

# UPORABA NIZKOCENOVNIH POSPEŠKOMETROV V SEIZMOLOGIJI

## THE USE OF LOW-COST ACCELEROMETERS IN SEISMOLOGY

UDK 550.34.016

**Peter Sinčič**

Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, petersincic@gov.si

**Izidor Tasič**

mag., Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, izidortasic@gov.si

Povzetek

V Sloveniji so podatki o parametrih potresa že v zelo kratkem času na voljo različnim uporabnikom. To je mogoče zaradi kakovostne Državne mreže potresnih opazovalnic, ki jo sestavlja 26 potresnih opazovalnic, ki merijo nihanja tal na prostem površju. Predvsem v urbanih okoljih se dodatno opazujejo močna nihanja tal s pospeškometri, saj so dobljeni podatki zelo pomembni za zanesljivo opredeljevanje potresne nevarnosti in za potresno odporno projektiranje objektov. Več instrumentalnih podatkov o močnih nihanjih tal v urbanih okoljih bi bilo mogoče pridobiti z gosto dopolnilno mrežo nizkocenovnih pospeškometrov, ki bi prek računalniško distribuiranega omrežja temeljili na sodelovanju prostovoljcev. Ob koncu prejšnjega desetletja je na to temo na stanfordski univerzi začel potekati projekt Quake-Catcher Network (QCN), ki temelji na nizkocenovnih pospeškometrih in osebnih računalnikih prostovoljcev. V članku je opisana uporabnost tega sistema.

Abstract

Data about earthquake parameters is available to different users already in a very short time due to the high-quality national seismic network, which consists of 26 seismic stations. From various professional and technical reasons, this network does not measure the earthquake in the urban environment. However, since these data are important for the reliable identification of seismic hazard and earthquake resistant design of buildings, strong seismic ground oscillations in urban environment are recorded with accelerometers. But the number of those is low. More data about the effects of earthquakes in urban areas could be obtained with a dense network of low-cost accelerometers installed and maintained by using volunteers' computers located in the urban areas, which are connected to the world Wide Web. At the end of the last decade, the project "Quake-Catcher Network" (QCN) was launched on this topic at Stanford University, which is based on low-cost accelerometers and volunteers' PCs. The article describes the utility of the system.

## Uvod

V Sloveniji so podatki o magnitudi potresa in lokaciji nadžarišča že v zelo kratkem času na voljo različnim uporabnikom zaradi kakovostne Državne mreže potresnih opazovalnic. Sestavljajo jo posamezne opazovalnice, na katerih je nameščena seizmološka merilna oprema, in središče za obdelavo podatkov (SOP), pri čemer se seizmični podatki zbirajo v stvarnem času, obdelujejo in vrednotijo. Sodobno seizmološko merilno opremo sestavljajo merilnik hitrosti nihanj tal (seizmometer), zajemalna enota, ki analogni signal iz merilnikov digitalizira, opremi z natančnim časom in pripravi za prenos prek računalniškega omrežja, in komunikacijska oprema, ki skrbi za začetno usmerjanje paketov skozi topologijo računalniškega omrežja do SOP. Zaradi omejenega dinamičnega območja seizmometra je vse več potresnih opazovalnic opremljenih tudi s pospeškometri (akcelerometri), ki so manj občutljivi na šibka nihanja tal, a omogočajo merjenje večjih odmikov. Tako je zagotovljeno, da tudi ob povečani dinamiki nihanja tal,

ki je posledica močnejšega bližnjega potresa, potresna opazovalnica zazna tudi največje amplitude nihanj tal. Cilj meritve na potresnih opazovalnicah je spremljanje celovite potresne dejavnosti v kontroliranem okolju na stalni lokaciji, s čim bolj konstantnimi parametri bližnje okolice, in sicer tako, da je omogočen kakovosten zajem seizmičnih signalov (Tasič in Mali, 2014). Ker je dinamika nihanja tal pri potresu kompleksna, frekvence nihanja tal so od nekaj deset in do nekaj deset hercev, amplituda nihanj tal od nekaj deset in nanometrov pa celo do nekaj centimetrov, hitrosti potovanja potresnih valov pa so velikostnega reda kilometri na sekundo, je seizmološka merilna oprema draga in zahteva nadzorovane pogoje postavitve in vzdrževanja. Zaradi vsega naštetega je potresnih opazovalnic malo. Državno mrežo v Sloveniji sestavlja 26 potresnih opazovalnic.

