

МОНИТОРИНГ НА ПРОДЪЛЖИТЕЛНИ ДЕФОРМАЦИИ В СТРОИТЕЛНИ СЪОРЪЖЕНИЯ НА БАЗАТА НА ИНЕРЦИАЛЕН МОДУЛ ЗА АБСОЛЮТНА ОРИЕНТАЦИЯ

Емил Йончев¹⁾, Росен Милетиев²⁾, Лъчезар Христов¹⁾, Тодор Тодоров¹⁾
e_ionchev@yahoo.com, miletiev@tu-sofia.bg, Lachezar.Hristov@outlook.com,
t.todorov@valbis.com

- ¹⁾ *Висше транспортно училище “Тодор Каблешков”,
ул. “Гео Милев”, 158, София 1574*
²⁾ *Технически Университет – София
София 1000, бул. “Кл. Охридски” 8
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: акселерометър, жирооскоп, магнитометър, инклинометър, инерциален измервателен модул, ъгли на Ойлер, кватерниони, Raspberry Pi

Резюме: Измерване на деформации на строителни съоръжения (язовирни стени, подпорни стени и др.) и геодинамични процеси (свлачища, сипеи, срутища), с цел своевременно установяване на започнал процес на преместване и загуба на устойчивост и вземане на мерки за предотвратяването им, се извършва на базата на събиране и анализ на данни от няколко вида сензори. За максимална достоверност на получените резултати е необходимо внимателно подбиране на видовете сензори и тяхното разполагане на обекта.

В статията е предложен метод за оценяване промяна в положението на измервателен стълб. Когато бъде регистрирана промяна в положението му, тя се използва като сигнал за започнал нежелан процес. За целта е използван инерциалния измервателен модул за абсолютна ориентация VNO055 на фирмата Bosch. Същият в реални условия следва да е закрепена към стълб забит дълбоко в наблюдаван участък. За да се оцени чувствителността и стабилността на данните получавани от модула, е използвана опитна постановка, която позволява промяна в положението му през определен брой ъгли градуси. VNO055 се свързва посредством I2C интерфейс към платформата Raspberry Pi, където се обработват и записват получените данни. Промяната на положението на тялото се оценява чрез ъглите на Ойлер или от кватерниони, получавани директно на изхода на модула. За да се изпълни условието за наблюдение на обекта в няколко различни точки, е предвидена възможност идентични модули да се свързват помежду си чрез ZigBee мрежа и да предават събраните данни към координатора на мрежата. Той има връзка към интернет мрежата, като по този начин се осигурява възможност и за дистанционно наблюдение на данните от отделните модули.

ВЪВЕДЕНИЕ

Деформациите представляват малки премествания на цяло съоръжение или на части от него, вследствие промени в земната основа, породени от напрежения и натоварвания от околната среда или вследствие на експлоатацията. Всъщност това е крайният резултат на процеси, които са започнали много преди това и са се появили при създаване на съответните благоприятни условия. С развитие на технологиите се създават възможности за наблюдаване на определени параметри на съоръженията и на тази база да се вземат превантивни мерки за тяхното обезопасяване.

За да се определи започнал процес на деформации в дадена структура, се разчита на системи включващи сензори, използвани в геодезията, в геотехниката и метеорологията. Типът и броят на сензорите, които ще събират необходимите данни, зависи от характеристиките на изследваното съоръжение.

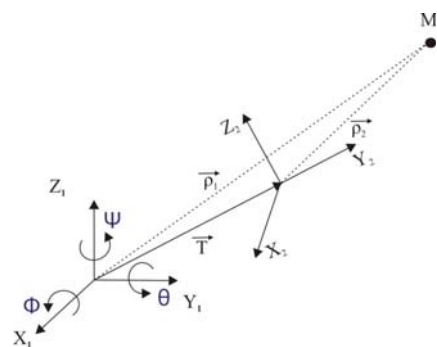
Най-често използваните сензори в геодезията са тотални станции и спътникови навигационни приемници [1, 2]. В зависимост от използваната технология за определяне на географските координати има възможност системата да е реализирана само с едночестотен навигационен приемник и специализиран софтуер за обработка на получените данни за получаване на прецизно определяне на координатите [3, 4, 5]. Друга възможност е да се използва мрежа от навигационни приемници, които може да са едночестотни или двучестотни [7]. Съчетаването на високоточни инклинометри с навигационни приемници дава по-пълна картина за случващите се процеси в изследвания обект [8]. Инклинометрите намират широко приложение за измерване на деформации при свлачища, пълзене от естествен наклон, временни изкопи, земни и скални насипи [9]. Обикновено измерват наклона по една или две оси и се характеризират с висока точност и цена [10].

