

Mjerenje buke akustičkom kamerom

Strišković, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:328185>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU

JELENA STRIŠKOVIĆ

MJERENJE BUKE AKUSTIČKOM KAMEROM

Diplomski rad

Osijek, 2015.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ODJEL ZA FIZIKU

JELENA STRIŠKOVIĆ

MJERENJE BUKE AKUSTIČKOM KAMEROM

Diplomski rad

predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja zvanja magistre edukacije fizike i informatike

Osijek, 2015

Ovaj diplomski rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom doc.dr.sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija Fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Barbari ♥

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ AKUSTIKE.....	3
3. FIZIKALNA SVOJSTVA ZVUKA	6
3.1. Zvučni tlak	6
3.2. Ravni zvučni valovi	9
3.3. Energija zvuka	11
4. POJAVE KOJE PRATE ZVUČNE VALOVE.....	17
4.1. Refleksija zvučnih valova.....	17
4.2. Ogib zvučnih valova	18
4.3. Apsorpcija zvučnih valova	18
4.4. Lom zvučnih valova	20
4.5. Dopplerov efekt	21
5. HARMONICI.....	25
6. KAKO ČUJEMO	28
7. ULTRAZVUK I INFRAZVUK.....	31
7.1. Ultrazvuk	31
7.2. Infrazvuk.....	33
8. BUKA	35
9. MJERENJA BUKE AKUSTIČKOM KAMEROM	38
10. METODIČKA OBRADA.....	45
11. ZAKLJUČAK	55
12. LITERATURA.....	56
ŽIVOTOPIS	59

MJERENJE BUKE AKUSTIČKOM KAMEROM

JELENA STRIŠKOVIĆ

Sažetak

Interdisciplinarna znanost koja proučava zvučne pojave naziva se akustika (grč. ἀκουστικός što znači slušni). Kao takva bavi se problemima vezanim uz stvaranje zvuka, njegovim širenjem u različitim sredstvima te efektima i posljedicama zvuka. Sam zvuk možemo definirati kao longitudinalni mehanički val čime su uvelike opisana njegova fizikalna svojstva. Ovaj diplomski rad za cilj ima objasniti neke fizikalne karakteristike zvuka kao što su zvučni tlak, energija zvučnog vala, intenzitet zvuka, lom, refleksija, apsorpcija i Dopplerov efekt te dati kratki pregled ultrazvuka i infrazvuka – dvaju pojava koje ljudsko uho ne registrira, a dio su spektra zvučnih valova. Također u radu su prikazani vizualni rezultati mjerenja akustičkom kamerom. Na kraju metodički je obrađena jedinica „Zvuk“ koja je dio programa fizike u trećem razredu gimnazije.

(59 stranica, 30 slika, 4 tablice)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: akustička kamera / buka / Fourierove transformacije / valovi / zvuk

Mentor: doc.dr.sc. Denis Stanić

Ocjenjivači: doc.dr.sc. Marina Poje Sovilj, mr.sc. Slavko Petrinšak

Rad prihvaćen: 12.10.2015.

MEASUREMENTS OF NOISE WITH AN ACOUSTIC CAMERA

JELENA STRIŠKOVIĆ

Abstract

Interdisciplinary science that deals with the study of all sound phenomena is called acoustics (greek. Ἀκουστικός meaning auditory). As such it deals with issues related to the creation of sound, its expansion into a variety of means and various sound effects. Sound can be defined as a longitudinal mechanical wave. In this definition are in a great deal incorporated physical properties of sound. This Master's thesis aims to explain some of the physical properties of sound, such as sound pressure, sound wave energy, intensity of sound, refraction, reflection, absorption, and Doppler effect and to give a brief overview of ultrasound and infrasound - two phenomena that the human ear does not register but are the part the spectrum of the sound waves. Also this thesis presents the visual results of measurements with an acoustic camera. Finally, unit "Sound" that is part of the Physics classes in the third year of high school, has been methodically processed.

(59 pages, 30 pictures, 4 tables)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: acoustic camera / Fourier transformation / noise / sound / waves

Supervisor: doc.dr.sc. Denis Stanić

Reviewers: doc.dr.sc. Marina Poje Sovilj, mr.sc. Slavko Petrinšak

Thesis accepted: 12.10.2015.

1. UVOD

Valovi na vodi, glazba, seizmičko podrhtavanje – sve su to valne pojave. Val se javlja kada god se sustav poremeti iz stanja ravnoteže te kada se taj poremećaj može širiti i tako prenositi energiju i određenu količinu gibanja kroz prostor i vrijeme. Zvuk je mehanički longitudinalni val, koji se za razliku od transverzalnih valova koji se šire samo u čvrstim tijelima, može širiti i u fluidima.

Zvuk je sastavni dio naših svakodnevnih života. Prisjetite se samo koliko tehnologije koju svakodnevno koristimo uključuje slanje ili primanje zvuka u različitim oblicima. Unatoč tome, većina ljudi ipak ne razumije što je to zvuk. Znanost koja proučava zvučne pojave naziva se akustika (grč. *ἀκουστικός* što znači slušni). Kao takva bavi se problemima vezanim uz stvaranje zvuka, njegovim širenjem u različitim sredstvima te efektima i posljedicama koje zvuk „ostavlja za sobom“. Akustika se počela razvijati kao grana teorijske fizike, a danas poprima svoj interdisciplinarni karakter te se tako javlja u različitim područjima kao što su područje elektroakustičkih pretvarača, medicini, inženjerstvu, zaštiti na radu, telekomunikacijama, fonetici, glazbi pa čak i području njege tijela.

Važnu komponentu zvuka čini i buka, koja se može definirati kao „neugodan“ ili „neželjeni“ zvuk. Sa stajališta same akustike, zvuk i buka jedan su te isti fenomen promjene atmosferskog tlaka. Sa stajališta čovjeka diferencijaciju je gotovo nemoguće napraviti jer ono što je nekome vrlo ugodno, nekome je izvor buke. Kako navodi Svjetska zdravstvena organizacija, razvojem industrije javlja se sve više potencijalnih izvora buke koji uzrokuju sve veću naglušnost stanovništva. Upravo iz tog razloga priznavanje buke kao ozbiljnog zdravstvenog problema je sve aktivnije. Da bi mogli ublažiti posljedice koje buka ostavlja na čovjeka izuzetno je važno razvijati uređaje za detekciju zvuka. Trenutno najbolje rezultate u ovom području daju akustičke kamere koje pokazuju raspodjelu zvučnog tlaka na nekoj udaljenosti od izvora korištenjem akustičkih podataka svih istovremeno snimljenih mikrofonskih kanala, a pri tome se razine zvučnog tlaka prikazuju bojama. Algoritmi kao što je Cross Spectral Matrix Beamforming omogućuju detaljnu analizu nastalih zvučnih valova pomoću brzih Fourierovih transformacija.

Ovim diplomskim radom opisane su samo neke fizikalne karakteristike zvuka potrebne za rad akustičke kamere kao što su zvučni tlak, energija zvučnog vala, intenzitet zvuka, lom, refleksija i apsorpcija zvuka te Dopplerov efekt. Nadalje, dani su zakonski normativi o dozvoljenim

razinama neželjenog zvuka (buke) te su prikazani rezultati mjerenja akustičkom kamerom tvrtke „Zavod za unapređivanje sigurnosti d.d.“ iz Osijeka koja nam je nesebično posudila jedinu akustičku kameru na ovim područjima kojom se mjeri razina buke. Na kraju, jer se ipak radi o radu izrađenom u cilju stjecanja zvanja magistra edukacije fizike i informatike, metodički je obrađena jedinica „Zvuk“ koja je dio programa fizike u trećem razredu gimnazije.

2. POVIJESNI RAZVOJ AKUSTIKE

Iako se počeci akustike vežu uz umjetnost Stare Grčke i Rima te prvih amfiteatara, mnogi njeni prvi dosezi rezultat su tek puke metode pokušaja i promašaja, a ne matematičkih interpretacija fizikalnih zakonitosti. Akustika se prometnula u jednu od važnijih grana znanosti vjerojatno jer je usko vezana uz čovjekove osjećaje, percepciju i osjetljivost na zvučne podražaje. Začetke akustike postavio je grčki matematičar i filozof Pitagora (6. st. pr. n. e.). Naime, on je vršio, za to vrijeme izrazito netipične, pokuse vezane za zvuk pomoću vibrirajućih žica različitih duljina te je došao do zaključka da žice koje titraju proizvode ugodne (konsonantne) suzvuke ako se njihove duljine odnose kao brojevi 12:9:8:6. Sustav ugađanja glazbala koji se temelji na tom omjeru danas se naziva Pitagorinim. Hipotezu o širenju zvuka, koja se zapravo više temelji na filozofiji, nego li pak eksperimentalnoj fizici, dao je još jedan grčki velikan – Aristotel (4. st. pr. n. e.). On je ispravno sugerirao da se zvučni val širi u zraku gibanjem zraka, no međutim pogrešno je sugerirao da se visoke frekvencije šire brže od niskih frekvencija – to je pogreška koja je trajala stoljećima. Arhita iz Tarenta (4. st. pr. n. e.) detaljnije razrađuje teoriju harmonije daljnjim ispitivanjima frekvencija. Za šumove je rekao da proizlaze iz vibracija koje nastaju zbog prolaska tijela kroz zrak. Postavio je hipotezu da i nebeska tijela, koja se neprekidno kreću, moraju proizvoditi šumove samo ih ljudi zbog ograničenosti svojih osjetila ne mogu pojmiti. Zvukove je dijelio na oštre i tupe, a kojoj skupini pripadaju ovisilo je o brzini vibracije zvukova - što je vibracija brža, to je oštrij zvuk koji iz nje proizlazi. Vitruvije (1. st. pr. n. e.), rimski arhitektonski inženjer znatno je pridonio akustičkom dizajnu kazališta. Sa stajališta fizike važan je jer je odredio ispravan mehanizam za prijenos zvučnih valova, odnosno smatrao je da se zvuk širi valovima sličnim onima na vodi. Prva osoba nove ere koja je imala značajniji doprinos akustici bio je rimski filozof Boecije (6. st. n. e.). Iako akustičke pojave nisu bile primarni cilj njegova istraživanja dokumentirao je nekoliko ideja koje se odnose na znanost glazbe, uključujući i prijedlog da se ljudska percepcija visine tona odnosi na fizikalno svojstvo frekvencije. Nakon njega slijedi zastoj u razvoju akustike koji je trajao gotovo tisuću godina, sve do pojave Marina Mersennea. Iako je znanstvenoj zajednici poznatiji po radu iz područja teorije brojeva značajno je doprinio aktualizaciji i modernizaciji akustike. Godine 1627. izdao je svoje najpoznatije djelo *L'harmonie universelle* u kojem daje točan opis svih do tada poznatih glazbenih instrumenata. Prvi je dao ideju za mjerenje brzine zvuka pomoću pucanja topa. Naime pretpostavio je da je brzina svjetlosti jako velika te zbog toga prasak topa vidimo trenutno. Tada je brzina zvuka vrijeme koje prođe od trenutka bljeska do trenutka kad zvuk pucnja dođe do nas. Kasnije, istog stoljeća, engleski fizičar