Ob koncu prejšnjega desetletja je na stanfordski univerzi potekal projekt Quake-Catcher Network (QCN) (Cochran et al., 2009a), ki je imel za cilj ustvariti nizkocenovno gosto in široko razvejano dopolnilno seizmološko omrežje

pospeškometrov. Projekt temelji na ideji, da bi prostovoljci, ki imajo svoje računalnike, neprestano priključene na internet, na njih prek USB-vmesnika priklopili nizkocenovne triosne pospeškometre, in sproti pošiljali zajete seizmične signale v center QCN-ja. Razvili so programsko opremo za osebne računalnike in nizkocenovni triosni pospeškometer JW 24F8, ki temelji na tehnologiji MEMS (Cochran at al., 2009b). Zaradi nižje kakovosti takih merilnih sistemov je cilj omrežja predvsem pridobiti dodatne podatke o nihanjih tal ob močnejših potresih iz urbanih okolij in tako povečati količino instrumentalnih podatkov o nihanjih tal za močne potrese na območjih, kjer sicer ni potresnih opazovalnic. V začetni fazi je bil projekt QCN zastavljen tako, da bi v oblaku sodelovali predvsem prenosniki tipa MacBook in nekateri prenosniki tipa ThinkPad, ki so imeli zaradi zaščite diskov ob padcu računalnika že tovarniško vgrajene miniaturne pospeškometre. Za preostale tipe računalnikov so ponudili zunanji pospeškometer WAF8, ki je bil povezan z računalnikom prek USB-vmesnika. Predvsem vgrajeni pospeškometri so imeli kar nekaj pomanjkljivosti, od velikega instrumentalnega šuma, težav z motnjami iz bližnje okolice (tipkanje po tipkovnici) in težko zagotovljene stabilnosti lokacije. Zato so sredi leta 2010 dali na tržišče nov model zunanjega nizkocenovnega pospeškometra JW 24F14 z izboljšanimi lastnostmi.

V nadaljevanju bomo analizirali možnost uporabe nizkocenovnih pospeškometrov z osebnimi računalniki prostovoljcev in uporabnost povečane gostote nestandardiziranih seizmičnih merilnih točk na slovenskem ozemlju.

## Nizkocenovni pospeškometri

Pospeškometri MEMS (mikro elektromehanski sistemi, angl.: micro electro mechanical system) delujejo na principu merjenja sile, ki nastane v upogibni vzmeti,

s katero je vztrajnostna masa pritrjena na ohišje, ko pride do tresenja. Kot že ime pove, je MEMS sestavljen iz mehanskih delov, tipal in elektronike. Amplitude seizmičnih valov v frekvenčnem pasu od 0,01 Hz do 20 Hz so zaradi potresov zelo različne, od nekaj deset nanometrov (šibki potresi) do nekaj milimetrov in več (močni potresi), zato morajo biti pospeškometri občutljivi, imeti morajo veliko dinamično območje, dobro razmerje signal/šum in pasovno širino. Nizke frekvence povzročajo šibek odziv pospeškometra in majhen izhodni signal, ki tako določa njegovo uporabnost.

Pospeškometre MEMS izdelujejo iz piezoporovnih materialov. Pospeškometer je narejen tako, da je vztrajnostna masa z upogibno vzmetjo pritrjena na silicijevo ohišje. Piezoporovni material, nanesen na upogibno vzmet, je namenjen merjenju pospeškov premika mase iz ravnovesne lege. Zaradi napetosti, nastalih v upogibni vzmeti, se mu spremeni upornost. Z dodatnim elektronskim vezjem sestavlja Wheatstonov mostič, na izhodu katerega dobimo signal, katerega amplituda je linearna funkcija pospeška (Lynch at al., 2003).

