

Snimanje modova oscilovanja površine u veoma bliskom polju tehnikom impulsne pobude

Filip Pantelić, Marko Milivojčević, David Petrović

Apstrakt— U ovom radu opisana je procedura snimanja modova oscilovanja tanke drvene ploče ukrućene na svojim krajevima. Ploča je pobuđivana impulsom dok joj je odziv sniman u veoma bliskom polju u konačnom broju tačaka iznad vibrirajuće površine. Merna pozicija mikrofona određivana je pomoću ultrazvučnog sistema za detekciju položaja. Predložena metoda ima za cilj skraćivanje vremena potrebnog za snimanje modova oscilovanja površina u veoma bliskom polju.

Ključne reči— modovi oscilovanja, veoma blisko polje, bežično pozicioniranje

I. UVOD

Snimanje u veoma bliskom polju kao metoda za vizualizaciju modova oscilovanja površina već je opisana u literaturi [1,2]. Kako bi se mogla ostvariti vizualizacija modova oscilovanja potrebno je ostvariti merenja u dovoljnom broju tačaka iznad površine ploče koja osciluje. U slučaju jednodimenzionih geometrija, kao što su štapovi i grede, broj tačaka u kojima se snima ne mora biti veliki, pa se tako sa rastojanjem od 1 cm između susednih mernih tačaka mogu ostvariti dobri rezultati [3]. U slučaju manjeg rastojanja između mernih tačaka ostvaruje se bolja prostorna rezolucija ali postupak merenja zahteva ozbiljniji utrošak vremena. Za dvodimenzione geometrije potrebno je napraviti veliki broj merenja da bi se ostvarila ista rezolucija jer je potrebno formirati mrežu mernih tačaka po posmatranoj površini.

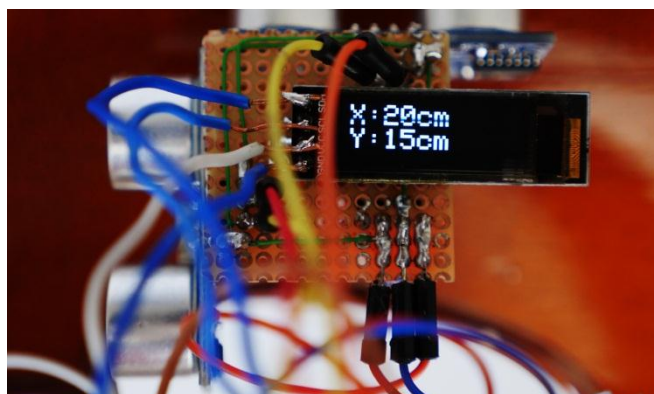
Ako se snimaju sopstveni modovi neke ploče potrebno je obezbediti njenu pobudu. U slučaju velikog broja merenja vremenski intervali potrebni za premeštanje mikrofona u sledeću poziciju i dužina trajanja pobude, koji sami po sebi ne traju dugo, postaju značajan faktor jer se mogu ponoviti više stotina puta. Tako za slučaj pobude elektromehaničkim pretvaračem koji je pobuđen sekvencom šuma u trajanju od 60 s za ploču 10x10 cm potrebno je utrošiti skoro dva sata ako je razmak između mernih tačaka 1 cm. Smanjivanje vremena potrebnog za skeniranje uzorka u veoma bliskom polju ovu metodu bi učinilo prijemčivijom za širu upotrebu.

Skraćivanjem vremena pobude postupak se može značajno skratiti. Pobuda elektrodinamičkim pretvaračem i *sine sweep* signalom pokazala se dobrom u te svrhe [4,5]. Kod ovakve

vrste merenja problem može predstavljati to što se montiranjem pobude na uzorak menjaju karakteristike analiziranog mehaničkog sistema, kao i to što rezonantne frekvencije elektrodinamičkog pretvarača ulaze u interakciju sa modovima analiziranog uzorka. Pobuda impulsom, koja je predstavljena u ovom radu, pokazala se kao najbolji izbor za pobuđivanje ploče zato što pored kratkog trajanja ne zahteva montiranje uzorka na pobuđivač. Ova činjenica omogućava ostvarivanje slobodnih graničnih uslova, koji su vrlo često nužni pri ovakvoj vrsti merenja. Sa druge strane, izostanak pobude čini metodu jednostavnijom i dostupnijom. Odziv uzorka pobuđenog impulsom beleži se samo mikrofonom koji se pri tom postavlja u veoma blisko polje, par milimetara od ploče koja osciluje. U tom slučaju zvučni pritisak srazmeran je brzini oscilovanja u tački iznad koje se meri [6].

