

## НАВИГАЦИЯ ПЕШЕХОДА В ЗАКРЫТОМ ПОМЕЩЕНИИ

*Предлагаемая работа продолжает серию статей, посвященных созданию в лаборатории инерциальных геодезических систем МГТУ им. Н.Э. Баумана первого отечественного малогабаритного персонального навигационного комплекса. Рассмотрена специфика использования комплекса в отсутствие сигналов спутниковых систем навигации, в частности, вопросы интегрирования с данными цифровых электронных карт. Приведены результаты испытаний.*

Персональные навигационные устройства (ПНУ) пользуются большим спросом у военных и гражданских специалистов: сотрудников охранных, транспортных агентств, работников коммунального хозяйства, ремонтных служб, экологических ведомств, геологов и других. Кроме того ПНУ применяются 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.

Навигация пешехода с помощью современных средств — самая молодая отрасль навигационной науки. Нормы и правила морской и воздушной навигации разрабатывались в течение многих лет. Все навигационные приборы и карты при этом проходят обязательную сертификацию. Дорожное движение и транспортирование грузов также жестко регламентируются (в частности, Отделением транспорта экономической комиссии ООН). Развитие автомобильной навигации привело к разработке новых стандартов для цифровых дорожных карт. В частности, глобальная цифровая модель земной поверхности реализована в файле географических данных (Geographic Data File — GDF) и используется для создания интеллектуальных транспортных систем (Intelligent Transport Systems). В большинстве систем автомобильной навигации и служб местного базирования (Location Based Service — LBS) применяется географический формат данных. В географических координатах оцифровано большинство автомобильных дорог и непосредственно примыкающих к ним районов. Эти данные могут быть использованы и для пешеходной навигации в части маршрутов, проходящих по открытой местности, но их недостаточно, если человек зашел в здание или оказался под землей.

Для пешеходной навигации необходима также своя стратегия автоматического прокладывания маршрута (широко распространенная стратегия для автомобиля в данном случае неприменима). Отдельная область пешеходной навигации, динамично развивающаяся на Западе и требующая специфических подходов, — навигация незрячих.

**Требования к устройству пешеходной навигации.** Пешеходная навигация имеет широкий спектр применений, у каждого из которых свои требования по точности, надежности, доступности и непрерывности. Совокупность этих параметров в любой момент времени определяет статус навигационной системы:

*точность* — ошибка определения координат, которая гарантирует с определенной степенью вероятности в любой момент времени в любой точке маршрута;

*надежность* — вероятность того, что ошибка определения координат превысит допустимый порог;

*доступность* — интегральная характеристика, объединяющая одновременно показатели точности и надежности;

*непрерывность* — характеризуется минимальным интервалом времени, в течение которого навигационная информация доступна пользователю.

**Базы данных (БД) цифровых карт зданий / закрытых помещений.** Современные БД цифровых карт закрытых помещений разработаны для обработки данных с помощью программы САД (Computer Aided Design) и представляют собой двух- или трехмерные модели, описывающие объект полиномиальными кривыми или стандартными фигурами. Здание представляется как совокупность комнат, коридоров, дверей и лифтов (рис. 1). Однако для автоматической прокладки оптимального маршрута необходима дополнительная информация об объектах, поэтому каждый элемент БД имеет свои характеристики, или свойства (например, номер комнаты).

Обычно в качестве координат объектов здания используются географические, а местные координаты. Это позволяет сориентироваться в здании (например, пройти от входа в нужную комнату), но не позволяет привязать эти объекты к геоинформационной карте окружающей местности.

Информация, которую получает пользователь САД-карты, является статической, применение функций навигации очень ограничено. В САД-файлах объекты представляются в виде точек, дуг и линий. Преобразование такой примитивной модели в топологическую требует применения специальных алгоритмов.

