

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы ПЧС-1 «Разработка теоретических основ моделирования дина-

мики развития технических, природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций», проводимой в СПбГЭТУ (регистр. № 7.1111.2011).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Б. И. Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 222 с.

2. Исследование и моделирование технологического процесса инсинерации / Ю. А. Иванова, А. Е. Горбунова, О. В. Моисеева, И. С. Чернышова // Тр. Всерос. конгресса «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России». СПб., 14–15 нояб. 2011. С. 40–44.

3. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промотходов / ВНИИГАЗ. М., 1998.

4. Предупреждение аварийных ситуаций в технологическом процессе термического уничтожения отходов и оценка воздействия на окружающую среду / В. В. Алексеев, А. Д. Чарнецкий, В. С. Коновалова, Р. Ю. Марченков // Науч.-практ. конф. «Научные и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». СПб., 12–13 нояб. 2010. С. 24–29.

5. ИИС контроля и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов / В. В. Алексеев, А. Д. Чарнецкий, П. Г. Королев, К. О. Комшилова, В. С. Коновалова, Р. Ю. Марченков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 4. С. 65–73.

V. V. Alexeyev, Yu. A. Ivanova, V. V. Gavrilov, P. G. Korolev

## METHOD OF ESTIMATING THE EFFICIENCY MEASUREMENT AND CONTROL SYSTEMS OF INCINERATION ECOLOGICAL SECURITY

*Questions of construction of information-measuring and control systems (MCS) control and process control of thermal destruction of waste, technical (algorithmic) solutions aimed at minimizing the impact on the environment. We propose a method for checking the correctness of the algorithms and performance evaluation MCS.*

**Information-measuring and control system, incineration, environmental safety**

УДК 531.383

Н. А. Шалаев, П. И. Бегун, А. М. Боронахин

## Система персональной навигации

*Выполнен обзор существующих систем персональной навигации, раскрыты их недостатки, в частности наличие значительных погрешностей в отсутствие корректирующего сигнала спутниковой навигационной системы (СНС) из-за неоптимального крепления инерциальных датчиков на теле пользователя и их общей сложной траектории перемещения в пространстве. Предложены методы повышения точности путем привлечения альтернативных источников о параметрах движения.*

**Инерциальная навигационная система, акселерометр, гироскоп, микромеханический чувствительный элемент, инерциальный измерительный модуль**

Важную роль в деятельности спасателей, пожарных, бойцов вооруженных сил играет система персональной навигации (СПН). Достоверная информация о местоположении единицы подразделения, вырабатываемая СПН, требуется в ситуациях, когда необходимо скоординировать сов-

местные действия отряда для проведения быстрых и слаженных операций, будь то разбор завалов рухнувшего дома, поиск уцелевших в задымленных помещениях или ликвидация группы боевиков.

**Подходы к решению задач персональной навигации.** Первый подход использует метод

счисления пути [1]. При этом датчик линейных ускорений (ДЛУ – акселерометр) используется в качестве шагомера (рис. 1). Зная число шагов, длину шага и направление движения (по показаниям электронного или магнитного компаса), можно определить координаты объекта. Длина шага при этом принимается либо априорно известной, либо оценивается с привлечением дополнительной информации.



ДЛУ  
Рис. 1

Пешеходная система навигационного счисления пути (рис. 2) базируется на использовании системы датчиков и встроенного микроконтроллера, который вычисляет курс и пройденный путь [1]. Магниторезистивные трёхосевые датчики обеспечивают определение направления движения пешехода. Датчики гироскопа и акселерометра позволяют учесть поправки на крен датчиков магнитометра при движении пешехода. С помощью акселерометров производится фиксация дискретных движений, например шага.

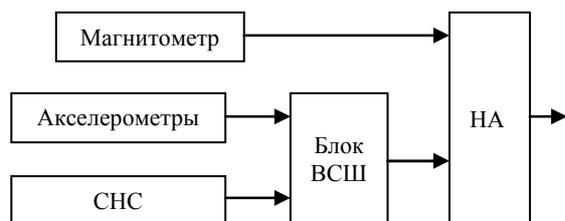


Рис. 2

Корреляция между движениями пешехода (рис. 3, а) и показаниями акселерометров (рис. 3, б) позволяет определять пространственное положение стопы в каждый момент времени (1 – отрыв стопы; 2 – перенос стопы; 3 – контакт с землей; 4 – покой).