Robert Hooke je prvi proizveo zvučni val poznate frekvencije pomoću rotirajućeg zupčanika koji mu je služio kao mjerni uređaj. Jedna od najvećih ličnosti povijesti fizike, Galileo di Vincenzo Bonaiuti de' Galilei, također se bavio problemima iz područja akustike. Njegovo zanimanje za zvuk bilo je inspirirano dijelom od strane njegovog oca, koji je bio matematičar, glazbenik te skladatelj. [17, 38, 41]

Sve do 17. stoljeća mnogi filozofi i znanstvenici su vjerovali kako se zvuk širi preko nevidljivih čestica koje potječu od izvora zvuka. Pojam zvuka kao vala izravno je osporavao ovaj pogled, ali to nije bilo utvrđeno eksperimentalno sve do danas sveopće poznatog „zvona u vakuumu“ kojeg je proveo njemački znanstvenik Athanasius Kircher te ga opisao u svojoj knjizi *Musurgia Universalis* (1650). Čak i nakon ispumpavanja zraka iz staklenke, Kircher je još uvijek mogao čuti zvono te je pogrešno zaključio da zrak nije potreban za prijenos zvuka. Zapravo, Kircherova staklenka nije bila posve bez zraka, vjerojatno zbog neadekvatnosti u svojoj vakuum pumpi. Do 1660. Robert Boyle je poboljšao vakuumsku tehnologiju do točke gdje je mogao promatrati intenziteta zvuka kako se smanjuje gotovo na nulu dok je zrak izlazio iz pumpe. Boyle je tada došao do ispravnog zaključka da je medij, poput zraka, potreban za prijenos zvučnih valova. [38]

Nakon što se priznalo da je zvuk zapravo val, mjerenje brzine zvuka postao je ozbiljan zadatak. U 17. stoljeću, francuski znanstvenik i filozof Pierre Gassendi, napravio je najstariji poznati pokušaj mjerenja brzine zvuka u zraku. Ispravno, pod pretpostavkom da je brzina svjetlosti puno veća nego brzina zvuka, Gassendi je tijekom nevjetrovitog dana izmjerio vremensku razliku između uočavanja bljesaka pištolja i zvuka njegove detonacije. Iako je dobivena vrijednost bila prevelika - oko 478,4 metara u sekundi ispravno je zaključio da je brzina zvuka neovisna o frekvenciji. 1650-ih, talijanski fizičari Giovanni Alfonso Borelli i Vincenzo Viviani dobili su puno bolje vrijednosti od 350 metara u sekundi koristeći istu tehniku. Njihov sunarodnjak Bianconi pokazao je 1740. da se brzina zvuka u zraku povećava s temperaturom. Najranija precizna eksperimentalna vrijednost brzine zvuka, dobivena je na Akademiji znanosti u Parizu 1738., iznosila je 332 metara u sekundi - nevjerojatno blizu današnje prihvaćene vrijednosti, s obzirom na prirodu tadašnjih mjernih alata. Brzina zvuka u vodi po prvi puta je izmjerena od strane švicarskog fizičara Daniela Colladona, 1826. godine. Začudo, njegov primarni interes nije bio u mjerenju brzine zvuka u vodi, nego u izračunu stlačivosti vode. Colladon je dostigao brzinu od 1435 metara u sekundi na 8° C. Današnja prihvaćena vrijednost na toj temperaturi je oko 1439 metara u sekundi. [38, 40, 47]

U ranom 18. stoljeću, engleski matematičar Brook Taylor razvio je matematičku teoriju vibrirajuće žice koja je odgovarala prethodnim eksperimentalnim opažanjima, ali nije bio u mogućnosti nositi se s vibrirajućim sustavom u cjelini bez odgovarajuće matematičke baze. Taj uvjet su pružili Isaac Newton te Gottfried Leibniz koji su postavili temelje matematičkoj analizi te time pokazali način derivacije opće valne jednadžbe. Jean-Baptiste de Fourier je matematički dokazao da su valovi osnovni element čijom se superpozicijom mogu prikazati periodička gibanja bez obzira na svoj oblik. [40, 41, 47]

Christian Doppler zaslužan je za otkrivanje pojave promjene promatrane valne duljine vala međusobnim približavanjem ili udaljavanjem izvora i promatrača koja danas nosi njegovo ime. Do ovoga je zaključka došao 1842. godine na osnovu proučavanja promjene frekvencije svjetlosti koju emitiraju zvijezde u dvojnem sustavu. Tri godine kasnije, njegova predviđanja je eksperimentalno potvrdio Christophorus Henricus Didericus Buys Ballot kada je na željezničkoj postaji uspoređivao zvuk trubača koji stoje na jednom mjestu i trubača koji se gibaju. U istom stoljeću je britanski fizičar Thomas Young na valjak premazan čađom prislonio pisaljku koja je bila vezana za glazbenu viljušku. Kada bi proizveo zvuk pisaljka bi bilježila titranje na valjku koju je pri tome okretao rukom. Ovo je bila osnovna ideja za razvoj gramafona. [17, 40]

Proučavanje još jedne akustičke pojave – ultrazvuka, pokrenuo je američki znanstvenik John LeConte, koji je 1850-ih razvio tehniku promatranja postojanja ultrazvučnih valova s plinskim plamenom. Ovu tehniku je kasnije koristio britanski fizičar John Tyndall za detaljnu studiju o svojstvima zvučnih valova. Piezoelektrični učinak, osnovno sredstvo za proizvodnju i detekciju ultrazvučnih valova koji se danas široko koristi, otkrili su 1880. godine francuski kemičar i fizičar Pierre Curie te njegov brat Jacques Curie. [40]

Razvoj akustike dobio je novi zamah razvojem elektrotehnike koja je omogućila korištenje moderne mjerne opreme, senzora te pretvarača. Danas središnju ulogu u proučavanju zvučnih pojava imaju računala koja omogućuju brzo i kvalitetno modeliranje i optimizaciju kao i precizno mjerenje.

3. FIZIKALNA SVOJSTVA ZVUKA

Trenutno najprihvaćenija definicija zvuka je ta da je zvuk svaka vremenski promjenjiva mehanička deformacija u elastičnoj sredini. Ovime su obuhvaćena tri glavna obilježja zvuka, a to su vremenska promjenjivost koja je važna jer se time eliminiraju plastične deformacije, mehanička deformacija koja je važna jer pretpostavlja sredstvo širenja te kao treće zvuk određuje elastična sredina, dakle sva čvrsta tijela, plinovi i tekućine. Jer se može širiti i u čvrstim tijelima i u plinovima i tekućinama zvuk možemo prepoznati kao longitudinalni val.

Preduvjet za oscilacije kakve je zvuk su masa čestica koje osciliraju te postojanje unutrašnjih elastičnih sila koje teže svom početnom stanju, dakle stanju prije pojave deformacije. Upravo iz tog razloga se mehaničke oscilacije koje čine zvuk mogu javljati i fluidima i čvrstim tijelima. U svakoj od tih elastičnih sredina zvuk se širi drugačije. Jedna od karakteristika fluida (plinova i tekućina) je nedostatak ograničenja na deformacije. Fluidi ne mogu prenositi sile smicanja pa na promjenu oblika reagiraju samo zbog inercije. S druge strane, fluid reagira na promjenu volumena promjenom tlaka. U mnogim slučajevima oscilatorne promjene u fluidima su iznimno male. [47]