В статията се предлага метод за оценяване на деформациите, като скъпо струващия инклинометър е заменен от инерциална измервателна единица(система върху един кристал) BNO055 на фирмата Bosch. Тя има възможност да измерва положението на тяло в тримерно пространство спрямо референтна координатна система по няколко различни начина. Прилага се допълнителна обработка на получените данни с цел повишаване на точността и надеждността на получените резултати.

ОСНОВНИ МАТЕМАТИЧЕСКИ ЗАВИСИМОСТИ, ОПИСВАЩИ ПОЛОЖЕНИЕ НА ТЯЛО В ПРОСТРАНСТВОТО

Ориентацията на едно тяло в пространството спрямо дефинирана координатна система може да се изрази посредством три ъгъла, което е доказано от швейцарският математик и физик Леонард Ойлер. В негова чест са наречени ъгли на Ойлер. С тях може да се представи ориентацията на подвижна координатна система(свързана с подвижното тяло) спрямо неподвижната референтна система.

Наличието на различни координатни системи и начини за представяне на координатите на дадена точка в тях, предполага да се разполага с установени правила за лесно преминаване от една в друга координатна система. Един от начините е това да се извърши с помощта на две операции - транслиране и ротация. Такъв случай е представен на фигура 1, където точката М е определена в две различни координатни системи, съответно с координатите на свързващите вектори \vec{p}_1 , \vec{p}_2 , между



Фиг. 1. Референтна и подвижна координатна система

началото на съответната координатна система и точката М. Връзката между координатите на двата вектора се дава с израза:

$$(1.1) \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \mu R \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

За да се преобразуват координатите на вектора \vec{p}_2 , в координати спрямо първата координатна система, е необходимо да се знае ротационната матрица R, коефициента μ , ако има разликата в използваните мерни единици и необходимата трансляция на началата на координатните системи \vec{T} .

Ротационната матрица се получава от три последователни завъртания около трите оси на едната координатна система до съвпадане с осите на другата. Предварително трябва техните начала да съвпадат и двете да са дясно или ляво ориентирани. Като ъгъла на завъртане има положителен знак при завъртане обратно на часовата стрелка, гледано от положителната посока на оста към началото. За координатни системи, които нямат общо начало, първо се намира вектора, с който трябва да се транслира едната координатна система спрямо другата.

Ротационната матрица се получава като произведение от последователните завъртания около съответните оси. Важно е да се запази реда на ротационните матрици в произведението, съобразно реда на извършените завъртания. В разгледания случай, ако завъртанията са направени в ред R(ϕ), R(θ), R(ψ) то матрицата е:

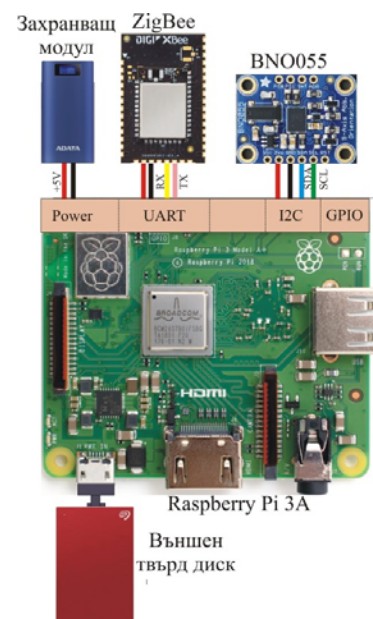
$$(1.2) R_{e_2}^{e_1} = R(\psi)R(\theta)R(\phi)$$

