильтра низких частот. Пересечение границы снизу вверх расценивается как шаг.

В связи с тем, что частота шага у людей разная, для определения экстремального

Для описания походки пешехода используются такие параметры, как частота, скорость и т.д. [12]. Количество шагов определяется с помощью акселерометра в составе ИИМ. При ходьбе руки, ноги и поясница человека двигаются одновременно, причем максимальное ускорение испытывает именно поясница. При появлении движения возникает ускорение, которое достигает экстремальных значений, например, при движении поясницы пешехода. Количество шагов можно определить, анализируя экстремальное значение ускорения на каждом шаге. Модель ходьбы показана на рис. 8 [13].

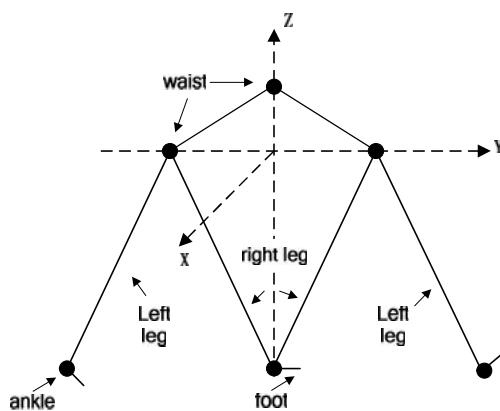


Рис. 8. Модель ходьбы.

Лодыжка, левая нога, талия, правая нога, стопа

значения ускорения на каждом шаге может потребоваться разное время. Чтобы решить эту проблему, используется адаптивное временное окно, размер которого определяется по интервалу времени между двумя шагами. Граница для ускорения рассчитывается по максимуму и минимуму ускорений, определенным в окне. Подробное описание метода определения числа шагов см. в [13].

Количество шагов можно точно определить, анализируя походки. В Табл. 5 и 6 представлены результаты испытаний для случаев ходьбы и бега пешеходов, согласно которым точное определение числа шагов удастся осуществить более чем в 94% случаев. На основании данных о количестве шагов, полученных с использованием длины шага, определенной по априорным данным или полученной в реальном времени методом автоматической коррекции, можно рассчитать скорость пешехода. Она может служить эталонным значением при отсутствии сигналов GPS, повышая навигационную точность.

Т а б л и ц а 5

Испытание в режиме ходьбы

Тип движения	Кол-во шагов	реальных	Кол-во шагов, рассчитанное алгоритмом	Точность (%)
Медленная ходьба по плоской поверхности	170		163	95.88
Быстрая ходьба по плоской поверхности	201		200	99.50
Медленная ходьба по наклонной поверхности	185		182	98.38
Быстрая ходьба по наклонной поверхности	210		208	99.05
Подъем по лестнице	100		99	99.00
Спуск по лестнице	104		99	95.19

Т а б л и ц а 6

Испытание в режиме бега

Тип движения	Кол-во шагов	реальных	Кол-во шагов, рассчитанное алгоритмом	Точность (%)
Медленный бег по плоской поверхности	146		146	100
Быстрый бег по плоской поверхности	114		108	94.74
Медленный бег по наклонной поверхности	143		139	97.20
Быстрый бег по наклонной поверхности	164		160	97.56
Подъем по лестнице	58		55	94.83
Спуск по лестнице	64		61	95.31

Погрешности ПИНС можно оценить с помощью ОФК, используя следующие уравнения для вектора состояния и вектора измерений:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)w(t)$$

$$Z(t) = H(t)X(t) + v(t),$$

где $X(t)$ – вектор состояния,

$$X(t) = [\delta V_E \ \delta V_N \ \delta V_U \ \delta \lambda \ \delta L \ \delta h \ \delta \phi_E \ \delta \phi_N \ \delta \phi_U \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]^T$$

и δV_E , δV_N и δV_U – погрешности скорости в восточном, северном и вертикальном направлениях; $\delta \lambda$ и δL – погрешности долготы и широты; δh – погрешность высоты; $\delta \phi_E$, $\delta \phi_N$ и $\delta \phi_U$ – погрешности угла рассогласования в восточном, северном и вертикальном направлениях; ε_x , ε_y и ε_z – дрейф гироскопа, ∇_x , ∇_y и ∇_z – смещения нуля акселерометра.