II. SISTEM ZA BEŽIČNO POZICIONIRANJE MIKROFONA

Kako bi se celokupan proces snimanja ubrzao i kako bi se smanjila mogućnost greške upotrebjeno je bežično pozicioniranje mikrofona u odnosu na ivice predmeta. Ovaj način određivanja pozicije mikrofona koristeći dve ose realizovan je uz pomoć ultrasoničnih senzora kontrolisanih mikrokontrolerom, pa celokupan sistem pridružen mikrofonom vrši prikaz koordinata po X i Y osi na OLED ekranu prikazanom na Sl. 1.



Sl. 1. OLED ekran za prikaz merne pozicije mikrofona

Prilikom pozicioniranja mikrofona prvobitno je korišćena metoda podele površine na kvadratna polja fiksnih dimenzija, što je zahtevalo da se u softverskom paketu Matlab definišu nazivi i pozicije polja u odnosu na ivice posmatanog predmeta kako bi im se pridružila odgovarajuća pobuda beležena mikrofonom. Određivanje merne pozicije mikrofona zahteva i

Filip Pantelić – Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Vojvode Stepe 283, 11010 Beograd, Srbija (e-mail: filip_pantelic@yahoo.com).

Marko Milivojčević – Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Vojvode Stepe 283, 11010 Beograd, Srbija (e-mail: markom@viser.edu.rs).

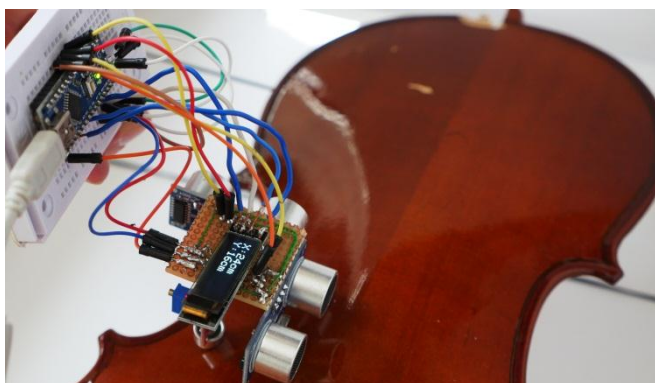
David Petrović – Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Vojvode Stepe 283, 11010 Beograd, Srbija (e-mail: davidp@viser.edu.rs).

formiranje mreže mernih tačaka na uzorku, kao što je prikazano na Sl. 2. To se može ostvariti ucrtavanjem mernih pozicija na površinu uzorka, što je neprihvatljivo kada su predmet analize predmeti od vrednosti kao što su muzički instrumenti. Alternativno se može projektovati mreža svetlosnim projektorom, što dodatno komplikuje proces i ne daje dobre rezultate na zakrivljenim površinama.



Sl. 2. Mreža mernih pozicija iscrtanih na površini analiziranog uzorka

Bežično pozicioniranje mikrofona ubrzava proces merenja precizno beležeći poziciju pri svakom premeštanju mikrofona. Postupak formiranja slike moda oscilovanja dozvoljava slobodu u izboru mernih tačaka koje mogu biti nepravilno rasporedene po posmatranoj površini. U nekim regijama merne tačke mogu biti gušće rasporedene ako je potrebno zabeležiti više detalja, što u slučaju merenja bez bežičnog pozicioniranja dodatno komplikuje proceduru.



