



УДК 527.62

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.49.56

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ВЫСОКОТОЧНОЙ СПУТНИКОВО-ЛОКАЛЬНО-ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ В ЗАДАЧАХ БЕСПИЛОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

INTEGRATED SYSTEMS OF HIGH-PRECISION SATELLITE-LOCAL-INERTIAL NAVIGATION IN UNMANNED VEHICLE CONTROL

ЧИКРИН ДМИТРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ
dmitry.kfu@gmail.com

CHICKRIN DMITRY E.
dmitry.kfu@gmail.com

САВИНКОВ ПАВЕЛ АНДРЕЕВИЧ

SAVINKOV PAVEL A.

КОКУНИН ПЕТР АНАТОЛЬЕВИЧ

KOKUNIN PYOTR A.

ШАГИЕВ РИНАТ ИЛЬДАРОВИЧ

SHAGIEV RINAT I.

ФГАОУ ВО КФУ
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 16а

Kazan Federal University
16a Kremlyovskaya St., Kazan, 420008

Рассмотрены современные тенденции по созданию интегрированных навигационных систем беспилотных транспортных средств. Обоснованы технические требования к перспективным отечественным навигационным системам беспилотных транспортных средств. Описан опыт и результаты отечественных разработок в данной области.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы; инерциальные навигационные системы; системы локальной навигации; беспилотные транспортные средства.

The paper considers modern trends in the creation of integrated navigation systems of unmanned vehicles, as well as technical requirements for promising domestic navigation systems of pilot-less vehicles. The experience and results of domestic developments in this area have been presented.

Keywords: global navigation satellite systems; inertial navigation systems; local navigation systems; unmanned vehicles.

ВВЕДЕНИЕ И ПРОБЛЕМАТИКА СОВРЕМЕННЫХ ИНТЕГРИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Ключевым моментом при управлении беспилотным транспортным средством является определение в реальном времени его навигационных параметров (координат, времени, пространственной ориентации, линейных и угловых скоростей, линейных и угловых ускорений).

Надежное выполнение таких задач, как движение по заданному маршруту, удержание в полосе, перестроение и различные режимы маневрирования, накладывает существенные ограничения на прецизионность навигационной подсистемы беспилотного ТС [1, 2]. Принимая во внимание габариты ТС (здесь рассматриваются грузовые ТС с шириной колесной базы не менее 2,5 м и длиной не менее 8 м), типовую ширину полосы движения (3 м), а также учитывая кинематику движения ТС,

Таблица 1. Требования к точности определения навигационных параметров беспилотного ТС

Table 1. Accuracy requirements for determining navigation parameters of an unmanned vehicle

Погрешность определения координат, СКО, м: Error of coordinates determination, RMSE, m: – план (горизонталь) plane (horizontal) – высота (вертикаль) height (vertical)	0,1 0,2
Погрешность определения составляющих вектора скорости, СКО, м/с: The error in determining the components of the velocity vector, RMSE, m/s: – план (горизонталь) plane (horizontal) – высота (вертикаль) height (vertical)	0,02 0,04
Погрешность определения составляющих вектора линейных ускорений, СКО, м/с ² : The error in determining the components of the linear acceleration vector, RMSE, m/s ² : – план (горизонталь) plane (horizontal) – высота (вертикаль) height (vertical)	0,1 0,3
Погрешность определения составляющих векторов угловой скорости по всем углам Эйлера, СКО, град./с: The error in determining the components of angular velocity vectors in all angles of Euler, RMSE, degrees/s:	1
Погрешность определения угловой ориентации СКО, град.: The error in determining the angular orientation of the RMSE, degree	0,5

