

УДК 629.7.054.07

В. В. Лукьянов

МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ ПЕРСОНАЛЬНОГО НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Обоснован выбор используемого при создании первого отечественного персонального навигационного комплекса оборудования и описаны методы калибровки входящих в комплекс систем.

В настоящее время персональные навигационные устройства широко распространены в мире. Однако все они используют единственный источник информации — показания спутниковой навигационной системы (СНС: GPS, ГЛОНАСС или GPS/ГЛОНАСС). Точность этих показаний целиком зависит от количества наблюдаемых спутников и от их взаимной конфигурации (вплоть до полной потери навигационной информации). Самые большие погрешности возникают при движении в районах высотной городской застройки, лесу, горных ущельях: интервалы отсутствия информации могут длиться от нескольких секунд до десятков минут. Для преодоления указанных недостатков можно использовать автономные источники измерений, в частности, инерциальные.

В России подобного рода система была изготовлена в лаборатории инерциальных геодезических систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Цель выполнения данного проекта — разработка персонального (индивидуального, носимого одним человеком, пешеходом) интегрированного навигационного комплекса на базе блока инерциальных интегрированных измерительных элементов низкой точности. Устройство должно быть компактным, карманного размера, легконосимым — следовательно, основные элементы должны быть изготовлены по технологии микро-электромеханики MEMS. Емкость потенциального рынка для такого устройства очень велика, поэтому составляющие компоненты должны быть стандартными и недорогими (в перспективе — российского производства). Устройство должно обеспечивать пользователю непрерывную навигационную информацию (координаты местоположения, скорость и направление движения) в течение всего времени

¹Данная публикация продолжает серию статей, посвященных созданию лаборатории инерциальных геодезических систем МГТУ им. Н.Э. Баумана.

функционирования в любом окружении — на открытом пространстве, в лесу, горах, в районах высотной городской застройки, а также в закрытых помещениях (в зданиях, шахтах и т.д.). Для обеспечения такой информации устройство должно интегрировать показания инерциальных (акселерометров и гироскопов) и неинерциальных измерительных датчиков (приемника спутниковых сигналов GPS/ГЛОНАСС, магнитометров, баровысотомера).

При выполнении условия прямой видимости между антенной и необходимым количеством спутников показания комплекса основываются на данных GPS, одновременно должны компенсироваться параметры автономной части комплекса (курс, длина шагов). При недостаточном качестве связи со спутниками (например, в районах высотной застройки) показания GPS должны корректироваться, а при полном ее отсутствии (например, в закрытых помещениях) — восполняться автономными источниками измерений. Основные ошибки в определении местоположения пешехода связаны с погрешностями определения азимута движения. Использование магнитного компаса и гироскопа в совокупности с применением оригинальных методов обработки позволяют выделить преимущества каждого из датчиков и компенсировать их недостатки. Сравнение сигналов датчиков при изменении силы магнитного поля поможет определить и скомпенсировать магнитные возмущения. В отсутствие таких возмущений непрерывное измерение азимута позволит оценить и скомпенсировать смещение нуля и погрешность масштабного коэффициента гироскопа.

Состав персонального навигационного комплекса. Персональный навигационный комплекс состоит из следующих модулей (рис. 1):
— инерциально-измерительный блок (модуль автономных измерителей) — включает в себя в едином корпусе трехосные блоки MEMS-



Рис. 1. Состав персонального навигационного комплекса

датчиков с цифровым выходом: акселерометров ADXL202 производства Analog Devices, пьезогироскопов ENC-03J производства Murata Manufacturing Co., измерителей напряженности магнитного поля — магниторезистивных датчиков Honeywell HMC 1022/2021Z, а также миниатюрный баровысотомер;

— приемник GPS/ГЛОНАСС, основанный на технологии высокочувствительной обработки спутниковых сигналов SiRF [1];

— блок питания (аккумуляторная батарея, обеспечивающая напряжение 12 В, и устройство сопряжения);

— устройства записи, отображения и совместной обработки сигналов измерителей (накопитель информации, переносной компьютер типа Notebook).

В качестве инерциально-измерительного блока была использована бесплатформенная инерциальная навигационная система “КомпаНав-2” производства российской компании “ТеКнол” [2]. Сверхкомпактная интегрированная навигационная система “КомпаНав-2” представляет собой сочетание недорогих компактных микро-электромеханических датчиков и высокоскоростного процессорного чипа. Вместе с высокочувствительным приемником GPS/ГЛОНАСС она образует навигационный прибор для широкого круга применений. Оригинальный алгоритм, включающий в себя анализ временных рядов, алгебру кватернионов, теорию оценивания, позволяет карманному устройству работать как полноценная навигационная система. Различные варианты программного обеспечения позволяют эффективно использовать систему в целях авиационной (самолеты, вертолеты, беспилотные летательные аппараты), наземной (автомобильной и пешеходной) и морской навигации.

