

Анализа вибрација помоћу GNSS пријемника

Vibration Analysis Using GNSS Devices

Јелена Батановић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Студијски програм – РАЧУНАРСТВО И АУТОМАТИКА

Кратак садржај – Овај рад представља могућности коришћења GNSS (Global Navigation Satellite System) пријемника за анализу вибрација. Циљ овог рада је испитати да ли се помоћу GNSS уређаја вибрације могу у некој мери квалитетно мерити. У раду је креиран модел неуронских мрежа помоћу мерења добијених са GNSS пријемника и акцелерометра прикупљених у експерименту у ком су симулиране вибрације дефинисаних амплитуда и фреквенција.

Кључне речи: GNSS, акцелерометар, неуронске мреже, вибрације

Abstract – This paper presents the possibilities of using GNSS receivers for vibration analysis. The aim of this paper is to investigate whether vibrations can be measured to some extent using GNSS devices. In this paper, a neural network model is created using measurements obtained from GNSS receivers and an accelerometer, collected during an experiment in which vibrations of defined amplitudes and frequencies were simulated.

Keywords: GNSS, accelerometer, neural networks, vibrations

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Владимир Бугарски, доцент.

1. УВОД

Вибрације представљају осцилаторна кретања тела или система око равнотежног положаја. Њихово разумевање и правилна анализа од великог су значаја за нашу безбедност, јер омогућавају благовремено откривање потенцијалних опасности и издавање упозорења, како у природи, тако и на објектима и машинама [1,2].

У овом раду испитује се могућност GNSS (Global Navigation Satellite System) пријемника за мерење карактеристика вибрација, фреквенције и амплитуде. Креирани су модели неуронски мрежа обучени подацима мерења GNSS уређаја, а као референтне вредности коришћени су подаци добијени акцелерометром. Мерења са оба уређаја прикупљена су у експерименту где су генерисане вибрације тачно дефинисаних амплитуда и фреквенција на креираној макети.

2. ПРЕГЛЕД СТАЊА У ОБЛАСТИ

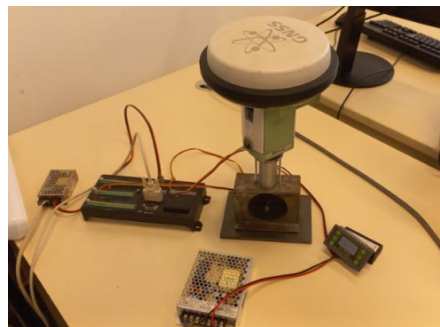
Ово поглавље пружа увид у методологије и радове различитих аутора у овој области. Посебан акценат је стављен на анализу вибрација у дијагностици кварова. Радови [3,4] се баве коришћењем средње квадратне вредности (енгл. Root Mean Square - RMS) и екстремних (енгл. peak) вредности у анализи вибрација и детекцији квара. У раду [5] анализа сигнала са акцелерометра и значајних фреквенција коришћена је као средство за детекцију и разумевање дефекта лежаја. Систематичан преглед коришћења анализе вибрација у дијагностици кварова представљен је у чланку [6]. У њему су описани аквизиција података, коришћени сензори, обрада сигнала са издвајањем значајних карактеристика и примена вештачке интелигенције у анализи кварова. Могућности GPS (Global Positioning System) уређаја за одређивање вибрација анализираних су у студији [7], где су праћене динамичке карактеристике зграде већих фреквенција. Интеграција два уређаја, GPS и акцелерометра, описана је у радовима [8,9], где је приказано да ови уређаји допуњају један другог и да заједничким коришћењем дају најбоље резултате.

3. АНАЛИЗА И ПРИКУПЉАЊЕ ПОДАТАКА

Истраживање је спроведено на припремљеној макети на којој су генерисане вибрације са тачно дефинисаним амплитудама и фреквенцијама. Подаци су прикупљани помоћу GPS уређаја и акцелерометра.

3.1. Уређаји коришћени у пројекту

Макета из експеримента (слика 1.) је направљена у виду конструкције са клипом и ексцентром, са различитим полупречницима плочица: 1,5 cm, 1,75 cm и 2 cm.



