

ИНТЕГРИРАНА ИНЕРЦИАЛНА И НАВИГАЦИОННА СИСТЕМА С ПОВИШЕНА ТОЧНОСТ

Емил Йончев¹⁾, Росен Милетиев²⁾, Лъчезар Христов¹⁾
[e iontchev@yahoo.com](mailto:iontchev@yahoo.com), miletiev@tu-sofia.bg, Lachezar.Hristov@outlook.com

*1) Висше транспортно училище "Тодор Каблешков",
гр. София, ул. „Гео Милев" 158
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

*2) Технически Университет – София
София 1000, бул. "Кл. Охридски" 8*

Ключови думи: *навигационен приемник, диференциална навигация, микроконтролер, акселерометър, жирокоп, магнитометър*

Резюме: *Базовите функции на глобалните навигационни спътникови системи (ГНСС) са да доставят точните географски координати на обекти, техните скорости и точно време. Точността на определяне на тези параметри зависи от: броя налични спътникови сигнали; използват ли се сигнали от допълващи системи; използваните методи за обработка на получените данни; интегритета на системата; непрекъснатостта на сигналите по време на определяне на позицията и други.*

В статията е представена инерциална система с възможност за измерване на ускорение, ъглова скорост, стойност на магнитното поле, атмосферно налягане. Всичките тези данни, се маркират с географските координати на мястото където са измерени и точното време, кога се е случило събитието. За повишаване точността на определяне на координатите е използван навигационен приемник, който работи в няколко честотни ленти, в които са разположени навигационни сигнали от четири ГНСС, QZSS и сигнали от спътникови допълващи системи. В допълнение има възможност да работи като използва диференциален и/или фазов метод. Избран е метод за получаване на диференциалните корекции от отдалечен сървър (caster) чрез използване на мобилна мрежа и предвидения за тази цел протокол Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP). Със системата са проведени експерименти с и без използване на допълнителни данни за диференциална корекция и RTK режим. Сравнена е получената точност на системата в двата случая.

ВЪВЕДЕНИЕ

Определяне на точното местоположение на обекти в пространството, параметрите, характеризиращи движението им в това пространство, както и точното време кога се случват отделните събития, са задачи които се поставят в много области от човешкия живот. Точността, навременното получаване на данни за правилното

функциониране на системата, както и непрекъснато получаване на навигационните данни, е от съществено значение при приложения свързани с безопасността на човешкия живот [1], [2], [3]. В други приложения като в геодезията [4], при управлението на обекти, при измервания за състоянието на транспортна инфраструктура [5], [6], изискванията са само към точността и непрекъснатото получаване на данните. Различни методи за повишаване на точността могат да бъдат използвани, като всеки от тях се характеризира, с различен брой на използваните елементи за неговото реализиране и цена. Съвсем грубо методите могат да се обединят в две групи. Едната група методи са свързани с използването само на навигационни приемници(НП), които могат да работят със сигнали от различни ГНСС. Втората група методи включва освен кодовите измервания и използване на диференциални корекции и/или допълнителни данни от сензори участващи в инерциална система. Към тази група могат да се отнесат методите за диференциална навигация, основани на използване на фазата на носещата честота.

В статията е направено кратко представяне на основните параметри, влияещи върху точността за определяне на местоположението на обект и използваните методи за намаляване на тяхното влияние. На тази база е направен избор на елементите за навигационна система и конкретен сценарий за работа, измежду няколко възможни такива. Предназначението на системата е да предава необходимите географски координати и време на микроконтролера за маркиране на суровите данни, получени от инерциалната система, измерваща динамични характеристики на тяло в пространството.

МЕТОДИ ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ТОЧНОСТТА ПРИ ОПРЕДЕЛЯНЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЕТО НА ОБЕКТ

Изчисляването на разстоянието между навигационния приемник и поне четири спътника, на базата на псевдослучайни кодови комбинации е базовият метод за определяне на местоположението на обект.