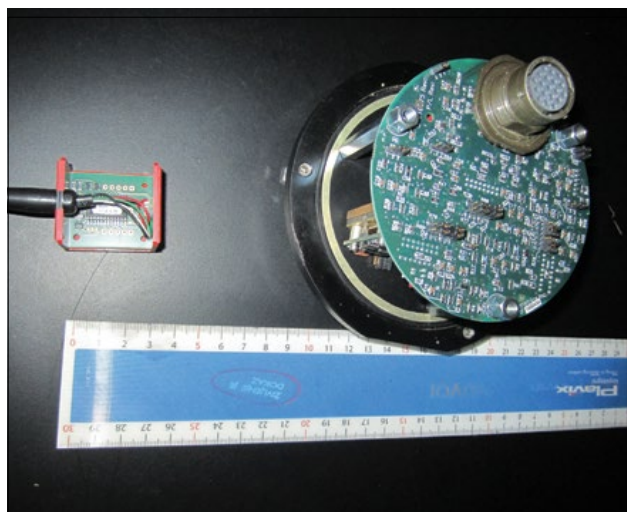
Pospeškometer JW 24F14 ima 14-bitno ločljivost in merilno območje programsko nastavljeno na  $\pm 2g$ . Frekvenčno območje senzorja je od 0,05 Hz do 25 Hz. Prek USB-kabla ga lahko priključimo na računalnik. Senzor prilepimo na tla tako, da ima trden stik s podlago, eno vodoravno komponento usmerimo proti severu, drugo pa proti vzhodu.

## Zmožljivost nizkocenovnega pospeškometra »JW 24F14«

Nizkocenovni pospeškometer JW 24F14, ki ga uporabljajo v omrežju QCN, bomo primerjali s profesional-



Slika 1: Pospeškometer JW 24F14 (levo, oranžni) in profesionalni pospeškometer EpiSensor (desno)  
Figure 1: Accelerometer JW 24F14 (left, orange) and professional accelerometer EpiSensor (right).



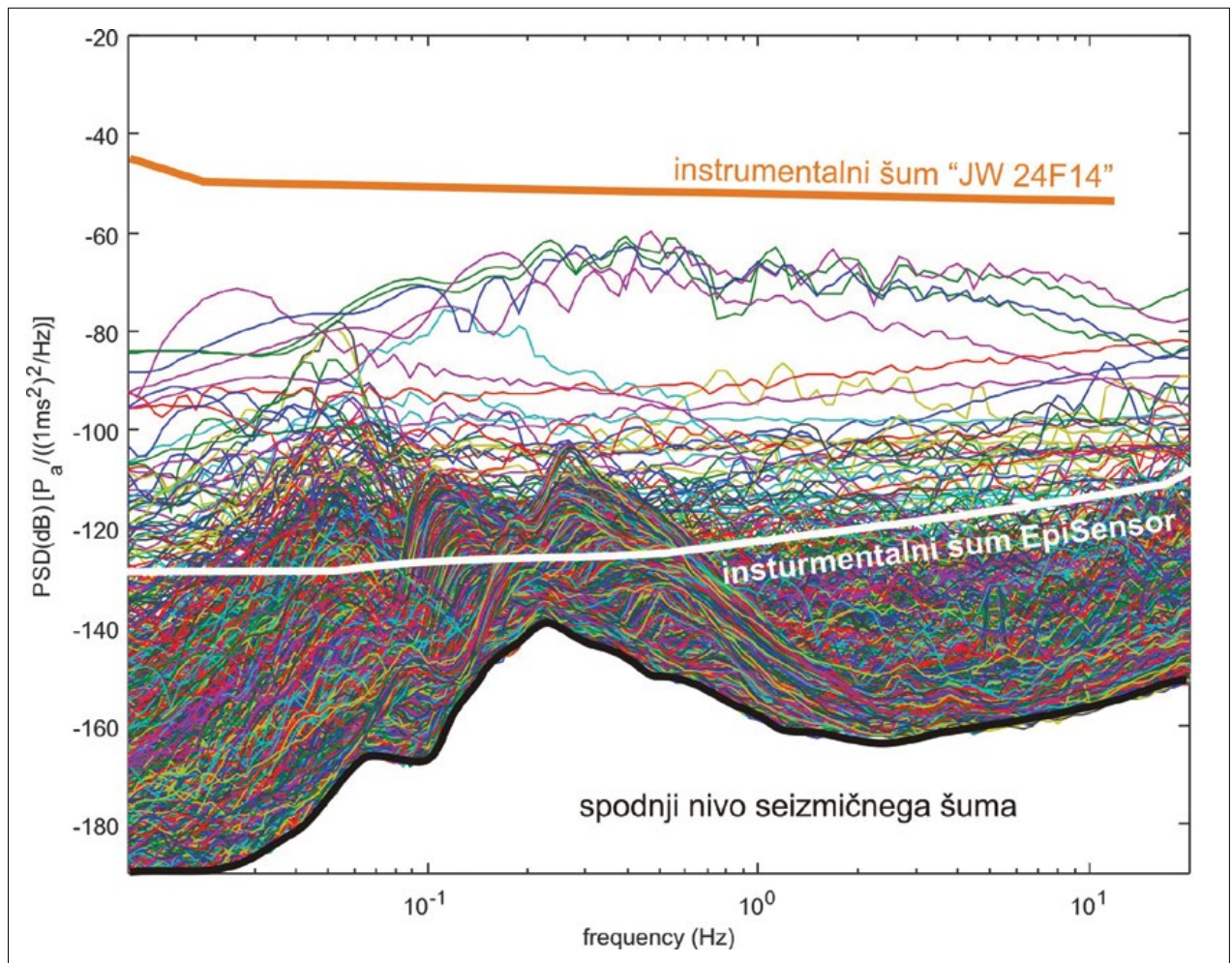
Slika 2: Notranjost pospeškometrov JW 24F14 (levo) in EpiSensor (desno)  
Figure 2: The interior of JW 24F14 (left) and EpiSensor (right) accelerometers