Друга възможност за определяне положението на тяло в пространството е като се използват кватернионите. Те също се получават директно от модул BNO055. Връзката между тях и ъглите на Ойлер се дава с израза 1.3:

$$(1.3) \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{atan2}(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1^2 + q_2^2)) \\ \text{asin}(2(q_0q_2 - q_3q_1)) \\ \text{atan2}(2(q_0q_3 + q_1q_2), 1 - 2(q_2^2 + q_3^2)) \end{bmatrix}$$

МЕТОД ЗА ОЦЕНЯВАНЕ НА ПРОДЪЛЖИТЕЛНИ ДЕФОРМАЦИИ

В основата на метода е следене за промяна положението на измервателен стълб спрямо неговото първоначално положение (референтната координатна система) с помощта на системата показана на фигура 2. Инерциалният измервателен модул BNO055 съчетава в структурата си триосни - акселерометър, жirosкоп, магнитометър, сензор за температура и микроконтролер с 32 битово ARM M0 ядро. Данните от отделните сензори се обединяват и директно се изчисляват ъглите на Ойлер, кватернионите, ротационни вектори, посока на движение, спрямо абсолютна координатна система. Отделно може да се измерват линейните ускорения, предизвикани от движение, ускоренията с гравитационната съставка, ъгловата скорост и тримерното магнитно поле. Данните могат да бъдат прочетени от компютърна система през I2C или UART интерфейс. В конкретната система е използван микрокомпютъра Raspberry Pi 3A за събиране и обработване на данните получавани от BNO055. Предвидена е възможност данните да бъдат предавани

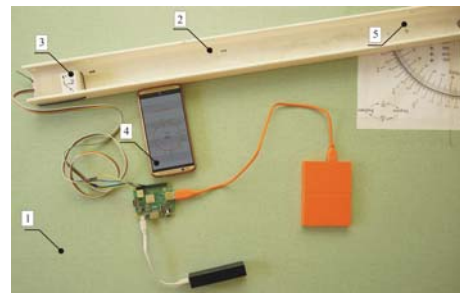


Фиг. 2. Система за отчитане положението на измервателен стълб

или наблюдавани отдалечено. Това е реализирано посредством безжична ZigBee мрежа, в която системата представлява отделен възел. Връзката към мрежата се осъществява с модула Digi XBee® S2C ZigBee, който осигурява покритие до 1200м на открито. Мрежата дава възможност да се получават данни от други възли на мрежата, като по този начин се осигурява възможност да се сравняват данни от измервателни стълбове, разположени съответно на мястото без проблеми и стълбове разположени в райони на свлачище. Сравнявайки данните от такива стълбове, може да се получи по-достоверна информация за започнал дестабилизиращ процес. Мрежата може да използва криптиране с 128-bit AES алгоритъм или да се използва собствен алгоритъм [11]. Координаторът на мрежата има връзка към интернет, с което се осигурява възможност за наблюдение на данните в реално време от всяка точка на Земята. За да се улесни достъпа до данни, на микрокомпютъра Raspberry Pi 3A е реализиран уеб сървър.

Суровите данни се събират непрекъснато и обработват, като се следи дали получаваните ъгли се отличават от зададеното първоначално положение. С цел да се избегнат кратковременни смущения суровите данни се филтрират. При превишаване на предварителни зададени прагови стойности на ъглите се формира съобщение към контролния наблюдателен център, предавано през ZigBee мрежата и интернет.

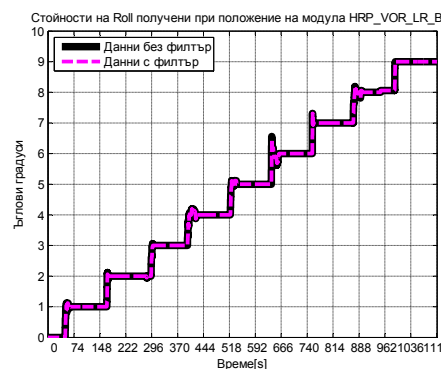
За да може системата непрекъснато да работи при полеви условия, тя се захранва от външна батерия с капацитет от 20000mAh.