Точността на позицията и времето, определени от НП, се определя като произведение между геометричен фактор и параметър, определен от грешката в определяне на псевдоразстоянието (User equivalent range error (UERE)): Геометричният фактор отразява комплексния ефект на относителното геометрично положение спътник-потребител в грешката на решението. Той се изразява с параметъра понижаване на точността (Dilution of Precision - DOP).

Допуска се, че UERE е независима и с еднакво разпределение от спътник към спътник. Определя се с израза (1):

$$(1) \sigma_{UERE} = \sqrt{\sigma_{сч}^2 + \sigma_{еф}^2 + \sigma_{\text{йоносф.}}^2 + \sigma_{\text{тропоф.}}^2 + \sigma_{\text{многопътност}}^2 + \sigma_{\text{нпч}}^2 + \sigma_{\text{шум}}^2}$$

Където : σ_{xx}^2 – са грешките внасяни от различните източници на грешки.

От всички посочени източници на грешки с най-голям дял в общата грешка е влиянието на йоносферата върху разпространението на навигационните сигнали. Намаляване на това влияние и свеждането му до минимум се постига с използване на двучестотни навигационни приемници.

Влиянието на геометричният фактор върху грешката може да бъде намалено чрез наличието на повече навигационни спътници, от които НП да избере оптимално съзвездие. Този параметър може да бъде подобрен с използване на навигационен приемник с възможност за работа със сигнали от няколко ГНСС.

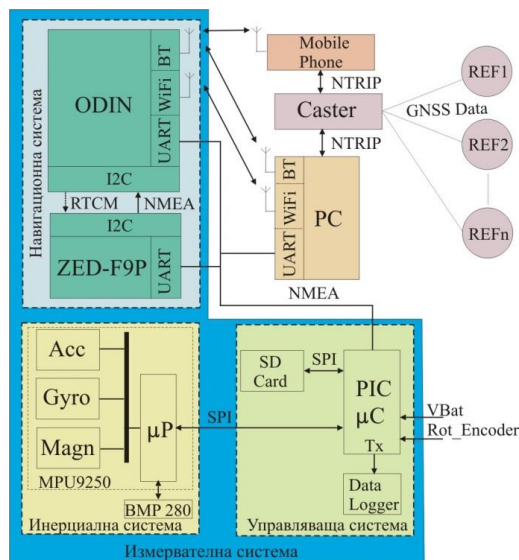
Методът базиран на измерване на разстоянието, чрез измерване на промяната на фазата на носещата честота на навигационния сигнал, преминал разстоянието между спътника и НП, се характеризира с по-висока точност, но изисква и повече компоненти

в системата и по-сложна обработка на получените данни. Известен е с името фазов метод. Точността, която може да бъде постигната с него, зависи от дължината на вълната на използвания сигнал. Проблем при този метод е, че трябва да се определят броят цели цикли на носещата честота, която има много малка дължина. За определянето им има разработени методи, които най-общо може да бъдат разделени на статични(с последваща обработка) и кинематични(динамични) работещи в реално време Real-time kinematic(RTK). Към тях се отнасят и мрежовите кинематични методи. Те се реализират чрез мрежова инфраструктура, състояща се от референтни станции(REF), свързани по различни комуникационни канали със сървъри, които от своя страна са свързани с контролен изчислителен център(caster). Те осигуряват работа с висока точност на значително по-големи разстояния от референтните станции.

За предаване на данните, подготвени в диференциалните системи, има няколко формата. Най-често се използва стандарта RTCM SC-104. Той има няколко версии, като версия 10.1 е протокол за предаване на диференциални корекции през Интернет, известен с абревиатурата NTRIP.

