

Detekcija infrazvoka z zvočnikom v funkciji mikrofona

Samo Beguš, Gregor Geršak

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: samo.begus@fe.uni-lj.si

Infrasound detection with loudspeaker operating as microphone

In this paper we present a novel method for detection of infrasound using an ordinary loudspeaker. We tested 6 different loudspeakers in three configurations: loudspeaker alone with no enclosure, loudspeaker system with a compression type enclosure and loudspeaker system with a bass reflex enclosure, as the most common loudspeaker design. The frequency response of the loudspeakers have been measured and analysed in view of a possible use as an infrasound sensor - microphone. Loudspeakers were shown that could be used, especially when expected infrasound levels are high. Sensitivities and frequency responses are provided.

1 Vpliv infrazvoka na človeka

V zadnjih letih je opazen in dokumentiran negativen vpliv zvokov infrazvočnih in ultrazvočnih frekvenc na zdravje ljudi, ki so mu (dolgotrajno) izpostavljeni [1-4]. V vsakdanjem življenjskem okolju je vedno več generatorjev infrazvoka (npr. promet, vetrne elektrarne [5]), hkrati je v veljavi le malo priporočil in varnostnih standardov, ki urejujejo to področje [6, 7]. Zato so raziskave o vplivu ultrazvoka in infrazvoka na človeka zelo pomembne in potrebne, prav tako merjenje izpostavljenosti infrazvoku.

Aplikacije na pametnih telefonih omogočajo zaznavanje in merjenje nivoja zvočnega tlaka. Točnost, ponovljivost in zanesljivost delovanja aplikacij je odvisna od več parametrov – strojne opreme, programske opreme, validacije strojne in programske opreme ter okoliških parametrov. To velja še posebno za aplikacije, namenjene zaznavanju infrazvoka [8].

2 Zaznavanje in merjenje infrazvoka

Za zaznavanje in merjenje infrazvoka lahko uporabimo fonometre z ustreznimi mikrofoni, po možnosti z razširjenim frekvenčnim območjem v področju infrazvoka.

Merilni mikrofoni proizvajalca Brüel & Kjær, tip 4191 s spodnjo frekvenčno mejo -3 dB od 1 Hz do 2 Hz [9] je široko uporabljen in vsestranski mikrofoni. Podobno velja tudi za dva namenska mikrofona za merjenje infrazvoka, predpolarizirani tip 4964 istega proizvajalca, s spodnjo frekvenčno mejo -3 dB od 0,01 do 0,05 Hz [10] in nepolarizirani kondenzatorski mikrofoni tip 4193 [11]. Uporabijo se lahko keramični mikrofoni [12] in predelani splošno uporabni elektret-kondenzatorski mikrofoni [13]. Takšne in podobne konfiguracije zahtevajo

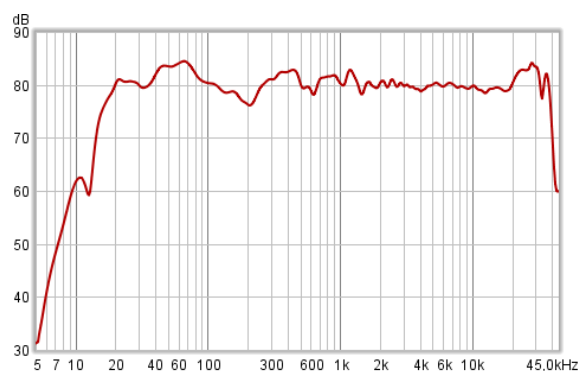
namenski mikrofoni, s katerimi ob ustrezni strojni in programski opremlitvi lahko zagotovimo sledljive meritve.

Za enostavno detekcijo, kjer želimo le zaznavanje infrazvoka, bi lahko uporabili nenamenske, enostavne in cenovno dostopne mikrofone. Cilj prispevka je preveriti, če je možno zaznavati infrazvok z običajnim zvočnikom, ki je sestavni del vsakega avdio sistema.

