

УДК 629.7.054.07

В. В. Лукьянов

ПРИКЛАДНЫЕ АЛГОРИТМЫ НАВИГАЦИИ ПЕШЕХОДА

Приведены описание прикладных навигационных алгоритмов и результаты проведенных испытаний в интегрированном со спутниковой навигационной системой режиме.

Вычисление курсового угла. Автономные методы вычисления курсового угла. Курсовой угол может быть определен как классическим методом с помощью бесплатформенной инерциальной навигационной системы, так и с помощью магнитного компаса (рис. 1). В первом случае основная проблема состоит в компенсации гироскопических дрейфов, которые приводят к возрастающим со временем ошибкам (см. рис. 2 — толстая черная линия).

Во втором случае используется магнитный компас, включающий в себя триаду магнитометрических датчиков, встроенных в корпус инерциальной навигационной системы. Магнитометры измеряют проекции вектора напряженности магнитного поля Земли на свои оси. Для того чтобы измерить курсовой угол системы, необходимо пересчитать эти измерения на оси навигационной системы координат. При этом используются углы ориентации (крен, тангаж), полученные непосредственно в инерциальной системе. Горизонтальные составляющие

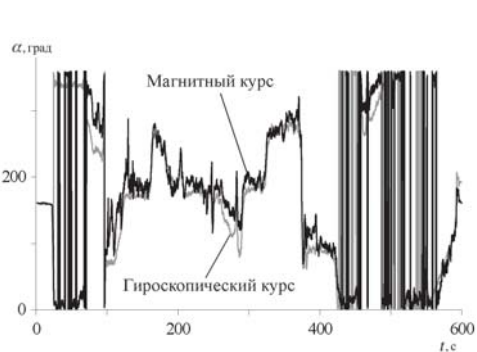


Рис. 1. Гироскопический и магнитный

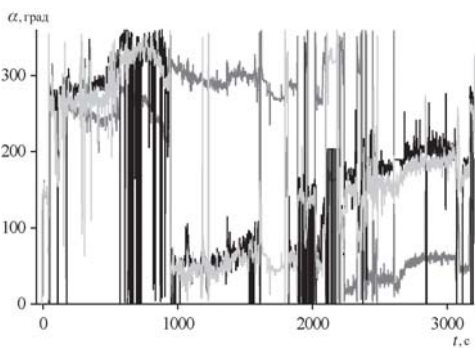


Рис. 2. Гироскопический, магнитный и спутниковый курс в городе

вектора напряженности в осях навигационной системы координат вычисляются по следующей формуле [1]:

$$\begin{aligned} H_x &= M_x \cos \gamma + M_z \sin \gamma; \\ H_y &= M_y \cos \vartheta - M_x \sin \gamma \sin \vartheta - M_z \cos \gamma \sin \vartheta, \end{aligned} \quad (1)$$

где M_x, M_y, M_z — проекции вектора напряженности магнитного поля Земли; H_x, H_y — проекции вектора напряженности на горизонтальные оси географической системы координат; γ, ϑ — углы крена и тангажа.

После этого возможно вычислить магнитный курс

$$H_{mag} = \operatorname{arctg} \left(\frac{H_x}{H_y} \right). \quad (2)$$

Магнитный курс, вычисленный по формуле (2), содержит ошибки определения углов ориентации измерительного блока. Применяя преобразование Тэйлора первого порядка к выражению (2), получим [2]

$$\alpha + \Delta\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{-H_y}{H_x} \right) + \frac{\partial \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{-H_y}{H_x} \right) \right)}{\partial H_y} \Delta H_y + \frac{\partial \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{-H_y}{H_x} \right) \right)}{\partial H_x} \Delta H_x.$$

После некоторых упрощений и с учетом того, что модуль вектора напряженности магнитного поля Земли

$$H_e = H_h \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ \tan \delta \end{bmatrix},$$

где δ — угол наклона вектора напряженности магнитного поля Земли к горизонтальной плоскости в данном месте, уравнение ошибки определения курсового угла принимает следующий вид:

$$\Delta\alpha = -\Delta\theta \operatorname{tg} \delta \cos \alpha - \Delta\varphi \operatorname{tg} \delta \sin \alpha.$$

Это соотношение показывает, что данная ошибка зависит как от погрешностей определения углов ориентации, так и от истинного значения курсового угла. Кроме того, она зависит от широты места: в высоких широтах горизонтальная составляющая магнитного поля мала и доминирующими являются ошибки угловой ориентации. В средних широтах $\operatorname{tg} \delta \approx 2$ [3].