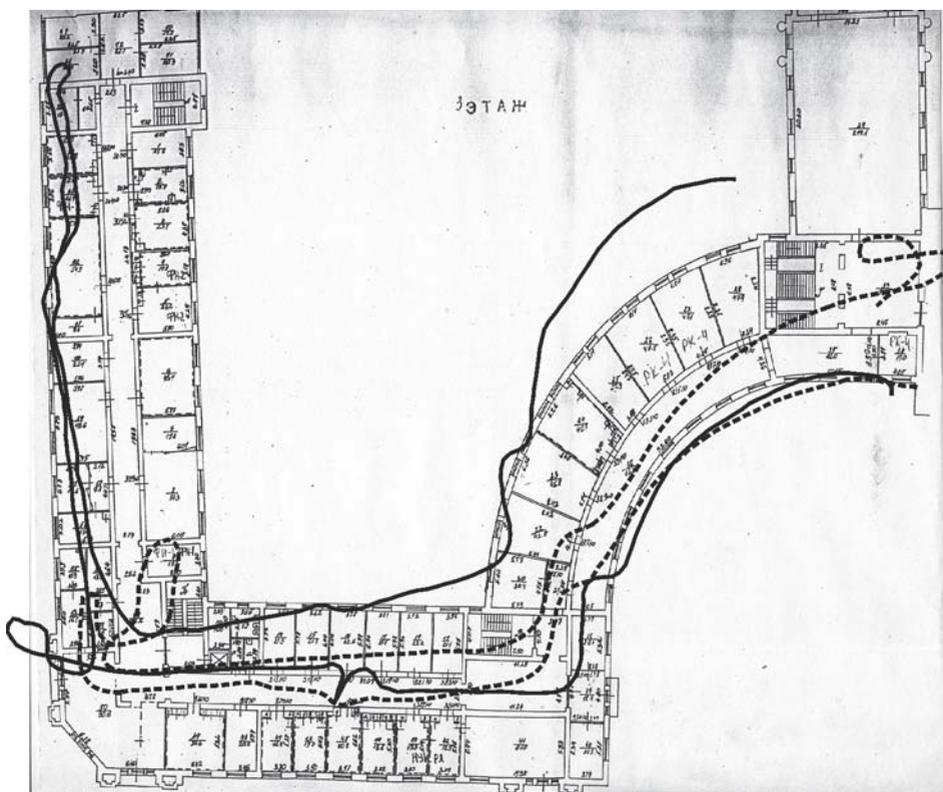


Рис. 1. Испытания в южном крыле главного корпуса МГТУ им. Н.Э. Баумана

**От CAD-файлов к топологической модели.** Местные БД необходимо сделать совместимыми с геоинформационными. Это позволит реализовать автоматическое прокладывание маршрута и осуществить коррекцию показаний навигационного устройства по карте (map matching). В рамках топологической модели объекты характеризуются не только формой и положением в пространстве, но и их взаимным расположением (связями, близостью, включением одного в другое). Преобразование информации из CAD-файлов в топологическую модель происходит в несколько этапов. На первом этапе осуществляется детектирование отдельных объектов. Затем каждому объекту присваивается стандартное наименование (дверь, комната, коридор и т.д.), а вся ненужная информация уничтожается. Например, дверь, представленная в CAD-формате линиями и дугами, в топологической модели заменяется на одну точку. Следующий этап заключается в связывании объектов в единую сеть.

**Концепция навигации в закрытом помещении.** Современная навигация предъявляет высокие требования к степени интеграции ПНУ с цифровыми картами. Состав ПНУ и алгоритмы его функционирования приведены в предыдущей публикации о персональных навигаци-

онных комплексах. В настоящей работе рассматриваются алгоритмы интегрирования показаний ПНУ с данными цифровых карт.

Ранее указывалось, что данные, полученные из оригинальной карты, перед их непосредственным использованием в целях навигации должны быть преобразованы в топологическую модель. Затем производится начальное позиционирование пешехода.

На втором этапе разрабатываются процедуры корректировки координат маршрута с помощью цифровых карт (map matching).