Izmerili smo šest različnih zvočnikov: brez ohišja, s kompresijskim ohišjem in z bas-refleks ohišjem. Izmerili smo njihovo frekvenčno odvisnost in občutljivost.

3 Metode

Meritve občutljivosti zvočnikov v funkciji mikrofona smo izvedli v gluhi sobi na Fakulteti za elektrotehniko (FE). Kot vir zvoka smo uporabili kombinacijo nizkotonskega zvočnika Genelec 7050C [14] in monitor zvočnika Genelec 8040A [15]. Njun skupni frekvenčni odziv je prikazan na sliki 1.



Slika 1. Frekvenčni odziv sistema za generiranje zvoka v gluhi sobi na FE.

Referenčne meritve uporabljenih zvočnih virov smo izvedli z merilnim kondenzatorskim mikrofonom Brüel & Kjær tip 4191 s predojačevalnikom Brüel & Kjær tip 2669 in Nexus ojačevalnikom. Za zajemanje in generiranje testnih signalov smo uporabili USB zvočno kartico Creative E-MU 0404 pri frekvenci vzorčenja 96 kHz in 24 bitni globini ter 23 dB ojačanja. Zvočnik smo priključili na mikrofonski, XLR vhod. Spodnja frekvenčna meja zvočne kartice -3 dB je pri frekvenci 2 Hz. Za izvajanje meritev in obdelavo smo uporabili program Room Equalization Wizard (REW) [16], Microsoft Excel [17] in Audacity [18].

Glede na omejitve sistema za generiranje zvoka, zvočne kartice, mikrofona in mikrofonskega predojačevalnika smo vse analize in prikaze omejili pri spodnji frekvenčni meji 5 Hz. Tu bi opozorili še na pojav presluha električnega signala med vhodom zvočne

kartice pri nizkih frekvencah, pod 5 Hz. Posledično smo uporabljali vedno le en vhod.

3.1 Potek meritve frekvenčnega odziva in občutljivosti

Nivo jakosti hrupa v gluhi sobi je do 12 dBA in okrog 45 dB, zato je pri meritvah pri nizkih frekvencah in nivojih jakosti <40 dB potrebno uporabiti metode za merjenje s pomočjo ozkopasovne frekvenčne analize, da dobimo primerno razmerje signal/šum, da lahko ugotovimo občutljivost zvočnika in izločimo vpliv hrupa v gluhi sobi.



Slika 2. Fotografija postavitve v gluhi sobi na FE. Levo: merjeni zvočnik – mikrofoni; desno: Genelec zvočnika.

Meritve frekvenčnega odziva smo izvedli v gluhi sobi, kjer smo namestili zvočnika za generiranje zvoka in izmerili frekvenčni odziv z mikrofonom B&K 4191. Fotografija postavitve v gluhi sobi je prikazana na sliki 2. Merili smo na razdalji 0,5 m, ker smo želeli doseči čim višji nivo zvočnega tlaka tudi pri nizkih frekvencah. Genelec zvočnika sta specifikirana za frekvenčno območje (-3 dB) tip 8040A: <45 Hz ter >20 kHz in (-6 dB) za tip 7050C: 24 Hz do 85 Hz [14, 15]. Na takšni razdalji in pri nivoju zvočnega tlaka 60 dB smo lahko merili odziv do 8,8 Hz in pri 50 dB do 5,1 Hz.

Tabela 1: Uporabljeni zvočniki v testu.