Слика 1. Макета коришћена у експерименту

За покретање је коришћен електромотор, са неопходним напајањем и контролером електромотора. Додатно, за прикупљање података, се користи уређај за снимање и контролу података (Data Logger) Campbell Scientific CR1000, са неопходним напајањем и серијском RS-232 комуникацијом ка рачунару. Акцелерометри мере убрзање вибрација и широко се користе у индустрији, машинству и истраживањима због своје осетљивости, прецизности и великог фреквентног опсега. За потребе овог пројекта коришћен је двоосни акцелерометар ADXL203 приказан на слици 2.



Слика 2. Изглед акцелерометра [10]

GNSS/GPS уређаји коришћени у пројекту су Leica GS15 (слика 3.) пријемник (ровер), уз њега и Leica CS15 контролер и Trimble R8s (слика 4.), који је коришћен као референтна станица (база) постављена на пар метара од макете. Примењена метода позиционирања је кинематичко позиционирање у накнадној обради (енгл. Post Processing Kinematics) и представља метод GNSS позиционирања који се заснива на фазним мерењима носиоца сигнала и омогућава постизање високе прецизности.



Слика 3. Leica Viva GS15 [11]



Слика 4. Trimble R8 [12]

3.2. Подаци

Подаци коришћени за анализу карактеристика GPS-а су прикупљани у оквиру два засебна мерења. Први експеримент обухвата мерења која су спроведена тако што су подаци прикупљани истовремено помоћу оба уређаја, GPS-а и акцелерометра, како би били временски синхронизовани и како би се могло

једноставније анализирати понашање и карактеристике сигнала у истим временским тренуцима. Овај начин обухватао је поставку GPS-а на макету, испод ког је био постављен акцелерометар. Оптерећење, које је последица поставке GPS пријемника, је утицало на квалитет снимака добијених са акцелерометра, тј. на вибрације које он мери, стварајући велике шуме, те су снимци првог експеримента изузети из анализе. Експеримент је поновљен, и други пут су вибрације праћене у различитим тренуцима. На овај начин подаци нису временски синхронизовани, али су добијене вредности поузданије.

Подаци добијени мерењем GPS уређаја су обрађени у програму Leica GeoOffice. Овај програм омогућава решавање фазних неодређености и елиминисање сметњи из сигнала, чиме су добијене координате са фиксним фазним решењем и центиметарском тачношћу. Координата од значаја за овај систем је висина, те је рачуната њена средња вредност и она одузима од сваког појединачног мерења како би се добио померај по висини, који је коришћен у даљој обради. Резултати мерени акцелерометром представљају убрзање, дато у мерној јединици g, која представља гравитационо убрзање. У даљој обради коришћено је убрзање у m/s^2 добијено помоћу формуле (1):

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (1)$$

Мерења поменутих сензора су извршена у интервалима од по 0,05 секунди, што одговара фреквенцији узорковања од 20 Hz. У складу са Никвист-Шеноновом теоремом (2), фреквенција узорковања директно одређује највећу фреквенцију сигнала која се може поуздано анализирати.

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (2)$$

f_s је фреквенција узорковања, а f_{max} максимална фреквенција сигнала. Како је фреквенција узорковања ових података 20 Hz, на основу ове теореме закључено је да све фреквентне компоненте сигнала до 10 Hz могу бити прецизно анализирани, што и обухвата фреквенције из експеримента које су у опсегу од 3 Hz до 5 Hz.

4. МОДЕЛ ПРЕДИКЦИЈЕ

Након примарне обраде и сређивања сирових података са сензора, спроведена је додатна припрема и адаптација података коришћењем окружења и доступних алата програмског језика Matlab. Поступак припреме података обухвата анализу и прилагођавање сигнала добијених са GPS уређаја и акцелерометра, како би били међусобно упоредиви, а потом и проналазак значајних образаца и карактеристика унутар ових сигнала који су релевантни као улази у неуронску мрежу.