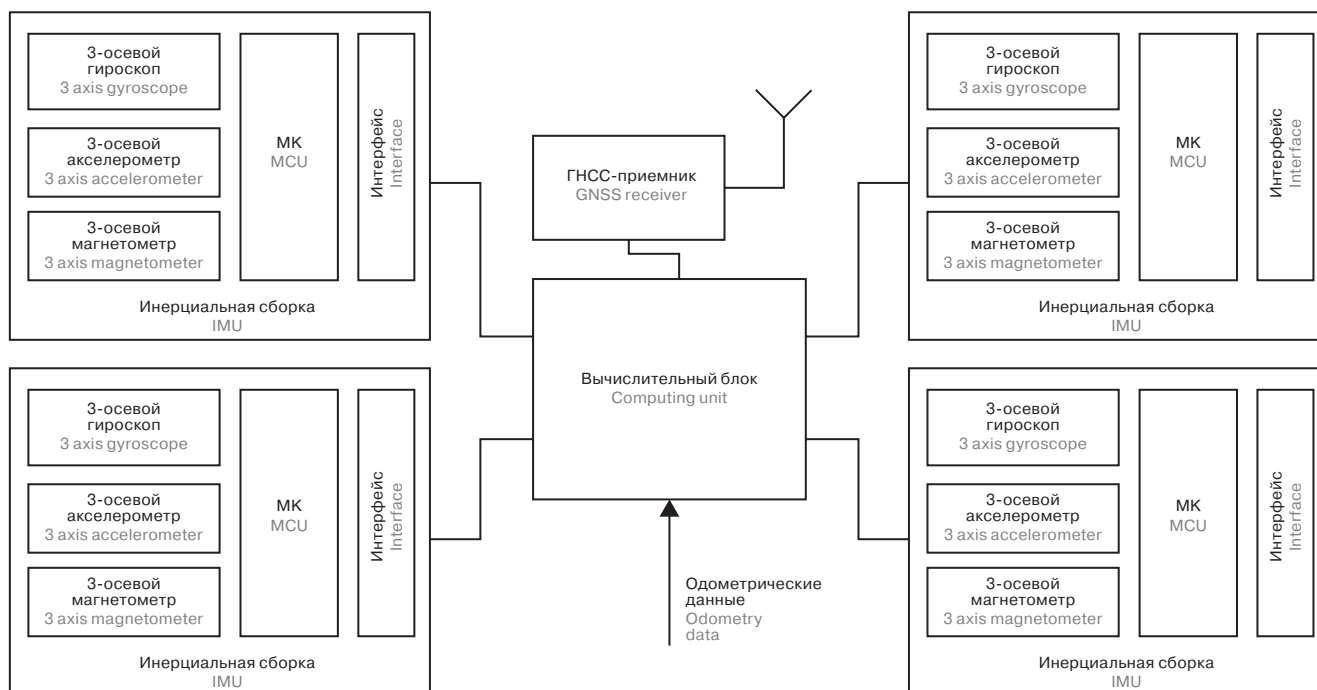


Рис. 1. Структурная схема совмещенной навигационной системы

Fig. 1. Block diagram of the combined navigation system

предъявляют соответствующие требования к точности обработки навигационных параметров в задачах управления беспилотными транспортными средствами (колоннами беспилотных транспортных средств), приведенные в табл. 1.

Эти требования определяют необходимость комплексного применения самых передовых навигационных технологий, основанных на различных физических принципах, поскольку требования к точности навигации должны выполняться вне зависимости от того, движется ли транспортное средство по открытой местности, в условиях городской застройки или в закрытом помещении.

Одной из составляющей такой интегрированной системы, отвечающей указанным требованиям, являются аппаратно-

программные средства высокоточной навигации по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Требованиям к указанной точности определения координат отвечают две известные на сегодня базовые ГНСС-технологии: это RTK (Real Time Kinematic) и PPP (Precise Point Positioning). При этом технология RTK ограничивает зону использования радиусом действия базовых станций ГНСС, необходимых для функционирования данного режима. Технология PPP рассматривается как наиболее перспективная, поскольку не требует наличия специальной инфраструктуры для обеспечения корректирующей информацией, а учитывая перспективу передачи корректирующей информации с геостационарных спутников, а также непосредственно со спутников ГЛОНАСС, технология

INTRODUCTION AND PROBLEMS OF MODERN INTEGRATED NAVIGATION SYSTEMS

The key point in controlling an unmanned vehicle is the definition of its navigation parameters in real time (coordinates, time, spatial orientation, linear and angular velocities, linear and angular accelerations).

Reliable performance of such tasks as driving along a given route, holding in a lane, rebuilding, and various maneuvering modes, imposes significant limitations on the precision of the navigation subsystem of an unmanned vehicle [1, 2]. Taking into account the dimensions of the vehicle (here we consider cargo vehicles with a wheelbase width of at least 2.5 m and a length of at least 8 m), the typical width of the traffic lane (3 m), as well as the

kinematics of vehicle movement, we have given corresponding requirements for accuracy of determining navigation parameters in the tasks of managing unmanned vehicles (columns of unmanned vehicles) in Table 1.

These requirements determine the need for an integrated application of the most advanced navigation technologies based on various physical principles, since the requirements for navigation accuracy must be met regardless of whether the vehicle moves in an open area, in urban areas, or indoors.

One of the components of such an integrated system that meets the specified requirements is hardware and software tools for high-precision navigation using global navigation satellite systems (GNSS) signals. The requirements for this accuracy of determining the

coordinates are met by two currently known basic GNSS technologies: RTK (Real Time Kinematic) and PPP (Precise Point Positioning). At the same time, RTK technology limits the zone used to the range of the GNSS base stations necessary for the operation of this mode. PPP technology is considered as the most promising because it does not require a special infrastructure to provide corrective information, and given the prospect of transmitting corrective information from geostationary satellites, as well as directly from GLONASS satellites, the technology can be used everywhere, regardless of infrastructure (including, in the absence of GSM coverage).

However, in the presence of interference in the reception of satellite signals, intentional or natural (partial shading of GNSS signals



может использоваться повсеместно, вне зависимости от наличия или отсутствия какой-либо информационной инфраструктуры (в том числе и при отсутствии GSM-покрытия).

Однако при наличии помех приему спутниковых сигналов, преднамеренных либо естественных (частичное затенение сигналов ГНСС высокими деревьями, зданиями и иными объектами на пути следования транспортного средства), точность решения по сигналам ГНСС может существенно ухудшаться вплоть до временного пропадания решения. Использование комплексного решения спутниково-инерциальной навигации позволит не только с высокой точностью получать первичную информацию о линейных и угловых ускорениях транспортного средства, но также обеспечить выработку навигационного решения в сложных условиях приема спутниковых сигналов (а также при временном пропадании приема спутниковых сигналов) без потери надлежащей точности.