У магнитного компаса, в отличие от гироскопа отсутствует такой недостаток, как систематический дрейф, но компас подвержен влиянию внешних возмущений. Источниками таких возмущений могут быть либо генераторы электромагнитных излучений, либо предметы из магнитных материалов. Взаимное расположение источников возмущений относительно магнитометров может быть фиксированным,

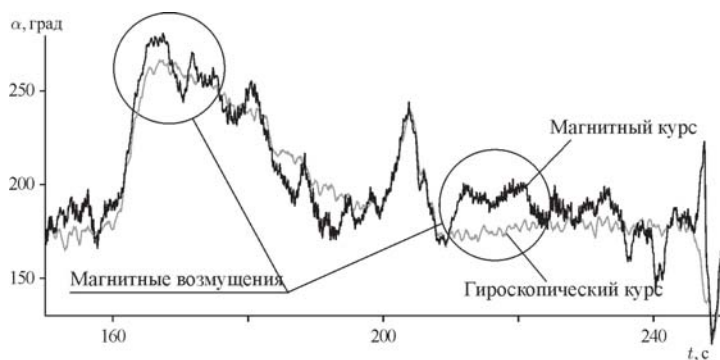


Рис. 3. Ошибки определения курса, вызванные магнитными возмущениями

если они находятся в одежде пешехода или непосредственно в корпусе инерциально-измерительного блока. Влияние таких возмущений может быть скомпенсировано при первоначальной калибровке магнитометров. Влияние источников возмущений, расположенных в окружающих пешехода предметах, носит случайный характер и с трудом поддается компенсации. На рис. 3 приведен пример такого типа возмущений: эталонный (в данном случае гироскопический) и магнитный курс.

Стратегия быстрых поворотов. Иногда пешеход совершает на маршруте достаточно резкие повороты с угловой скоростью до десятков градусов в секунду. Ошибка гироскопического курса имеет низкочастотный характер и за короткий промежуток времени изменяется незначительно. Ошибка же магнитного компаса в окружении источников возмущения магнитного поля зависит не от времени, а от взаимной ориентации с этими источниками, поэтому может измениться за время поворота на несколько градусов. Этот эффект учитывается в алгоритме персонального навигационного комплекса следующим образом: определяется разность углов быстрого поворота, полученных по изменениям магнитного и гироскопического курсов. Показания магнитного компаса будут корректироваться на величину этой разности вплоть до следующего поворота.

Вычисление курсового угла с помощью спутниковых навигационных систем. Курсовой угол определяется спутниковой навигационной системой через соотношение горизонтальных составляющих скорости движения. Чем больше величина этих составляющих, тем точнее (при тех же ошибках определения скорости) вычисляется угол (при остановках курсовой угол спутниковой системой вообще не определяется). Для целей пешеходной навигации курсовые показания спутниковой системы можно считать достоверными при скорости ходьбы не менее 3 км/ч.

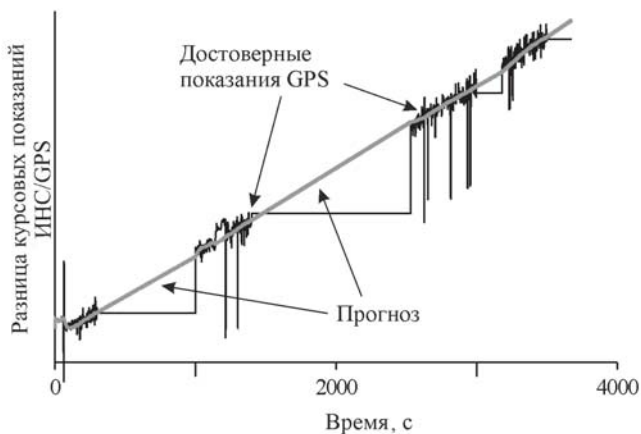


Рис. 4. Оценка ошибки определения курсового угла инерциальной навигационной системы

Достоверные измерения спутниковой системы используются для компенсации систематической составляющей скорости дрейфа гироскопической платформы инерциальной системы (рис. 4).