4.1. Matlab

Matlab представља програмско окружење које обухвата различите апликације за визуелизацију и тестирање, алате за генерисање кода и мноштво библиотека прилагођених областима као што су

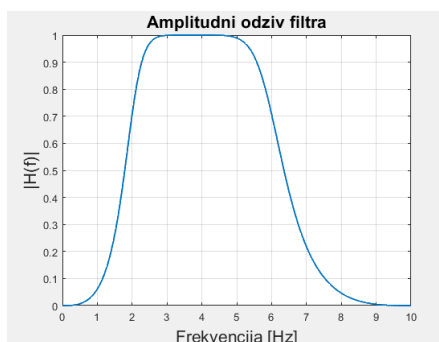
управљање системима, машинско учење, обрада сигнала, роботика и многе druge.

4.2. Припрема улазних података

Анализа података отпочета је итерацијом кроз датотеке (1 датотека за снимак са акцелерометром и 5 датотека са GPS снимцима). Свако мерење обрађује податке тачно дефинисане амплитуде и фреквенције.

У првом експерименту, сваки од снимака је посматран као један улазни податак и креирана је једна неуронска мрежа са два излаза: амплитудом и фреквенцијом. На овај начин обраде података, улазни скуп представља матрицу величине 3×42 (3 карактеристике и 45 фајлова, од којих су 3 коришћена за накнадно тестирање мреже, а 42 као улази приликом тренинга). Фајлови представљају снимке комбинација фреквенција од 3 Hz, 4 Hz и 5 Hz и амплитуда од 1,5 cm, 1,75 cm и 2 cm. Да би се постигао што већи скуп улазних података, у другом експерименту је коришћена обрада сигнала по прозорима. Сваки од улазних скупова података подељен је на прозоре од 5 секунди уз преклапање од 50 %.

Након читања података са GPS уређаја и акцелерометра, над њима је примењен Butterworth филтер (слика 5.) који пропушта одређени опсег вредности сигнала. У овом раду коришћени филтер има дефинисани опсег од 2 Hz до 6 Hz и трећег је реда.



Слика 5. Butterworth-ов филтер, амплитудни одзив

Над припремљеним GPS подацима примењена је двострука деривација, како би се од позиције добило убрзање.

4.3. Обрада података

Карактеристике које дефинишу матрицу улаза првог експеримента су: доминантна фреквенција, амплитуда на доминантној фреквенцији (максимална амплитуда) и RMS параметар. Одређивањем максималне вредности сигнала добијена је доминантна амплитуда, док је доминантна фреквенција одређена њеним индексом. RMS (корен средње квадратне вредности) представља меру просечне енергије сигнала.

Други експеримент чине две неуронске мреже. Карактеристике од значаја за анализу амплитуде које су коришћене у раду су: максимална вредност омотача сигнала, средња вредност омотача сигнала, RMS, опсег од врха до врха сигнала и спектрална снага у задатом опсегу. Омотач сигнала представља глатку криву која прати промену амплитуде сигнала кроз време, а добијен је применом Хилбертове трансформације. Као значајне карактеристике за одређивање амплитуде

сигнала коришћени су максимум и средња вредност омотача. Приликом креирања мреже за анализу фреквенција коришћена је поред поменутих: RMS вредности, доминантне фреквенције и спектралне снаге у задатом опсегу и додатна карактеристика, тежиште спектра. Жељене вредности, таргети којима се тежи су доминантна фреквенција (Hz) и амплитуда на доминантној фреквенцији (m).

Након припреме улазних података за неуронске мреже, у оба експеримента, подаци су нормализовани. Вештачка неуронска мрежа је обучавања функцијом Бајесове регуларизације пропагацијом уназад. Додатна два експеримента представљају обучавање неуронске мреже са прозорима краће дужине - 1,25 секунди, и са фиксним вредностима као таргетима.