Встроенный барометрический датчик давления позволяет определить третью координату при перемещении объекта, например, по этажам здания. Температурный датчик позволяет скорректировать показания всех датчиков, в которых проявляется температурный дрейф параметров. Частота опроса данных составляет 8 Гц. Обмен данными осуществляется с помощью интерфейсов RS-

232, SPI и специального командного протокола управления. В системе также может присутствовать и СНС – приёмник для привязки перемещений пешехода к абсолютным координатам на карте местности (рис. 4).

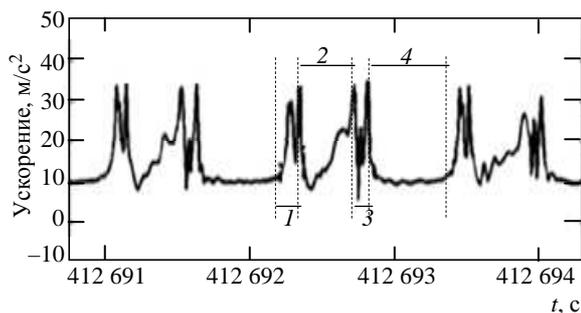
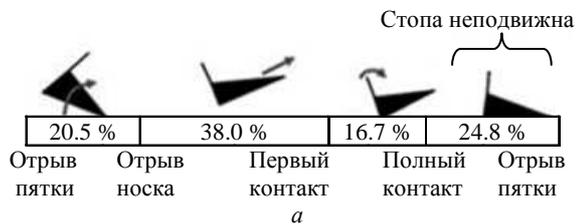


Рис. 3

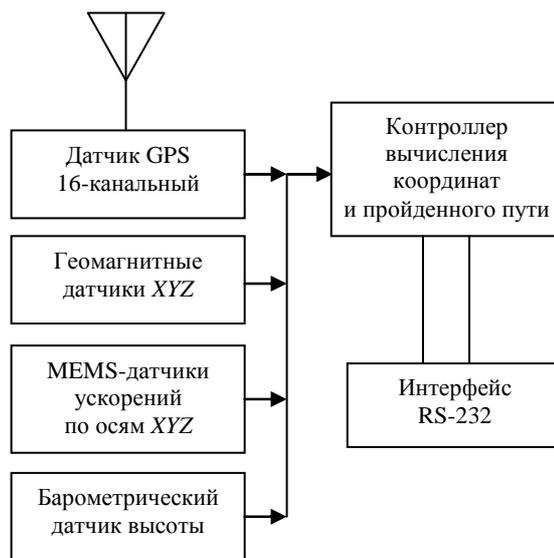


Рис. 4

Вторым подходом в рамках инерциального метода является метод инерциальной навигации. Измерительная система с шестью степенями свободы включает в себя триады микромеханических акселерометров и датчиков угловых скоростей (гироскопов). Для определения координат объекта используется алгоритм инерциальной навигационной системы (ИНС), который подразумевает двойное интегрирование показаний акселерометров, угловые перемещения которых определяются с помощью гироскопов [1].

**Характеристики типовой СПН.** Типовой СПН можно считать модуль GyroDRM™, разработанный фирмой «Honeywell». Система GyroDRM™ является интеллектуальным персональным навигатором с ошибкой определения местонахождения 1...5 м на 100 м пройденного пути. Области применения модуля – картография, системы национальной безопасности, городская топография, персональные навигационные системы для пожарных подразделений, полиции, МЧС, служб безопасности и разведки, а также для навигации в парках и в лесу. Модуль имеет улучшенные характеристики по сравнению с DRM-3. В нём применяются новые алгоритмы для фильтрации данных от датчиков и вычисления пути.

Основные особенности СПН на примере модуля GyroDRM™ [1]:

- режим непрерывного позиционирования без провалов;
- работа как с GPS, так и без него;
- точность горизонтального позиционирования: 1–2 % расстояния от последней коррекции;
- точность определения азимута 1°;
- точность вертикального позиционирования 1.5 м;
- 12-канальный GPS-приёмник;
- возможность записи и хранения координат пройденного пути;
- не требуется поддержка внешним оборудованием;
- отметчик событий;
- встроенный барометрический высотомер;
- встроенный цифровой компас;
- патентованный алгоритм SmartPedometry™ на основе внутренней фильтрации Кальмана;
- сигнал тревоги о магнитных аномалиях.