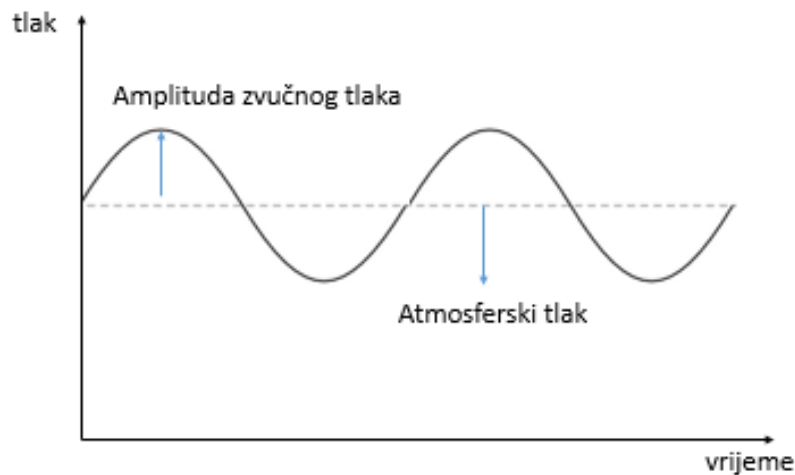
3.1. Zvučni tlak

Zvučni tlak (razlika između trenutne vrijednosti ukupnog tlaka i statičkog tlaka) je veličina koje je izuzetno važna kada govorimo o zvuku jer je mnogo lakše izvršiti mjerenje zvučnog tlaka, nego primjerice fluktuacije gustoće ili temperature. Ovo možemo ilustrirati jednostavnim primjerom tako da promatramo varijacije u zraku koje odgovaraju razini zvučnog tlaka od 120dB, što je veoma visok zvučni tlak te je blizu pragu boli. Na ovoj razini djelomične varijacije tlaka (zvučni tlak u odnosu na statički tlak) su oko $2 \cdot 10^{-4}$, djelomične promjene gustoće su oko $1,4 \cdot 10^{-4}$, oscilatorne promjene temperature su manje od $0,02^{\circ}\text{C}$, dok je brzina čestica oko 50 mm/s (makroskopski prosjek, a ne brzina pojedine molekule). Na 1 000 Hz to odgovara pomaku čestice manjem od 8 μm . Širenjem zvučnih valova, zvučni se tlak superponira atmosferskom tlaku, tako da u jednoj poluperiodi ukupni tlak poraste iznad atmosferskog, a u idućoj se poluperiodi snizi ispod njene vrijednosti. Kada se općenito govori o zvučnom tlaku tada se misli na efektivni zvučni tlak koji podrazumijeva da se amplituda zvučnog tlaka smanji $\sqrt{2}$ puta. [25, 41, 43]

$$p_{ef} = \frac{1}{t_2 - t_1} \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt}$$

gdje je

- $t_2 - t_1$ – vremenski interval integracije
- $p(t)$ – trenutna vrijednost zvučnog tlaka



Slika 1. Zvučni tlak je izmjenični tlak superponiran atmosferskom tlaku

Matematički opis gibanja zvučnog vala u primjerice fluidu možemo dobiti ukoliko kombiniramo jednađbe koje prikazuju činjenicu da je:

- masa očuvana
- lokalna longitudinalna sila uzrokovana razlikom u lokalnom tlaku je balansirana pomoću inercije sredstva
- zvuk je približno adijabatska pojava.

Kao rezultat imamo lineariziranu (članovi višeg reda su zanemarivi) valnu jednađbu. To je parcijalna diferencijalna jednađba drugog reda koja u terminima zvučnog tlaka u Cartesijevom koordinatnom sustavu ima oblik

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

gdje je

- p – tlak
- t – temperatura
- v – brzina zvuka $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
- E – modul elastičnosti¹
- ρ – ravnotežna gustoća sredstva.

Još je Pierre Simon Laplace dokazao da se u jednadžbi za plin modul elastičnosti može zamijeniti umnoškom:

$$E = \gamma p_0$$

gdje je

- γ – omjer specifičnih toplinskih kapaciteta pri konstantnom tlaku (c_p) i konstantnom volumenu (c_v)²
- p_0 – statički tlak ($\approx 101,3$ kPa)

Brzinu zvuka za plinove možemo izraziti i preko plinske konstante R (≈ 287 J kg⁻¹K⁻¹ $\approx 8,314$ J mol⁻¹K⁻¹):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{\rho}} = \sqrt{\gamma R T}$$

Na temperaturi 293,15 K = 20°C brzina zvuka u zraku iznosi 343 m/s. Pod normalnim uvjetima (20°C; 101,3 kPa) gustoća zraka iznosi 1,204 kg/m³. Primijetite da brzina zvuka u plinovima ovisi samo o temperaturi, a ne i statičkom tlaku. Modul elastičnosti ovisi samo o statičkom tlaku, a ravnotežna gustoća ovisi o obje veličine. Brzina zvuka u tekućinama mnogo je veća, nego u plinovima, a u krutim tijelima je najveća (iz tog razloga u filmovima ljudi prislanjanju uho na željezničke tračnice – zvuk vlaka se njima širi puno brže, nego zrakom). Za primjer možemo uzeti vodu u kojoj je brzina zvuka oko 1 500 m/s. [16, 41]

¹ Fizikalna veličina koja opisuje koliko se izduljena elastična tijela skraćuju ili produljuju pod djelovanjem sile ovisno o materijalu od kojega su načinjena

² Ovo je moguće jer se zgušnjavanje i razrjeđivanje slojeva plina u zvučnom titranju odvija adijabatski

Dodatna jednačba koja povezuje brzinu čestice i zvučni tlak je Eulerova jednačba gibanja:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p = 0$$

3.2. Ravni zvučni valovi

Ravni zvučni valovi su središnji pojam u akustici. Ravni valovi su valovi u kojima je bilo koja akustička varijabla u danom trenutku konstantna na svaku ravninu okomitu na smjer širenja vala. Ravni val je rješenje jednodimenzionalne valne jednačbe:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Generalno rješenje te jednačbe je:

$$p = f_1(vt - x) + f_2(vt + x)$$

gdje su f_1 i f_2 proizvoljne funkcije.

Širenje harmonijskog ravnog vala u x smjeru može se napisati kao:

$$p = A \sin\left(\frac{\omega}{v} (vt - x) + \varphi\right) = A \sin(\omega t - kx + \varphi)$$

gdje je

- ω – kružna frekvencija
- $k = \omega / v$ – valni broj
- A - amplituda vala
- φ - fazni kut.

U svakom trenutku u ovom zvučnom polju, zvučni tlak mijenja se sinusoidalno s kružnom frekvencijom ω te u svakom fiksnom trenutku zvučni tlak se sinusoidalno mijenja s prostornom koordinatom x .

Još jedna značajna karakteristika ovakvog vala je njegova valna duljina tj. razmak između dvije susjedne točke najvećeg zgušnjavanja ili između dvije točke najvećeg razrjeđenja sredine u kojoj se zvučni val širi:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{2v\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{k}$$

Vidimo da je valna duljina obrnuto proporcionalna frekvenciji. Ako ovdje uvrstimo gornju i donju granicu čujnosti, dobivamo da se radi o valnim duljinama od oko 17,15 m za frekvenciju od 20 Hz te 17,15 mm za frekvenciju od 20 kHz. Upravo taj široki pojas frekvencija često čini probleme u akustici jer se zvučna polja često istražuju frekvenciju po frekvenciju. Linearnost implicira da će sinusoidalni izvor kružne frekvencije ω generirati zvučno polje koje se mijenja harmonijski s frekvencijom u svakom trenutku. Ako izvor emitira bilo kakav signal koji nije sinusoidalnog karaktera, automatski bi se promijenio i opći oblik vala. Kako nam je frekvencija zadana, sve što je potrebno odrediti su amplituda i faza u svakom trenutku. Ovo nas dovodi do uvođenja kompleksnih veličina. U svakom danom položaju zvučni tlak se može zapisati kao kompleksna funkcija:

$$\hat{p} = A e^{i\omega t} = |A| e^{i\varphi} e^{i\omega t} = |A| e^{i(\omega t + \varphi)}$$

gdje je

- φ – faza kompleksne amplitude A .

Realni (fizički) vremenski promjenjiv zvučni tlak je realni dio kompleksnog tlaka:

$$p = \text{Re}\{\hat{p}\} = \text{Re}\{|A|e^{i(\omega t + \varphi)}\} = |A|\cos(\omega t + \varphi)$$

Kako se cijelo zvučno polje mijenja s $e^{i\omega t}$, operator $\partial/\partial t$ možemo zamijeniti s $i\omega$. Analogno tome operator $\partial^2/\partial^2 t$ možemo zamijeniti s $-\omega^2$. Uvrstimo li ove promjene u već spomenutu Eulerovu jednadžbu gibanja:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \nabla p = 0$$

dobivamo:

$$i\omega\rho \hat{v} + \nabla\hat{p} = 0$$

te se valna jednađba može pojednostavniti i zapisati kao

$$\frac{\partial^2\hat{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\hat{p}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\hat{p}}{\partial z^2} + k^2\hat{p} = 0$$

što je poznata Helmholtzova jednađba u kojoj vremenska komponenta ovisnosti nestaje.

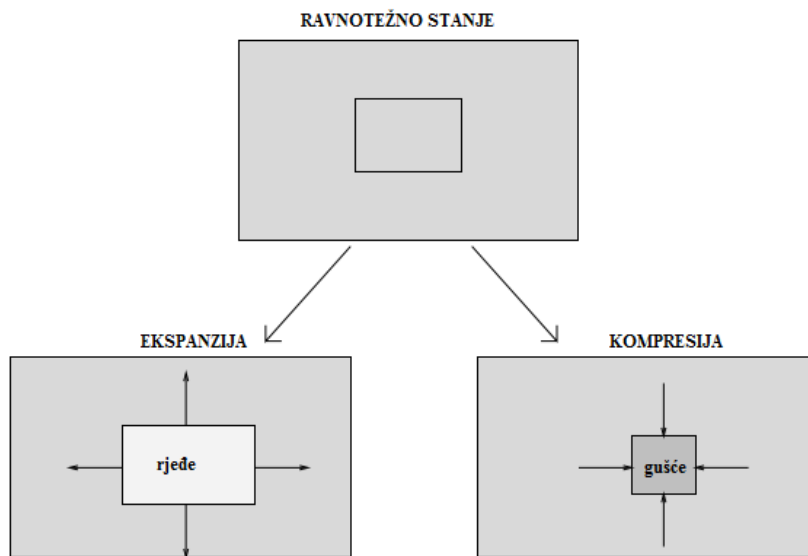
3.3. Energija zvuka

Svi oblici zvuka slijede dijagram:

Fizikalni uzrok → Generirajući mehanizam → Širenje zvuka → Primitak zvuka → Posljedica

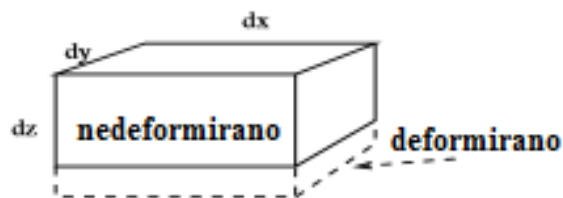
Kod svake pojave zvuka postoje razni uzroci i njihove posljedice (ovisno radi li se o npr. govoru ili potresu) te razni oblici stvaranja/primitka koji su svi zapravo fizikalni procesi pretvorbi raznih oblika mehaničke energije. Središnje mjesto u razmatranju zvuka, ipak, ima razmatranje energije pri širenju zvuka. U fluidima se zvuk širi kao val zvučnog tlaka. Pri kretanju toga vala javlja se vibracija molekula uslijed razlike tlakova. S tim kretanjem je vezana vibracijska kinetička energija.