nimi seizmološkimi instrumenti. Nesmiselno je pričakovati, da bi sistem, katerega cena znaša približno 50 €, omogočal meritve enake kakovosti kot dražji profesionalni instrumenti (5500 €). Že površna primerjava JW 24F14 s profesionalnim pospeškometrom EpiSensor (slika 1) kaže na razliko v kakovosti ohišja. Tudi notranjost obeh instrumentov (slika 2) je bistveno drugačna, kar razloži razliko v ceni in kakovosti.

Pomemben dejavnik kakovosti instrumenta je njegov lastni oziroma instrumentalni šum. Ta nam pove spodnjo mejo, na kateri lahko merilni instrument zaznava podatke. Slika 3 prikazuje spektre močnostne gostote (PSD) za vertikalno komponento potresne opazovalnice BOJS, za leto 2014. Podatki so bili zabeleženi s pomočjo seizmometra STS-2, na isti lokaciji pa je postavljen tudi pospeškometer EpiSensor. Posamezni spekter je izračunan za vsako polno uro. Kot lahko razberemo iz slike, je lastni šum pospeškometra JW 24F14 prevelik, da bi bil primeren za tako mirne lokacije.

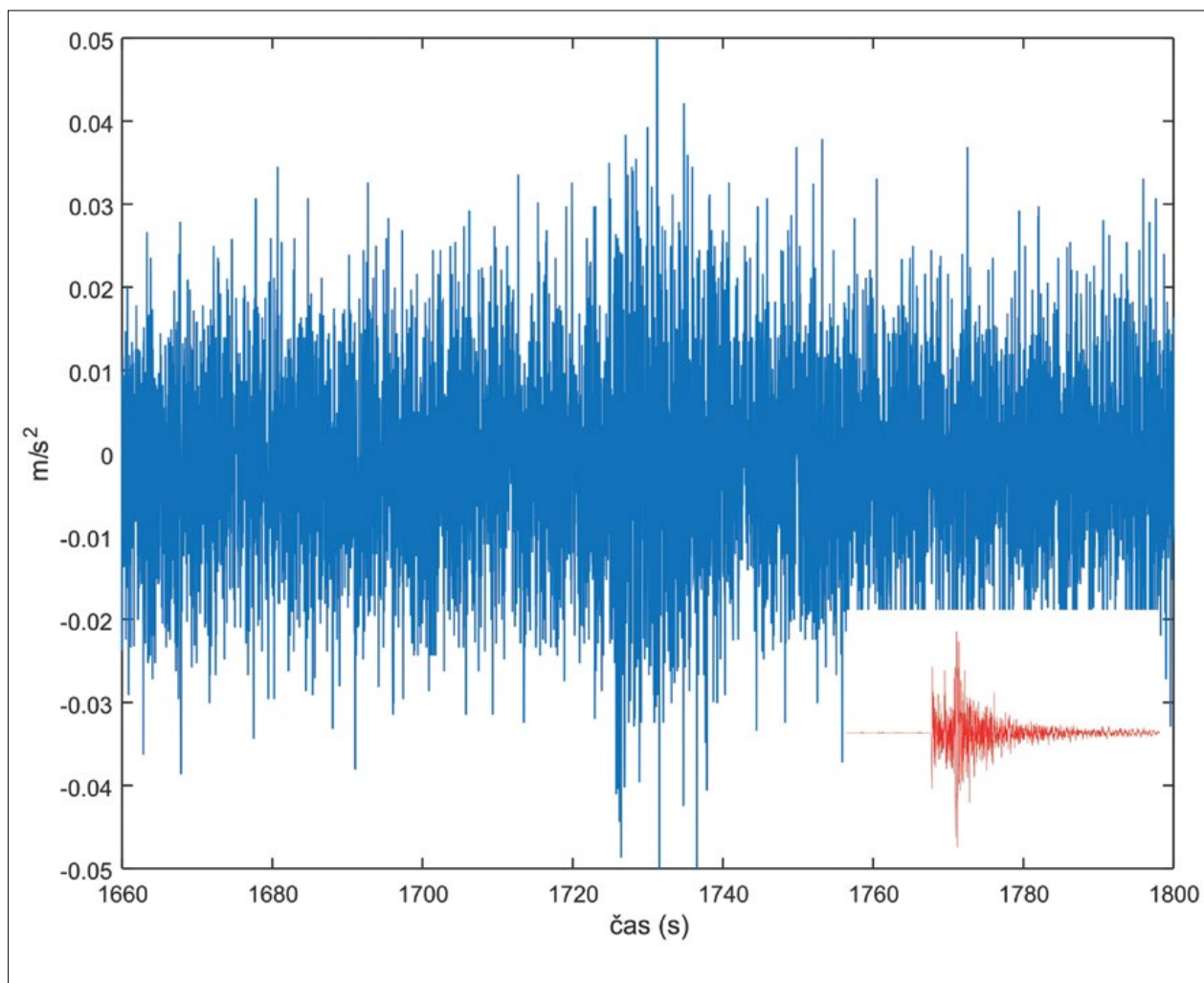
Slika 4 prikazuje zapis lokalnega potresa dne 22. 4. 2014, magnitude 4,4, z oddaljenostjo 50 kilometrov od nadžarišča na instrumentu JW 24F14, ki je bil v središču Ljubljane v prostorih Urada za seizmologijo in geologijo. Nihanje tal komaj zaznavno odstopa iz seizmičnega šuma. V spodnjem kotu slike je isti potres zabeležen na potresni opazovalnici LJU. Na sliki 5 je shematsko prikazan diagram poteka amplitude pospeška nihanja podlage glede na frekvenco na območju pasovne širine oktave seizmometra STS-2, pospeškometra EpiSensor in nizkocenovnega pospeškometra JW 24F14.

Iz slike 5 vidimo, da ta pospeškometer tudi kot dopolnilni instrument ni primeren za območja, na katerih prevladujejo šibki in srednje močni potresi. Pri potresu z magnitudo 4,4 in oddaljenostjo 50 kilometrov od nadžarišča tak merilni sistem komaj zazna povečano amplitudo tal. Njegova uporabnost, ko zajame celoten spekter nihanj tal pri potresu, postane primerna šele pri zelo močnih potresih. Menimo, da tam, kjer velikost potresa preseže magnitudo 7,0.