Поскольку перемещение транспортных средств происходит не только на открытом (для приема спутниковых сигналов) пространстве, но также и внутри помещений (ангаров), то навигационная система таких транспортных средств должна предусматривать выработку навигационного решения требуемой точности с «бесшовным» автоматическим переходом между технологиями спутниковой и локальной навигации в интеграции с системой инерциальной навигации.

В статье приведены общие принципы построения интегрированных навигационных систем беспилотных транспортных средств, сформулированы основные требования к их функциональным и эксплуатационным характеристикам в зависимости от комплекса решаемых задач и условий применения.

До сравнительно недавнего времени аппаратно-программные решения по всем рассматриваемым направлениям существовали только у ведущих зарубежных производителей. В докладе описан опыт разработки отечественных высокоточных аппаратно-программных средств с высокой степенью локализации отечественной ЭКБ в части спутниковой, инерциальной и локальной навигации, приведены достигнутые характеристики и результаты работ по их комплексированию и внедрению в системы автоматического управления транспортными средствами.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

На рис. 1 представлена общая структурная схема предлагаемого решения. Система имеет в своем составе инерциальную подсистему (четыре инерциальных сборки), ГНСС-подсистемы (ГНСС-приемник и ГНСС-антенна) и вычислительный блок.

Инерциальная подсистема позволяет получать навигационные оценки (координаты и углы поворота транспортного средства) при плохом качестве или полном отсутствии ГНСС-сигнала. Применение избыточного количества инерциальных сборок позволяет повысить точность инерциальной подсистемы навигации путем компенсации ошибок каждого отдельного датчика по трем другим [3–5]. Каждая инерциальная сборка имеет в своем составе 3-осевой гироскоп, 3-осевой акселерометр, 3-осевой магнитометр, микроконтроллер и трансивер интерфейса передачи данных. Инерциальные сборки осуществляют измерение линейных ускорений и угловых скоростей с частотой до 100 Гц и передают данные на вычислительный блок.

ГНСС-подсистема построена на базе двухчастотного ГНСС-приемника, работающего в режиме PPP с частотой до 10 Гц и обеспечивающего точность определения координат не менее 10 см.

Вычислительный блок принимает данные со всех внешних устройств, осуществляет фильтрацию и вычисление координат инерциальной системы навигации, декодирование данных ГНСС-приемника, а также своевременное переключение с ГНСС-навигации на инерциальную и наоборот.

Расчет навигационных оценок инерциальной системы навигации основан на совмещении данных инерциальных датчиков вместе с одометрическими данными транспортного средства (текущая скорость передвижения). Ниже приведен краткий алгоритм работы подсистемы инерциальной навигации, реализованный в вычислительном блоке.

1. Прием данных с четырех инерциальных сборок.
2. Применение калибровочных поправок для акселерометра, гироскопа и магнитометра индивидуально для каждого датчика. Калибровочные поправки корректируют неортогональность осей датчиков, нулевые сдвиги, а также масштабные коэффициенты. Калибровочные поправки получены на калибровочно-измерительном стенде собственного исполнения.

by tall trees, buildings and other objects along the route of the vehicle), the accuracy of the decision on GNSS signals may deteriorate significantly, up to a temporary loss of the solution. Using an integrated solution of satellite-inertial navigation will not only provide high-accuracy primary information about linear and angular accelerations of the vehicle, but also ensure the development of a navigation solution in difficult conditions of receiving satellite signals (as well as temporary loss of satellite reception) without losing proper accuracy.

Since the movement of vehicles occurs not only in open (for receiving satellite signals) space, but also inside buildings (hangars), the navigation system of such vehicles should provide for developing a navigation solution of the required accuracy with a seamless automatic

transition between satellite and local technologies navigation integration with inertial navigation system.

The article presents general principles of building integrated navigation systems of unmanned vehicles and formulates main requirements for their functional and operational characteristics, depending on the set of tasks and conditions.

Until relatively recently, only leading foreign manufacturers have come up with hardware and software solutions in all the considered areas. The report describes the experience of developing domestic high-precision hardware and software with a high degree of localization of the domestic component base in terms of satellite, inertial and local navigation, the characteristics achieved and

the results of work on their integration and introduction into the automatic vehicle control system.

PROPOSED SOLUTION

Figure 1 shows a general block diagram of the proposed solution. The system includes an inertial subsystem (four inertial assemblies), GNSS subsystems (GNSS receiver and GNSS antenna) and a computing unit.

The inertial subsystem allows obtaining navigation estimates (coordinates and angles of rotation of the vehicle) with poor quality or the complete absence of the GNSS signal. The use of an excessive amount of inertial assemblies makes it possible to increase the accuracy of the inertial navigation subsystem by compensating for the errors of each



3. При первом включении устройства происходит определение начальных дрейфов гироскопов (bias), а также определение ориентации при помощи акселерометров (углы roll и pitch) и магнитометров (yaw). Для повышения точности вычисление начальной ориентации происходит по усредненной выборке за 5–10 секунд.
4. После завершения калибровки происходит непрерывный расчет траекторий движения и поворота для каждого инерциального датчика при помощи UKF-фильтра с 22-мерным вектором состояния [6]. Расчет ориентации производится на основе математики кватернионов для предотвращения проблемы gimbal lock. Зная взаимное расположение каждой инерциальной сборки, накладываются ограничения на вычисленные координаты при помощи фильтра Калмана и вносят коррекцию в результирующие координаты датчиков и в вектор ошибки фильтра. При наличии данных с одометра происходит коррекция вычисленной скорости в векторе состояния аналогичным образом.