Счисление пути. Классическая методика счисления пути предполагает двойное интегрирование продольного ускорения подвижного объекта. Однако для навигации пешехода с использованием акселерометров низкой точности такая методика непригодна из-за высокого уровня погрешностей и малых значений измеряемых ускорений. В этом случае используется альтернативный метод счисления пути.

Очевидно, что пройденное расстояние может быть вычислено перемножением количества сделанных шагов на их длину. Длина шага в ходе прохождения маршрута может существенно изменяться (рис. 5), поэтому ее использование как фиксированной величины может приводить к большим ошибкам. Следовательно, длину шага необходимо вычислять более точно. При ходьбе тело человека совершает верти-

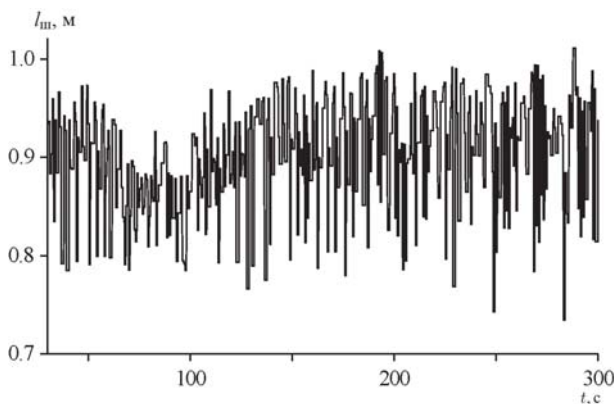


Рис. 5. Оценка длины шагов

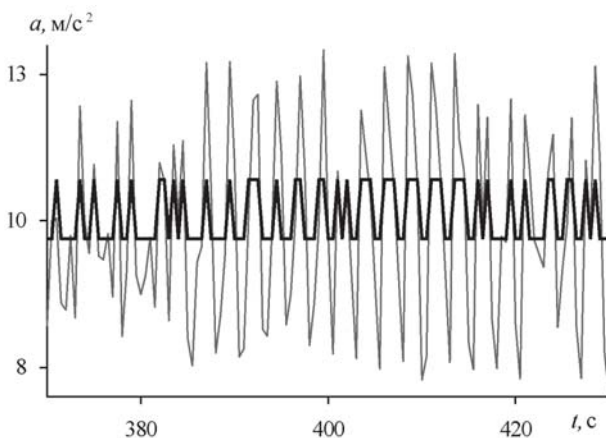


Рис. 6. Вертикальное ускорение, детектор шагов

кальные перемещения, т.е. имеет вертикальные ускорения (рис. 6). Существует корреляция этих ускорений с длиной шагов.

Сделанный шаг фиксируется в момент превышения текущего значения вертикального ускорения над некоторым пороговым значением. О длине шага $l_{ш}$, т.е. о приращении пути можно судить по разности максимального и минимального значений ускорения, измеренных в ближайшей окрестности от этого момента:

$$l_{ш} = K \sqrt[4]{a_{\max} - a_{\min}}. \quad (3)$$

Данная формула получена эмпирическим путем [4], но эффективно работает при разных режимах движения. Коэффициент K — индивидуальная характеристика. Хотя испытания показали, что у разных людей он отличается незначительно, для увеличения точности рекомендуется его калибровка непосредственно на маршруте по внешним измерениям. На рис. 5 приведен график оценки длины сделанных пешеходом шагов.

Алгоритм пешеходной навигации. В соответствии с рассмотренными методиками, ошибка определения координат персональным навигационным комплексом складывается из двух составляющих: первая — из-за неправильного определения курсового угла и вторая — из-за неточности в определении длины шагов. Для реализации указанных методик был разработан прикладной алгоритм, блок-схема которого приведена на рис. 7. Алгоритм состоит из четырех основных частей: классического алгоритма бесплатформенной инерциальной навигационной системы, блоков определения курсового угла и счисления пройденного пути, а также блока коррекции.