Система изготавливается в двух вариантах: в “легком” и в прочном корпусе. Прочный корпус обеспечивает термо-, влаго- и виброзащиту чувствительных элементов (рис. 2).

Система имеет следующие характеристики: габаритные размеры 110×85×35 мм (в настоящее время завершается разработка сверхминиатюрного варианта), вес 0,3 кг, энергопотребление 1,5 Вт, частота выдачи информации от 10 до 50 Гц в зависимости от задачи. Диапазон измеряемых скоростей: до 150 град/с при ускорениях до 2g. Точность определения углов ориентации (крен, тангаж) в автономном режиме: 0,2...0,3 град при стационарном движении, 1,5...2 град при движении с ускорением; в режиме интегрирования показаний с сигналами спутниковой навигационной системы: 0,2...0,4 град при стационарном режиме, 0,7...1 град при движении с ускорением. Точность определения курса в автономном режиме составляет 2...3 град в отсутствие магнитных возмущений; 0,5...1,5 град в интегрированном режиме. Выставка модуля производится в течение 10 с.



а



б

Рис. 2. Система “КомпаНав-2”: *а* – прочный корпус, *б* – “легкий” корпус

Новый высокочувствительный приемник спутниковых сигналов SiRF обеспечивает надежное определение координат даже при плохом созвездии спутников, например, в районах высотной городской застройки [3]. Энергопотребление составляет до 90 мА. Габаритные размеры приемника $95 \times 47 \times 17$ мм, масса 65 г. Длительность инициации (определения начальных координат) — до 45 с.

Накопитель информации производства компании “ТеКнол” предназначен для записи данных, поступающих с системы “КомпаНав-2”. Емкость накопителя составляет 1 Гб, что соответствует 30 ч непрерывной записи всей информации с частотой 50 Гц. Накопитель обеспечивает режим прозрачной передачи/приема данных через устройство от системы “КомпаНав-2” к компьютеру, т.е. при необходимости “в разрыв” между системой и компьютером или другим потребителем информации. После прохождения маршрута накопленные данные выводятся в компьютер с помощью специального программного обеспечения, где образуется стандартный бинарный файл. Накопитель позволяет осуществлять непрерывную запись данных без использования компьютера с последующим воспроизведением для анализа и реконструкции. Размер модуля $85 \times 70 \times 55$ мм, вес менее 0,2 кг, максимальная потребляемая мощность не более 150 мВт.

При перемещении автономной части комплекса относительно тела пешехода азимутальные показания могут значительно изменяться, поэтому необходимо обеспечить его надежное крепление. В данном случае комплекс закреплялся в поясной сумке на ремне на уровне талии (рис. 3), что сохраняло полную свободу движений пешеходу. Небольшие перемещения антенны спутникового приемника не оказывают существенного влияния на точность выходных показаний ком-



Рис. 3. Крепление персонального навигационного комплекса на теле человека

плекса, поэтому единственным требованием к ее установке является обеспечение максимального телесного угла обзора небосвода. Испытания показали, что вполне приемлемым вариантом может считаться крепление антенны приемника на плече.

Калибровка отдельных составляющих персонального навигационного комплекса. Калибровка в отсутствие сигналов спутниковых навигационных систем. Предварительная калибровка магнитометров. В идеальном случае зависимость показаний горизонтально расположенных магнитометров друг от друга графически представляет собой окружность с центром в нулевой точке ($H_{x \max} = H_{y \max}$ — величина горизонтальной составляющей вектора напряженности магнитного поля Земли в данной точке). На маршруте эти показания искажаются действием различного рода возмущений, “жестких” и “мягких” (рис. 4).

Предварительную калибровку магнитометрических датчиков проводят в специальном помещении, по возможности свободном от источников возмущения магнитного поля Земли, на столе с горизонтальной поверхностью. Инерциально-измерительный блок поворачивается вокруг своей оси на 360° , при этом записываются показания магнитометров. Для горизонтально расположенных датчиков модель измерений принимает вид

$$H_{x\text{изм}} = X_{sf} \times H_x + X_0;$$

$$H_{y\text{изм}} = Y_{sf} \times H_y + Y_0,$$

где (X_{sf}, Y_{sf}) , (X_0, Y_0) — масштабные факторы и смещения нулевого сигнала соответствующих магнитометров.