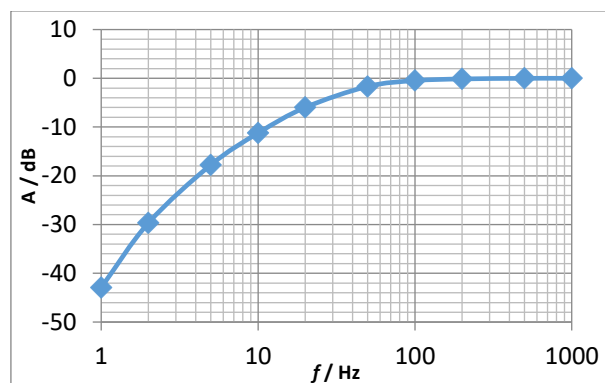
Oznaka zvočnika	Vrsta ohišja	Št. zv.	Velikost nizkotonskega zvočnika	Širina / cm	Višina / cm	Globina / cm
U	Brez	1	8 cm X 12 cm	12	8	5
K1	Kompresijsko	2	Φ 20 cm	28,5	38	20
K2	Kompresijsko	1	Φ 8,5 cm	15	24	15,5
B1	Bas refleks	2	Φ 12 cm	16	24	24
B2	Bas refleks	2	Φ 12 cm	14,5	23,8	23,4
B3	Bas refleks	2	Φ 16,6 cm	20,5	32,5	29

Pri merjenju odziva zvočnika kot mikrofona smo zamenjali merilni mikrofoni 4191 z izbranim zvočnikom in izvedli meritev, občutljivost smo določili z

upoštevanjem občutljivosti zvočne kartice in nastavljenega ojačanja. V tabeli 1 so zbrani podatki in uporabljene oznake zvočnikov.

Pri ročni meritvi občutljivosti izmerimo napetost na sponkah zvočnika z voltmetrom pri znanem nivoju zvočnega tlaka.

3.2 Zajem signalov z diktafonom

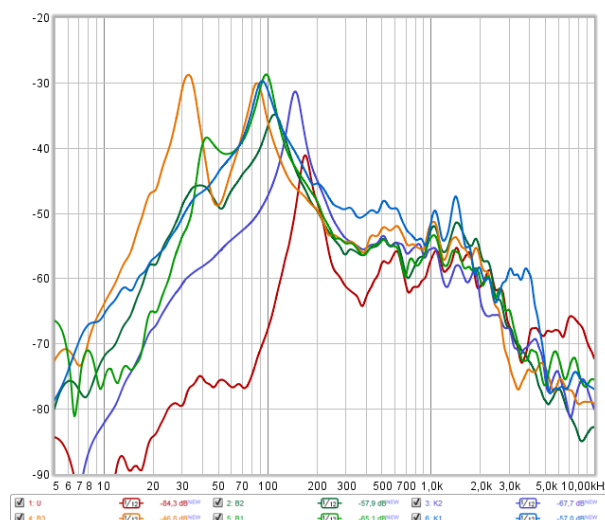


Slika 3. Frekvenčni odziv mikrofonskega vhoda diktafona Olympus LS11.

Namesto zvočne kartice kot sistema za zajem signalov smo preverili možnost uporabe diktafona z mikrofonskim vhodom. Na sliki 3 je prikazan frekvenčni odziv diktafona Olympus LS11 [19]. Iz grafa občutljivosti vidimo, da se zmanjša za 20 dB pri frekvenci 4 Hz. Sledi, da je sicer možno zaznavati infrazvok z zvočnikom in diktafonom s frekvenčno korekcijo, vendar z omejenim dinamičnim območjem zaradi slabše občutljivosti pri nizkih frekvencah.

4 Rezultati

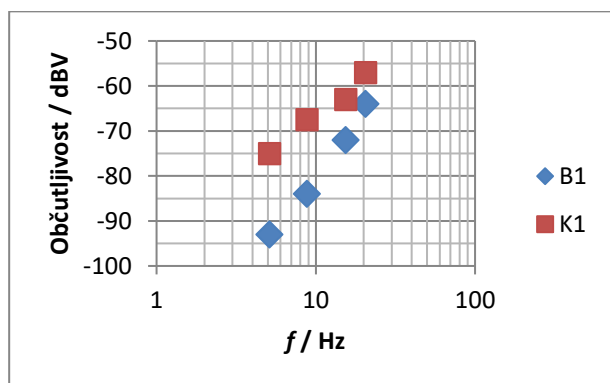
V nadaljevanju so predstavljeni rezultati meritev frekvenčnega odziva in občutljivosti.