Последний этап — автоматическое вычисление оптимального маршрута до заданной точки. Алгоритм прокладывания маршрута для систем автомобильной навигации с использованием дорожных БД является широко известным. Но алгоритм навигации в помещении имеет ряд существенных отличий по следующим причинам:

- БД зданий и помещений не являются унифицированными и зачастую плохо совместимы;

- ряд методов автомобильной навигации либо принципиально не реализуем (установка датчиков на колесо или на рулевую колонку), либо сильно ограничен (использование сигналов спутниковых систем);

- у различных категорий пользователей существуют специфические требования, например, инвалиды опорно-двигательного аппарата не могут использовать лестницы, а незрячие — специальный интерфейс, отличный от графического.

На рис. 2 приведена общая концепция навигации пешехода. Навигационная система должна обеспечивать трехмерные координаты местоположения в течение всего времени функционирования вне зависимости от внешних источников коррекции, в том числе по цифровым картам. Алгоритм коррекции по цифровым картам позволяет выделить из БД узловые точки и линейные участки возможного прохождения маршрута. Сравнивая показания навигационной системы с выделенными участками, можно существенно повысить точность определения координат.



**Рис. 2. Концепция навигации пешехода**

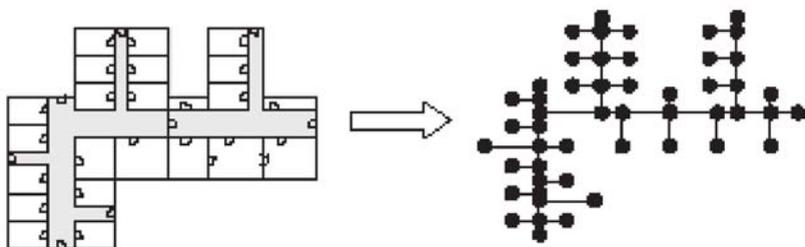


Рис. 3. Цифровая модель здания

**Топологическая модель для различных навигационных приложений.** *Абстрактная модель.* Для коррекции навигационного решения и выбора оптимального маршрута очень удобно представлять все возможные участки движения пешехода в виде сети узловых точек, соединенных линейными отрезками (подразумевается возможность только прямолинейного движения с поворотами в узловых точках [1]). Поэтому первым этапом создания топологической модели является преобразование информации из CAD-формата в совокупность элементарных составляющих, т.е. создается некая абстрактная модель, включающая в себя все интересующие объекты и связи между ними. На рис. 3 показана схема процесса создания цифровой модели части здания.

Все элементы модели подразделяются на следующие классы (рис. 4):

- линейные составляющие (коридор, дорога, проход между зданиями, комната и т.д.);
- узловые точки (лестница, лифт, дверь, интересующие пользователя объекты и т.д.).

Могут быть также другие элементы, например поверхности, но для автоматического прокладывания маршрута и корректировки показаний навигационной системы по цифровой карте приведенные ранее два класса являются определяющими. Представление всех объектов в виде точек и связывающих их отрезков удобно реализуется в компьютере.

Узловая точка — основной элемент абстрактной модели. Любой отрезок маршрута начинается и заканчивается в узловой точке. Для того чтобы корректно проложить маршрут на цифровой карте создается БД элементов модели с их атрибутами:

- типом связи (прямолинейный горизонтальный участок, лестница, лифт), а также длиной связи;
- ограничением доступа (только для сотрудников, доступ для инвалидов);
- типом узловой точки (перекресток, место перехода одного типа связи в другой).