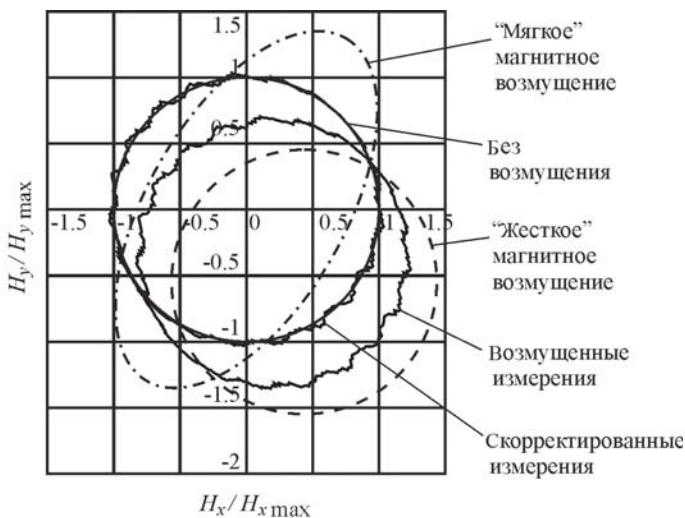


Рис. 4. Предварительная калибровка магнитометров

Калибруемые параметры можно рассматривать как приведенные, так как они будут учитывать не только собственные погрешности магнитных датчиков, но и влияние возмущений, источники которых находятся непосредственно в измерительном блоке.

Устанавливая измерительный блок на стол разными гранями, калибруют последовательно все пары магнитометров.

Полевая калибровка магнитного компаса. Для корректной работы магнитометров на маршруте необходимо, чтобы в непосредственной близости от комплекса не располагались источники электромагнитного излучения. К сожалению, идентифицировать участки, на которых показания магнитометра можно считать достоверными, не удастся. Исследованию в связи с этим подверглась, в частности, абсолютная величина напряженности окружающего магнитного поля: существовала вероятность, что в местах с большими магнитными наводками напряженность существенно возрастает. О наличии таких наводок во время испытаний можно судить по разности показаний со спутниковой либо, на небольшом интервале, инерциальной навигационной системой. Однако в ходе испытаний выяснилось, что однозначного соответствия колебаний напряженности с разностью курсовых показаний нет (рис. 5).

В результате анализа соотношения горизонтальных составляющих вектора напряженности магнитного поля H_x/H_y выявили следующее: при сильных возмущениях соответствующее измерение на графике должно находиться далеко от эталонной кривой (окружности), но и этот метод не отличается надежностью (рис. 6).

В принципе, в некоторых конкретных точках такого рода вариант оценки ошибки магнитного компаса возможен: носитель специально

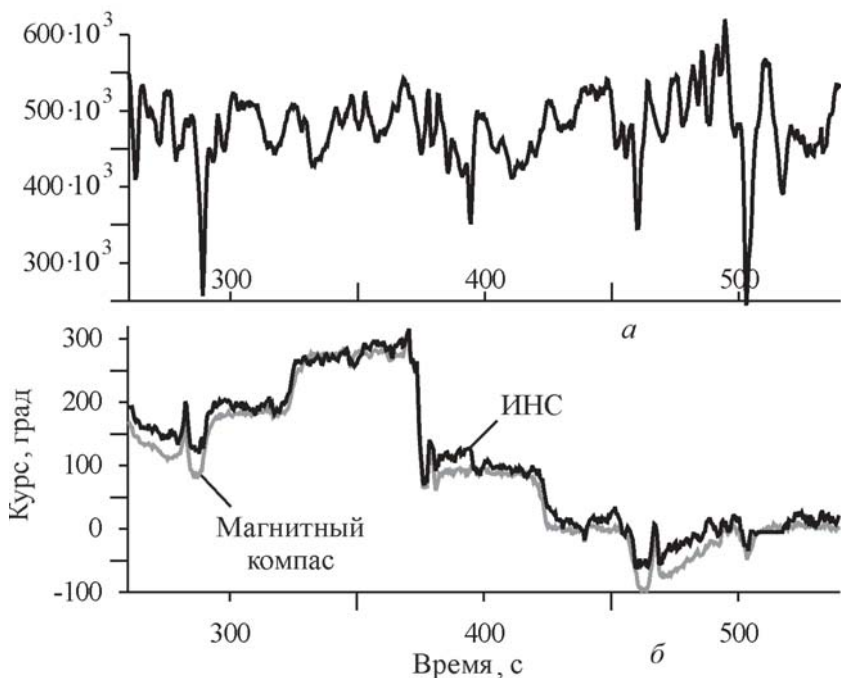


Рис. 5. Напряженность магнитного поля (а) и соответствующие курсовые показания магнитного компаса и ИНС (б)