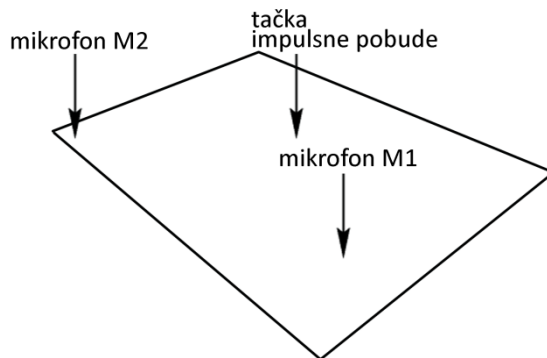
Sl. 3. Sistem za bežično pozicioniranje mikrofona

Za realizaciju sistema za pozicioniranje, koji je prikazan na Sl. 3. korišćen je mikrokontroler ATmega328 postavljen na Arduino Nano v3 platformu koji po svojim karakteristikama svakako prevazilazi konkretnu upotrebu, ali je upotrebljen zbog velike dostupnosti i niske cene i dva ultrasonična modula oznake HC-SR04. Ultrasonični moduli se sastoje od ultrasoničnog transmitera, prijemnika i kontrolnog kola koji nakon komande sa mikroprocesora emituju impulse na učestanosti od 40kHz i vrše osluškivanje povratnog signala. Ukoliko se na prijemniku detektuje povratni signal vrši se kalkulacija rastojanja na osnovu vremena koje je bilo potrebno da se signal nakon emitovanja odbije od prepreke i

vrati do prijemnika pri čemu se za brzinu kretanja impulsa koristi brzina zvuka. Kako bi se definisale referentne nule u odnosu na koje se posmatraju rastojanja po dve ose potrebno je postaviti odgovarajuće vertikalne barijere nakon čega se na ekranu ispisuje rastojanje mikrofona od istih. Maksimalna deklarirana preciznost i opseg HC - SR04 modula su 3mm odnosno 2cm - 400cm što nije bilo moguće ostvariti prilikom merenja, ali je dobijena trenutno zadovoljavajuća preciznost od 1cm. Izmenom koda moguće je prikazati mereno rastojanje sa dve decimale. Prilikom merenja je utvrđeno da ove vrednosti pri fiksnom rastojanju neretko vrše promenu. Ovo se može pripisati zakašnjenim refleksijama signala poslatog u nekoj od prethodnih iteracija. U prilog ovoj pretpostavci ide i to što se prilikom merenja pokazalo da se rastojanje do prepreke tačnije određuje ukoliko je ona napravljena od materijala koji bolje apsorbuje zvuk. Treba voditi računa o činjenici da prepreka ipak treba da reflektuje zvuk kako bi na prijemu mogao da se detektuje signal i da se izračuna njegovo vreme putovanja i proceni rastojanje.

III. SNIMANJE MODOVA OSCILOVANJA

U sprovedenom eksperimentu analizirana je tanka ploča od lesonita dimenzija 51x36 cm ukrućena na svojim krajevima, koja je pobuđivana rukom, udarcem čekića u drvo. Merni mikroskop M1, koji se nalazi na pokretnoj pločici zajedno sa ultrazvučnim sensorima, postavljen je u veoma bliskom polju, na udaljenosti od nekoliko milimetara od uzorka, kao što je prikazano na Sl. 4. Mikroskopom je beležen odziv iznad pobuđivane ploče. Neuniformnost pobude kompenzovana je korekcijom nivoa snimljenog signala u skladu sa signalom zabeleženim referentnim mikroskopom M2. Ovaj mikroskop je postavljen u jednoj tački i njegova pozicija se tokom ovih merenja ne menja. Uloga mu je da zabeleži različite nivoe zvučnog pritiska koje su posledica neuniformne pobude udarom čekića, pa se signali zabeleženi mikroskopom M1 pojačavaju ili slabe u skladu sa varijacijama pobude zabeležne mikroskopom M2. Tokom svih merenja pozicija impulsne pobude je takođe bila nepromenjena kako bi se na osnovu merenja mogli rekonstruisati modovi oscilovanja za slučaj pobude u toj tački. Odziv na impulsnu pobudu snimljen je u 70 tačaka iznad površine analizirane ploče.



