

# Uporaba mobilnih naprav za oktavno analizo zvoka

Metod Celestina<sup>1</sup>, Andrej Trost<sup>2</sup>

<sup>1</sup>EA LAB d.o.o., Cesta Ljubljanske brigade 23A, Ljubljana

<sup>2</sup>Fakulteta za elektrotehniko UL, Tržaska 25, Ljubljana

E-pošta: metod.celestina@ea-lab.eu

## Using mobile devices as an octave frequency analyzer

*Excessive noise is a major public health issue and affects many millions of people world-wide. The noise measurements are done by using a dedicated sound level meter, but in many cases a mobile device (phone) has a potential to provide means of an adequate noise measurement. While several studies were conducted to determine the adequacy of mobile devices for noise measurement, none of the studies examined sound analysis beyond the basic parameters. In the paper we present the results of a study of octave analysis accuracy based on an in-house measurement app.*

### 1 Uvod

Prekomeren hrup predstavlja problem za javno zdravje in pri prekomerno izpostavljenih osebah povzroča številne zdravstvene probleme, kot so okvara sluha, kardiovaskularne bolezni, povišan krvni tlak, motnje spanja in druge psihološke in sociološke probleme. Svetovna zdravstvena organizacija WHO (angl. World Health Organization) ocenjuje, da ima 466 milijonov ljudi sluh okvarjen do te mere, da je poslabšana njihova kvaliteta življenja [1], inštitut NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) iz ZDA pa ocenjuje, da je približno 22 milijonov ameriških delavcev izpostavljenih škodljivemu hrupu [3].

Meritve hrupa v okolju in delovnih mestih so urejene z zakonodajo in zahtevajo uporabo merilnikov zvoka, ki so skladni z mednarodnim standardom IEC 61672 [10]. Medtem ko so namenski merilniki zvoka dostopni le profesionalnim uporabnikom, so dragi in pogosto zahtevajo lastniški program za obdelavo podatkov, je bilo v zadnjih letih izvedenih več projektov merjenja hrupa v okolju, kjer je bil za meritve hrupa uporabljen mobilni telefon, kot cenejša in dostopnejša alternativa namenskem merilniku zvoka. Dostopnost in vseprisotnost mobilnih telefonov odpira možnost za nove načine merjenja hrupa, kot je množičenje (angl. crowd-sourcing) meritev [6, 7].

Število uporabnikov mobilnih naprav raste in bo doseglo 2,87 milijarde do leta 2020 [5]. Računska zmogljivost modernih mobilnih naprav je primerljiva z zmogljivostjo namiznih računalnikov. Po podatkih primerjalnega preizkusa Geekbench je zmogljivost mobilnega telefona Apple iPhone 7 približno enaka zmogljivosti računalnika,

ki ga poganja procesor Intel Core i5 [2]. Takšna zmogljivost je zadostna za opravljanje zahtevnejše digitalne obdelave signalov. Sodobne mobilne naprave imajo tudi funkcije, ki v konvencionalnih merilnikih zvoka niso prisotne ali pa so prisotne le izjemoma. Pozicioniranje z uporabo sistema GPS (angl. Global Positioning System), stalna povezanost z internetom, kamera in bogat ter uporabniku prijazen uporabniški vmesnik je le nekaj primerov.

### 2 Mobilna naprava kot merilnik zvoka

Uporaba mobilne naprave za izvajanje resnih meritev hrupa je odvisna predvsem od zagotavljanja pravilnega merjenja in ustrezne natančnosti. Na tem področju je bilo narejeno več študij. Kardous in Shaw z ameriškega inštituta NIOSH sta izvedla pilotno študijo [11], v kateri sta ugotavljala ustreznost aplikacij za merjenje zvoka za meritve hrupa v delovnem okolju. Rezultati so pokazali, da nekatere aplikacije izkazujejo dovolj veliko natančnost (napaka manjša od 2 dB) in bi bile lahko uporabljane kot adekvaten merilnik zvoka oz. za namene presejalnih meritev. Ista avtorja sta v nadaljnjih raziskavah [12, 14] ugotavljala natančnost pri uporabi zunanjega mikrofona. Raziskava je bila zožana za štiri mobilne aplikacije, ki so izkazovale največjo natančnost v prvi raziskavi. Rezultati so pokazali napako merjenja manjšo od 1 dB, kar je boljše od merilne negotovosti merilnika razreda 2 (skladno z IEC 61260), ki znaša 1,9 dB. Avtorja Murphy in King sta v svoji raziskavi [13] razširila delo avtorjev Kardous in Shaw [11] s tem, da sta uporabila veliko število različnih mobilnih naprav in aplikacij namesto izbrane množice. Rezultati so pokazali veliko variacijo med posameznimi napravami.