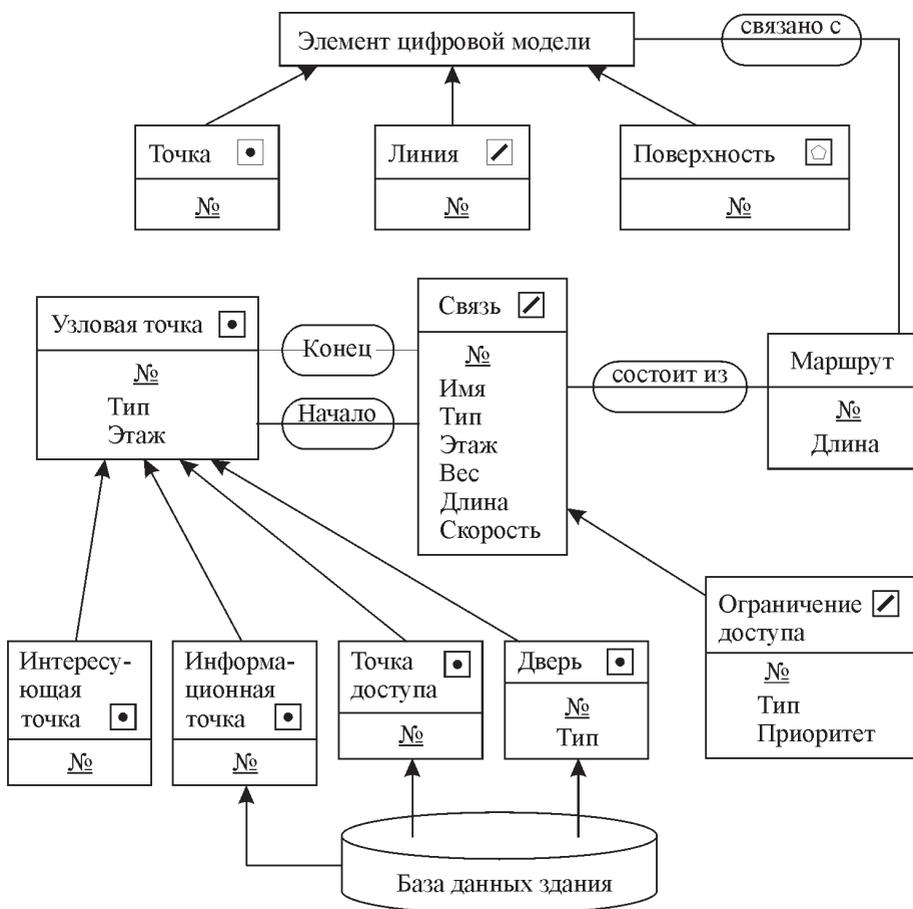


Рис. 4. Структура абстрактной модели

*Прокладывание маршрута в помещении.* Основная цель создания модели – автоматическое прокладывание маршрута по цифровой карте. Главным преимуществом абстрактной модели является интерпретация исследуемого района в виде сети, состоящей из узловых точек и связей между ними, которую удобно анализировать с помощью весовых функций. Каждая связь имеет такой атрибут, как “вес”, который зависит от времени, необходимого, чтобы из ее начальной узловой точки попасть в конечную узловую точку. При этом используется некоторая усредненная скорость движения. Вес участка маршрута, проходящего вверх и вниз по лестнице, также определяется средним временем движения. Учитываются и другие атрибуты, в частности ограничение доступа.

После того, как определены весовые функции всех возможных участков маршрута, применение алгоритма определения кратчайшего маршрута не вызывает трудностей. Длина маршрута определяется суммой весовых коэффициентов его участков. Поскольку решений в

общем случае может быть множество, последовательно анализируются все возможные варианты и из них выбирается оптимальное, т.е. обладающее минимальной суммой весов.

**Применение алгоритма map matching.** Персональные навигационные устройства позволяют определять координаты носителя даже в отсутствие сигналов спутниковых систем. Непрерывность процесса определения координат обеспечивается алгоритмом счисления пути. Суть алгоритма заключается в измерении азимутального угла и пройденного пути. Без сигналов от внешних источников коррекции координат ошибка ПНУ со временем возрастает из-за смещения нулевого сигнала и дрейфа его чувствительных элементов. Однако в качестве внешних источников сигнала коррекции может быть использована цифровая карта местности, по которой пролегает маршрут. Процесс интегрирования показаний двух систем для автомобиля является хорошо известным и носит название map matching [2]. Но если маршрут движения автомобиля – это достаточно плавный процесс, то движение человека является плохо предсказуемым. Пешеход может двигаться вперед, назад, а также изменять направление произвольно в любой момент времени. Он также может идти по лестнице, т.е. необходимо учитывать и вертикальные перемещения. Персональное навигационное устройство в любой момент времени должно способно детектировать все эти движения, а процедура совмещения маршрута с цифровой картой позволяет скорректировать его показания.