ИНТЕГРИРАНА ИНЕРЦИАЛНА И НАВИГАЦИОННА СИСТЕМА С ПОВИШЕНА ТОЧНОСТ

Предложената система се състои от три подсистеми: инерциална, навигационна; управляваща. Инерциалната и управляващата са реализирани на базата на системата



Фиг. 1. Измервателна система

предложена в източник [7]. Навигационната система е изцяло нова, с разширени възможности, респективно и с по-добри параметри. Блоквата схема на системата е показана на фигура 1.

Инерциалната е реализирана на базата на система за проследяване на движението MPU9250. Към нея по I2C шина е свързан барометър BMP280. Инерциалната система има десет степени на свобода. Управляващата е реализирана на базата на осем битовия микроконтролер PIC18F25K22-I/PT. Комуникацията му с инерциалната система се извършва по SPI шината, което дава възможност данните да се предават със скорост 1 или 20MHz. Връзката му с навигационната система може да се осъществи по UART или I2C шини. Основното предназначение на управляващата система е да записва данните от инерциалната съвместно с данните от навигационното съобщение. Към всяко едно съобщение е предвидено да се записват по 21 пакета инерциални данни.

На база на разгледаните методи за повишаване на точността, за реализирането на навигационната система, е избран навигационният приемник ZED-F9P на фирмата u-blox. Той може да работи в няколко честотни ленти, в които са разположени навигационни сигнали от четири ГНСС, фигура 2 [8].

ZED-F9P осигурява измерване на разстоянието спътник-НП, освен с кодови последователности и чрез фазата на носещата честота, за всяка една от системите.

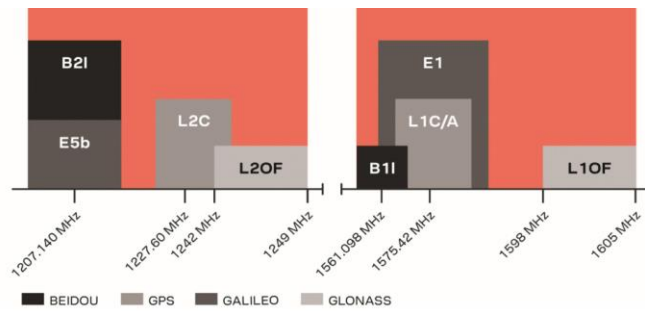
Поддържаните протоколи за обмяна на навигационна информация са NMEA до 4.11, UBX и RTCM 3.3. Наличните комуникационните интерфейси за връзка с други системи са UART, SPI, I2C и USB.

Фирмата u-blox предлага система за развитие C099-F9P, която съвместно със софтуера u-center предоставят възможности за настройка на различните режими на ZED-F9P. В C099-F9P, освен навигационния приемник е интегриран и модул ODIN, който осигурява връзки с други устройства чрез Bluetooth(BT) и WiFi. Това увеличава възможностите за използване на ZED-F9P в различни приложения.

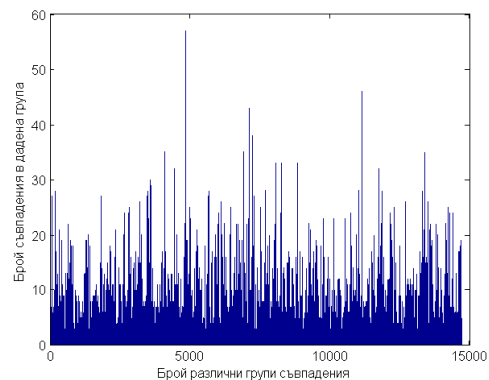
В системата е използван RTK режим с подвижна база, който се поддържа от базовият софтуер на ZED-F9P. Този режим осигурява възможност за определяне на относителното положение на подвижния НП, спрямо базата и възможност за определяне на пространственото положение на тяло с използване на три приемни антени, разположени по трите оси на обекта[9]. Направлението и разстоянието между антените на подвижния НП и базата се доставя със съобщението UBX-NAV-RELPOSNED. Необходимите корекции, изпращани от базовата станция, могат да бъдат получени от местни такива или от виртуални референтни станции (VRS), част от мрежови RTK. Избран е вариант те да бъдат получавани по интернет чрез протокола NTRIP. За този сценарий е необходим персонален компютър(PC) и програма клиент, която да получи корекциите и предаде на НП. Такъв клиент има вграден в програмата u-center, която е предназначена за тестване и оценка на характеристиките на НП. Получените корекции се предават на ZED-F9P по безжичен път или през UART интерфейс. Клиент за NTRIP протокола има и за операционната система Android. Корекциите в този случай се предават към ZED-F9P посредством Bluetooth връзка [10]. Други възможни сценарии на работа са описани в [11].