Vse meritve hrupa so na tak ali drugačen način standardizirane, uporabljena merilna oprema pa mora izpolnjevati zahteve določenih standardov. Za širše sprejetje mobilnih naprav za merjenje hrupa je nujno ovrednotiti skladnost meritve z relevantnimi standardi. V raziskavi [8] smo se osredotočili na skladnost merilnika zvoka, ki je bil sestavljen iz mobilnega telefona ter zunanjega mikrofona, z mednarodnim standardom IEC 61672 [10]. Merilnik smo izpostavili standardiziranim testom, ki se uporabljajo pri periodični kalibraciji profesionalnih merilnikov zvoka in ugotovili skladnost z zahtevami za Razred 2. Nadaljevanje tega raziskovalnega dela pa je ovrednotenje

skladnosti oktavne analize v mobilni aplikaciji za meritev zvoka z mednarodnim standardom IEC 61260 [9].

### 3 Oktavna analiza

Oktavna analiza je način frekvenčne analize, pri katerem frekvenčno vsebino signala ugotavljamo tako, da frekvenčno območje, ki nas zanima, razdelimo na frekvenčne pasove, katerih srednje frekvence si sledijo v logaritemskem zaporedju. Za vsak pas uporabimo pasovno prepustni filter, ki prepušča samo signal iz tega pasu, kateremu srednjo frekvenco  $f_m$ , in obe mejni frekvenci  $f_1$  in  $f_2$  določimo skladno z enačbami 1 2 in 3 ( $f_r$  je referenčna frekvenca 1000 Hz,  $x \in \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$  indeks okravnega pasu,  $b$  število frekvenčnih pasov na oktavo in  $G$  2 ali  $10^{0,3} \approx 1,99526$ ).

$$f_m = f_r \cdot G^{\frac{x}{b}} \quad (1)$$

$$f_1 = f_r \cdot G^{-\frac{2}{b}} \quad (2)$$

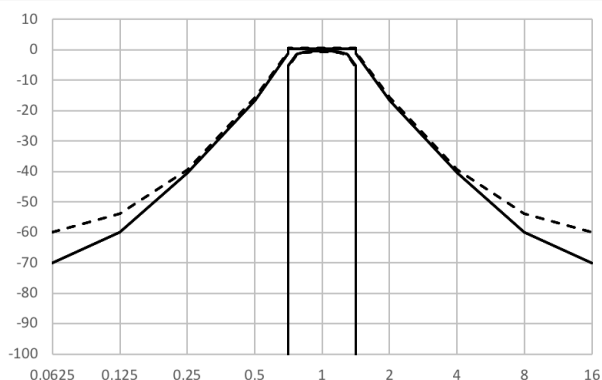
$$f_2 = f_r \cdot G^{+\frac{1}{2b}} \quad (3)$$

Tak način frekvenčne analize je zelo pogost v akustiki, kjer so širine frekvenčnih pasov tipično 1 oktava ali 1/3 oktave.

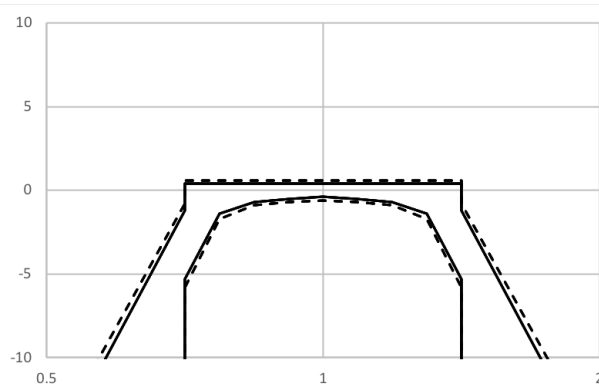
Zahteve za 1/n-oktavno analizo so podane v mednarodnem standardu IEC 61260 [9]. Standard predpisuje srednje frekvence oktavnih pasov, gabarite za prevajalno funkcijo pasovno prepustnih filtrov ter še nekatere dodatne zahteve, katerim morajo ustrezati oktavni filtri. Standard definira dva točnostna Razreda, Razred 1 in Razred 2, kjer Razred 1 zagotavlja večjo točnost. V raziskavi smo ugotavljali skladnost z zahtevami za prevajalno funkcijo pasovno prepustnih filtrov za vsak oktavni pas, efektivno pasovno širino vsakega od pasov, linearnost ter seštevanje signalov.