Одновременно с вычислением навигационных оценок по данным инерциальной подсистемы вычислительный блок осуществляет прием и анализ данных с ГНСС-приемника. При «хорошем» уровне ГНСС-сигнала (СКО координаты в горизонтальной плоскости не превышает 0,1 м) выходными координатами совмещенной навигационной системы являются спутниковые координаты. В этом режиме происходит постоянная коррекция рассчитанных координат инерциальной подсистемы, а также корректировка курса по данным ГНСС при движении транспортного средства. Таким образом, реализовано отсутствие накопления ошибки подсистемой инерциальной навигации при наличии достаточного уровня ГНСС-сигнала. При ухудшении качества спутникового сигнала (при уменьшении СКО координаты менее 0,1 м) происходит бесшовное переключение выхода системы на инерциальную навигацию.

Существенной проблемой при использовании инерциальной навигации является компенсация дрейфа гироскопа со временем, а также hard iron и soft iron отклонения магнитометра при изменяющейся магнитной обстановке при движении

транспортного средства [7]. Как было сказано выше, дрейф гироскопа компенсируется по данным ГНСС-подсистемы (при достаточном качестве спутникового сигнала). Для корректировки данных магнитометра были реализованы специальные алгоритмы онлайн-калибровки, позволяющие компенсировать hard iron и soft iron поправки [8–11].

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве спутникового приемника был использован двухчастотный приемник компании Farwater с антенной компании Tallysman. Данный приемник позволяет работать в следующих режимах: одиночный, RTK и PPP с получением поправок спутниковых орбит через сеть Интернет. Обмен данными с вычислительным блоком реализован по протоколу BINR [12] по интерфейсу Ethernet. ГНСС-приемник имеет быстрое время старта (менее 1 минуты) и обеспечивает выдачу точных координат с темпом до 2 Гц.

Инерциальные сборки разработаны и собраны авторами самостоятельно на базе MEMS-датчиков и микроконтроллера компании NXP. Данные датчики обладают одними из лучших характеристик в своем классе, при этом имеют низкую стоимость. Интерфейс связи с вычислительным блоком реализован при помощи стандарта RS-485, обладающего достаточной пропускной способностью для передачи данных со сборок с частотой выборки 100 Гц и обеспечивающего помехозащищенную передачу данных на расстояния до 100 м (актуально при разнесенном расположении инерциальныхборок). На рис. 2 показаны фотографии разработанной инерциальной сборки.

Вычислительный блок реализован на основе микроконтроллера семейства STM32F407 с реализацией необходимых интерфейсов для подключения внешних устройств. Выбор данного микроконтроллера обусловлен его большой распространенностью, хорошей документированностью, а также достаточным быстродействием для выполнения необходимых математических операций в реальном времени.

На рис. 3 приведена фотография блока совмещенной системы навигации с установленными компонентами.

individual sensor for three others [3–5]. Each inertial assembly includes a 3-axis gyroscope, a 3-axis accelerometer, a 3-axis magnetometer, a microcontroller, and a transceiver of the data interface. Inertial assemblies measure linear accelerations and angular velocities with a frequency of up to 100 Hz and transmit data to the computing unit.

The GNSS subsystem is based on a dual-frequency GNSS receiver operating in PPP mode with a frequency of up to 10 Hz and ensuring an accuracy of determining the coordinates of at least 10 cm.

The computing unit receives data from all external devices, filters and calculates the coordinates of the inertial navigation system, decodes the GNSS data of the receiver, as well as timely switches from GNSS navigation to inertial and vice versa.

The calculation of the navigation estimates of the inertial navigation system is based on combining inertial sensor data with the vehicle odometer data (current speed). Below is a brief algorithm of the inertial navigation subsystem implemented in the computing unit:

1. Receiving data from four inertial assemblies.
2. Application of calibration corrections for the accelerometer, gyroscope and magnetometer individually for each sensor. Calibration corrections correct the non-orthogonality of the sensor axes, zero shifts, as well as scale factors. Calibration corrections were obtained on a calibration and measurement bench of our own design.
3. When the device is first turned on, the initial drifts of the gyroscopes (bias) are

determined, and the orientation is determined using accelerometers (roll and pitch angles) and magnetometers (yaw). To improve the accuracy, the calculation of the initial orientation occurs on the average sample for 5–10 seconds.

4. Upon completing calibration, a continuous calculation of the trajectories of motion and rotation for each inertial sensor is performed using a UKF filter with a 22-dimensional state vector [6]. Orientation calculations are made on the basis of quaternion mathematics to prevent the gimbal lock problem. Knowing the relative position of each inertial assembly, restrictions are imposed on the calculated coordinates using the Kalman filter and a correction is made to the resulting coordinates of the sensors and to the filter error

МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Проверка разработанной системы совмещенной навигации осуществлена на малогабаритной платформе, представляющей точную уменьшенную копию грузового транспортного средства с соблюдением кинематики и развесовки автомобиля-прототипа (рис. 4). Данная малогабаритная платформа специально разработана и реализована для задач тестирования систем навигации и автопилота и позволяет производить тестирование данных систем в различных режимах и условиях. Представленная модификация является моделью 5-осевого грузового автомобиля с тремя поворотными осями (две спереди и одна сзади). Для задач тестирования реализовано полное дистанционное, а также автономное управление всеми узлами ТС (рулевое управление по каждой оси, управление акселератором и торможением).