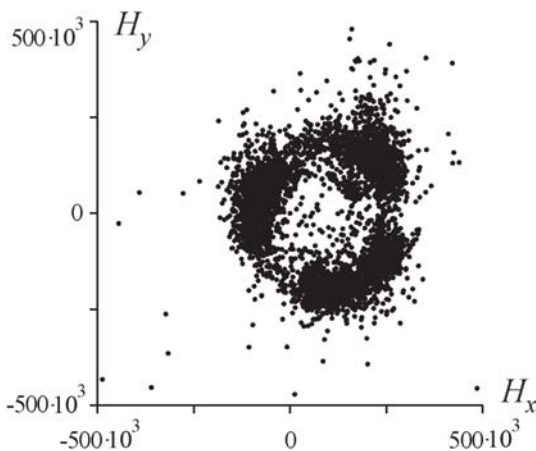


Рис. 6. Соотношение горизонтальных составляющих вектора напряженности магнитного поля на маршруте

вместе с комплексом поворачивается на 360° вокруг своей оси. Как было сказано ранее, по соотношению H_x/H_y судят о смещении показаний компаса, а также о погрешности его масштабного фактора. Такой режим практикуется в некоторых персональных магнитно-спутниковых комплексах сразу после запуска, однако его частое применение вряд ли окажется приемлемым для пользователя.

Другой вариант оценки угловой ошибки магнитного компаса в данной точке — пройти по компасу какое-то расстояние и вернуться в исходную точку. Влияние локального магнитного возмущения выразится в том, что показания компаса на прямом и обратном участках будут отличаться на двойной угол α его ошибки в данном месте. О величине ошибки можно судить по смещению соответствующих координат: $dS = 2L \sin(\alpha)$, где L — длина пути в одном направлении (рис. 7). Чем больше путь, тем

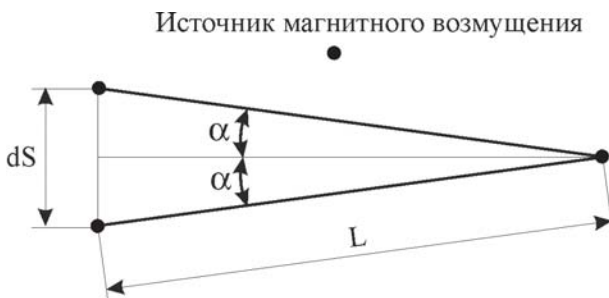


Рис. 7. Полевая калибровка магнитного компаса

точнее можно оценить α , но тем меньше вероятность, что α на всем протяжении пути можно считать постоянным.

Основной возможностью оценить ошибки магнитного компаса в отсутствие измерений спутниковой системы является совместная обработка его показаний и показаний ИНС. Однако частоты ошибок двух систем (магнитных возмущений и гироскопического дрейфа) достаточно близки, особенно на первом этапе маршрута (от 300 до 600 с) — интервале интенсивного разогрева микромеханических датчиков и электроники, что затрудняет их разделение (рис. 8).

Если гироскопы используются только для определения интервалов сильных магнитных возмущений, то нет необходимости далее калибровать их параметры, при этом с успехом могут быть использованы даже низкоточные гироскопы. Если же гироскопы будут использованы непосредственно для счисления пути, то смещения их нулевых сигналов и ошибки масштабного фактора должны быть включены в вектор состояния алгоритма оценивания.

Полевая калибровка гироскопических датчиков. В принципе, существует возможность полевой калибровки дрейфа гироскопов непосред-