Slika 4. Občutljivost zvočnikov v funkciji mikrofona izražena v dBV preračunano na nivo zvočnega tlaka 94 dB.

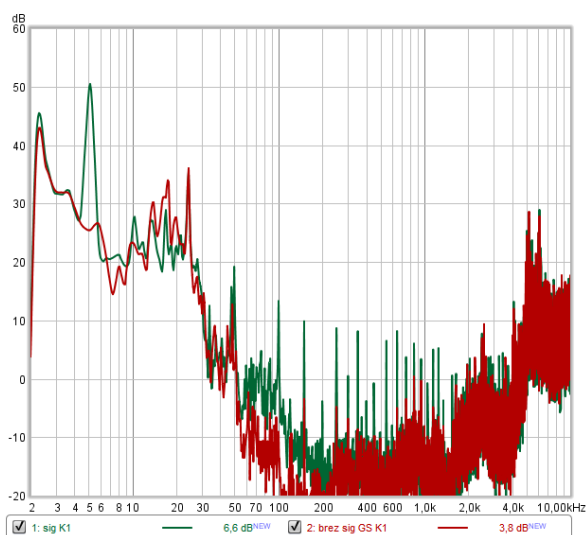
Na sliki 4 so prikazane občutljivosti in frekvenčne odvisnosti uporabljenih zvočnikov z oznakami posameznih zvočnikov, kot v tabeli 1 z 1/12 oktavnim glajenjem.

Občutljivost v dBV je bila izmerjena s programom REW, vrednosti pa korigirane na nivo zvočnega tlaka 94 dB. Pri nizkih frekvencah (pod 10 Hz; za zvočnik U pa že pod 90 Hz) je razmerje signal/šum prenizko za pravilen prikaz občutljivosti in frekvenčne odvisnosti na grafu, zato smo meritve v frekvenčnem območju od 5 Hz do 20 Hz izvedli ročno, amplitude signalov smo merili s pomočjo frekvenčno analize pri pasovni širini posamezne spektralne komponente 0,732 Hz. Rezultati za zvočnika K1 in B1 so prikazani na sliki 5.



Slika 5: Občutljivost zvočnikov K1 in B1 pri nizkih frekvencah.

Primer spektra signala brez in s prisotnim testnim tonom pri frekvenci 5,13 Hz je prikazan na sliki 6, s frekvenčno korekcijo občutljivosti. Spekter hrupa izmerjen z merilnim mikrofonom B&K 4191 v gluhi sobi pa na sliki 7.

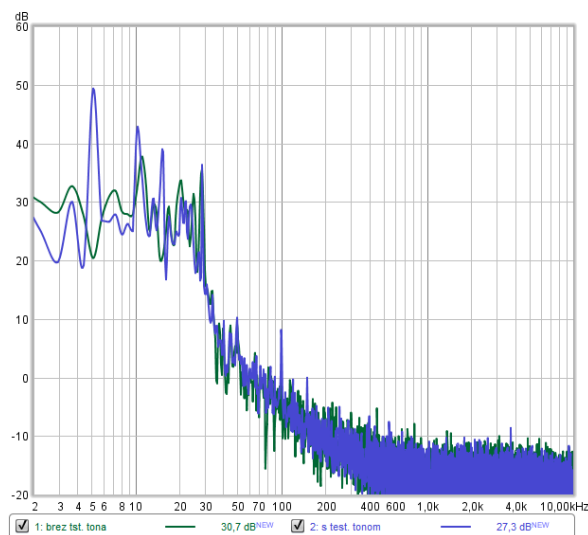


Slika 6: Spektra signala zajetega z zvočno kartico brez in s testnim tonom pri frekvenci 5,13 Hz z zvočnikom K1 v funkciji mikrofona. Uporabljena je frekvenčna korekcija občutljivosti.