Были проведены отдельные серии экспериментов инерциальной навигации, а также совмещенной системы. Инерциальная система тестировалась путем проезда МГП по эталонной траектории протяженностью около 400 метров с рядом поворотов и разворотов с совпадающими начальной и конечной точкой движения. Оценка точности производилась путем вычисления величины отклонения рассчитанной траектории и, как следствие, конечной точки маршрута от места старта. На рис. 5 представлены результаты тестирования инерциальной навигации.

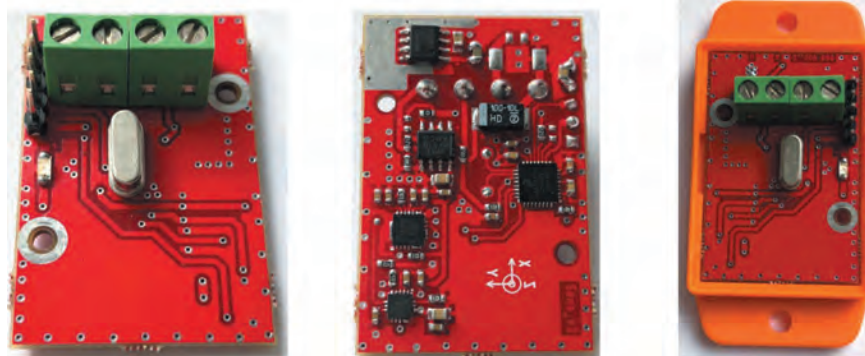


Рис. 2. Фотографии разработанной инерциальной сборки с 3-осевым гироскопом, акселерометром, магнитометром и интерфейсом связи RS485: а — вид сверху, б — вид снизу, в — вид сверху, установленный в корпус

Fig. 2. Photos of the developed inertial assembly with a 3-axis gyroscope, accelerometer, magnetometer and RS485 communication interface: a — top view, b — bottom view, c — top view mounted in the housing

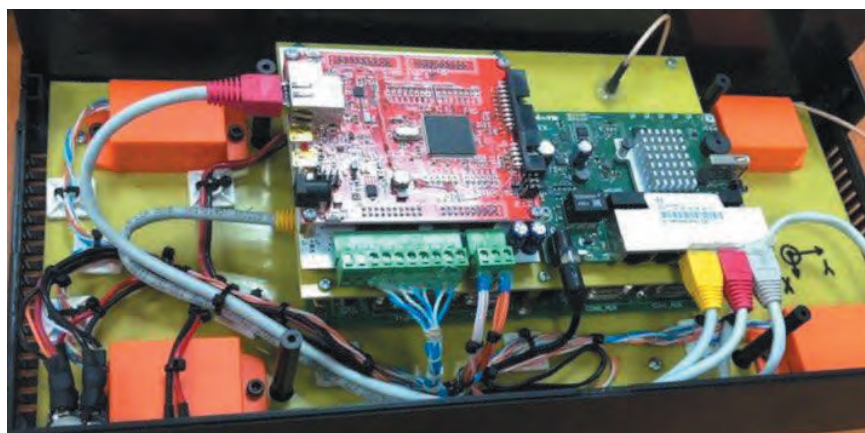


Рис. 3. Фотография блока совмещенной системы навигации

Fig. 3. Photo of the combined navigation system block

vector. If there are data from the odometer, the calculated speed is corrected in the state vector in the same way.

Simultaneously with the calculation of navigation estimates based on the data of the inertial subsystem, the computing unit performs reception and analysis of data from the GNSS receiver. With a “good” level of GNSS signal (the standard deviation of coordinates in the horizontal plane does not exceed 0.1 m), the output coordinates of the combined navigation system are satellite coordinates. In this mode, there is a constant correction of the calculated coordinates of the inertial subsystem, as well as the course correction according to GNSS data when the vehicle is moving. Thus, the absence of error accumulation by the inertial navigation subsystem with a sufficient level of GNSS signal

is realized. With the deterioration of the quality of the satellite signal (with a decrease in the mean-square deviation of coordinates less than 0.1 m), the system output is switched seamlessly to inertial navigation.

A significant problem with the use of inertial navigation is the compensation for the gyroscope’s drift with time, as well as hard iron and soft iron deviations of the magnetometer with a changing magnetic environment during the vehicle movement [7]. As mentioned above, the gyroscope drift is compensated for according to the GNSS data of the subsystem (with sufficient satellite signal quality). To correct the magnetometer data, special on-line calibration algorithms were implemented, allowing compensating for hard iron and soft iron corrections [8–11].

HARDWARE IMPLEMENTATION

As a satellite receiver, a two-frequency Farwater receiver with a Tallysman antenna was used. This receiver allows you to work in the following modes: single, RTK and PPP to receive satellite orbit corrections via the Internet. Data exchange with the computing unit is implemented via the BINR protocol [12] via the Ethernet interface. The GNSS receiver has a quick start time (less than 1 minute) and provides accurate positioning at a rate of up to 2 Hz.