U ravnotežnom stanju kocka fluida jednake je gustoće kao i okolni fluid. Pri kompresiji, pod utjecajem okolnog medija, gustoća u kocki se povećava, a pri ekspanziji smanjuje. Kocka se stisne, pusti te zatim obavlja rad nad medijem. U deformiranom stanju, potencijal za obavljanje rada se nalazi u obliku elastične potencijalne energije. [42]



Slika 2. U ravnotežnom stanju kocka fluida je jednake gustoće kao i okolni fluid. Pri kompresiji, pod utjecajem okolnog medija, gustoća u kocki se povećava, a pri ekspanziji smanjuje. [42]

Pogledajmo što se događa pri širenju početne kocke akustičkog sredstva u smjeru osi z.



Slika 3. Širenje početne kocke akustičkog sredstva u smjeru osi z

Rad koji okolni medij obavlja na kocki, po z osi, dan je s integralom:

$$- \int p(dx dy) dz,$$

gdje su granice integrala od nedeformiranog do deformiranog volumena u danom trenutku:

$$E_{pot} = - \int_{nedeformirano}^{deformirano} p(dx dy) dz = - \int p dV$$

Ako uzmemo u obzir Hookeov zakon, koji kaže kako za akustički medij vrijedi proporcionalnost tlaka okolnog medija, koji djeluje na površinu naše kocke, s promjenom volumena kocke dobivamo:

$$p = \frac{-\kappa dV}{V}$$

gdje je :

- p – zvučni tlak
- dV – promjena volumena
- V – početni volumen kocke
- κ – modul kompresije

Uz modul kompresije $\kappa = v^2 \rho$ slijedi:

$$- \int p dV = V \int \frac{p dp}{\rho v^2} = \frac{p^2 V}{2 \rho v^2}$$

gdje je :

- p – zvučni tlak
- ρ – gustoća akustičkog medija
- V – početni volumen kocke
- v – brzina zvuka u mediju

Time smo dobili izraz za potencijalnu energiju,

$$E_{pot} = \frac{p^2 V}{2 \rho v^2}$$

Također, može se izračunati prosječna kinetička energija koja nastaje zbog prolaska zvuka kroz akustički medij:

$$E_{kin} = \int F dx = \int m \vec{a} dx = \int m \vec{v} d\vec{v}$$

Supstitucijom $m = \rho V$ te $\vec{v} = \frac{p}{\rho v}$ ($\vec{v}$ je brzina samih čestica) dobivamo:

$$\int m \vec{v} d\vec{v} = \int \rho V \frac{p}{\rho v} d\left(\frac{p}{\rho v}\right) = \frac{p^2}{2v^2 \rho} V$$

$$E_{kin} = \frac{p^2}{2v^2 \rho} V$$

Time je ukupna trenutna energija malog dijela akustičkog materijala volumena V , koja nastaje zbog prolaska zvuka, zbroj kinetičke i potencijalne energije:

$$E_{tot} = E_{pot} + E_{kin}$$

$$E_{tot} = \frac{p^2}{2v^2 \rho} V + \frac{p^2}{2v^2 \rho} V = \frac{p^2}{v^2 \rho} V$$

gdje je :

- p – zvučni tlak
- ρ – gustoća akustičkog medija
- V – početni volumen kocke
- v – brzina zvuka u mediju

Koristan pojam je i gustoća energije (energija/volumen). U slučaju potencijalne energije ona iznosi:

$$w_{pot} = \frac{p^2}{2\rho v^2}$$

Gustoća kinetičke energije:

$$w_{kin} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

gdje je v – brzina titranja čestice

Kao što smo vidjeli zvučni val sadrži kinetičku i potencijalnu energiju koje ovise o brzini titranja i zvučnom tlaku. Ovo nam govori da se zvučnim valom prenosi mehanička energija. Količina energije koja u jednoj sekundi prostruji kroz jediničnu plohu koja je okomita na smjer širenja naziva se jakost ili intenzitet zvuka te je dana relacijom:

$$I = p * v$$

gdje je:

- p – zvučni tlak
- v - titrajna brzina čestica u smjeru širenja zvuka

Kod kuglastog širenja zvuka zvučna jakost je jednaka

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho v}$$

gdje je:

- W – zvučna snaga izvora
- r – udaljenost od izvora zvuka
- ρ - gustoća elastičnog sredstva,
- ρv – valni otpor medija

Vidimo da intenzitet zvuka opada s kvadratom udaljenosti od izvora izvuka.

Razina jakosti zvuka mjeri se u belima (B). Jedinica je nazvana po američkom fizičaru Alexandru Graham Bellu. Dva zvučna signala se razlikuju u intenzitetu za 1 bel ako omjer njihovih intenziteta iznosi 10.

$$J = \log \frac{I}{I_0}$$

U fizici se često umjesto samih fizikalnih veličina uvode tzv. razine veličina odnosno logaritam omjera zadane veličine i referentne veličine iste vrste. Takva veličina je vidimo i jakost zvuka te je ona time relativna veličina [25]. U praksi se najčešće rabi deset puta manja jedinica tj. decibel (dB):

$$J = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

gdje je

- $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ – referentni zvučni intenzitet

Osim, razine jakosti zvuka izuzetno nam je važna veličina koja opisuje razinu zvučnog tlaka te je ona dana izrazom:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

gdje je

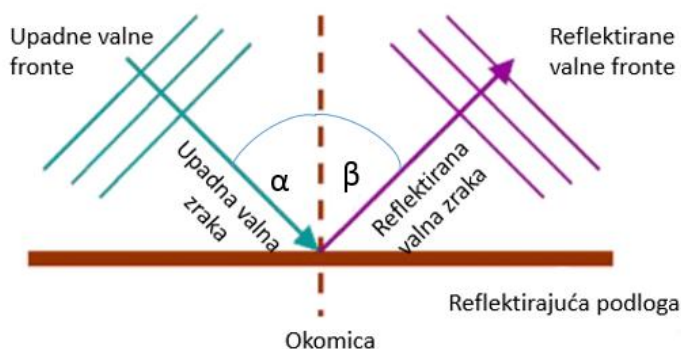
- p – promatrani zvučni tlak
- $p_0 = 20 \mu Pa$ – referentni efektivni zvučni tlak za zvuk u zraku.

I na kraju definirajmo još samo zvučnu snagu izvora koja predstavlja svu zvučnu energiju koju zrači izvor u određenom frekvencijskom pojasu u određenom vremenskom intervalu, podijeljena sa širinom toga intervala.

4. POJAVE KOJE PRATE ZVUČNE VALOVE

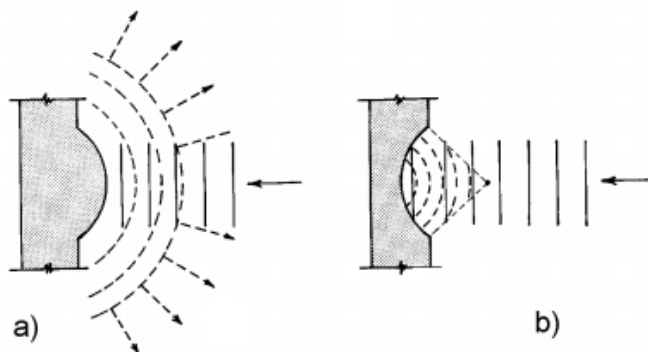
4.1. Refleksija zvučnih valova

Refleksija je odbijanje valova na graničnoj površini dva sredstva. U slučaju da je granična ploha glatka ili ima zanemarive neravnine tada se refleksija koja se događa na toj plohi naziva regularna refleksija. Kod regularne refleksije upadni kut dolazne valne zrake jednak je kutu odbijanja (refleksije) valne zrake. Da bi do zvučne refleksije uopće moglo doći mora biti ispunjen uvjet da je valna duljina zvučnog vala mnogo manja od dimenzija granične plohe od koje se taj isti val odbija. Širenje zvuka možemo prikazati zvučnim zrakama koje su zamišljeni pravci okomiti na valne fronte valova koje odašilje izvor zvuka.



Slika 4. Refleksija zvučnih valova

Zvučni valovi se reflektiraju i o glatku plohu koja nije ravna te tada upad na konveksnu površinu izaziva disperziju (slika 5.a), a upad na konkavnu površinu izaziva fokusiranje (slika 5.b) zvučnih valova.