Приведем уравнения погрешностей инерциальной навигационной системы:

$$\delta \dot{V}_E = \phi_U f_N - \phi_N f_U + \delta V_E \frac{V_N \tan L - V_U}{R_N + h} + \delta V_N \left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N + h} \tan L \right) - \delta V_U \left(2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} \right)$$

$$+ \delta L \left[2\omega_{ie} (V_U \sin L + V_N \cos L) + \frac{V_E V_N}{R_N + h} \sec^2 L \right] + \delta h \frac{V_E V_U - V_E V_N \tan L}{(R_N + h)^2} + T_{11} \nabla_x^b + T_{12} \nabla_y^b + T_{13} \nabla_z^b$$

$$\delta \dot{V}_N = -\phi_U f_E + \phi_E f_U - 2\delta V_E \left(\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N + h} \tan L \right) - \delta V_N \frac{V_U}{R_M + h} - \delta V_U \frac{V_N}{R_M + h}$$

$$- \delta L \left[2V_E \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E^2}{R_N + h} \sec^2 L \right] + \delta h \left[\frac{V_N V_U}{(R_M + h)^2} + \frac{V_E^2 \tan L}{(R_N + h)^2} \right] + T_{21} \nabla_x^b + T_{22} \nabla_y^b + T_{23} \nabla_z^b$$

$$\delta \dot{V}_U = \phi_N f_E - \phi_E f_N + 2\delta V_E \left(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} \right) + \delta V_N \frac{2V_U}{R_M + h} - 2\delta L V_E \omega_{ie} \sin L$$

$$- \delta h \left[\frac{V_N^2}{(R_M + h)^2} + \frac{V_E^2}{(R_N + h)^2} \right] + T_{31} \nabla_x^b + T_{32} \nabla_y^b + T_{33} \nabla_z^b$$

$$\delta \dot{L} = \frac{\delta V_N}{R_M + h} - \frac{\delta h V_N}{(R_M + h)^2}$$

$$\delta \dot{\lambda} = \frac{\delta V_E}{R_N + h} \sec L + \frac{\delta L V_E}{R_N + h} \tan L \sec L - \frac{\delta h V_E}{(R_N + h)^2} \sec L$$

$$\delta \dot{h} = \delta V_U$$

$$\dot{\phi}_E = \phi_N \left(\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N + h} \tan L \right) - \phi_U \left(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} \right) - \frac{\delta V_N}{R_M + h} + \frac{\delta h V_N}{(R_M + h)^2} - (T_{11} \varepsilon_x^b + T_{12} \varepsilon_y^b + T_{13} \varepsilon_z^b)$$

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_N &= -\phi_E \left(\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N + h} \tan L \right) - \frac{\phi_U V_N}{R_M + h} - \delta L \omega_{ie} \sin L + \frac{\delta V_E}{R_N + h} - \frac{\delta h V_E}{(R_N + h)^2} \\ &\quad - (T_{21} \varepsilon_x^b + T_{22} \varepsilon_y^b + T_{23} \varepsilon_z^b) \\ \dot{\phi}_U &= \phi_E \left(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} \right) + \frac{\phi_U V_N}{R_M + h} + \delta L \left(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} \sec^2 L \right) + \frac{\delta V_E}{R_N + h} \tan L \\ &\quad - \frac{\delta h V_E}{(R_N + h)^2} \tan L - (T_{31} \varepsilon_x^b + T_{32} \varepsilon_y^b + T_{33} \varepsilon_z^b)\end{aligned}$$

Погрешности гироскопа и акселерометра можно в общем случае записать как:

$$\varepsilon = \varepsilon_c + \varepsilon_g,$$

где ε_c – случайная постоянная, а ε_g – белый шум.

$$\dot{\varepsilon}_c = 0$$

На основе модели погрешностей строится матрица состояния системы F (см. Приложение).

$$\begin{cases} w(t) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ w_{\varepsilon x} \ w_{\varepsilon y} \ w_{\varepsilon z} \ w_{\nabla x} \ w_{\nabla y} \ w_{\nabla z}]^T \\ G(t) = I \end{cases}$$

Вектор измерений $Z(t)$ при использовании в задаче сигналов GPS имеет вид:

$$Z(t) = [\Delta V_E \ \Delta V_N \ \Delta \lambda \ \Delta L \ \Delta H \ \Delta \psi]^T,$$

где ΔV_E , ΔV_N – погрешности скорости в восточном и северном направлениях, $\Delta \lambda$ и ΔL – погрешности долготы и широты, ΔH – погрешность высоты, $\Delta \psi$ – погрешность пеленга, определяемого по данным магнетометра. Матрица измерений H имеет вид

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

При отсутствии сигналов GPS скорость пешехода определяется на основании числа шагов и вектор измерений приобретает вид:

$$Z(t) = [\Delta V_E \ \Delta V_N \ \Delta H \ \Delta \psi]^T$$

В этом случае матрица измерения равна

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

Результаты испытаний

Испытание ПИНС вне помещения проводилось после установки системы и ее калибровки, в том числе магнетометра. Первый испытательный маршрут показан на рис. 9: синяя линия – реальный маршрут, красная линия – маршрут, выработанный навигационной системой. Общая протяженность пути была порядка 550 м, время испытания – 500 с. Итоговая погрешность определения положения составила 3 м, максимальная за время испытаний – 12 м. При этом итоговая погрешность скорости была равна 0,5%, максимальная – 2,2%.