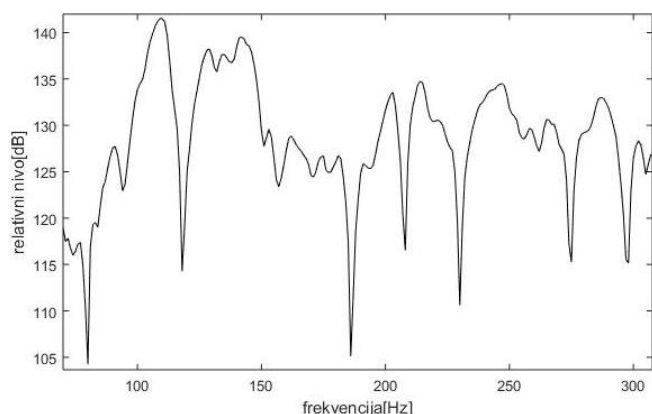
Sl. 4. Merne pozicije i pozicija pobude

Za signal u svakoj snimljenoj tački računat je spektar sa

frekvencijskom rezolucijom od 1 Hz u frekvencijskom opsegu od 1 Hz do 4000 Hz. Opseg iznad 4000 Hz nije analiziran jer se pri povećanju frekvencija oscilovanja smanjuje rastojanja između dva susedna maksimuma koji se javljaju na ploči, pa se za frekvencije iznad 4000 Hz merni mikroskop nalazi van granica veoma bliskog polja koja je definisana izrazom

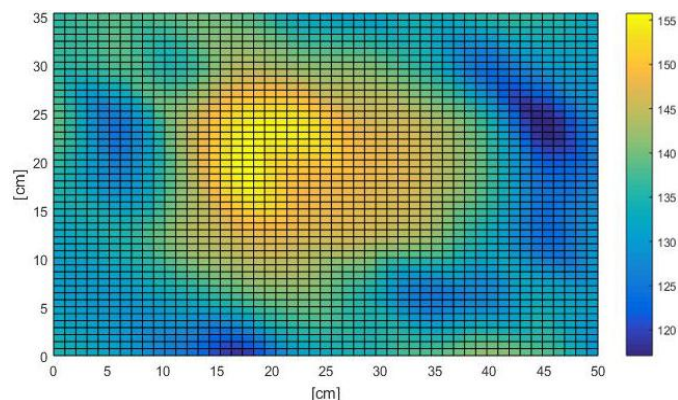
$$d < 0,11a \quad (1)$$

gde su d granica veoma bliskog polja i a širina antinoda, odnosno rastojanje između dva susedna čvora [2].



Sl. 5. Spektar impulsnog odziva uzorka

Na Sl. 5 prikazan je spektar signala snimljenog mikrofonom u jednoj mernoj tački. Modovi koji se mogu identifikovati na slici predstavljaju sopstvene frekvencije posmatranog sistema. Spektri signala snimljeni u svim mernim tačkama smešteni su u matricu $4000 \times X \times Y$, gde su X i Y pridružene koordinate očitane tokom merenja sa OLED ekrana sistema za detekciju položaja. Za svaku od frekvencija iz ove matrice moguće je očitati vrednosti nivoa zvučnog pritiska u zavisnosti od X i Y koordinata.



Sl. 6. Nivo zvučnog pritiska na površini ploče na 128 Hz

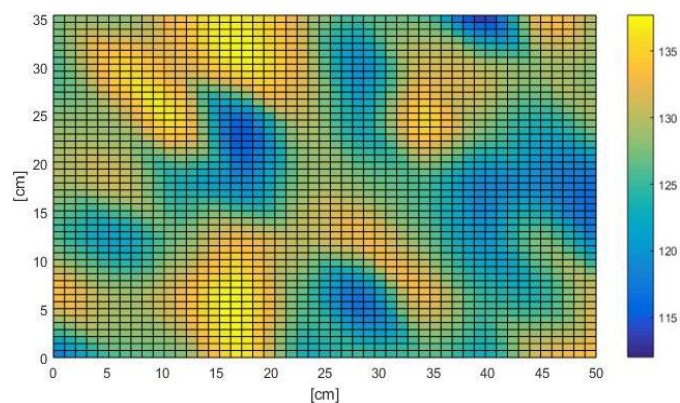
Kako je u veoma bliskom polju zvučni pritisak srazmeran brzini oscilovanja površine u tački iznad koje se snima, na osnovu ovih rezultata može se prikazati željeni mod oscilovanja ploče. Na osnovu izmerenih vrednosti, kojih mora biti najmanje tri da bi se mogla formirati površina, za svaku

frekvenciju čiji se mod želi prikazati vrši se interpolacija kako bi se aproksimirala funkcija moda. Povećanjem broja mernih tačaka interpolirana kriva vernije će predstavljati posmatranu fizičku pojavu.