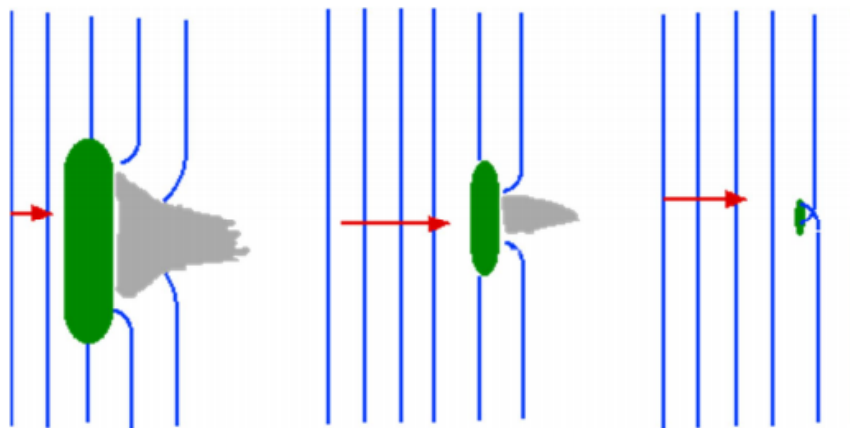


Slika 5. Refleksija zvučnih valova o konveksnu i konkavnu površinu. [26]

4.2. Ogib zvučnih valova

Iz svakodnevnog života znamo da možemo čuti i ono što se događa iza neke prepreke. Tome je tako jer zvučni valovi „zaobilaze“ prepreke mijenjajući pri tome smjer širenja, odnosno kod njih opažamo pojavu ogiba ili difrakcije. Izgled ogiba ovisi o odnosu valne duljine zvučnoga vala i dimenzije prepreke. Sam ogib se bolje uočava pri većim valnim duljinama, što znači da će se zvuk niže frekvencije jače ogibati na preprekama.

Zvučni val ogiba se oko prepreke na putu širenja ako je prepreka bitno manja od valne duljine, no ukoliko je znatno veća to nije tako. Sljedeća slika pokazuje nam primjer zvučne refleksije o prepreku dimenzija mnogo većih nego što je valna duljina zvučnoga vala. Zvučni se valovi gotovo potpuno odbijaju od prepreke pa ih iza nje gotovo niti nema. Taj prostor nazivamo zvučna sjena.

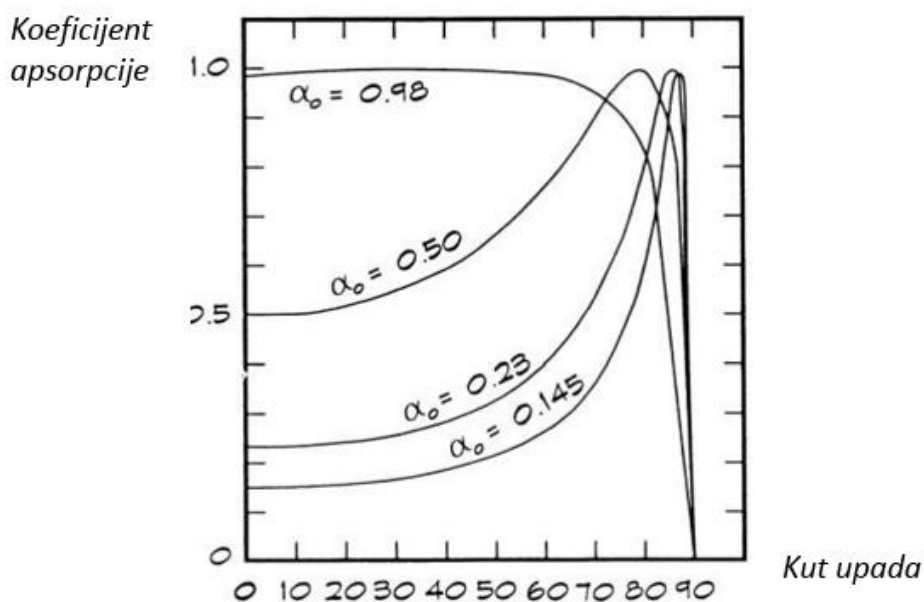


Slika 6. Zvučna sjena [26]

4.3. Apsorpcija zvučnih valova

Apsorpcija valova zvuka je pojava upijanja zvuka za vrijeme refleksije o graničnu površinu između dva sredstva. Val zvuka putujući kroz sredstvo udari o graničnu površinu te tada dio energije prelazi u drugo sredstvo u obliku transmisijskog vala te se kreće brzinom koja odgovara novom sredstvu, dok je ostatak energije odaslan natrag u prvo sredstvo u obliku reflektirajućeg vala, krećući se početnom brzinom. Pri apsorpciji veliki se dio energije pretvara u toplinu. Za apsorpciju zvuka još možemo reći da je to proces prigušivanja zvuka njegovim prolaskom kroz medij. Koeficijent apsorpcije (α) je funkcija frekvencije, kuta upada te pojedinog materijala i

njegova pripadajućeg oblika i volumena. Ova činjenica se koristi za mijenjanje akustičkih svojstava velikih prostorija, odnosno za skraćivanje odjeka i prigušivanje buke.



Slika 7. Ovisnost koeficijenta apsorpcije o kutu upada zvuka [52]

Jedan od načina mjerenja koeficijenta apsorpcije je ta da se u ječnoj komori (komora čije su površine obložene tvrdim i reflektirajućim materijalom, a površine nisu paralelne tako se stvara difuzno polje zbog čega se zvuk raspoređuje ravnomjerno kroz cijelu prostoriju) mjeri promjena vremena odjeka usred unošenja određenog materijala neke površine S . [40, 52] Tada je koeficijent apsorpcije dan izrazom:

$$\alpha = \frac{0,16 V}{S} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_p} \right)$$

gdje je:

- α – koeficijent apsorpcije uzorka
- S – površina uzorka mjerenog materijala
- V – volumen ječne komore
- T_u - vrijeme odjeka s uzorkom
- T_p – vrijeme odjeka prazne komore

4.4. Lom zvučnih valova

Kao što se svjetlosni valovi lome pri prijelazu iz jednog sredstva u drugo, tako se slično lome i zvučni valovi. Što je razlika u gustoći medija veća, veća je i promjena smjera širenja vala. Gušći materijal brži provodi zvuk kao što i viša temperatura medija omogućava brže provođenje zvuka kroz njega. Ovo nas dovodi do zaključka da ako su gornji slojevi topliji, smjer u kojem se zvuk širi savija se prema tlu (noć), a ukoliko je pri tlu topliji zrak zvuk će skretati prema gore (dan). Upravo je to razlog zašto ako dozivamo svog ljubimca po noći (kada je pri tlu hladan zrak) će nas čuti, a ukoliko to napravimo tijekom dana, kada je pri tlu temperatura veća, neće. Iz istog razloga je domet zvuka ljeti vrlo mali.



Slika 8. Smjer širenja zvučnih valova u ovisnosti o dobu dana [49]

U tablici 1 je prikazana brzina zvuka u materijalima različitih gustoća na istim temperaturama te zraka na različitim temperaturama.

Sredstvo	v / ms^{-1}	Sredstvo (plin)	$t ^\circ \text{C}$	v / ms^{-1}
Alkohol	1143	Zrak	0	331
Aluminij	5104	Zrak	20	344
Bakar	3560	Zrak	100	366
Voda	1461	Zrak	1000	700
Morska voda	1500	Vodik	0	1263
Željezo	5130	Vodena para	0	401
Živa	1407	Ugljični dioksid	0	258
Staklo	5500	Neon	0	437
Guma	54	Kisik	0	317
Olovo	1322	Helij	0	971

Tablica 1. Brzina zvuka u pojedinim materijalima [44]

Upravo o brzini zvuka u pojedinom materijalu ovisiti će i lom (refrakcija) zvučnih valova jer i ovdje, baš kao i kod valova svjetlosti, vrijedi Snellov zakon loma:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

gdje je:

- α – upadna zvučna zraka
- β – izlazna zvučna zraka
- v_1 – brzina zvuka u sredstvu iz kojeg zvučna zraka dolazi
- v_2 – brzina zvuka u sredstvu u kojeg se zvučna zraka lomi

Ukoliko zvuk prelazi iz gušćeg sredstva u rjeđe tada će se valna zraka lomiti prema okomici, a ukoliko zvuk prelazi iz rjeđeg u gušće sredstvo lomit će se od okomice.

4.5. Dopplerov efekt

Dopplerov efekt otkrio je Christian Doppler 1842. godine, promatrajući promjene frekvencija svjetlosti koju emitiraju zvijezde u dvojnem sustavu. Efekt opisuje promjenu frekvencije vala zbog gibanja samog izvora ili promatrača vala. Zbog različite prirode valova zvuka i svjetlosti, efekt nosi različite karakteristike iako dijele naziv. Dopplerov efekt za svjetlost je relativistički, dok je za zvuk klasičan, tj. nije bitna samo relativna brzina, nego i pojedinačne brzine izvora i promatrača.

U slučaju mirujućeg izvora i promatrača imamo klasični izraz za frekvenciju:

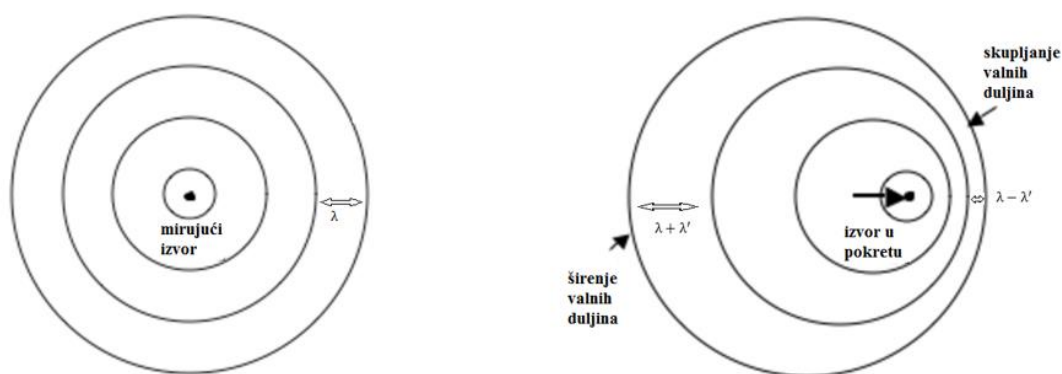
$$f = \frac{v_z}{\lambda}$$

gdje je:

- v_z – brzina zvuka u mediju širenja
- f – frekvencija zvuka na izvoru
- λ – valna duljina zvuka

Ukoliko se izvor giba, u vremenu perioda T , izvor će se pomaknuti za $v_i T$, čime nastaje promjena valne duljine:

$$\lambda' = v_i T = \frac{v_i}{f}$$



Slika 9. Lijevo: mirujući izvor stvara koncentrične kružnice. Desno: U slučaju kretanja izvora kružnice se izobličavaju.