Slika 3: Spektre močnostne gostote (PSD) za vertikalno komponento na potresni opazovalnici BOJS. Podatki veljajo za leto 2014 in so bili zabeleženi s pomočjo seizmometra STS-2, na isti lokaciji pa je postavljen tudi pospeškometer EpiSensor. Posamezen spekter je izračunan za vsako polno uro. Na sliki so prikazani še spodnja raven seizmičnega nemira, spodnja raven instrumentalnega šuma pospeškometra EpiSensor in spodnja raven instrumentalnega šuma pospeškometra JW 24F14.

Figure 3: Power spectra density plots for the vertical component of the seismometer STS-2 on the seismic station BOJS in 2014. Single spectrum was calculated for each hour. Also presented is seismic noise-floor, self-noise of EpiSensor and self noise of JW24F14.



Slika 4: Zapis lokalnega potresa 22. 4. 2014, z oddaljenostjo nadžarišča 50 kilometrov in magnitudo 4,4 na sistemu JW24F14 (modra črta). Nihanje tal komaj zaznavno odstopa iz seizmičnega šuma in tak zapis ni uporaben v seizmologiji. V spodnjem desnem kotu je isti potres zabeležen na potresni opazovalnici LJU (rdeč).

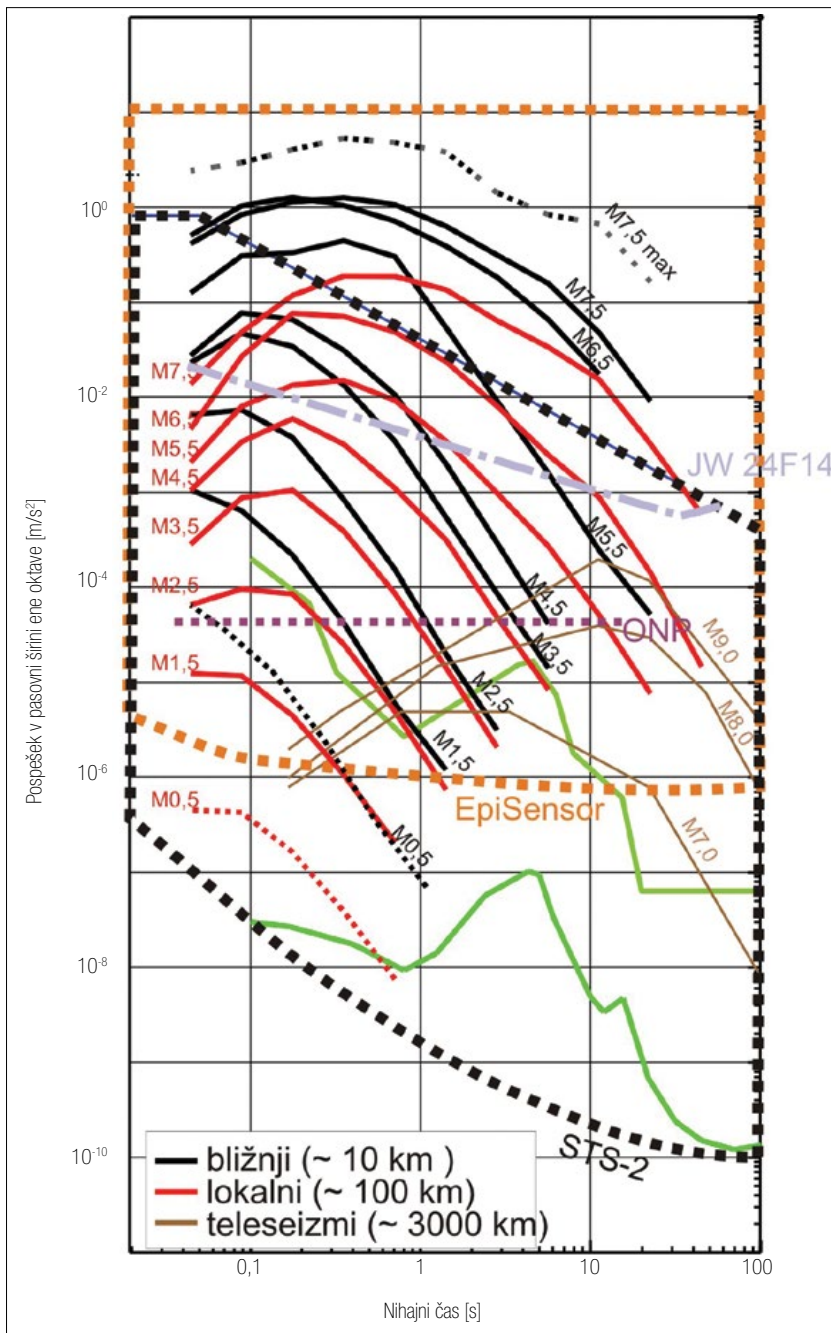
Figure 4: The record of the earthquake on 22 April, 2014 with the epicentre 50 km from Ljubljana and a magnitude of 4.4, on JW 24F14 (blue diagram). Fluctuations barely deviate from the seismic noise and such record cannot be used in seismology. In the bottom right corner, the same earthquake was recorded at seismic station LJU (red diagram).