В первом блоке реализован классический алгоритм бесплатформенной инерциальной навигационной системы [5], в частности, определяются ее углы ориентации в географической системе координат,

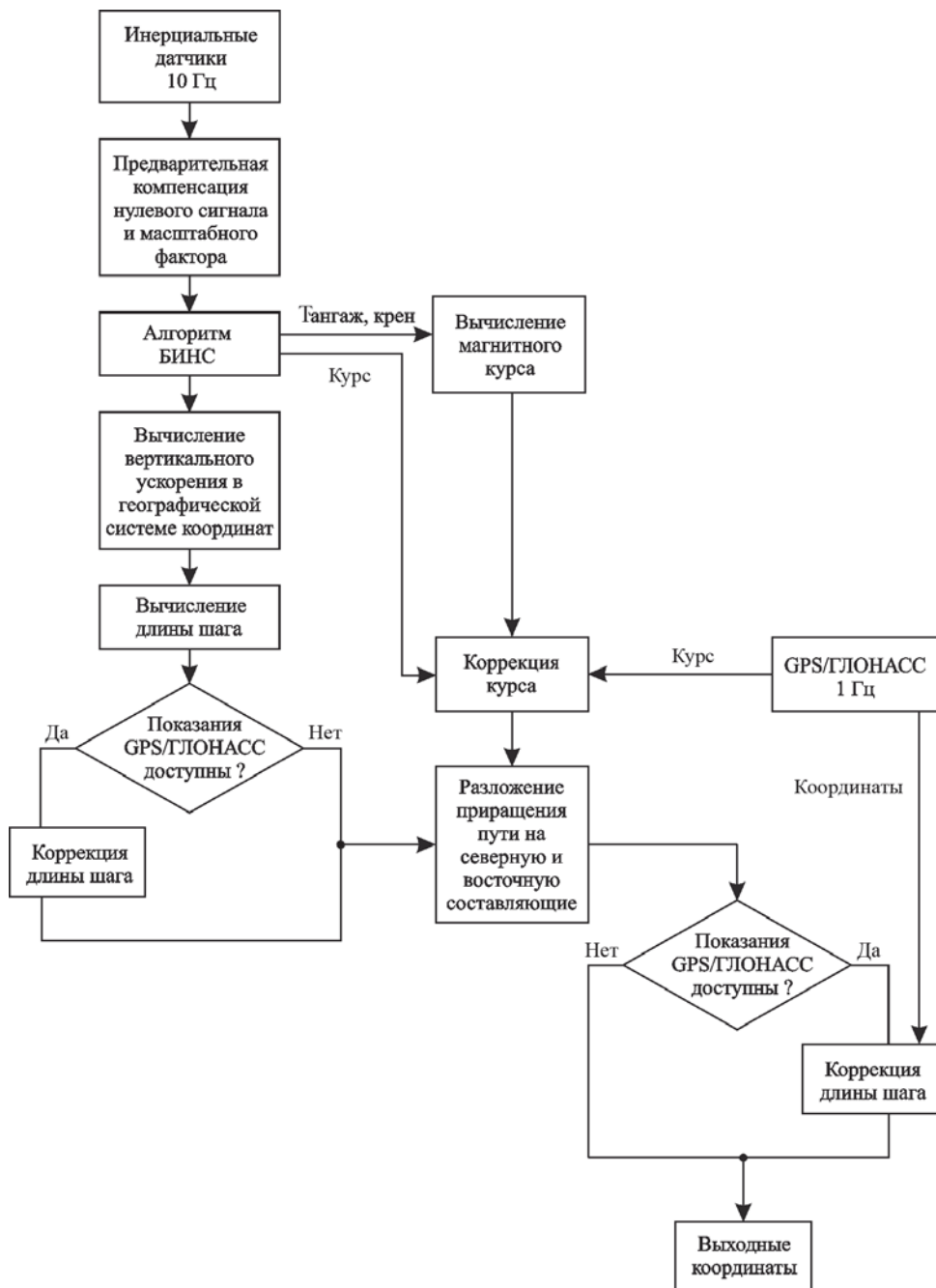


Рис. 7. Блок-схема прикладного алгоритма персонального навигационного комплекса

позволяющие выделить горизонтальные составляющие вектора напряженности магнитного поля, следовательно, вычислить магнитный курс.

Второй блок реализует алгоритм счисления пути путем детектирования шагов и вычисления их длины.

Третий блок — это блок коррекции длины шагов. В тот момент, когда показания спутниковой навигационной системы доступны, производится дополнительная корректировка длины шагов через коэффициент K (3) путем сравнения значений пройденного расстояния, полученных методом счисления пути и с помощью спутниковой системы.