Алгоритм работы компаса обеспечивает правильное определение углов как для вертикального, так и для горизонтального положения тела пользователя.

Алгоритм SmartPedometry™ учитывает любые движения человека: ходьбу, бег, боковое смещение, ползание, движение назад, даже топтание на месте. Автоматический компас учитывает положение тела оператора – стоит он или лежит. DRM@-5 имеет встроенный GPS-приёмник военного типа высокого разрешения. Низкое потребление позволяет носить устройство постоянно включенным. Барометрический высотомер позволяет определять номер этажа при движении объекта внутри здания. Программное обеспечение может модифицироваться с хост-контроллера. Для модуля не требуется подключение дополнительных датчиков движения.

Состав модуля: три датчика гироскопа, три датчика ускорения, три магниторезистивных датчика и барометрический высотомер. Мощность потребления – менее 1 Вт. Компактный модуль удобен для встраивания в одежду.

#### **Требуемая точность разрабатываемой СПН.**

Как было отмечено, модуль вычисления пути для навигации внутри помещений является сложной комбинацией цифрового компаса, GPS и систем шагометрии. Основные ошибки в предсказании пути и местоположения происходят из-за неточности определения направления магнитным компасом (75 %) и неточности определения длины шага (25 %). Таким образом, для создания приемлемой бытовой системы локального позиционирования ошибка вычисления пути должна быть не больше 5 %. В этом случае точность вычисления пути согласуется с точностью опорных координат хорошего GPS-приёмника. Для того чтобы достичь такого уровня точности в позиционировании, ошибка системы электронного компаса должна быть не более 1° при всех допустимых углах наклона модуля в процессе пешего перемещения. Следовательно, бюджет ошибки компаса будет определяться и точностью определения угловых кренов по вертикали и горизонтали. Выбравшие MEMS-акселерометры должны обеспечивать достаточный уровень точности при определении углов наклона, чтобы не выйти за пределы допуска 1°.

Для этого, по скромным подсчётам, ошибка должна быть не более 0.25° для каждой угловой компоненты. Интегральная погрешность двух акселерометров увеличится до ±0.5°. Основные конкурирующие на рынке модули вычисления пешеходного пути используют пьезоакселерометры и дешёвые датчики магнитного поля. Из-за этого точность электронного компаса получается явно недостаточной для создания систем локального позиционирования внутри помещений. Особенно это важно при позиционировании на этажах зданий с плотной планировкой, где невозможно оперативное обновление опорных координат от GPS. Для самостоятельной разработки программного обеспечения цифрового компаса необходимо нескольких сотен и даже тысяч часов, которые потребуются для тестирования и оптимизации алгоритмов фильтрации и обработки данных. Программа должна содержать простые компоненты для получения данных от датчиков, коррекции и адаптивной фильтрации, со-

держат вычислительные алгоритмы, основанные на геометрических формулах. Важно отметить следующее. Для получения хорошей точности требуется выполнить одновременное считывание данных от всех датчиков (snap-shot), чтобы сформировать набор отсчетов, строго относящихся к одному и тому же моменту времени. Последовательное преобразование значений от датчиков без использования схем выборки и хранения приведет к появлению недопустимой ошибки. В первую очередь это относится к данным акселерометров. Измерение векторов магнитного поля также имеет свои особенности. Поскольку датчики выполнены по мостовой схеме [1], возможны ошибки за счет смещений. Первое смещение – гауссово. Другое смещение может происходить за счет температурной нелинейности. Требуется также калибровка датчика и компенсация постоянной составляющей поля, наведённого, например, стальными объёмными конструкциями (балки здания, шасси автомобиля) [1].

**Предложение по улучшению элементной базы СПН.** Основной проблемой существующих решений СПН является неэффективность их использования (высокие погрешности) в условиях отсутствия сигналов внешних радиотехнических средств, которые используются для коррекции показаний автономной ИНС.

Построение интегрированных систем ориентации и навигации (ИСОН), нашедших применение практически во всех видах транспортных систем, предъявляют определенные требования как к проектированию самой ИНС, так и ее монтажу на объекте – максимально близко к центру качания. Кроме этого, при реализации схем комплексирования, требуется максимально полное математическое описание динамических свойств, с введением разумных для конкретного объекта граничных условий. Поэтому при рассмотрении существующих технических решений по созданию систем персональной навигации становится понятной причина чрезвычайно низкого уровня точности в автономном режиме (без информационной поддержки внешних радиотехнических средств).