Inertial assemblies are designed and assembled by the authors independently based on the MEMS sensors and a microcontroller of the NXP Company. These sensors have one of the best characteristics in their class, while having low cost. The communication interface with the



Рис. 4. Фотография малогабаритной платформы для задач тестирования

Fig. 4. Photo of a small-sized platform for testing tasks

Результаты тестирования показали хорошую достоверность получаемых траекторий, максимальное отклонение от начальной точки составило не более 1 метра (что составляет менее 1% на траектории протяженностью 400 м).

Было выявлено, что основным источником уменьшения точности является неучитываемый дрейф гироскопа (в данном тесте дрейф гироскопа намеренно не компенсировался по данным ГНСС навигации), который приводит к ошибке определения угла курса транспортного средства и, следовательно, уходу траектории от истинной. Попытка компенсировать дрейф гироскопа по данным магнитометра не дает существенного улучшения данных, т. к. примененный метод

computing unit is implemented using the RS-485 standard, which has sufficient bandwidth for transmitting data from assemblies with a sampling frequency of 100 Hz and providing anti-interference data transmission up to 100 m (relevant for the spaced arrangement of inertial assemblies). Figure 2 shows photographs of the developed inertial assembly.

The computing unit is based on a microcontroller of the STM32F407 family with the implementation of the necessary interfaces for connecting external devices. The choice of this microcontroller is due to its high prevalence, good documentation, as well as sufficient speed to perform the necessary mathematical operations in real time.

Figure 3 shows a photograph of a block of a combined navigation system with installed components.

MODEL EXPERIMENT

The verification of the developed combined navigation system was carried out on a small platform representing an exact reduced copy of a cargo vehicle in compliance with the kinematics and weight of the prototype vehicle (Fig. 4). This small-sized platform is specially designed and implemented for the tasks of testing navigation systems and autopilot and allows testing these systems in various modes and conditions. The presented modification is a model of a 5-axial truck with three rotary axles (two front and one rear). For testing tasks, full remote control, as well as autonomous control, of all vehicle nodes (steering on each axis, accelerator and braking control) is implemented.

Separate series of inertial navigation experiments and a combined system were conducted. The inertial system was tested using the vehicle that follows a reference trajectory

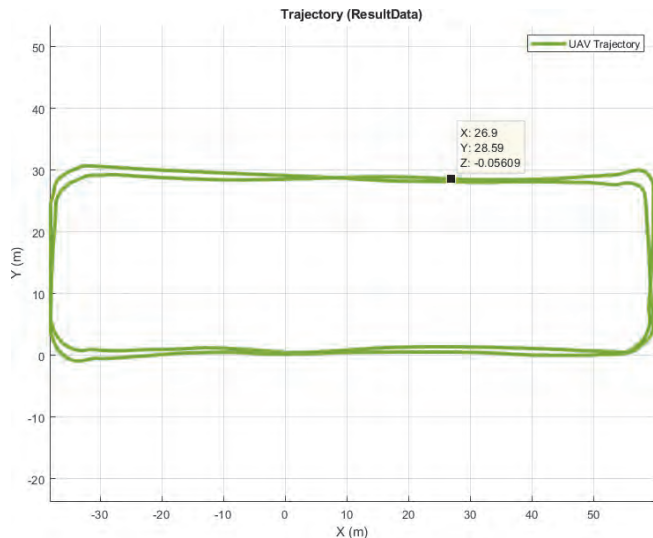


Рис. 5. Результаты тестирования системы инерциальной навигации
Fig. 5. Results of testing the inertial navigation system

онлайн-калибровку магнитометра не позволяет осуществлять калибровку при прямолинейном движении ТС. Другим источником неточности являются неточные одометрические данные с автомобиля.

Тестирование совмещенной системы навигации было проведено на специальном полигоне, где траектория движения транспортного средства проходила как по открытым участкам, где доступен сигнал ГНСС, так и по закрытым участкам (ангар), где сигнал от спутниковой навигации был недоступен. На рис. 6 приведены результаты тестирования.

На рис. 6 цветом обозначены режимы работы системы навигации: синий — координаты вычисляются на основе ГНСС-данных, красный — координаты вычисляются на основе инерциальных данных. Тестирование показало полную работоспособность разработанной системы навигации, обеспечивающей бесшовный переход с одной системы навигации на другую.

about 400 meters long with a number of turns and U-turns with the same starting and ending points of motion. The accuracy was estimated by calculating the deviation of the calculated trajectory, and as a result, the final point of the route from the start point.

Figure 5 shows the results of testing inertial navigation.

The test results showed good reliability of the trajectories obtained, the maximum deviation from the starting point being no more than 1 meter (which is less than 1% on a trajectory 400 m long).

It was found that the main source of reduction in accuracy is neglect of the gyroscope drift (in this test, the gyroscope drift was intentionally not compensated for by GNSS navigation), which leads to an error in determining the course angle of the vehicle, and, therefore, the trajectory drifts from the true

Восстановленная траектория демонстрирует достоверность определения начальной ориентации транспортного средства, а также сброс накопленной ошибки инерциальной подсистемы навигации при восстановлении спутниковых данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты.