IV. ZAKLJUČAK

Za beleženje informacija o prisustvu nekog moda potrebno je ostvariti merenje u barem dve tačke po talasnoj dužini, dok je preporučeni broj elemenata koji je potreban kako bi se rekonstruisala forma moda pet do deset elemenata po talasnoj dužini [7]. Na Sl. 6 prikazan je mod koji se javlja na 128 Hz za koji je ispunjen navedeni kriterijum, dok je na Sl. 7 prikazano merenje za koje je premalo mernih tačaka po talasnoj dužini pa se ne može rekonstruisati funkcija moda koji se javlja na toj frekvenciji. Talasne dužine fleksionih talasa koji se javljaju na ploči srazmerne su korenu frekvencije na kojoj se javljaju. Pošto je potrebno uvećati broj merenja po obe ose, broj potrebnih mernih tačaka za ovakve dvodimenzione geometrije srazmeran je frekvenciji. Dakle, za postizanje jednake preciznosti u opisivanju moda na 4000 Hz kao što je to ostvareno na 128 Hz, potrebno je 32 puta više mernih tačaka.

Dalje unapređenje sistema bi značilo pre svega povećanje preciznosti merenja rastojanja kao i potpunu automatizaciju memorisanja odgovarajućeg signala sa mikrofona uključujući i informacija o položaju istog, a nakon čega bi se na računaru vršila analiza podataka. Unapređenje preciznosti merenja postojećeg hardvera, to jest ultrasoničnih modula, je eventualno moguće usavršavanjem algoritama za analizu primljenih signala i usrednjavanjem većeg broja merenja, dok bi alternativa bila izmena hardvera odnosno upotreba laserskog određivanja daljine što rezultuje znatnim povećanjem cene celokupnog sistema.



Sl. 7. Nivo zvučnog pritiska na površini ploče na 3000 Hz

LITERATURA

- [1] I. Salom, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, „Vizualizacija modova oscilovanja zvona snimanjem zvuka u bliskom polju“, Srbija, Beograd 18. Telekomunikacioni forum TELFOR 2010,
- [2] J. Prezelj, P. Lipar, A. Belšak, M. Čudina1, On acoustic very near field measurements Mech. Syst. Signal Processing 40, 194–207, 2013.

- [3] F. Pantelić, J. Prezelj, „Hair tension influence on the vibroacoustic properties of the double bass bow“, J. Acoust. Soc. Am. 136(4): EL288 October 2014.
- [4] F. Pantelić, D. Šumarac Pavlović, M. Mijić, D. Ridley-Ellis, “Ispitivanje akustičkih osobina drveta i identifikacija modova skeniranjem uzorka u veoma bliskom polju“, Zlatibor, ETRAN, 2016.
- [5] F. Pantelić, D. Ridley-Ellis, M. Mijić, D. Šumarac Pavlović, Monitoring changes in wood properties using Very Near Field sound pressure scanning, 4th Annual Conference COST FP1302 WoodMusICK, Brussels, Belgium, October 5-7, 2017.
- [6] H.-E. de Bree, V. Svetovoy, R. Raangs and R. Visser, The very near field, theory, simulations and measurements of sound pressure and particle velocity in the very near field" in ICSV-11, Petersburg, 2004.
- [7] S. Marburg, „Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods“, Springer, ISBN 978-3-540-77448-8, 2008.

ABSTRACT

This paper describes the procedure for recording oscillation modes of a thin wooden plate fixed at its ends. The plate was excited by a impulse while its response was recorded in a very near field in the finite number of points above the vibrating surface. The measuring position of the microphone was determined using the ultrasonic position detection system.

Recording of plate vibration mods in the very near field by using impulse excitation technique

Filip Pantelić, Marko Milivojčević, David Petrović