#### 3.1 Prevajalna funkcija

Prevajalna funkcija vsakega izmed oktavnih pasov mora biti znotraj toleranc, ki so prikazane na slikah 1 in 2. Tolerance za Razred 1 so prikazane s polno, za Razred 2 pa prekinjeno črto. Frekvenčna skala je relativna in je normalizirana za srednjo frekvenco filtra.



Slika 1: Tolerance za Razred 1 in Razred 2.



Slika 2: Tolerance za Razred 1 in Razred 2 v propustnem pasu.

#### 3.2 Efektivna pasovna širina

Efektivna pasovna širina  $\Delta B$  je merilo, koliko ploščina pod prevajalno funkcijo filtra odstopa od prevajalne funkcije idealnega pasovno prepustnega filtra in je definirana kot

$$\Delta B = 10 \cdot \log \frac{\int_0^\infty \frac{1}{\Omega} \cdot 10^{-0,1 \cdot \Delta A(\Omega)} d\Omega}{\frac{1}{b} \ln G} \quad (4)$$

Integral v števcu enačbe 4 se v praksi izračuna numerično s kvadraturno formulo. Za izpolnjevanje zahtev standarda, mora biti  $\Delta B$  manjši od 0,4 dB (Razred 1) ali manjši od 0,6 dB (Razred 2).

#### 3.3 Seštevanje signalov

V primeru idealnih filtrov bi bil seštevek RMS vrednosti signalov na izhodu vsakega izmed oktavnih filtrov enak RMS vrednosti vhodnega signala. Realna prevajalna funkcija filtrov pa je taka, da obstaja delno prekrivanje med sosednjimi pasovi, zato je seštevek na izhodu filtrov običajno nekoliko večji od vrednosti na vhodu. Za izpolnjevanje zahtev standarda ne sme seštevek na izhodu odstopati od vhodne RMS vrednosti za več kot +0,8/-1,8 dB (Razred 1) oz. +1,8/-3,8 dB (Razred 2) pri katerikoli frekvenci, ki leži med srednjima frekvencama dveh sosednjih frekvenčnih pasov.

#### 3.4 Linearnost

Linearno območje delovanja se meri pri srednji frekvenci vsakega izmed pasovno prepustnih filtrov. V linernem območju amplituda izhodnega signala sledi amplitudi vhodnega in od pričakovane vrednosti ne odstopa več kot 0,5 dB (Razred 1) oz. 0,6 dB (Razred 2) v zgornjih 40 dB linearnega območja. V preostanku linearnega območja je dovoljeno odstopanje 0,7 dB (Razred 1) oz. 0,9 dB (Razred 2). Zahtevano območje za Razred 1 je 60 dB, za Razred 2 pa 50 dB.

### 4 Metoda testiranja

V raziskavi smo se omejili na izpolnjevanje zahtev pri uporabi zunanega mikrofona. Zunanji merilni mikrofoni zagotavlja boljši zajem signala in uporabo akustičnega kalibratorja za izvajanje kalibracije. Test je bil opravljen

na lastni mobilni aplikaciji NoiSee [4] na mobilnem telefonu iPhone X. Aplikacija omogoča frekvenčno analizo s širino pasu 1 oktava, srednje frekvence oktavnih pasov pa se ratezajo od 31,5 Hz do 16 kHz. Za namene testiranja je bila mobilna aplikacija modificirana tako, da je omogočala branje oktavnega spektra preko omrežne povezave in protokola REST.

Za test oktavnih filtrov smo nadomestili zunanji mikrofon z električnim nadomestnim vezjem, ki ima enako impedanco kot merilni mikrofon in omogoča vzbujanje akustičnega vhoda mobilnega telefona z električnim testnim signalom. Celotna testna postavitve je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Testna postavitve za testiranje oktavnih filtrov.

Za generiranje testnega signala je bil uporabljen generator Stanford DS360, ki generira sinusni signal z zelo nizkim popačenjem. Generator omogoča nadzor preko vmesnika GPIB, kar nam je omogočilo avtomatsko izvajanje testov. Osrednji del, ki je skrbel za avtomatizacijo testnega postopka, je bil realiziran v obliki skripte v jeziku Python. Naloga skripte je bila nastavljanje amplitude in frekvence signala na generatorju, branje oktavnega spektra iz mobilne aplikacije ter zapisovanje vrednosti v Excelovo preglednico.