*Топологический подход.* На первом этапе процесса навигации определяются начальные координаты подвижного объекта, им ставится в соответствие точка на цифровой карте, из БД выбираются все возможные пути движения из этой точки. Для каждого пути в зависимости от пройденного расстояния определяется функция вероятности. Выбирается путь с наибольшей функцией вероятности. Затем анализируется топология сети, т.е. выбранный путь сравнивается с траекторией, полученной методом счисления пути устройством ПНУ. При этом коррекции подлежат как пройденное расстояние, так и направление движения (азимут).

*Пройденное расстояние.* Для того чтобы скорректировать пройденное расстояние, рассчитанное методом счисления пути, необходимо по карте определить истинную конфигурацию дороги, по которой пролегает маршрут. На рис. 5 приведен пример, когда траектория маршрута не совпадает с осью дороги, т.е. с топологической связью. Чтобы корректно отобразить текущее местоположение пешехода на цифровой карте реально пройденное расстояние между двумя соседними поворотами дороги заменяется на его оценку  $d_{ПР \rightarrow ТП}$ , полученную исходя из смещения начальной точки от оси дороги и угла  $\theta$  между отрезком длиной  $l$ , соединяющим начальную и конечную точки, и осью дороги.

Переход с одной топологической связи на другую возможен в тот момент, когда пешеход на цифровой карте достигнет точки их сопряжения — перекрестка.

*Изменение направления движения.* Изменение направления движения возможно в точках пересечения или сопряжения топологических связей. Сигнал об изменении направления движения поступает от навигационной системы. Этот сигнал сопоставляется с информацией из БД. Если координаты точки поворота определены правильно, они совпадают с координатами одной из узловых точек БД.

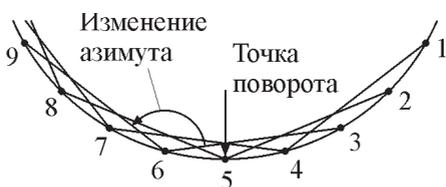
На рис. 6 приведен пример последовательности шагов, на каждом из которых поступает сигнал об изменении направления движения. Точки реального поворота могут быть определены сравнением азимутальных показаний ПНУ с данными, заложенными в цифровую карту.

Если в автомобильной навигации точку поворота легко идентифицировать по показаниям инерциальной навигационной системы, то направление движения пешехода изменяется постоянно на всем маршруте, поэтому требуется надежный алгоритм для фильтрации информации, не совпадающей с данными цифровой карты, и отображения на карте маршрута движения [3].

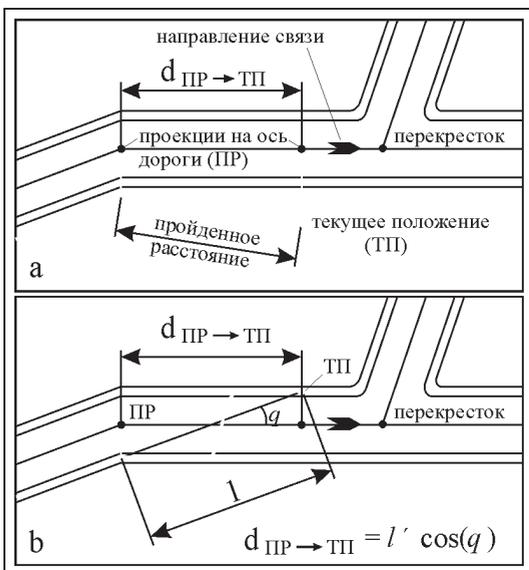
**Результаты испытаний.** Испытания проводились в зданиях МГТУ им. Н.Э. Баумана. Всего было проведено 14 экспериментов. Рассмотрим типовой маршрут испытаний.