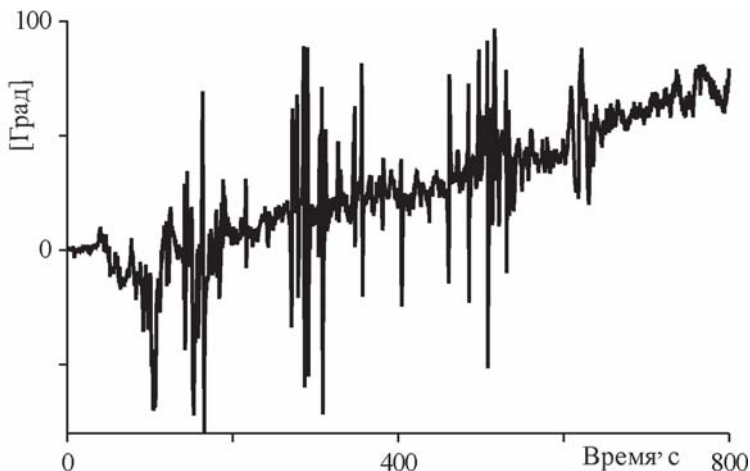


Рис. 8. Разница курсовых показаний гироскопического датчика и магнитного компаса

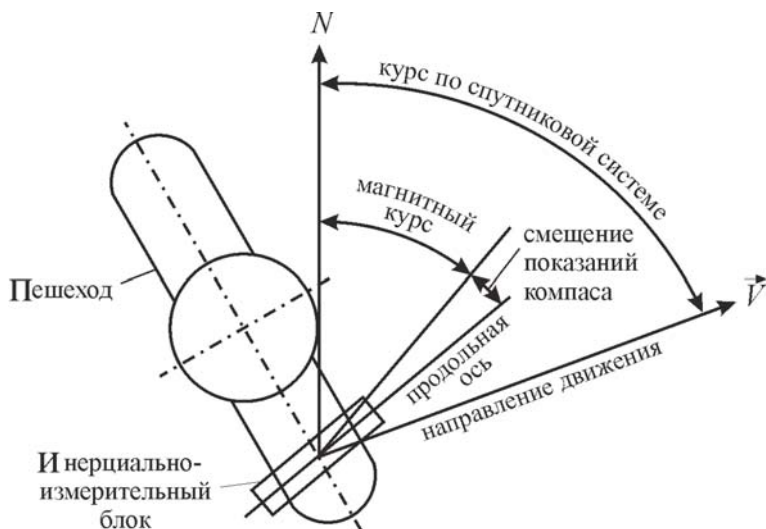


Рис. 9. Вид установки измерительного блока (в плане)

ственно на маршруте при отсутствии сигналов спутниковой системы. Для этого необходимо, чтобы инерциально-измерительный блок какое-то время остался неподвижным. Осредненный за это время сигнал в дальнейшем компенсируется в измерениях. Чем длительнее и чаще стоянки, тем лучше компенсируется гироскопический дрейф, но тем больше возражений вызывает этот режим у пользователя.

Калибровка с помощью спутниковых навигационных систем. Калибровка курсового угла установки комплекса. На рис. 9 приведена схема крепления инерциально-измерительного блока на теле пешехода.

Вплоть до получения первых достоверных курсовых показаний спутниковой системы в качестве выходного сигнала используются показания магнитного компаса. В общем случае направление, определяемое с помощью магнитного компаса, не совпадает с истинным направлением движения пешехода по следующим причинам: измерительный блок закреплен таким образом, что его продольная ось не совпадает с направлением движения; присутствует боковая составляющая скорости движения; показания компаса искажены возмущениями магнитного поля.

При появлении спутниковых измерений эти ошибки компенсируются:

$$\alpha = H(\text{CHC}) - H(\text{компаса}).$$

Истинное направление движения можно определить с помощью спутниковой навигационной системы. При прохождении маршрута измениться могут как ориентация измерительного блока относительно

тела пешехода, так и смещение показаний компаса, поэтому калибровку его показаний необходимо продолжать, пока доступны спутниковые измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пы х т и н Г. В. Обзор представленных на российском рынке встраиваемых OEM GPS-модулей // Современная электроника. – 2005. – № 1.
2. О ф и ц и а л ь н ы й интернет-сайт компании SiRF <http://www.sirf.com>. Интернет-сайт компании “Текнол” <http://www.teknol.ru>. Техническое описание инерциальной навигационной системы “КомпаНав-2”.
3. L a d e t t o Q., G a b a g l i o V., M e r m i n o d B. (2001) Combining Gyroscopes, Magnetic Compass and GPS for Pedestrian Navigation, Proc. Int. Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS 2001), pp. 205–214.

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 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.

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла из печати книга**

Жорина Л.В., Змиевской Г.Н. Основы взаимодействия физических полей с биологическими объектами / Учебное пособие, 2006 г., 238 с.

Рассмотрены механизмы взаимодействия излучений ионизирующего и оптического диапазонов с биологическими структурами на различных уровнях организации применительно к задачам медицинской диагностики, терапии и хирургии. Описаны принципы построения источников излучения и средств измерения доз воздействия на биологические объекты. Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов, обучающихся по направлению подготовки специалистов “Биомедицинская техника”, бакалавров и магистров, обучающихся по направлению “Биомедицинская инженерия”, а также для студентов высших медицинских учебных заведений и медико-биологических факультетов университетов.