Merjenje dodatno otežuje hrup pri nizkih frekvencah v gluhi sobi, amplituda testnega signala pa je omejena z

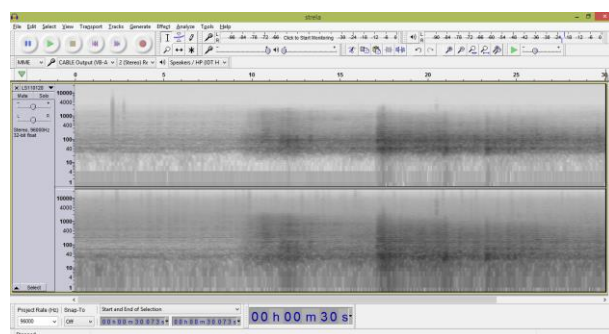
amplitudo generiranega signala z Genelec zvočniki pri nizkih frekvencah. Zvočnika delujeta izven specifikacij, pri frekvencah nižjih od 24 Hz.

Zvočniki z bas refleks izvedbo ohišja imajo pričakovano dve izraziti resonanci v nizkofrekvenčnem področju in upadanjem občutljivosti proti nizkim frekvencam, ostale konfiguracije pa izrazito resonanco in upad občutljivosti pri nizkih frekvencah in visokih frekvencah.



Slika 7: Spekter zvok z in brez testnega tona pri frekvenci 5,13 Hz izmerjen z merilnim mikrofonom B&K 4191 v gluhi sobi.

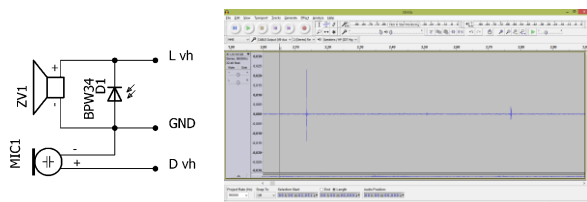
Povišan nivo spektra signala na sliki 7 pri prisotnem testnem tonu je posledica lastnega šuma Genelec zvočnikov. Prav tako se poviša nivo motenj omrežne frekvence (50 Hz in harmonske komponente) pri vključenem napajanju za zvočnike do 20 dB. Motnje se lahko zaduši z ustreznimi pasovno-zapornimi siti. Amplitudo motenj bi lahko zmanjšali tudi z uporabo koaksialnih kablov med zvočnikom in zvočno kartico (uporabljeni so bili neoklopljeni dvožilni kabli za zvočnike).



Slika 8: Spektrogram zvoka po udaru strele, prikazan s programom Audacity. Zgoraj: signal zvočnika v funkciji mikrofona; spodaj: mikrofona EM172. Prvi udar strele je ob času $t = 2,137$ s.

Kot primer uporabe zvočnika kot mikrofona za zaznavanje infrazvoka je na sliki 8 prikazan spektrogram zvoka groma po udaru strele. Izračunani razdalji udara ob

upoštevanju temperature v okolici 15 °C sta 3,4 km in 5,2 km. Uporabljan je bil zvočnik B1 in mikrofoni Primo EM172 s snemalnikom Olympus LS11. Zvočnik je bil priključen na L mikrofonski vhod, z vzporedno vezano fotodiodo, za hkratno indikacijo udara strele, slika 9; EM172 pa je bil priključen na D vhod snemalnika.



Slika 9: Levo: Priključitev zvočnika, mikrofona in fotodiode na snemalnik; desno: prikaz posnetega signala ob udaru strele.

S pomočjo fotodiode lahko enostavno določimo čas udara strele, slika 9, kjer se lahko vidi posamezne razelektritve.

Kljub temu, da na sliki 8 ni uporabljena kompenzacija frekvenčne odvisnosti zvočnika kot mikrofona je jasno opazen prisoten infrazvok v frekvenčnem območju do 20 Hz.