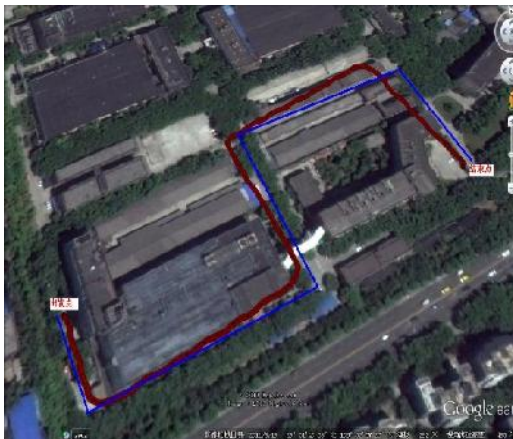


Рис. 9. Первый испытательный маршрут

На рис. 10 показан второй испытательный маршрут. Общая протяженность пути составила около 500 м, время испытания – 480 с. Итоговая погрешность определения положения составила 2 м, максимальная – 5 м, скорости – 0,4 % и 1 % соответственно.

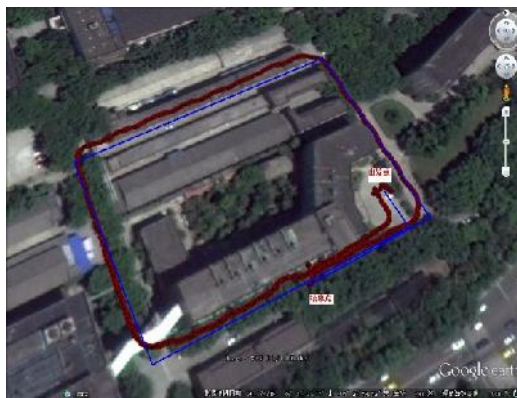


Рис. 10. Второй испытательный маршрут

На рис. 11 схематично изображен следующий испытательный маршрут: пешеход спускается с шестого этажа здания на первый, затем поднимается наверх на лифте. Из этого испытания следует, что ПИНС способна обеспечивать информацию о местоположении пешехода вне зависимости от наличия сигналов GPS.

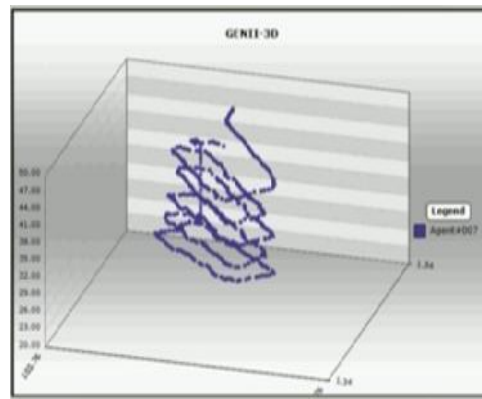


Рис. 11. Третий испытательный маршрут

Заключение

Интегрированная навигационная система, устанавливаемая на талии пешехода, определяет его положение в реальном времени как в помещении, так и вне его с использованием предлагаемого навигационного алгоритма на основе данных об ускорении и угловой скорости от микроИИМ, о магнитном направлении от магнетометра, о высоте от бароальтиметра, о положении и скорости от GPS. Результаты трех проведенных испытаний показывают, что в присутствии сигнала GPS погрешность определения азимута составляет менее $0,5^\circ$, положения – менее 5 м; при отсутствии сигнала GPS погрешность определения азимута менее 1° , положения – менее 3% от длины маршрута. Вне зависимости от наличия сигналов GPS погрешность определения высоты составляет менее 1 м, при этом обеспечивается возможность четкого определения номера этажа, на котором находится пешеход.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Seong Yun Cho and Chan Gook Park**, MEMS based pedestrian navigation system, The Journal of Navigation, 2006, no. 59, pp. 135-153.
2. **Calusdian, J.**, A personal navigation system based on inertial and magnetic field measurements, Naval Postgraduate School, Monterey California, USA, 2010.
3. **Bird, J. and Arden, D.**, Indoor navigation with foot-mounted strapdown inertial navigation and magnetic sensors, IEEE Wireless Communication, 2011, no. 18, pp. 28-35.
4. **Ojeda, L. and Borenstein, J.**, Personal dead-reckoning system for GPS-denied environments, Proceedings of the 2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics Rome, Italy, September 2007.
5. **Qian, W.-X., Zhu, X.-H., and Su, Y.**, Personal navigation method based on foot-mounted MEMS inertial/magnetic measurement unit, Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, no. 5.
6. **Bebek, O., Suster, M., Rajgopal, S., and Fu, M.**, Personal navigation via shoe mounted inertial measurement units, International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2010, pp. 1052-1058.
7. **Bolotin, Yu. V. and Fatehrad, M.**, Pedestrian inertial navigation with foot zero velocity update, 22nd St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg: Elektropribor, 2015, pp. 68-72.
8. **Voloshin, D., Rybokonenko, D., and Karbovskii, V.**, Towards a performance-realism compromise in the development of the pedestrian navigation model, ICCS 2015, International Conference on Computational Science, 2015, pp. 2799-2803.
9. **Panyov, A. A., Smirnov, A.S., and Kosyanchuk, V.V.**, Indoor navigation using foot-mounted IMU aided with heterogeneous additional information, 22nd St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg: Elektropribor, 2015, pp. 73-80.
10. **Zhou, W.-J.**, A method of automatically computing magnetic declination via the geomagnetic