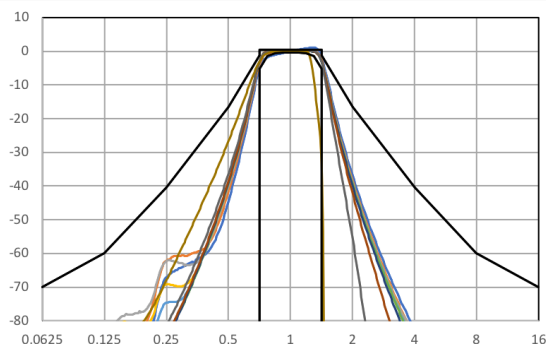
Za testiranje prevajalne funkcije filtrov, efektivne pasovne širine in seštevanje signalov je bil odziv vseh filtrov pomerjen z gostoto 48 točk na oktavo v frekvenčnem območju od 1 Hz do 24 kHz.

## 5 Rezultati

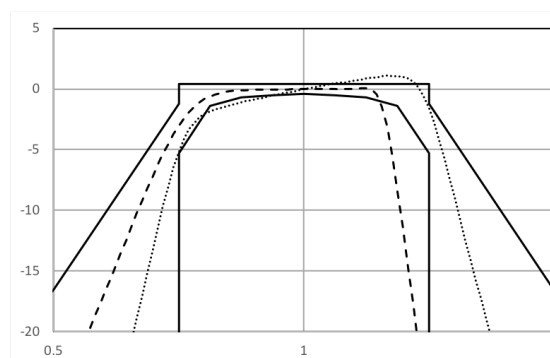
### 5.1 Prevajalna funkcija

Na sliki 4 so prikazani odzivi vseh filtrov, skupaj s tolerancami za Razred 1. Rezultati testa kažejo, da je odziv vseh oktavnih filtrov z izjemo prvega (srednja frekvenca 31,5 Hz) in zadnjega (srednja frekvence 16 kHz) skladen z zahtevami za Razred 1. Slika 5 prikazuje odstopanje prvega in zadnjega oktavnega pasu. Na vseh slikah predstavlja horizontalna os relativno frekvenco, ki je dejanska frekvenca, normalizirana za srednjo frekvenco vsakega izmed pasov.

Odstopanje prvega pasu (31,25 Hz) je posledica neidealnega analognega avdio vhoda na mobilnem telefonu, ki ni zasnovan za zajem tako nizkih frekvenc. Odstopanje zadnjega pasu (16 kHz) pa je artefakt digitalnega filtra. V delu, kjer odziv filtra ne sledi gabaritu, se namreč frekvenca vhodnega signala približuje Nyquistovi frekvenci.



Slika 4: Odziv vseh filtrov.



Slika 5: Odziva filtrov s srednjo frekvenco 31,25 Hz (črtkano) in 16 kHz (pikčasto).

### 5.2 Efektivna pasovna širina

Tabela 1 prikazuje rezultate efektivne pasovne širine. Skladnost z zahtevami Razreda 1 je izpolnjena pri štirih oktavnih pasovih, pri ostalih pa je izpolnjena skladnost z zahtevami Razreda 2.

Tabela 1: Rezultati testiranja efektivne pasovne širine.

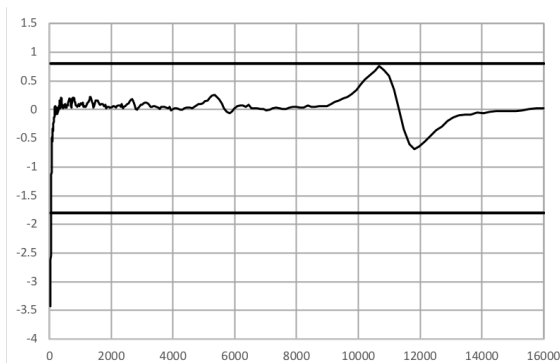
$f$ [Hz]	$\Delta B$ [dB]	$f$ [Hz]	$\Delta B$ [dB]
31.25	0,249	1000	0,421
62.5	0,281	2000	0,442
125	0,367	4000	0,461
250	0,419	8000	0,430
500	0,414	16000	-0,169

### 5.3 Seštevanje signalov

Napaka pri seštevanju signalov v odvisnosti od frekvence vhodnega signala je prikazana na sliki 6. Rezultati kažejo, da je v frekvenčnem območju od 31,25 Hz do 16 kHz napaka seštevanja znotraj predpisanih toleranc za Razred 1 (prikazane na sliki), razen pri najnižjem oktavnem pasu.

### 5.4 Linearnost

Rezultati testa linearnosti so prikazani v tabeli 2. Meje linearnega območja so določene glede na tolerance za Razred 1, spodnja (SM) in zgornja meja (ZM) linearnega območja pa sta izraženi v decibelih zvočnega tlaka.



Slika 6: Napaka seštevanja signalov v odvisnosti od frekvence.