## Nizkocenovni pospeškometer in uporabnost na območju Slovenije

Cilj dopolnilnega nizkocenovnega seizmološkega omrežja, ki temelji na prostovoljnem »oddajanju« računske moči osebnega računalnika za merjenja nihanj tal v bližini računalnika, je posredovati dodatne informacije o nihanju tal ob močnejšem potresu. Taka mreža bi dajala dodatne informacije predvsem v urbanih okoljih, kjer ni na voljo veliko meritev o odzivi zgradb na močan potres. Vendar pri meritvah, kot potekajo trenutno pri GCN, naletimo na težavo. Na GCN predlagajo, da se merilnik pritrdi na tla v bližini računalnika kar z močnimi lepilnimi trakovi, vendar tako ni zagotovljen trajen in trden stik s podlago, kar močno vpliva na pravilno zaznavanje nihanja tal. Podlage so lahko različne, na primer laminat, montažni leseni parket itn. Taka podlaga se lahko drugače odziva (valovi)

kot nosilni zid zgradbe, zato bi bilo treba merilni senzor z vijaki pritrditi na nosilni zid zgradbe. Ob tem naletimo na problem dolžine kabla. Trenutni sistemi uporabljajo največ pet metrov dolg USB-kabel, kar pomeni, da bi moral biti osebni računalnik postavljen blizu nosilne stene. Kabel z aktivnim podaljškom lahko podaljšamo na 15 metrov, vendar ima tak kabel kar velik premer in je trd, poleg tega pri našem testiranju podaljška merilnik ni pravilno deloval.

Na ozemlju Slovenije bi bilo sicer smiselno imeti dopolnilno nizkocenovno seizmološko omrežje v urbanih okoljih na območjih, ki so na karti potresne intenzitete za povratno dobo 475 let iz leta 2011 označene z območjem intenzitete VIII (Šket-Motnikar, Zupančič, 2011). Vendar ne na način pritrdjevanja, kot ga predlagajo na GCN-ju, in ne s trenutnimi senzori, ki imajo prevelik lastni šum. Taki podatki bi bili, čeprav dobljeni skoraj brez stroškov, nekoristni, ne le zaradi prezašumljenosti, temveč predvsem zaradi napačnih meritev.



Slika 5:  
Diagram poteka amplitude pospeška nihanja podlage v odvisnosti od frekvence v območju pasovne širine oktave. Na diagramu so označeni območje delovanja seizmometra STS-2, območje delovanja EpiSensorja in ocene nihanj tal pri posameznih potresih. Označena je tudi spodnja raven šuma nizkocenovnega pospeškometra JW 24F14. Prikazan pa je tudi spodnji nivo hipotetičnega optimalnega nizkocenovnega pospeškometra (ONP), ki bi bil zanimiv tudi za slovensko območje.