Pomicanje izvora smanjuje valnu duljinu u slučaju da se on približava, a povećava u slučaju da se udaljava. Primljena frekvencija iznosi:

$$f' = \frac{v_z}{\lambda \pm \lambda'} = \frac{v_z}{\frac{v_z}{f} \pm \frac{v_i}{f}}$$

$$f' = \frac{v_z}{v_z \pm v_i} f$$

gdje je:

- v_i – brzina izvora, pozitivna ako se udaljava
- f' – frekvencija koju prima mirujući promatrač u slučaju gibajućeg izvora

Zanimljivo je uočiti da postoji divergentno rješenje – ukoliko se izvor približava promatraču brzinom zvuka, primljena frekvencija divergira. Sav zvuk do promatrača dolazi u istom trenu kao i izvor, tj. dolazi do zvučnog udara. Taj fenomen se često naziva Machov udar, koji nastaje kada brzo tijelo poput aviona probije zvučnu barijeru. [6, 11]

U slučaju da se promatrač kreće prema izvoru, valna duljina ostaje ista, no promatrač prima valove kao da se zvuk kreće promijenjenom brzinom.

U tom slučaju dolazimo do izraza za frekvenciju:

$$f'' = \frac{v_z \pm v_p}{\lambda} = \frac{v_z \pm v_p}{\frac{v_z}{f}}$$

$$f'' = \frac{v_z \pm v_p}{v_z} f$$

gdje je:

- v_p – brzina promatrača, pozitivna ako se približava
- f'' – frekvencija koju prima gibajući promatrač od mirujućeg izvora

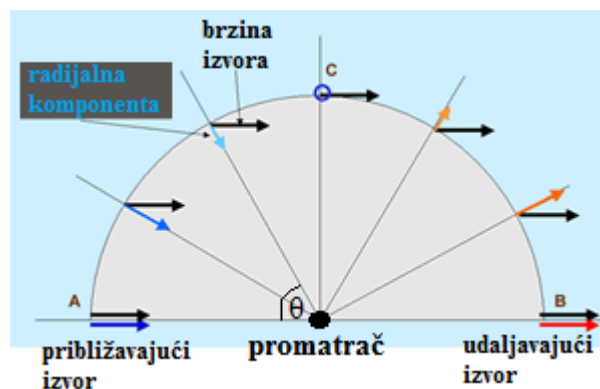
Zanimljivo je uočiti da se u slučaju gibanja promatrača brzinom zvuka u smjeru prema izvoru dobiva frekvencija $2f$, za razliku od ranije navedenog divergentnog slučaja u kojem se izvor giba brzinom zvuka.

Kombiniranjem izraza za gibajući izvor i za gibajućeg promatrača dolazimo do potpunog izraza za Dopplerov efekt za zvuk:

$$f_{Doppler} = \frac{v_z \pm v_p}{v_z \pm v_i} f$$

Gibanja pri kojima se promatrač i izvor približavaju povećavaju frekvenciju, što znači da je predznak v_p pozitivan, a v_i negativan u tom slučaju. Pri udaljavanju su predznaci suprotni.

Gornja formula naznačuje kako je frekvencija konstanta u slučaju konstantnog gibanja, međutim, to odgovara samo ukoliko se gibanje odvija po spojnici izvor – promatrač. Ukoliko se gibanje odvija drugačije, bitna je radijalna brzina. [6, 11]



Slika 10. Rastav brzina gibajućeg izvora u odnosu na mirujućeg promatrača. Za Dopplerov efekt bitna je samo radijalna komponenta brzine. [4]

Točke A i B odgovaraju izvoru na prethodnoj stranici, kada se izvor giba na spojnici promatrač-izvor. U točki C je gibanje okomito na spojnicu te ne dolazi do Dopplerovog efekta. Za sve ostale slučajeve potrebno je računati radijalnu komponentu brzine, koja se jednostavno dobije s:

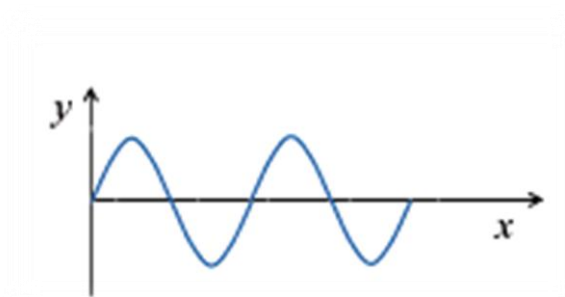
$$v_r = v_i \cos \theta.$$

Radijalna komponenta brzine je ona koja utječe na pojavu Dopplerovog efekta. [4]

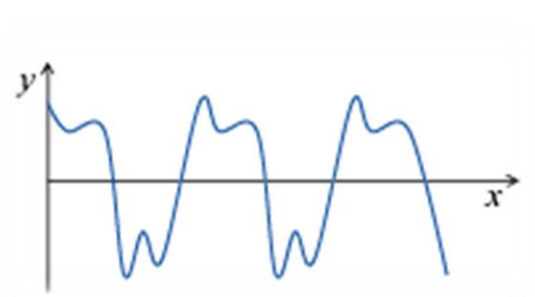
Postoje mnoge upotrebe Dopplerovog efekta koje se služe elektromagnetskim valovima, poput brzinomjera na cestama te mjerenje kretanja objekata u atmosferi tijekom oluja. Dopplerov efekt sa zvukom najviše se upotrebljava u medicini za ultrazvučno mjerenje smjera i brzine toka krvi.

5. HARMONICI

U osnovi zvukove možemo podijeliti na dvije skupine, a to su šumovi i tonovi. Šum je zvuk koji nastaje nepravilnim titranjem zvučnog izvora promjenjive frekvencije. Zvuk kojeg čini harmonijsko titranje jedne frekvencije kao i onaj zvuk koji je sastavljen od više harmonijskih titraja različitih frekvencija, ali takvih da su pojedine frekvencije cjelobrojni višekratnici najniže frekvencije među njima, nazivamo ton. Ton koji se sastoji od samo jedne frekvencije, a čiji je zvučni val sinusoidalnog oblika, zove se mono-harmonijski ton i u prirodi je vrlo rijedak. Frekvencijom izvora određena je i visina tona. Visoki tonovi nastaju titranjem izvora velikim frekvencijama, a duboki tonovi titranjem izvora malim frekvencijama.

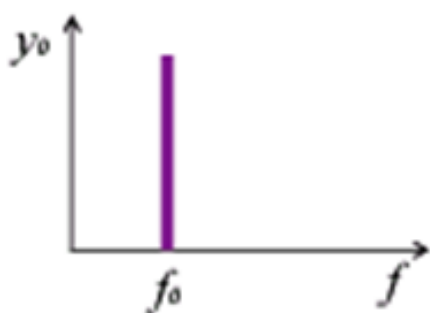


Slika 11. Čisti ton [29]

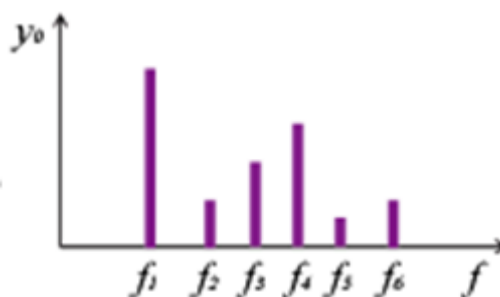


Slika 12. Složeni ton [29]

Na sljedeće dvije slike prikazani su pripadajući spektri čistog i složenog tona

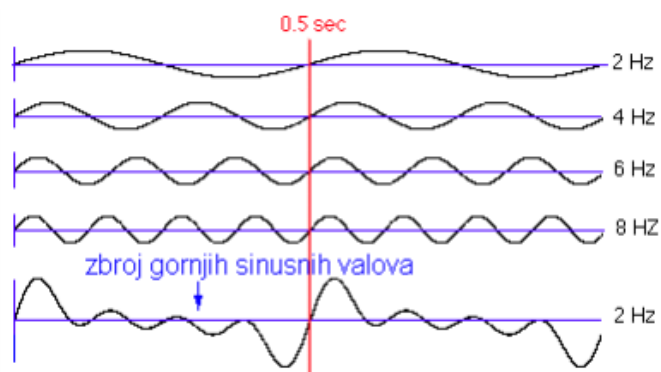


Slika 13. Spektar čistog tona [29]



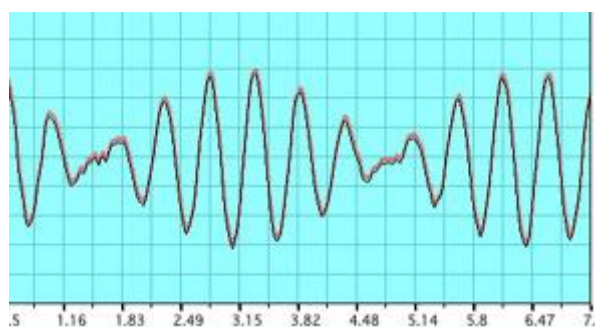
Slika 14. Spektar složenog tona [29]

Najnižu frekvenciju složenog tona nazivamo osnovnom frekvencijom, a ostale viši harmonici. Frekvencija pojedinog harmonika uvijek je jednaka cjelobrojnom višekratniku osnovne frekvencije. Na slici 15. možemo vidjeti pet valova od kojih prvi val predstavlja osnovni ton, a valovi od 2, 4, 6 i 8 Hz predstavljaju više harmonike tog osnovnog tona. Rezultat zbrajanja tih valova je posljednji val.