- declination map, Engineering of Surveying and Mapping, 2007, vol. 16, no. 1, pp. 51-54.
12. **Chen, J.-W.**, Study on direct ellipse fitting algorithm, Geotechnical Investigation & Surveying, 2007, no. 6, pp. 49-51.
13. **Chen, C. and Xing, D.**, Research of acceleration sensor signal processing based on MATLAB, Microcontroller & Embedded Systems, 2006, no. 9, pp. 16-19.
14. **Liu, Ch., Yang, H., and Song, J.**, Research on adaptive pedometer detection algorithm, Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015.

Приложение

Матрица состояния системы F, построенная на основе приведенных в статью уравнений погрешностей ИНС, имеет вид:

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & 0_{33} & F_{15} \\ F_{21} & F_{22} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} & 0_{33} \\ 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} \\ 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} & 0_{33} \end{bmatrix},$$

где 0_{33} – нулевая матрица 3×3 ; $F_{15} = F_{34} = C_b^n$;

$$F_{11} = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan L - V_U}{R_N + h} & 2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N + h} \tan L - \left(2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} \right) \\ -2 \left(\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} \right) & -\frac{V_U}{R_M + h} & -\frac{V_N}{R_M + h} \\ 2 \left(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} \right) & \frac{2V_U}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{12} = \begin{bmatrix} 2\omega_{ie} (V_U \sin L + V_N \cos L) + \frac{V_E V_N}{R_N + h} \sec^2 L & 0 & \frac{V_E V_U - V_E V_N \tan L}{(R_N + h)^2} \\ - \left[2V_E \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E^2}{R_N + h} \sec^2 L \right] & 0 & \frac{V_N V_U}{(R_M + h)^2} + \frac{V_E^2 \tan L}{(R_N + h)^2} \\ -2V_E \omega_{ie} \sin L & 0 & - \left(\frac{V_N^2}{(R_M + h)^2} + \frac{V_E^2}{(R_N + h)^2} \right) \end{bmatrix},$$

$$F_{13} = \begin{bmatrix} 0 & -f_U & f_N \\ f_U & 0 & -f_E \\ -f_N & f_E & 0 \end{bmatrix}, \quad F_{21} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_N + h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$F_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ \frac{V_E \tan L \sec L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_E \sec L}{(R_N + h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad F_{31} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{1}{R_N + h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N + h} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N + h)^2} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix},$$

$$F_{33} = \begin{bmatrix} 0 & \mu_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h} & -\left(\mu_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h}\right) \\ -\left(\mu_{ie} \sin L + \frac{V_E \tan L}{R_N + h}\right) & 0 & -\frac{V_N}{R_M + h} \\ \mu_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N + h} & \frac{V_N}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix}.$$

Liu Y., Yang H., Liu Ch., Song J. (26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, China), **Cai T., Yu M.** (Southeast University, China)
 The Pedestrian Integrated Navigation System with micro IMU / GPS / Magnetometer / Barometric Altimeter // *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2015. № 4 (91). P. 29-41.

Abstract. The paper presents a Pedestrian Integrated Navigation System (PINS) including micro Inertial Measurement Unit (IMU), Global Positioning System (GPS) module, magnetometer and barometric altimeter, whose data are processed by the Extended Kalman Filter (EKF).

Key words: pedestrian integrated navigation system, micro inertial measurement units, global positioning system module, magnetometer, barometric altimeter, extended Kalman filter

Материал поступил 15.05.15