Tabela 2: Rezultati testiranja linearnosti.

f [Hz]	ZM [dB]	SM [dB]	Lin. obm. [dB]
31,25	116,5	33,8	82,2
62,5	118,8	29,2	89,6
125	119,6	30,1	89,5
250	119,8	30,4	89,4
500	119,9	29,2	90,7
1000	119,9	28,2	91,7
2000	119,9	29,5	90,4
4000	119,8	30,5	89,3
8000	119,8	35,2	84,6
16000	119,8	37,2	82,6

Pri vseh oktavnih pasovih je izpolnjen kriterij za skladnost z Razredom 1 skladno z IEC 61260. Razlog za odstopanje pri najnižjem frekvenčnem pasu je isti kot pri prevajalni funkciji. Pri nizkih frekvencah je vhodni signal zaduščen zaradi karakteristike avdio vhoda, zaradi česar je odziv oktavnega filtra prenizek. Negativno odstopanje v tem frekvenčnem območju je tako pričakovano.

## 6 Zaključek

Rezultati oktavnega analizatorja realiziranega v mobilni aplikaciji za merjenje hrupa so pokazali, da je skladnost z Razredom 1, kot je definiran v standardu IEC 61260, možna pri večini zahtev, pri vseh pa so izpolnjene zahteve za Razred 2. Odstopanje prevajalne funkcije pri nižjih frekvencah lahko pojasnimo z odzivom analognega dela avdio vhoda, ki pri tako nizkih frekvencah že duši vhodni signal. Najvišji oktavni pas pa se na zgornjem robu približa Nyquistovi frekvenci, kar popači njegov odziv do te mere, da ne ustreza več zahtevam.

Znanstvene raziskave v zadnjih letih so v veliki meri pokazale ustreznost mobilnih naprav za meritve hrupa in nove načine izvajanja meritev, kot je množičenje, vendar so se osredotočale le na posamezne parametre hrupa, ne pa na frekvenčno analizo, ki se praviloma uporablja pri meritvah hrupa v okolju in na delovnih mestih. Raziskava predstavlja prvi korak pri ugotavljanju skladnosti s standardnimi zahtevami za oktavno analizo.

Glavna pomanjkljivost raziskave je, da je bila ome-

jena na eno mobilno napravo, zaradi česar rezultatov ne moremo z gotovostjo posplošiti na vse mobilne naprave. Nadaljnje raziskovalno delo bo temeljilo na testih več različnih mobilnih naprav in testu 1/3-oktavne analize.

## Literatura

- [1] Deafness and hearing loss. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/en/>. Accessed March 2018.
- [2] iPhone, iPad, and iPod Benchmarks. <https://browser.geekbench.com/ios-benchmarks/>. Accessed July 2017.
- [3] Noise and hearing loss prevention. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/noise/>. Accessed March 2018.
- [4] NoiSee. <http://www.ea-lab.eu/noisee/>. Accessed March 2018.
- [5] Number of smartphone users worldwide from 2014 to 2020. <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>, June 2016. Accessed July 2017.
- [6] I. Aspuru, I. García, K. Herranz, and A. Santander. CITI-SENSE: methods and tools for empowering citizens to observe acoustic comfort in outdoor public spaces. *Noise Mapping*, 3(1), jan 2016.
- [7] P. Aumond, C. Lavandier, C. Ribeiro, E. G. Boix, K. Kambona, E. D'Hondt, and P. Delaitre. A study of the accuracy of mobile technology for measuring urban noise pollution in large scale participatory sensing campaigns. *Applied Acoustics*, 117:219–226, feb 2017.
- [8] M. Celestina, J. Hrovat, and C. A. Kardous. Smartphone-based sound level measurement apps: Evaluation of compliance with international sound level meter standards. *Applied Acoustics*, 139:119–128, oct 2018.
- [9] IEC 61260-1, Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specifications. Standard, International Electrotechnical Commission, 2014.
- [10] IEC 61672-1, Electroacoustics – Sound level meters, Part 1: Specifications. Standard, International Electrotechnical Commission, 2013.
- [11] C. A. Kardous and P. B. Shaw. Evaluation of smartphone sound measurement applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(4):EL186–EL192, 2014.
- [12] C. A. Kardous and P. B. Shaw. Evaluation of smartphone sound measurement applications (apps) using external microphones—a follow-up study. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(4):EL327–EL333, oct 2016.
- [13] E. Murphy and E. A. King. Testing the accuracy of smartphones and sound level meter applications for measuring environmental noise. *Applied Acoustics*, 106:16–22, may 2016.
- [14] B. Roberts, C. Kardous, and R. Neitzel. Improving the accuracy of smart devices to measure noise exposure. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(11):840–846, sep 2016.