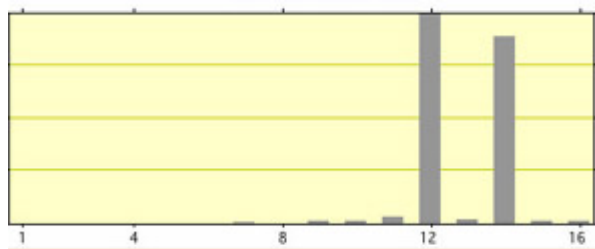


Slika 15. Osnovni ton i viši harmonici [10]

Već smo spomenuli da je mono – harmonijski ton u prirodi vrlo rijedak te da se zvuk najčešće sastoji od valova različitih frekvencija. Da bi takav val analizirali koristimo se spektralnom analizom koja zvučni val razlaže na njegove sastavne frekvencije. Ulazni parametar je amplituda zvuka u vremenu, a izlazni raspodjela frekvencija u određenom frekventnom pojasu u tom istom vremenu. [23]



Slika 16. Ulazni parametri spektralne analize [23]



Slika 17. Izlazni parametri spektralne analize [23]

Spektralna analiza se najčešće provodi Fourierovom analizom. Fourierovi redovi se mogu definirati kao razvoj (ili reprezentacija) proizvoljne periodične funkcije $f(x)$ po sinusima i kosinusima.[15, 23] Pretpostavimo da je promatrana funkcija (koja u našem slučaju predstavlja zvučni val) periodična na nekom intervalu $[0, 2\pi]$. Tada se funkcija $f(x)$ može aproksimirati trigonometrijskim redom:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(nx + \varphi_n))$$

gdje je:

- $\frac{a_0}{2}$ – translacijski član (translacija funkcije duž y-osi)
- a_n – amplituda
- φ_n - faza

Primijenimo li na gornju relaciju adicijsku formulu za sinus, Fourierov red možemo zapisati kao:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(nx) \cos \varphi_n + b_n \cos(nx) \sin \varphi_n)$$

gdje su $\sin \varphi_n$ te $\cos \varphi_n$ brojevi koji su dio koeficijenta uz $\sin(nx)$ i $\cos(nx)$. Uzmemo li i to u obzir, Fourierov red sada izgleda ovako:

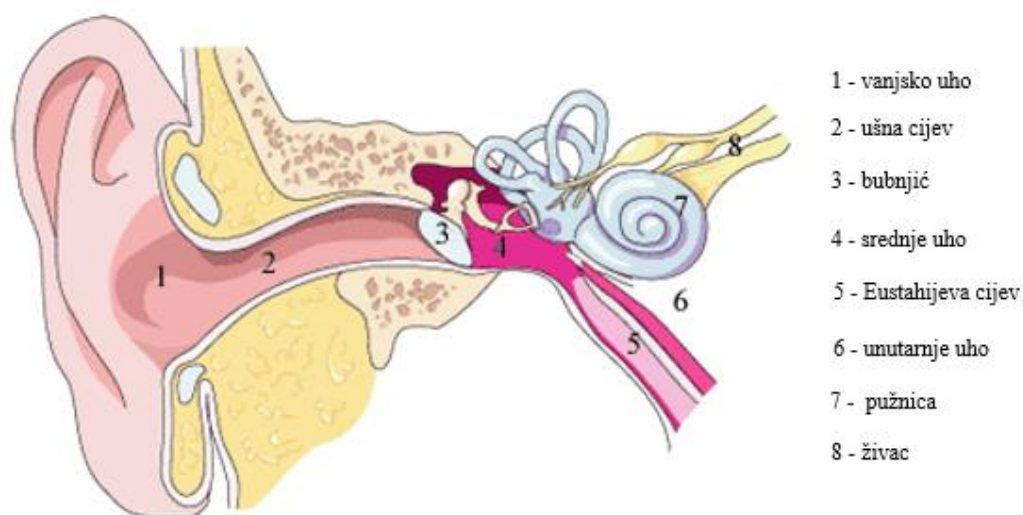
$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(nx) + b_n \cos(nx))$$

Traženje Fourierova reda sada se svodi na traženje koeficijenata a_n i b_n . Važno je naglasiti da ovime više ne moramo promatrati fazu pojedine sinus funkcije već je dovoljno tražiti koeficijente uz sinus i kosinus. Ovakav račun aproksimacija daje najmanju pogrešku te su zbog toga Fourierove transformacije nezaobilazan alat u akustici. Unatoč tome ovaj osnovni oblik Fourierova reda nije pogodan za spektralnu analizu složenih zvučnih valova već se koristi brza Fourierova transformacija čiji je rezultat skup kompleksnih brojeva gdje je frekvencija prikazana kao redni broj kompleksnog broja u skupu, a elongacija kao zbroj kvadrata realnog i imaginarnog dijela kompleksnog broja. [6, 14, 15, 23]

6. KAKO ČUJEMO

Ljudsko uho je zapanjujući transformator zvučne energije u mehaničku energiju te mehaničke energije u živčani impuls koji se prenosi do mozga. Ta sposobnost uha omogućuje nam opažanje visine zvuka detekcijom frekvencije vala, glasnoću zvuka detekcijom amplitude vala te boju zvuka detekcijom različitih frekvencija koje čine složen zvučni val.

Uho se sastoji od tri osnovna dijela: vanjskog, srednjeg i unutarnjeg uha. Svaki dio uha ima odgovarajuću ulogu u opažanju i interpretaciji zvuka. Vanjsko uha prikuplja i usmjerava zvuk do srednjeg uha. Srednje uho pretvara energiju zvučnog vala u unutarnje vibracije koštane strukture srednjeg uha i u konačnici pretvara te vibracije u kompresijski val u unutarnjem uhu. Unutarnje uho pretvara energiju kompresijskog vala unutar tekućine unutarnjeg uha u živčani impuls koji se može prenijeti do mozga. [20, 25, 29]



Slika 18. Slušni organ u poprečnom presjeku [48]

Vanjsko uho

Vanjsko uho sastoji se od ušne školjke (*lat. auricula*) i oko dva centimetra duge ušne cijevi (*lat. meatus acusticus externus*) koje zajedno čine lijevak koji pojačava zvuk. Nabori ušne školjke su oblikovani tako da usmjeruju zvučne valove prema otvoru ušne cijevi. Ušna školjka pruža zaštitu za srednje uho kako bi se spriječilo oštećenje bubnjića. Vanjsko uho također usmjerava zvučne valove, koji dolaze do uha, preko ušne cijevi do bubnjića u srednjem uhu. Zbog svoje

duljine, ušna cijev može pojačavati zvukove čija je frekvencija oko 3000 Hz. Dok zvuk putuje vanjskim uhom, još uvijek je u obliku kompresijskog vala, s periodičkim područjima visokog i niskog tlaka (zgušnjenjima i razrjeđenjima zraka). Energija mehaničkog vala se pretvara u unutarnje vibracije koštane strukture srednjeg uha tek kada zvuk dođe do granice vanjskog i srednjeg uha. [25, 29, 46]

Srednje uho

Srednje uho je šupljina ispunjena zrakom, a sastoji se od bubnjića (*lat. cavum tympani*) i tri sićušne, međusobno povezane kosti: čekić (*lat. malleus*), nakovanj (*lat. incus*) i stremen (*lat. tapes*). Bubnjić je vrlo izdržljiva i napeta membrana koja počne vibrirati kada do nje stigne kompresijski val. Zgušnjenje zraka tjera bubnjić unutra, a razrjeđenje zraka tjera bubnjić prema van pa prema tome bubnjić vibrira na frekvenciji zvučnog vala.

Prva slušna košćica je čekić koji je zapravo svojim kratkim nastavkom srastao sa sredinom bubnjića i zajedno s njime se okreće oko njegove osi. Kako je čekić povezan s bubnjićem, vibracije bubnjića će uzrokovati vibracije čekića, stremena i nakovnja na frekvenciji zvučnog vala. Stremen je povezan s unutarnjim uhom pa se vibracije stremena prenose do tekućine u unutarnjem uhu i stvara se kompresijski val unutar te tekućine. Ove košćice sluše kao pojačivači vibracija zvučnog vala. Naime, kako je kompresijski val koji udara u veliku površinu bubnjića koncentriran na malu površinu stremena tako je snaga vibrirajućeg stremena 15 puta veća od snage vibrirajućeg bubnjića. Ova značajka poboljšava našu sposobnost detektiranja najslabijih zvukova. Srednje je uho šupljina ispunjena zrakom koja je s ustima povezana Eustahijevom cijevi. Ova veza omogućuje izjednačavanje tlakova unutar zrakom ispunjenih šupljina uha. Tako kada osjećamo bol ili nelagodnu u uhu zbog primjerice promjene nadmorske visine, tlak izjednačavamo gutanjem (otvara se Eustahijeva cijev), a bol prolazi. [20, 25, 29, 46]