Приведенные результаты получены в ноябре 2004 г. Продолжительность маршрута 10 мин, длина 670 м.

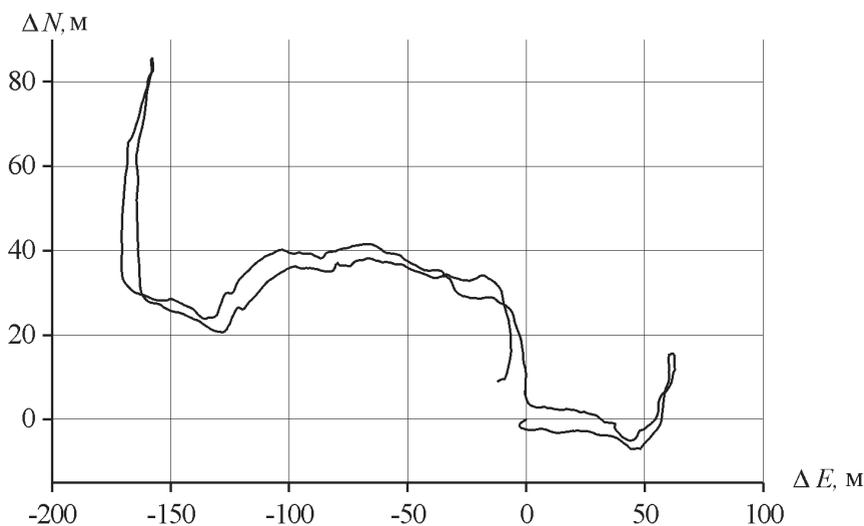
Приведенные результаты получены в ноябре 2004 г. Продолжительность маршрута 10 мин, длина 670 м.



**Рис. 6. Коррекция азимутальных показаний по данным цифровой карты**



**Рис. 5. Оценка пройденного расстояния**



**Рис. 7. Маршрут испытаний в здании**

На рис. 7 показан маршрут испытаний (в приращениях координат от начальной точки) в циркульной части главного корпуса. Для данного типа окружения характерно наличие сильных возмущений магнитного поля, которые влияют на точность позиционирования.

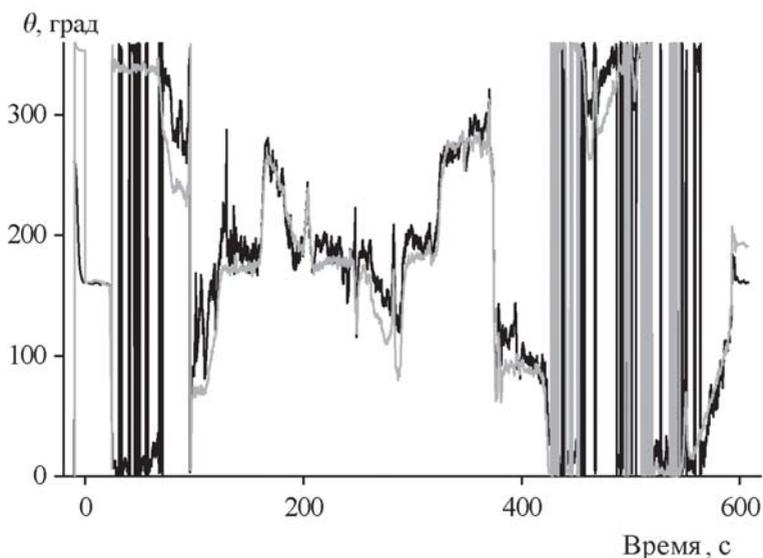
По приведенной траектории можно судить о точности навигационного решения. Маршрут испытаний был проложен так, что он дважды проходил через одни и те же точки. Более того, о точности позиционирования можно было судить по расстоянию между началом и концом траектории (начало и конец маршрута также находились в одной точке).

Ошибка позиционирования пешехода в здании составляла не более 15 м (3,6 % пройденного пути).