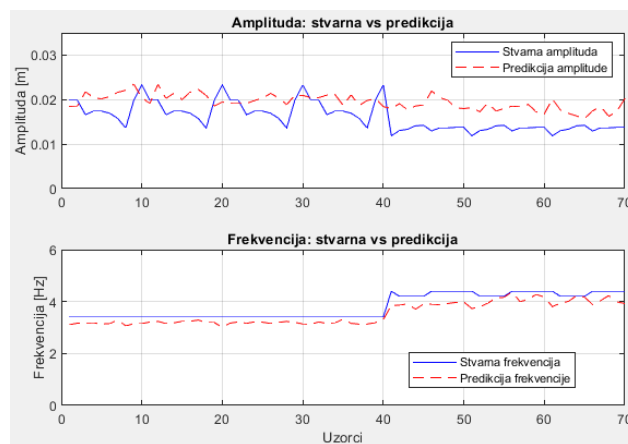
5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Неуронске мреже су тестиране над подацима који нису коришћени током обуке. Резултати примене неуронске мреже из првог експеримента при симулираној амплитуди од 2 cm и фреквенцији од 5 Hz, приказани су у Табели 1. Резултати за ову вредност амплитуде су у околини од око 2,27 cm, док је вредност из снимка акцелерометра 2,244 cm. За дату фреквенцију резултати су у околини вредности од 4,6 Hz, док је акцелерометар измерио 4,685 Hz.

Табела 1. Резултати употребе неуронске мреже из првог експеримента

	Добијене вредности	Таргети
Амплитуда (m)	0,02236	0,02244
Фреквенција (Hz)	4,554	4,685
Амплитуда (m)	0,02274	0,02244
Фреквенција (Hz)	4,55	4,685
Амплитуда (m)	0,02304	0,02244
Фреквенција (Hz)	4,723	4,685

Резултати добијени применом неуронских мрежа из другог експеримента уз употребу прозора величине 5 s са преклапањем од 50 %, приказани су на слици 6.

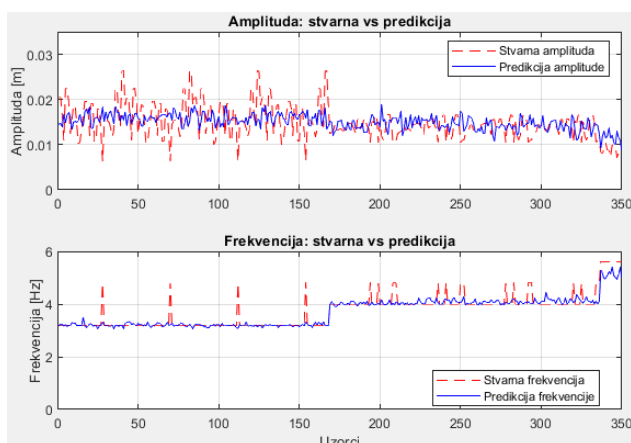


Слика 6. Резултати неуронских мрежа из другог експеримента

Приказ је подељен у два графика. Горњи график представља резултате неуронске мреже за одређивање амплитуде, а доњи за одређивање фреквенције.

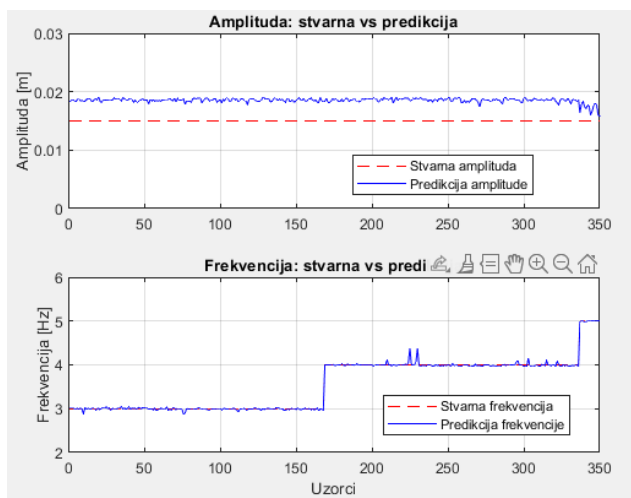
Црвеном испрекиданом бојом приказане су предвиђене вредности, док су плавом означени таргети мреже. У приказаних 70 узорак вредност симулиране амплитуда је 1,5 cm, док се симулирана фреквенција мења и првих четрдесет узорака износи 3 Hz, а наредних тридесет 4 Hz. Резултујуће вредности амплитуде варирају између 0,015 m до 0,023 m, али и таргети варирају. Резултујућа фреквенција је око 3 Hz за вредност таргета од 3,5 Hz и око 4 Hz за вредности од око 4,3 Hz.