В четвертом блоке корректируется курсовой угол инерциальной навигационной системы. По измерениям спутниковой системы корректируется систематический дрейф ее гироскопов. Некоторое время после последней коррекции в качестве выходного курсового угла комплекса могут быть использованы скорректированные показания инерциальной системы. При этом на точность определения координат не будут влиять локальные возмущения магнитного поля.

По завершении процедур коррекции вычисляются координаты пешехода. Для того чтобы минимизировать ошибки, вызванные разложением пройденного пути на северную и восточные составляющие, применяется еще одна процедура коррекции, осуществляемая по измерениям координат спутниковой навигационной системы.

Алгоритм реализован в виде программного обеспечения.

Испытания навигационного комплекса. В рамках разработки навигационного комплекса для пешехода были проведены десятки испытаний в различных условиях (лес, город, здание). Каждый из районов проведения испытаний имеет свои особенности. Так, лесная местность характеризуется наличием слабых магнитных возмущений, но частыми пропаданиями сигнала от приемника сигналов спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Для городской местности, наряду с периодическими пропаданиями сигналов от спутниковой системы, также характерно наличие достаточно значительных искажений магнитного поля, что приводит к существенным ошибкам определения курса, а, следовательно, и местоположения. При этом показания приемника были использованы как в качестве измерений для коррекции текущего местоположения, курсовых показаний комплекса, длины шагов и показаний баровысотомера, так и в качестве эталонного сигнала при имитации пропадания спутниковых сигналов. Здание характеризуется наличием сильных возмущений магнитного поля и полным отсутствием информации от приемника.

На рис. 8 показан типовой маршрут испытаний в лесу, сплошной линией показана истинная траектория (данные GPS/ГЛОНАСС), штриховой линией — автономное решение персонального навигационного комплекса. Важно отметить, что траектория получена на основе абсолютно автономного навигационного решения. Коррекция выполнялась лишь в начале маршрута, длительность коррекции составляла 4 мин.

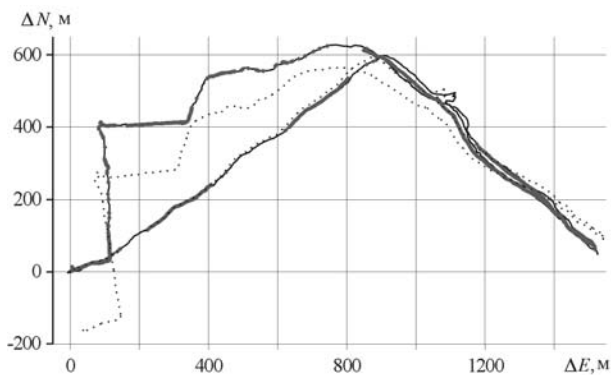


Рис. 8. Лесной маршрут

Из рис. 8 видно, что ошибка позиционирования на маршруте составляет не более 5 % пройденного пути.

Ошибки определения местоположения пешеходным навигационным комплексом можно разделить на две составляющие: одна зависит от определения длины шага, другая — от определения курса. В целях повышения точности позиционирования была использована технология калибровки длины шагов и курса в реальном масштабе времени по показаниям внешнего источника информации — приемника GPS/ГЛОНАСС.

Далее приведены типовые маршруты испытаний в различных условиях. Для демонстрации точности позиционирования навигационной системы имитировались пропадания сигналов спутниковой системы длительностью от 3 до 10 мин.

Испытания в лесу. Для проведения испытаний был выбран Измайловский лесопарк Москвы. Было проведено 10 экспериментов. Ниже приведен типовой маршрут испытаний.

Приведенные результаты получены в сентябре 2004 г. Продолжительность маршрута 1 ч, длина 4,4 км. Для демонстрации точности навигационной системы имитировались пропадания сигналов от спутников длительностью от 3 до 10 мин.

На рис. 8 сплошная черная линия — эталонный маршрут (показания GPS/ГЛОНАСС), жирные серые точки — показания навигационного комплекса на интервалах времени пропадания сигнала от спутниковой системы (как реального, так и имитированного).

Точность определения местоположения на интервалах времени имитации пропадания спутниковых сигналов не превышает 17 м (4,2 % пройденного расстояния в отсутствие сигналов GPS/ГЛОНАСС).