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

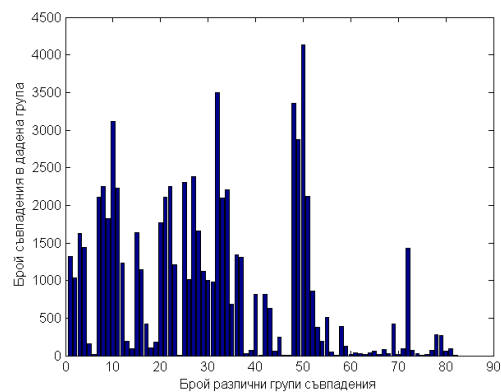
Основният акцент в предлаганата система е да се повиши точността на определяне на географските координати. За да се провери как се променя този параметър с и без използване на диференциални корекции и RTK, са проведени статични и динамични измервания. В



Фиг. 2. Честотни ленти

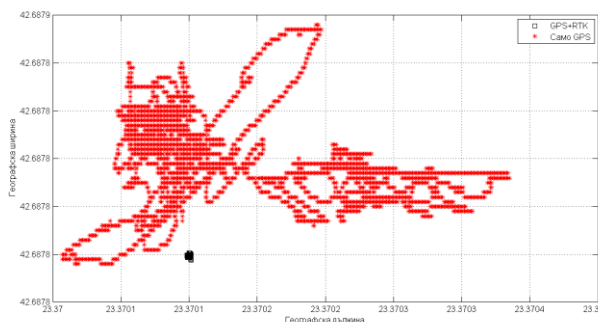


Фиг. 3. Брой различни групи при режим - само GPS



Фиг. 4. Брой различни групи

статията са показани данните от статичните измервания. Те са получени в продължение на два часа и в двата случая (само с GPS и GPS + RTK) антената е била в едно и също положение. Честотата на НП е 10 Hz, което при продължителност на запис от 2 часа, създава матрица от 72000 реда с географски координати. Критерий за точност на даден режим е броят отчети с еднакви координати измежду получените данни. Този брой е намерен и за двете матрици с географски координати. Предвид, че те се различават в някаква област (въпреки, че е добре всичките да са еднакви) са оформени различни групи с еднакви координати. Колкото е по-малък броят на тези групи толкова по-точна е системата. Резултатите от определянето на броя групи и съответно колко пъти се срещат конкретните координати в групите, са показани на фигура 3 и 4. На база на събраните данни е изчертано местоположението на антената при двата режима, фигура 5. Разликата в точността постигната при двата режима е очевидна.



Фиг. 5. Сравнение на точността при двата режима

Оценената точност с параметъра СЕР (Вероятна кръгова грешка), получен с използване на функциите на u-center, съответно при използване на RTK режим, е 0.06m.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изборът на ZED F9P позволи да се реализира навигационна система с повишена точност и с възможност за работа при различни режими. При RTK режим на работа с подвижна база се осигурява точност в сантиметровия обхват. Това удовлетворява поставените изисквания за географско маркиране на инерциалните данни. Следващата стъпка е управляващата система да бъде реализирана на базата на система за вграждане от типа на Raspberry Pi. На същата ще може да бъде качена операционна система Linux, за която има версия на u-center. Така тя ще стане напълно независима и няма да има необходимост от персонален компютър или мобилен телефон.