Эффективную как по точности, так и по распределению по телу человека систему датчиков с оптимальными показателями энергопотребления, массе и габаритам представляется возможным построить, совместно используя методики разработки ИНС и методики медицинских обследований человека и получив достоверную математическую модель моторики движений человека.

Человек при выполнении любого двигательного действия в реальной жизненной ситуации последовательно включает определенное количество подвижно-соединенных звеньев. В каждом виде двигательных проявлений существует своя, свойственная именно этой группе цепочка последовательных элементарных движений, приводящих к нужному конечному результату. При фиксации и классификации движений многозвеньевого системы опорно-двигательного аппарата человека СПН может допустить ошибку распознавания типа локомоции, что приведет к дополнительной погрешности позиционирования. Решение данной проблемы возможно с привлечением биотехнических систем. Рассмотрим некоторые из них.

«ДиаСлед-Скан» – это аппаратно-программный комплекс для регистрации, отображения и обработки информации о динамике распределения давления между стопой и опорной поверхностью, плантографии, подографии и анализа рентгенограмм [2], [3].

Комплекс включает в себя сенсоры в виде стелек, каждая из которых оснащена 108 тензодатчиками (рис. 5, а). В результате исследований возможен выбор нескольких тензодатчиков, по показаниям которых может быть реализован шаговый регистратор (ШР), учитывающий персональные особенности локомоций пользователя (рис. 5, б).

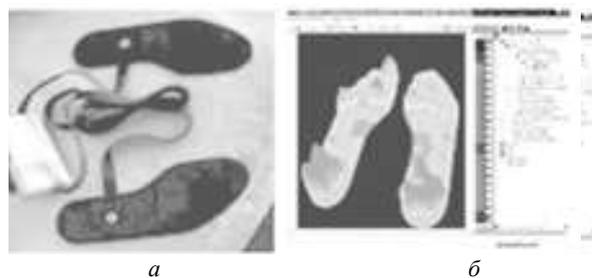


Рис. 5

Свой вклад в погрешность позиционирования вносит также несоответствие реального тела человека механической модели. Без хирургического вмешательства невозможно расположить инерциальный измерительный модуль непосредственно в расчетной точке, полученной в результате моделирования. В лучшем случае приходится довольствоваться креплением к мягким тканям человека, если даже не к одежде. Минимизировать погрешность перемещений мягких тканей относительно костных возможно путем создания системы распределенных по телу инерциальных датчиков. В этом случае задача определения местоположения отдельного модуля преобразуется в задачу вычисления координат центра масс тела, рассчитанного по показаниям ИНС.

Смоделировать движения человека могут помочь метод захвата движений, компьютерная оптическая топография и комплекс «МБН-Биомеханика».

*Метод захвата движений* основан на принципе стереофотограмметрии – реконструкции трехмерной сцены по результатам ее синхронной скоростной съемки минимум в двух различных плоскостях (рис. 6, а). С движущимися элементами связываются специальные технические метки. Траектории движения меток реконструируются по производимым снимкам с использованием математических методов. Информация о способе расположения меток на исследуемой системе позволяет, применив методы регистрации, объединить полученные траектории движения с морфологическими данными об исследуемой системе и получить ее морфокинетическую модель (рис. 6, б). Пример таких систем – VICON (съемка 120 кадров в секунду) Elite. Хотя цифровые камеры позволяют измерять координаты геометрического центра маркера с точностью до 0.1 мм, возникает значительная погрешность при размещении маркера на теле испытуемого [4], [5]. Местоположения маркеров можно рассматривать как непосредственные места для последующего крепления инерционных датчиков.