В лесу разница магнитного курса и курса, полученного по показаниям спутниковой системы, при существенной скорости ходьбы невелика. При этом в показаниях спутниковой системы наблюдаются

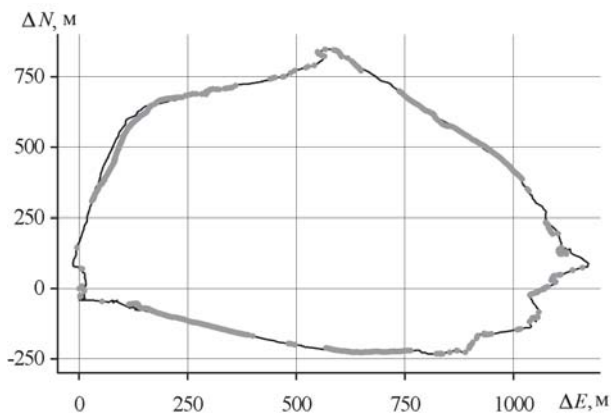


Рис. 9. Городской маршрут

частые, хотя и непродолжительные пропадания из-за листвы деревьев. Гироскопический курс имеет трендообразно нарастающую ошибку.

На рис. 7 показано изменение ускорения в вертикальном канале системы (тонкая серая линия) и детектирование шагов (толстая черная линия), пик означает шаг.

Испытания в городе. Для проведения испытаний был выбран Басманный район Москвы (улицы Бауманская, Радио, Басманная и др.). Всего было проведено 11 экспериментов. Ниже приведен типичный маршрут проведения испытаний.

Результаты получены в августе 2004 г. Продолжительность маршрута 50 мин, длина 3,4 км. Для демонстрации точности навигационной системы имитировались пропадания сигналов от спутников длительностью от 3 до 10 мин.

На рис. 9 тонкая черная линия — эталонный маршрут (показания GPS/ГЛОНАСС), жирные серые точки — показания навигационного комплекса на интервалах времени пропадания сигналов от спутниковой системы, как реальных, так и искусственно имитированных.

Ошибка позиционирования на интервалах пропадания сигнала спутниковых систем не превышает 22 м (не более 5 % пройденного расстояния в отсутствие сигналов GPS/ГЛОНАСС).

На рис. 2 приведен магнитный курс (штриховая линия), гироскопический курс (тонкая линия), а также курс, полученный по показаниям приемника GPS/ГЛОНАСС (толстая линия).

На рис. 10 траектория пройденного маршрута наложена на фрагмент карты Москвы: сплошной черной линией представлена траектория, построенная по показаниям GPS/ГЛОНАСС (погрешности и полные пропадания связаны с затенением спутниковых сигналов деревьями, близко стоящими зданиями, а также с заходом в одно из них), жирными точками отмечены показания навигационного комплекса в

Выводы. Испытания персонального навигационного комплекса, проведенные в интегрированном со спутниковой навигационной системой режиме, подтвердили правильность выбора составляющих элементов комплекса, а также продемонстрировали высокую эффективность разработанных прикладных алгоритмов: ошибка определения координат в автономном режиме не превышает 5% длины пройденного пути.

Дальнейшие исследования связаны с изучением возможности использования персонального комплекса в закрытом помещении (в здании, шахте и т.д.), т.е. в отсутствие показаний спутниковых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S a l y c h e v O. S. Applied Inertial Navigation. Problems and Solutions, Bauman MSTU Press, 1998.
2. L a d e t t o Q., J. v a n S e e t e r s , S o k o l o w s k i S., S a g a n Z., M e r m i n o d B. Digital Magnetic Compass and Gyroscope for Dismounted Soldier Position & Navigation. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL), 2002.
3. D e n n e W. Magnetic Compas Deviation and Correction. Brown, Son & Fergusson Ltd, Scotland, 1979.
4. W e i n b e r g H. Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications. Analog Devices Publication on equipment, AN-602 Application Note, 2002.
5. О ф и ц и а л ь н ы й интернет-сайт компании “Текнол”. Техническое описание инерциальной навигационной системы “Компанав-2”.

Статья поступила в редакцию 23.06.2005

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 более 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 more of than 20 publications in the field of inertial navigation.