1. Разработана и протестирована четырехточечная инерциальная система навигации, позволяющая повысить точность и достоверность получаемых траекторий движения транспортного средства. В модельных экспериментах погрешность отклонения восстановленной траектории от истинной составила порядка 1% от пройденного расстояния.
2. Протестирован режим PPP спутникового навигационного приемника, обеспечивающего точность определения координат до 0,3 м.
3. Разработана и реализована совмещенная система навигации с бесшовным переходом со спутниковой навигации на инерциальную и наоборот. Реализованы алгоритмы калибровки одометрических данных, определения начального курса транспортного средства, а также алгоритмы компенсации дрейфов ИНС по данным спутниковой навигации.

Тестовые эксперименты выявили недостатки примененных алгоритмов, а именно невозможность компенсации дрейфа гироскопа во время отсутствия сигналов ГНСС и, следовательно, накопление ошибки по ориентации транспортного средства, а также невозможность онлайн-калибровки магнитометра при движении по прямолинейным траекториям. Для устранения данных недостатков планируется модернизация подсистемы инерциальной навигации с установкой инерциальных сборок на вращающуюся платформу, что позволит непрерывно осуществлять компенсацию данных магнитометра независимо от текущей траектории движения, а также позволит снизить влияние дрейфа гироскопа, применив известные методы компенсации для вращающихся гироскопов [13, 14].

one. An attempt to compensate for the gyroscope drift according to the magnetometer data does not provide a significant improvement in the data, since the applied method of online calibration of the magnetometer does not allow calibration with rectilinear motion of the vehicle. Another source of inaccuracy is inaccurate vehicle odometer data.

The combined navigation system was tested at a special test site, where the vehicle's trajectory passed through both open areas, where the GNSS signal is available, and closed areas (hangar), where the signal from satellite navigation was unavailable.

Figure 6 shows the test results.

In Fig. 6, the navigation system operation modes are indicated by color: blue — coordinates are calculated based on GNSS data, red — coordinates are calculated based on inertial data. Testing has shown the

complete working capacity of the developed navigation system, providing a seamless transition from one navigation system to another. The reconstructed trajectory demonstrates the accuracy of determining the initial orientation of the vehicle, as well as resetting the accumulated error of the inertial navigation subsystem when restoring satellite data.

CONCLUSIONS

The authors believe that the following provisions and results are novel:

1. A four-point inertial navigation system has been developed and tested, which allows increasing the accuracy and reliability of the obtained trajectories of the vehicle. In model experiments, the deviation error of the reconstructed trajectory from the true one was about 1% of the distance traveled.

GPS/GNSS module with IMU integration

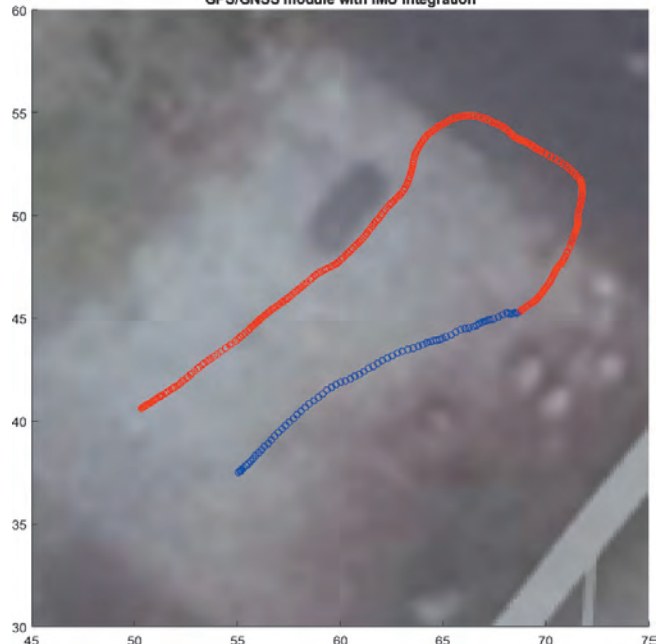


Рис. 6. Результаты тестирования совмещенной системы навигации
Fig. 6. Results of testing the combined navigation system

ЛИТЕРАТУРА

1. Vivacqua R., Vassallo R., Martins F. *A low cost sensors approach for accurate vehicle localization and autonomous driving application* // Sensors. 2017. Vol. 17(10).
2. Nastro L. *Position and orientation data requirements for precise autonomous vehicle navigation* // Proceedings of the XXIst ISPRS Congress. 2008. Vol. XXXVII(1). P. 1237–1242.
3. Bancroft J. B., Lachapelle G. *Data fusion algorithms for multiple inertial measurement units* // Sensors. 2011. Vol. 11(7). P. 6771–6798.
4. Vaccaro R. J., Zaki A. S. *Reduced-drift virtual gyro from an array of low-cost gyros* // Sensors. 2017. Vol. 17(2).

2. The PPP mode of the satellite navigation receiver was tested, which ensures the accuracy of determining the coordinates up to 0.3 m.
3. A combined navigation system with a seamless transition from satellite navigation to inertial navigation and vice versa has been developed and implemented. Plus the algorithms for calibrating odometric data, determining the initial course of the vehicle, as well as algorithms for compensating for the ANN drifts using satellite navigation data.