БЛАГОДАРНОСТ

Представената измервателна система с повишена точност е част от Научно изследователски проект по Договор № 86/20.05.2020г., с възложител ВТУ „Тодор Каблешков”.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Неделчев Н., Възможности за използване на глобално позициониране в железопътната осигурителна техника, Механика Транспорт Комуникации, брой 3, 2011г., статия № 0599, ISSN 1312-3823
- [2] Неделчев Н., Н. Кънев, Двуканална навигационна спътникова система, Механика Транспорт Комуникации, том 11, брой 3, 2013г., статия № 0873, ISSN 1312-3823
- [3] Ivanov I, S. Vetova, G. Stanchev, Cryptographic Algorithm IDA for Security and Data Storage Increase in the Integrated Application of the European System "Ecall" For Automatic Emergency Calls in Car Accidents, IJEIT - Impact Factor: 2.137, Volume 4, Issue 12, June 2015, pp. 10 – 13, ISSN: 2277-3754
- [4] Ivanov R., Engineering surveying and deformation surveys, Monograph, Sofia, 2020, ISBN 978-954-12-0272-2

- [5] Иванов Р., Ем. Йончев, П. Пискулев, Н. Бабунска-Иванова, Определяне геометрията на автомобилни пътища с GPS, акселерометър и одомертър, “Механика, транспорт, комуникации”, бр. 3, 2009 стр. V-27-31, София.
- [6] Iontchev E., Simeonov Iv., Miletiev R., GSM/GPS/INS system for urban railway monitoring based on mems inertial sensors, Proceedings of the 22nd Micromechanics and Microsystems Technology Europe Workshop, Tonsberg, Norway, 19-22 June 2011, pp D81
- [7] Miletiev R., P. Kapanakov, E. Iontchev, R. Yordanov, High sampling rate IMU with dual band GNSS receiver, 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), May 14-15, 2020, Web-based Conference – Slovakia, ISBN: 978-80-553-3529-2, pp 156-157, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9121131>
- [8] https://www.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P_ProductSummary_%28UBX-17005151%29.pdf
- [9] https://www.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9P_MovingBase_AppNote_28UBX-19009093_29.pdf
- [10] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lefebure.ntripclient>
- [11] https://www.u-blox.com/sites/default/files/C099-F9P-AppBoard-ODIN-W2-uCX_UserGuide_%28UBX-18055649%29.pdf

INTEGRATED INERTIAL AND NAVIGATION SYSTEM WITH INCREASED ACCURACY

Emil Iontchev¹⁾, Rosen Miletiev²⁾, Lachezar Hristov¹⁾

**1) Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.**

THE REPUBLIC OF BULGARIA

**2) Technical University of Sofia
8 Kl. Ohridski Blvd, 1000, Sofia,
BULGARIA**

Keywords: *navigation receiver, differential navigation, microcontroller, accelerometer, gyroscope, magnetometer*

Abstract: *The base functions of the global navigation satellite systems (GNSS) are to deliver the exact geographical coordinates of objects, their speeds and exact time. The accuracy of determining the base parameters depends: on the number of satellite signals available; whether signals from complementary systems are used; the methods used to process the received data; the integrity of the system; the continuity of signals during positioning and etc. The article presents an inertial system with the ability to measure acceleration, angular velocity, magnetic field value and atmospheric pressure. All these data are marked with a geographical coordinates of the place where they were measured and also the exact time when the event occurred. To increase the accuracy of determining the coordinates, a navigation receiver was used, which works in several frequency bands, in which navigation signals from four GNSS, QZSS, and signals from the satellite complementary systems. It has the ability to operate in differential RTK mode, acting as a base station or a rover. The method for receiving the differential correction from a remote database (caster) using a mobile network and protocol NTRIP provided for this purpose has been chosen. Experiments were performed with the system using additional data for differential correction and without these data. The obtained accuracy of the system was compared in both cases.*