Фиг. 3. Опитна постановка

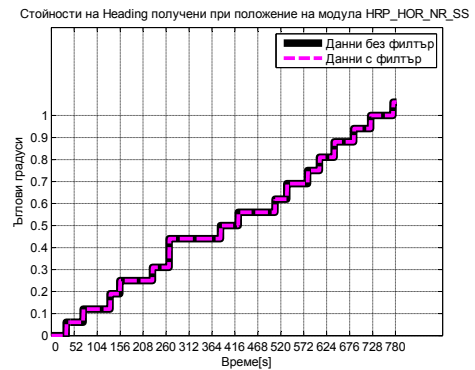
ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

За проверка работоспособността на системата са проведени лабораторни тестове, чиято основна цел е да се установи чувствителността и стабилността на системата. За целта е реализирана опитната постановка показана на фигура 3. Върху неподвижен плот поз.1 е монтиран подвижен пластмасов канал поз.2 имащ възможност да се върти само в една равнина около точката на закрепване. Модулът BNO055 поз.3 е закрепен неподвижно към канала. Оста X на модула е успоредна с компаса поз.4. Плотът поз. 1 има възможност да бъде в хоризонтално положение спрямо земната повърхност или вертикално. Измерванията са правени като модула е преместван през един ъглов градус отчитано от скалата поз.5 и е оставал в съответното положение в продължение на две минути. Част от получените резултати при вертикално положение на плота са показано на фигура 4. Направени са измервания и при премествания по-малки от един градус, като времето за престой в дадена позиция не е две минути както в предишния случай, а е по-кратко, фигура 5. За избягване на нестабилност в показанията на модула данните са обработени с филтър с пълзяща средна стойност. Данните са изчертани с и без филтър. От графиките е видно, че показанията са стабилни и липсват случайни шумови компоненти. Разлика в показанията на филтъра и без него се появява само в моментите на преход от едно устойчиво положение в друго. В реална обстановка е предвидено данните да се записват само когато настъпи събитие, което да задейства програмния тригер. Това може да е промяна в някои от ъглите на Ойлер, промяна в



Фиг. 4. Сензора е във вертикална равнина и с изместване през 1

линейно ускорение или ъглова скорост. По този начин се използва по-малък обем от капацитета на диска. За намаляване на консумацията на енергия модула работи в режим на намалена консумация, при който само акселерометъра е в активен режим. Само при регистриране на ускорение, модула се включва в активен режим. Предаването на данни към контролния център може да се извърши при поискване на такива или при трайна промяна в показанията на някои от ъглите спрямо тяхното предварително установено нормално положение.



Фиг. 5. Сензора е в хоризонтална равнина и с изместване по-малко от 1°

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложеният метод за оценяване на продължителни деформации е решение, което може да замени скъпо струващ инклинометър, в случаите когато трябва да се наблюдава участък с по-голяма площ и е необходимо да се използват повече регистриращи системи.

Реализираната система се характеризира със стабилност на получаваните от нея данни и висока чувствителност, доказани от проведените лабораторни експерименти. Ниската ѝ цена дава възможност да бъдат използвани няколко такива системи за наблюдение на даден участък и те да бъдат свързани в мрежа. Обединяването на данните от тях ще даде възможност за формиране на надежден сигнал за възникване на дестабилизиращ процес.

Данните от отделните системи могат да бъдат наблюдавани през интернет или да бъдат изпращани към контролния център при превишаване на зададен праг.