Figure 5:  
Frequency - amplitude plot for octave wide band-passes of ground motion acceleration. The range of operation of seismometer STS-2 and accelerometer EpiSensor is shown. The self-noise of accelerometer JW 24F14 is also presented. Theoretical self-noise of optimal hypothetical low cost accelerometer (ONP), which would be appropriate for Slovenian area, is also shown.

K sreči se informacijska tehnologija zelo hitro razvija in na tržišču je vse več nizkocenovnih mikroročunalnikov (kot je recimo Arduino), ki so žepne velikosti in lahko v povezavi s senzorji delujejo popolnoma samostojno. Zelo verjetno tudi ni daleč čas, ko bodo na voljo tudi nizkocenovni senzorji za zaznavanje nihanj tal z boljšimi lastnostmi instrumentalnega šuma od trenutnih. Za območje Slovenije bi bil primeren merilnik, katerega hipotetično spodnjo raven smo narisali na sliki 5 in ga imenovali Optimalni nizkocenovni pospeškometer (ONP). Tak merilnik bi bil v povezavi z nizkocenovnim mikroročunalnikom, ki bi lahko deloval v brezžičnem (WiFi) omrežju, in za ceno le nekaj deset evrov, uporaben tudi kot dopolnitev državne mreže potresnih opazovalnic. To velja predvsem za območje Ljubljanske kotline, Krško-Brežiškega polja in Zgornjega Posočja. Pri tem bi bilo treba standardizirati način pritrditve pospeškometra

na podlago zgradbe ali nosilni zid zgradbe, s čimer bi zadostili minimalnim pogojem, pri katerih bi instrumenti morali delovati. Le v takih primerih bi bili podatki dovolj kakovostni, da bi jih lahko uporabili kot dopolnilno meritvam iz potresnih opazovalnic.

## Sklepne misli

Sistem QCN še vedno deluje, ob koncu leta 2014 je imel v omrežju okoli 3200 enot. Vpeljali so še nekoliko izboljšane nizkocenovne senzorje (JW24F14, O-NAVIA, O-NAVIB), ki stanejo le nekaj deset evrov, vendar kakovost tudi iz teh sistemov še vedno ne dosega ravni ONP. Za seizmologijo na območju Slovenije so podatki iz takih sistemov predvsem indikatorski, nimajo pa uporabne vrednosti. Ko bodo nizkocenovni pospeškometri začeli

dosegati kakovost ONP, bo podoben sistem, kot je QCN, zanimiv tudi za meritve nihanj tal na območju Slovenije, predvsem v urbanih okoljih in zgradbah širšega družbenega pomena, kot so šole, vrtci, bolnice, s čimer bi lahko natančneje vrednotili učinke potresa na posamezno zgradbo. Ko bo ta raven kakovosti dosežena, bo prousto-

voljstvo eden najpomembnejših dejavnikov pri njihovi množični uporabi, kar je smiselno za take dopolnilne sisteme. Vendar brez dodatnega vloženega prizadevanja v sisteme standardizacije ter uveljavljanja kontrole kakovosti to ne bo mogoče.

## Viri in literatura

1. Cochran, E.S., Lawrence, J.F., Christensen, C., Jakka, R.S., 2009a. The Quake-Catcher Network: Citizen science expanding seismic horizons, *Seismological Research Letters*, vol. 80, no.1, 26–30.
2. Cochran, E., Lawrence, J., Christensen, C., Chung, A., 2009b. A Novel Strong-motion Seismic Network for Community Participation in Earthquake Monitoring, *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, vol 12, no. 6, 8–15.
3. Lynch, J. P., Partridge, A., Law, K. H., Kenny, T. W., Kiremidjian, A. S., Carryer, E., 2003. Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring, *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 16, no. 3, 108–114.
4. Šket Motnikar, B., Zupančič P., 2011. Intenziteta (EMS-98) za uporabo v sistemu zaščite in reševanja, [http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/intenziteta\\_resevanje.jpg](http://www.arso.gov.si/potresi/podatki/intenziteta_resevanje.jpg) [1. 4. 2015].
5. Tasič, I., Mali, M., 2014. Merilni seizmološki sistemi za začasne potresne opazovalnice, *Potresi v letu 2013*, 53–57, Ljubljana.