Test experiments have revealed the shortcomings of the applied algorithms, namely: the impossibility of compensating for the gyroscope drift during the absence of GNSS signals and, therefore, the error accumulation in the orientation of the vehicle, as well as the impossibility of online calibration of the magnetometer when driving along straight-line trajectories.



5. Jafari M. *Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system* // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 47. P. 467–472.
6. Yuan X., Yu S., Zhang S., Wang G., Liu S. *Quaternion-based unscented kalman filter for accurate indoor heading estimation using wearable multi-sensor system* // Sensors. 2015. Vol. 15(5). P. 10872–10890.
7. Jonas C., Törnqvist D., Gustafsson F. *Robust heading estimation indoors using convex optimization* // Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. 2013. P. 1173–1179.
8. Renaudin V., Afzal M. H., Lachapelle G. *New method for magnetometers based orientation estimation* // IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium. 2010. P. 348–356.
9. El-Diasty M. *An Accurate Heading Solution using MEMS-based Gyroscope and Magnetometer Integrated System (Preliminary Results)* // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. 2(2). P. 75–78.
10. Kok M., Schon T. B. *Magnetometer calibration using inertial sensors* // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16(14). P. 5679–5689.
11. Malyugina A., Igudesman K., Chickrin D. *Least-squares fitting of a three-dimensional ellipsoid to noisy data* // Applied Mathematical Sciences. 2014. Vol. 8(149–152). P. 7409–7421.
12. BINR interface protocol specification Ver. 1.3 // GLONASS / GPS / GALILEO / COMPASS / SBAS NV08C receiver series / NAVIS Inc. 2012. URL: <http://www.nvs-gnss.com/support/documentation/item/download/39.html>.
13. Wu Z., Sun Z., Zhang W., Chen Q. *Attitude and gyro bias estimation by the rotation of an inertial measurement unit* // Measurement Science and Technology. 2015. Vol. 26(12).
14. Ruizenaar M. G. H., Kemp R. A. W. *DriftLess™, an innovative method to estimate and compensate for the biases of inertial sensors* // Proceedings of the ENC-GNSS 2014, the European Navigation Conference. 2014.

To eliminate these shortcomings, it is planned to upgrade the inertial navigation subsystem with the installation of inertial assemblies on a rotating platform, which will allow continuous compensation for the magnetometer data regardless of the current motion path, and will also reduce the influence of the gyro drift using the known compensation methods for rotating gyros [13, 14].

REFERENCE

1. Vivacqua R., Vassallo R., Martins F. *A low cost sensors approach for accurate vehicle localization and autonomous driving application* // Sensors. 2017. Vol. 17(10).
2. Nastro L. *Position and orientation data requirements for precise autonomous vehicle navigation* // Proceedings of the XXIst ISPRS Congress. 2008. Vol. XXXVII(1). P. 1237–1242.
3. Bancroft J. B., Lachapelle G. *Data fusion algorithms for multiple inertial measurement units* // Sensors. 2011. Vol. 11(7). P. 6771–6798.
4. Vaccaro R. J., Zaki A. S. *Reduced-drift virtual gyro from an array of low-cost gyros* // Sensors. 2017. Vol. 17(2).
5. Jafari M. *Optimal redundant sensor configuration for accuracy increasing in space inertial navigation system* // Aerospace Science and Technology. 2015. Vol. 47. P. 467–472.
6. Yuan X., Yu S., Zhang S., Wang G., Liu S. *Quaternion-based unscented kalman filter for accurate indoor heading estimation using wearable multi-sensor system* // Sensors. 2015. Vol. 15(5). P. 10872–10890.
7. Jonas C., Törnqvist D., Gustafsson F. *Robust heading estimation indoors using convex optimization* // Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion. 2013. P. 1173–1179.
8. Renaudin V., Afzal M. H., Lachapelle G. *New method for magnetometers based orientation estimation* // IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium. 2010. P. 348–356.
9. El-Diasty M. *An Accurate Heading Solution Using MEMS-based Gyroscope and Magnetometer Integrated System (Preliminary Results)* // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. 2(2). P. 75–78.
10. Kok M., Schon T. B. *Magnetometer calibration using inertial sensors* // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16(14). P. 5679–5689.
11. Malyugina A., Igudesman K., Chickrin D. *Least-squares fitting of a three-dimensional ellipsoid to noisy data* // Applied Mathematical Sciences. 2014. Vol. 8(149–152). P. 7409–7421.
12. BINR interface protocol specification Ver. 1.3 // GLONASS/GPS/GALILEO/COMPASS/SBAS NV08C receiver series / NAVIS Inc. 2012. URL: <http://www.nvs-gnss.com/support/documentation/item/download/39.html>.
13. Wu Z., Sun Z., Zhang W., Chen Q. *Attitude and gyro bias estimation by the rotation of an inertial measurement unit* // Measurement Science and Technology. 2015. Vol. 26(12).
14. Ruizenaar M. G. H., Kemp R. A. W. *DriftLess™, an innovative method to estimate and compensate for the biases of inertial sensors* // Proceedings of the ENC-GNSS 2014, the European Navigation Conference. 2014.

ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
www.technosphere.ru

ЭЛЕКТРОНИКА НАНОИНДУСТРИЯ ФОТОНИКА ПЕРВАЯ МИЛЯ Аналитика СТАННОИНСТРУМЕНТ

Цифровая экономика