5 Zaključek

V prispevku smo pokazali, da lahko zaznavamo infrazvok z običajnim zvočnikom ter zvočno kartico kot sistemom za zajemanje in vključenim predojačevalnikom (ojačanje 23 dB). Izmerili smo šest različnih zvočnikov: brez ohišja, s kompresijskim ohišjem in bas-refleks ohišjem, njihovo frekvenčno odvisnost in občutljivost.

V prihodnjih študijah bi bilo dobro izmeriti ekvivalentni nivo šuma takšnega sistema, za kar pa bi potrebovali sistem za generiranje zvoka in infrazvoka z nižjo spodnjo frekvenčno mejo. Iz slike 6 lahko sicer ocenimo ekvivalentni nivo šuma cca 30 dB pri 5 Hz, a je ocena nezanesljiva zaradi hrupa v gluhi sobi.

Literatura

- [1] European Environment Agency, Noise in Europe 2014, Copenhagen, 2014, ISBN 978-92-9213-505-8.
- [2] D. Krahé, D. Schreckenberger, F. Ebner, C. Eulitz, U. Möhler, Machbarkeitsstudie zur Wirkung von Infrasschall, Umweltbundesamt, Dessau, 2014, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/machbarkeitsstudie-zu-wirkungen-von-infrasschall>.
- [3] Salt, A. N. & Lichtenhan, J. T., How Does Wind Turbine Noise Affect People?, Acoustics Today, 2014, 10, 20 – 27.
- [4] Health Protection Agency (UK) 2010: Health effects of exposure to ultrasound and infrasound (RCE-14) – Report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation. ISBN 978-0-85951-662-4. Online available via the website of the Health Protection Agency <http://www.hpa.org.uk/>
- [5] Branko Zajamšek, Kristy Hansen; Dobre prakse merjenja ter modeliranja hrupa vetrnih elektrarn, objavljeno v: Dovjak, Mateja (glavni in odgovorni urednik, član

uredniškega odbora, drugo). Hrup vetrnih elektrarn in mogoči vplivi na življenjsko okolje = Wind turbine noise and possible impacts on living environment : mednarodni znanstveni posvet = international scientific consultation, Ljubljana, 15. 1. 2020 : zbornik prispevkov. Ljubljana: Slovensko društvo za akustiko: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2020. 1 spletni vir (1 datoteka PDF (80 str.)), ilustr.

- [6] ISO 7196:1995-3: Acoustics - Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements, ISO 1995
- [7] DIN 45680:2013-09: Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen (Norm-Entwurf), Deutsches Institut für Normung, 2013. <Measurement and assessment of low-frequency noise immissions (Draft Standard)>
- [8] InfraSound Detector <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.microcadsystems.serge.infrasounddetector&hl=sl>
- [9] <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2212.ashx> 4191
- [10] <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2478.ashx> 4964
- [11] <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2214.ashx> 4193
- [12] M. Watson, B. McIntosh and D. ReVelle, "A meteor infrasound recording system," ICASSP '76. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Philadelphia, PA, USA, 1976, pp. 786-789, doi: 10.1109/ICASSP.1976.1170020.
- [13] Takanao Sugimoto, Kenji Koyama, Yosuke Kurihara and Kajiro Watanabe, "Measurement of infrasound generated by wind turbine generator," 2008 SICE Annual Conference, Tokyo, 2008, pp. 5-8, doi: 10.1109/SICE.2008.4654612.
- [14] <https://www.genelec.com/7050c>
- [15] <https://www.genelec.com/previous-models/8040a>
- [16] <https://www.roomeqwizard.com/>
- [17] <https://www.microsoft.com>
- [18] <https://www.audacityteam.org/>
- [19] https://www.olympus.co.uk/site/en/archived_products/audio/audio_recording_1/ls_11/index.pdf