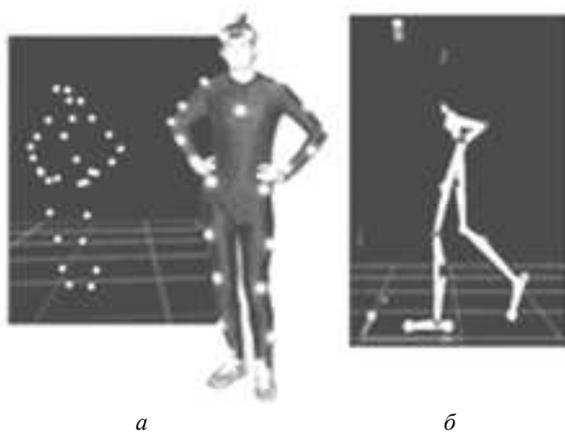


Рис. 6

*Компьютерная оптическая топография.* Для модели тела конкретного испытуемого необходимо ввести закрепленные физические параметры: массу тела, рост, длину рук и ног, ширину мышечков бедра и голени. Эти данные программным путем, основываясь на антропометрических таблицах, пересчитывают в характеристики каждого из сегментов модели: масса сегмента, координаты центра масс и момент инерции. Важную инфор-

мацию о геометрии тела человека, об особенностях и нарушении осанки можно получить при исследовании специальным методом компьютерной топографии. Этот метод позволяет количественно с высокой точностью определить координаты любой анатомической точки поверхности тела.

Топограф оптический деформаций позвоночника (ТОДП) в состоянии с достаточной достоверностью произвести оцифровку формы тела. Устройство основано на методе компьютерной оптической топографии. ТОДП позволяет дистанционно и бесконтактно определять форму поверхности туловища пациента. Продолжительность обследования составляет 1–2 мин. Принцип его действия состоит в проецировании оптического изображения вертикальных параллельных полос на обследуемую поверхность туловища пациентов с помощью слайд-проектора и регистрации этих полос камерой. Изображение спроецированных на тело пациента полос деформируется в соответствии с рельефом его поверхности и несет детальную информацию о ее форме. Такое изображение вводится в цифровой виде в компьютер, где с помощью специальных алгоритмов происходит восстановление цифровой модели обследуемой поверхности в каждой точке исходного снимка (рис. 7) [6]–[8].



Рис. 7

Регистрируя форму поверхности опорно-двигательного аппарата человека, представляется возможным создать модель нижних конечностей и определить места наибольшей неподвижности мягких тканей относительно костных в процессе локомоций.

Точность таких комплексов составляет [6]–[8]:

– пространственных измерений: 0.5 мм;

– угловых измерений:  $8.7 \cdot 10^{-3}$  рад.

Получив с помощью топографа статические параметры, необходимо перевести их в динамику, выявив характерные закономерности локомоций человека. Регистрацию различных двигательных актов по временным, пространственным, кинематическим, динамическим параметрам способен провести комплекс для анализа двигательной функции человека «МБН-Биомеханика».

В основу принципа работы комплекса при исследовании динамики локомоций и стабилотрии положены методы силового воздействия пациента на опорную поверхность при ходьбе, стоянии и других статодинамических тестах.

Электрические сигналы с датчиков (пьезоэлементов) поступают в электронный блок, находящийся под опорной пластиной платформы, а затем в компьютер, где обрабатываются и анализируются соответствующей программой.

Программное медицинское обеспечение комплекса выполняет следующие функции:

- определяет и анализирует пространственные и временные характеристики походки – длину, частоту, базу и скорость шага, угол разворота стопы, время цикла шага, периоды опоры, перенос и опору на обе и одну ногу, опорные фазы наиболее нагруженных точек стопы, характеристику перекатов в сагиттальной и фронтальной плоскостях и некоторые другие производные характеристики;

- при функциональной гониометрии суставов производит количественное и качественное исследование движений суставов по фазам шага;

- проводит анализ биоэлектрической активности мышц соответственно фазам шага или выполняемого диагностического двигательного теста, сравнение с нормативными данными;

- проводит анализ силового взаимодействия с опорой по вертикальной, продольной и поперечной составляющим с количественным определением аномалий локомоторных фаз, вектор-диаграммы и стабилотриграммы переката стопы по опоре;

- при стабилотрии проводит анализ положения, движения, частотного спектра и некоторых других показателей динамики проекции общего центра массы тела на плоскость опоры.

Точность подобных систем составляет [8]:

- пространственных измерений: 2 %;
- угловых измерений:  $8.7 \cdot 10^{-3}$  рад;
- временных измерений: 0.01 с.