Применом прозора величине 1,25 секунде, вредност амплитуде која је добијена као резултат у првом делу сигнала, варира у опсегу од 0,015 m до 0,02 m, при чему је ближа вредности од 0,015 m, док је у последњим узорцима сигнала нешто нижа од 0,015 m. Овакве вредности амплитуде су приближније симулираним вредностима него у случају са прозорима од 5 секунди. Опсег резултујућих вредности је мањи. Резултати неуронске мреже за одређивање фреквенције, такође, доста боље прате симулиране вредности у односу на претходни случај. Резултати су приказани на слици 7.



Слика 7. Резултати неуронских мрежа при дефинисаним прозором од 1,25 s

Као додатни експеримент, за таргете мреже унете су фиксне вредности уместо вредности добијених са акцелерометра. Резултати су приказани на слици 8.



Слика 8. Резултати неуронских мрежа из четвртог експеримента

Таргети неуронске мреже за одређивање фреквенције су прослеђене вредности од 3 Hz, 4 Hz и 5 Hz, а за

одређивање амплитуде вредности од 0,015 m, 0,0175 m и 0,02 m. Резултати овог експеримента (слика 8.) указују на то да када је у питању мрежа за одређивање фреквенције, резултати су добри и прате понашање циљних вредности тј. предвиђају вредности од 3 Hz, 4 Hz и 5 Hz, док неуронска мрежа за одређивање амплитуде приказује нешто већа одступања и за вредности таргета од 0,015 m, добијена је вредност од око 0,0185 m.

6. ЗАКЉУЧАК

На основу спроведене анализе и експеримената, закључак је да интеграција података са GNSS/GPS уређаја и акцелерометра, уз примену неуронских мрежа омогућава добру процену карактеристика вибрација. Мрежа за одређивање фреквенције је показала поуздану процену доминантне фреквенције и добру усклађеност предвиђаних и стварних вредности на тестираним примерима. Резултати мреже за одређивање амплитуде прате реално понашање система, уз одређена одступања те нису довољно поуздани, али то указује на могућност примене овог приступа у пракси и добру основу за даља истраживања.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] T. Irvine, "An Introduction to Shock and Vibration Response Spectra", Revision E, 2023.
- [2] J.T. Broch et al., "Mechanical Vibration and Shock Measurements", Nærum, Brüel & Kjær, 1984.
- [3] J. Igba et al., "Analysing RMS and peak values of vibration signals for condition monitoring of wind turbine gearboxes", *Renewable Energy*, Vol. 91, pp. 90-106, June 2016.
- [4] M. Minescu et al., "Fault detection and analysis at pumping units by vibration interpreting encountered in extraction of oil", *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 21, pp. 372-384, 2015.
- [5] P.D. McFadden, J.D. Smith, "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 96, pp. 69-82, September 1984.
- [6] M.H.M. Ghazali, W. Rahiman, "Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review", *Shock and Vibration*, Vol. 2021, August 2021.
- [7] P. Psimoulis, et al., "Potential of Global Positioning System (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 318, pp. 606-623, June 2008.
- [8] X. Meng et al., "Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers", *Engineering Structures*, Vol. 29, pp. 3178-3184, November 2007.
- [9] X. Li et al., "Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system", *GPS Solutions*, Vol. 10, pp. 233-247, 2006.

- [10] <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-adxl203.html#eb-overview> (pristupljeno u januaru 2025.)
- [11] <https://cpec.leica-geosystems.com/producto/base-rover-gs15-cs15-controller/> (pristupljeno u novembru 2025.)
- [12] <https://geomatixlandsurveying.com/wp-content/uploads/2018/11/trimble-r8s-datasheet.pdf> (pristupljeno u decembru 2025.)

Кратка биографија:



Јелена Батановић рођена је у Шапцу 2000. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства - Аутоматика и управљања одбранила је 2025. год.

Контакт:

jelena.batanovic@gmail.com