БЛАГОДАРНОСТ

Представената система за мониторинг на продължителни деформации в строителни съоръжения на базата на инерциален модул за абсолютна ориентация е част от Научно изследователски проект по Договор № 54/21.04.2021г., с възложител ВТУ „Тодор Каблешков“.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Ivanov R., Engineering surveying and deformation surveys, Monograph, Sofia, 2020, ISBN 978-954-12-0272-2
- [2] Yuwono B D, Y Prasetyo, Analysis Deformation Monitoring Techniques Using GNSS Survey and Terrestrial Survey (Case Studi: Diponegoro University Dam, Semarang, Indonesia), 2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 313 012045
- [3] Poluzzi Luca, Luca Tavasci, Francesco Corsini, Maurizio Barbarella, Stefano Gandolfi, Low-cost GNSS sensors for monitoring applications, Applied Geomatics (2020) 12 (Suppl 1):S35–S44, <https://doi.org/10.1007/s12518-019-00268-5>
- [4] Zheng Yanli, Rui Zhang, Shengfeng Gu, A new PPP algorithm for deformation monitoring with single-frequency receiver, Earth Syst. Sci. 123, No. 8, December 2014, pp. 1919–1926
- [5] Цановски Ю., Ц. Данчев, Precise Point Positioning (PPP) за нуждите на геодезическата практика, Годишник на университета по архитектура, строителство и геодезия, София, Том 51, 2018, Брой 9

- [6] Bellone T., P. Dabove, A.M. Manzano, C. Taglioretti Real-time monitoring for fast deformations using GNSS low-cost receivers, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7:2, 458-470, 2016, DOI: 10.1080/19475705.2014.966867
- [7] Manzini Nicolas, André Orcesi, Christian Thom, Antoine Clément, Serge Botton, Miguel Ortiz, John Dumoulin, Structural Health Monitoring using a GPS sensor network, *NDT.net Issue - 2018-11 – Articles*, 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2018), July 10-13, 2018 in Manchester, UK (EWSHM 2018)
- [8] Erol Bihter, Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring, *Sensors* 2010, 10, 10803-10827; doi:10.3390/s101210803, ISSN 1424-8220
- [9] Green Gordon E., P. Erik Mikkelsen, Deformation Measurements with Inclinometers, *Transportation Research Record*, Issue Number: 1169, ISSN: 0361-1981
- [10] https://leica-geosystems.com/products/levels/leica-nivel210_220
- [11] 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

MONITORING OF CONTINUOUS DEFORMATIONS IN CONSTRUCTION FACILITIES BASED ON INERTIAL MODULE FOR ABSOLUTE ORIENTATION

Emil Iontchev¹⁾, Rosen Miletiev²⁾, Lachezar Hristov¹⁾, Todor Todorov¹⁾
e_iontchev@yahoo.com, miletiev@tu-sofia.bg, Lachezar.Hristov@outlook.com, t.todorov@valbis.com

¹⁾ **Todor Kableskov University of Transport 158, Geo Milev Str., 1574, Sofia**

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

Key words: *accelerometer, gyroscope, magnetometer, inclinometer, inertial measurement unit, Euler angles, quaternions, Raspberry Pi*

Abstract: *Measurement of deformations of construction facilities (dam walls, retaining walls, etc.) and geodynamic processes (landslides, scree, rockslides), in order to timely establish the process of relocation and stability loss as well as taking measures to prevent them, is performed based on data collection and analysis from several types of sensors. For maximum reliability of the obtained results, it is necessary to carefully select the types of sensors and their location on the site.*

The article proposes a method for estimating a change in the position of a measuring pole. When a change in his position is registered, it is used as a signal for an unwanted process that has already begun. For this purpose, the inertial measuring module for absolute orientation BNO055 from Bosch was used. In real conditions, the module should be attached to a pole driven deep into the monitored area. To assess the sensitivity and stability of the obtained data from the module, an experimental setup was used, which allows a change in its position through a certain number of angular degrees. BNO055 connects via the I2C interface to the Raspberry Pi platform, where the received data is processed and recorded. The change in body position is estimated by Euler angles or by quaternions obtained directly at the output of the module. In order to fulfill the condition for monitoring the site at several different points, it is possible to connect identical modules to each other via a ZigBee network and to transmit the collected data to the network coordinator. It has a connection to the Internet, thus providing the opportunity for remote monitoring of data from individual modules.