На рис. 8 приведена запись гироскопического (серая линия) и магнитного (черная линия) курсов во время испытаний. Как следует из приведенного графика, вследствие повышенной возмущенности магнитного поля курс, определяемый с помощью магнитометров, содержит существенные ошибки, влияющие на точность навигационного решения.

На рис. 9 представлен маршрут испытаний в башне главного корпуса. Периодический уход траектории движения от лестницы обусловлен погрешностями баровысотомера из-за ветра от приоткрытых окон.

На рис. 10 сплошной черной линией показан маршрут испытаний в южном крыле 4-го этажа главного корпуса по показаниям непосредственно ПНУ, а штриховой линией — при периодической коррекции систематической составляющей его гироскопического дрейфа (см. в предыдущей публикации раздел “Методы полевой калибровки”).



**Рис. 8.** Гироскопический и магнитный курс в здании

На рис. 8 хорошо виден эффект действия магнитных возмущений при сравнении траекторий, полученных с помощью двух датчиков (гироскопического и магнитного).

**Заключение.** Навигация в помещении объединяет в себе целый ряд технологий, в частности, интегрирование показаний навигационной системы с информацией цифровых карт. Причем в данном случае алгоритм интегрирования показаний более сложный, чем в автомобильной навигации, и использует другие источники измерений.

К показаниям навигационной системы предъявляются высокие требования по надежности, особенно со стороны экстренных служб.

Дальнейшие исследования в области пешеходной навигации в закрытом помещении могут быть связаны со следующими мероприятиями.

1. Улучшение характеристик ПНУ, а как следствие — обеспечение его автономности. Это обеспечит более широкую область его применения, в частности, с использованием в составе ПНУ малогабаритных, но более дорогих чувствительных элементов с улучшенными характеристиками типа датчика угловой скорости Silicon Sensing System или цифрового магнитного компаса Leica Digital Magnetic Compass (DMS-SX).

2. Изготовление и испытания комплексов специального исполнения: механически, вибро- и влагоустойчивых, термосбалансированных и других для экстренных служб; со звуковым интерфейсом для инвалидов по зрению; с возможностью переключения режимов, что обеспечит непрерывность выдаваемой информации (пешеходно-автомобильный вариант); с возможностью интеграции с другими