**Структурная схема СПН с ШР.** Таким образом, задействовав приведенные биотехнические системы, представляется возможным проектирование более совершенной по точностным характеристикам СПН (рис. 8), отличительными особенностями которой являются оптимальное расположение инерциальных датчиков и использование

алгоритмов адаптации под индивидуальные характеристики двигательных движений пользователя:

- в присутствии спутникового сигнала задача определения координат решается с помощью СНС и барометра: СНС вырабатывает долготу и широту, барометр – высоту. Блоки магнитометров (ММ) и акселерометров (ДЛУ) с поддержкой СНС в это время определяют среднюю длину локомоций опорно-двигательного аппарата при различных способах передвижения (шагом, бегом, по-пластунски и т. п.);

- при пропадании сигнала задача определения координат распадается на задачу курсоопределения и задачу определения скорости. Курс вырабатывается блоком магнитометров, предварительно сориентированным относительно горизонта, триадами датчиков линейной скорости и углового ускорения (ДУС) и барометром. Скорость выводится из данных о длине локомоций и их периодичности. Периодичность определяется шаговым регистратором. Полученные сигналы объединяются и обрабатываются с помощью навигационного алгоритма для окончательного определения координат пользователя.

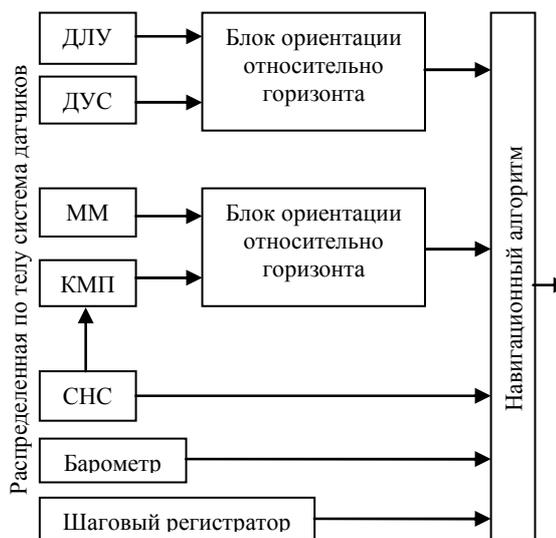


Рис. 8

Итогом произведенного обзора является выявление необходимости повышения точностных характеристик автономного решения задачи персональной (шаговой) навигации путем привлечения биотехнических систем, которые могут как выполнять функции ШР, так и определять индивидуальные особенности движения человека, что позволит предложить более рационально распределенную по телу систему инерциальных датчиков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарин А. Мультисенсорные навигационные системы для локального позиционирования // Современные технологии. 2006. № 6. С. 11–17.
  2. Смирнова Л. М., Юлдашев З. М. Измерительно-информационные системы для протезно-ортопедической отрасли // Биотехносфера. 2012. № 2(20). С. 22–25.
  3. Веденина А. С. Расширение функциональных возможностей плантоподографии методом оптического сканирования // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 11. С. 53–58.
  4. Кашуба В., Хмельницкая И. Современные оптико-электронные методы измерения и анализа двигательных действий спортсменов высокой квалификации // Наука в олимпийском спорте. 2005. № 2. С. 138–140.
  5. Попов Г. И. Биомеханические основы создания предметной среды для формирования и совершенствования спортивных движений. М., 1999. 42 с.
  6. Сарнадский В. Н. Компьютерная оптическая топография // Поликлиника. 2008. № 1. С. 68–76.
  7. Михайловский М. В., Фомичев Н. Г. Хирургия деформаций позвоночника. Новосибирск: Сиб. университетское изд-во, 2002. 430 с.
  8. Жуков Б. Н., Каторкин С. Е. Инновационные технологии в диагностике, лечении и медицинской реабилитации больных хронической венозной недостаточностью нижних конечностей. Самара: Литфонд, 2010. 383 с.
- 

N. A. Shalaev, P. I. Begun, A. M. Boronahin

### PERSONAL NAVIGATION SYSTEM

*The existing systems of personal navigation are reviewed, their shortcomings being revealed, in particular, the appearance of significant errors since no correcting SNS signal is available because the sensors on the user's body cannot be fixed in the optimal way and their general trajectory of relocation in space is non-trivial. Some methods of increasing the accuracy with the use of alternative sources of moment parameters are proposed.*

**Inertial navigation system, accelerometer, gyroscope, micromechanical sensitive element, inertial measuring module**

---