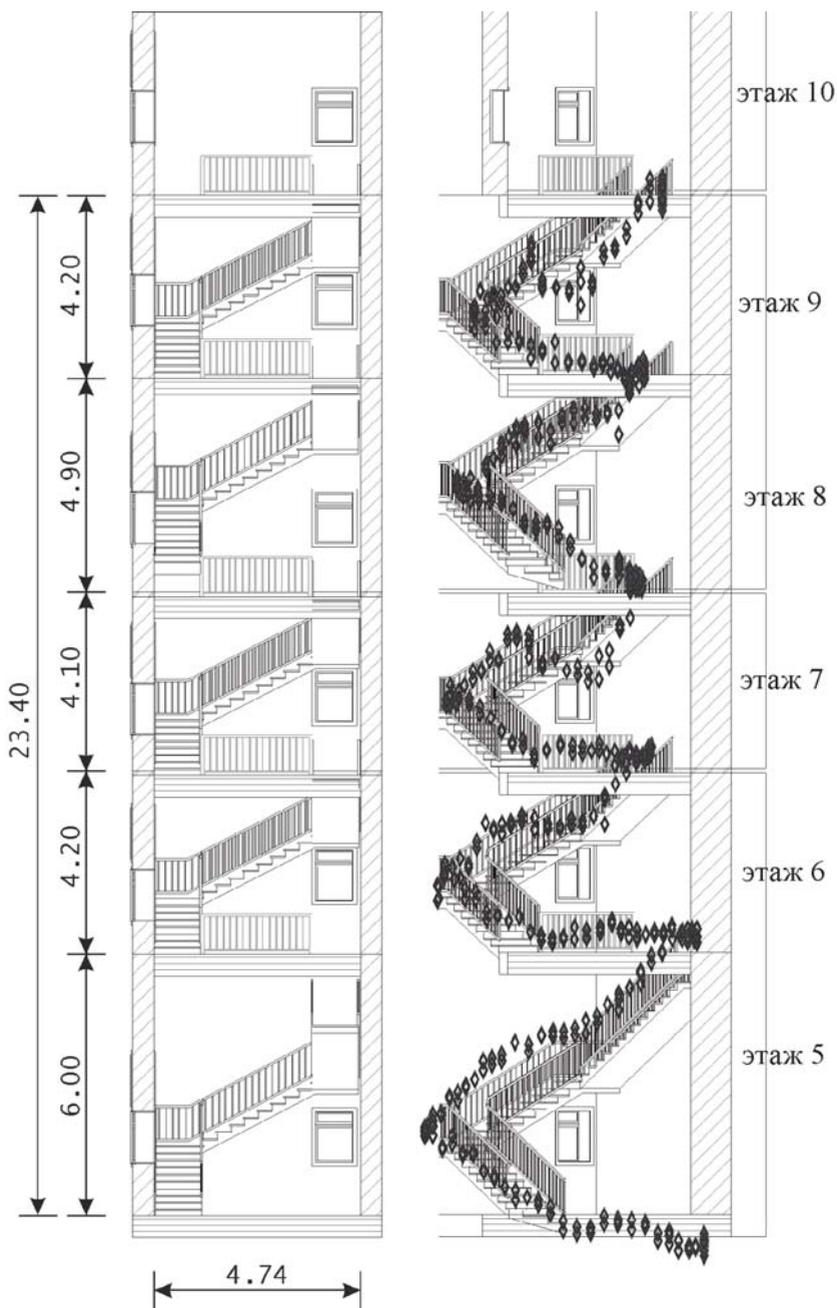
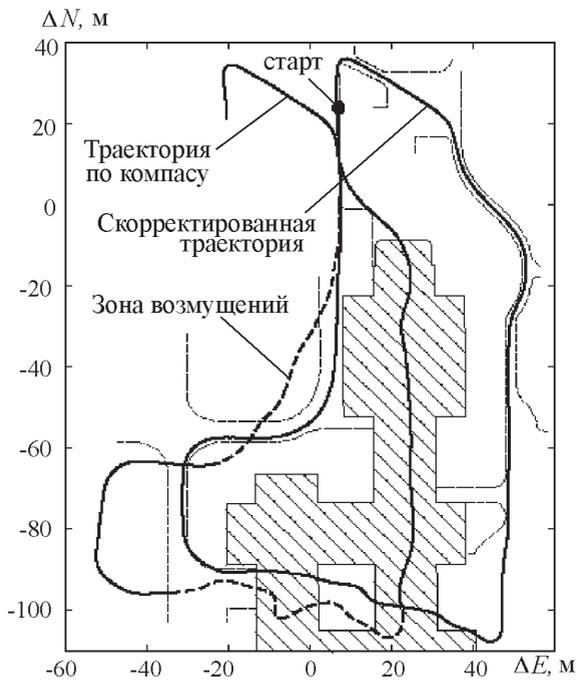


Рис. 9. Испытания в башне главного корпуса МГТУ им. Н.Э. Баумана



**Рис. 10. Влияние магнитных возмущений на траекторию маршрута**

электронными устройствами, например, с мобильным телефоном, со средствами визуального контроля и отображения окружающей ситуации, в частности отображения текущих координат комплекса на электронной карте в реальном масштабе времени на удаленном дисплее для дистанционного контроля за местонахождением его носителя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goodchild Michael F., GIS and Transportation: Status and Challenge, *Geoinformatica* 4:2, 127–139, 2000.
2. Shan Hung P., Chuan Su T. Map Matching Algorithms of GPS Vehicle Navigation System, Reng Chia University, 1998.
3. Rouiller Julien, Développement Conceptuel d'un Système de Cartes Interactives pour la Navigation Pédestre, Diploma Thesis EPFL, 2002.

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