Unutarnje uho

Unutarnje uho se zbog svog zamršenog izgleda naziva i labirint. Sastoji se od pužnice (*lat. cochlea*), predvorja (*lat. vestibulum*) i polukružne cijevi (*lat. canales semicirculares*). Pužnica i polukružni kanali su ispunjeni tekućinom nalik vodi (endolimfa). Tekućina i živčane stanice

polukružnih kanala nemaju nikakvu ulogu u slušnom procesu, one samo služe za otkrivanje ubrzanog gibanja i pomažu u održavanju ravnoteže. Pužnica je organ u obliku puža s dva i pol zavoja duljine oko tri centimetra (kada se rastegne). Osim što je ispunjena tekućinom, u unutrašnjosti pužnice se nalazi Cortijev organ koji se sastoji od oko 20 000 živčanih stanica nalik dlačicama različite duljine (0,04 – 0,5 mm) i napetosti koje reagiraju (rezoniraju) na različite podražaje. Naime, nailaskom kompresijskog vala (zvučnog vala) dolazi do rezonancije onih dlačica čija je vlastita frekvencija jednaka frekvenciji vala te dlačica počinje vibrirati većom amplitudom. Zbog povećane amplitude vibriranja dlačica otpušta električni impuls koji putuje slušnim živcem do mozga. U procesu koji se još uvijek u potpunosti ne razumije, mozak je sposoban interpretirati odgovarajuće značajke zvuka prema primljenim električnim impulsima. [20, 25, 29, 46]

7. ULTRAZVUK I INFRAZVUK

Jedna od bitnih karakteristika zvuka je njegova frekvencija. Kao i kod elektromagnetskog spektra, za zvuk postoji podjela prema frekvenciji. U svojim počecima se akustika kao znanost bavila proučavanjem zvukova koje čuje ljudsko uho. Područje proučavanja akustike je u međuvremenu prošireno na više (ultra) i niže (infra) frekvencije. Za standardne uvjete uzima se da je raspon frekvencija ljudskog uha oko $20 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ kHz}$. Ultrazvuk je stoga definiran kao zvuk frekvencija iznad 20 kHz, a infrazvuk s frekvencijama ispod 20 Hz.



Slika 19. Podjela zvučnih valova prema frekvencijama [50]

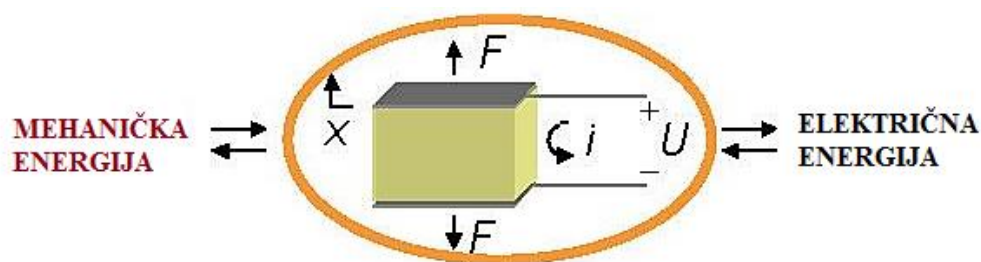
7.1. Ultrazvuk

Jer je raspodjela zvučnih valova određena isključivo pragovima ljudskog sluha, već u životinjskom svijetu nalazimo primjere životinja čije su granice sluha u različitim područjima od ljudskoga. Najpoznatiji primjer su šišmiši, koji putem eholokacije u ultrazvučnom području (raspon od 100 kHz do 200 kHz) određuju položaj svojeg plijena.

Tehnike mjerenja pomoću ultrazvučnih frekvencija, koje se koriste u industriji i medicini, imaju svojih ograničenja. Nije moguće mjeriti objekte manjih dimenzija od valne duljine vala te su stoga potrebne visoke frekvencije kako bi se pri mjerenjima dobila dobra rezolucija. S druge strane, valovi izrazito visokih frekvencija i kratkih valnih duljina se lako apsorbiraju u materijalu te tako ne prodiru duboko u uzorke. Stoga se pri, na primjer, medicinskom testiranju koriste visoke frekvencije za mjerenja blizu površine, a niske frekvencije za mjerenja duboko u tkivu. Spomenute frekvencije variraju od 1MHz do 50 MHz.

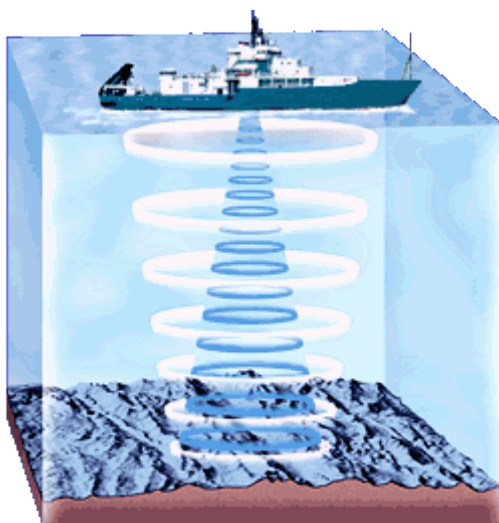
Za stvaranje ultrazvučnih valova bitna je uloga inverznog piezoelektričnog efekta. Piezoelektrični efekt je pojava stvaranja električnog naboja na površini kristala (izolatora) koji je elastično deformiran utjecajem vanjske, mehaničke, sile – te se može koristiti za mjerenje tlaka. Ukoliko želimo stvarati deformacije na tom istom kristalu, možemo se poslužiti električnim signalom. Korištenjem električnog signala možemo dobiti periodične deformacije – koje nazivamo

vibracije. Te vibracije su zapravo izvor ultrazvučnih valova, koji se usmjeravaju prema meti istraživanja. [2]



Slika 20. Piezoelektrični efekt [2]

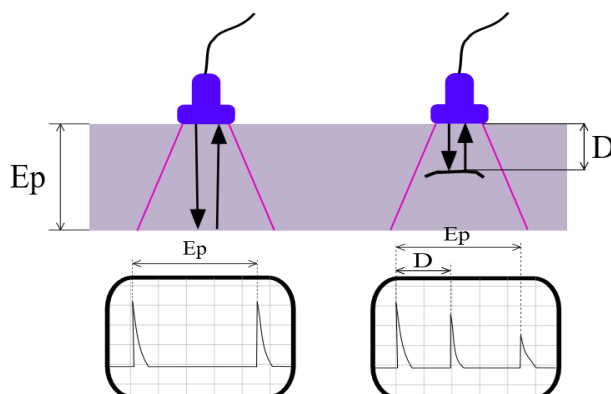
Kod sonara (*SOund Navigation And Ranging*), koji su se počeli koristiti u Prvom svjetskom ratu, piezoelektrični efekt korišten je prvo za stvaranje akustičkih i ultrazvučnih signala, a zatim za detekciju jeke i razlučivanje položaja predmeta u moru i to na način da stvaraju usmjerene snopove ultrazvučnih valova koji se na zaprekama reflektiraju te se vraćaju odašiljaču s dovoljnog intenziteta da se može detektirati.[2,6]



Slika 21. Princip rada sonara [9]

U industriji je ultrazvučno testiranje vrsta nedestruktivnih metoda, koja se temelji na širenju ultrazvučnih valova u objektima ili materijalima koji se testiraju. U najčešćim primjenama koriste se veoma kratki pulsevi ultrazvuka. Koriste se frekvencije centrirane oko 0,1MHz – 15 MHz, no ponekada i do 50 MHz. Cilj mjerenja je naći nepravilnosti u unutrašnjosti ili napraviti karakterizaciju materijala.

Pokazni primjer upotrebe ultrazvuka je ultrazvučno mjerenje debljine, koji mjeri debljinu traženog uzorka, npr. za provjeru korozije cijevi. Princip mjerenja je prikazan na donjoj slici.



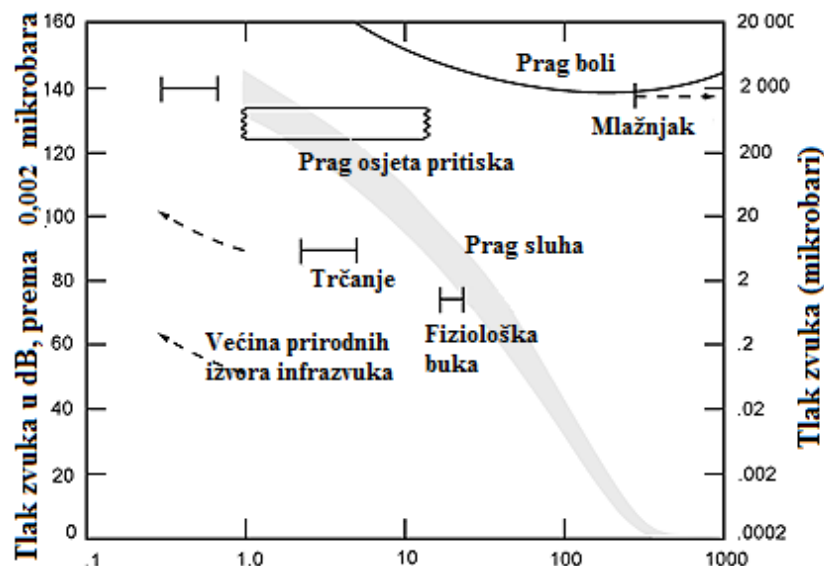
Slika 22. Ultrazvučno testiranje [50]

Lijevo: Sonda šalje početni puls u materijal. Imamo dva signala; jedan od početnog pulsa, a drugi nastaje odbijanjem od stražnje površine.

Desno: Nepravilnost stvara treći signal i istovremeno smanjuje amplitudu signala koji nastaje odbijanjem od stražnje površine. Položaj nepravilnosti se određuje putem omjera D/E_p .

7.2. Infrazvuk

Kao što smo već spomenuli, infrazvuk je naziv za duboki zvuk frekvencije manje je od 20 Hz koji ljudsko uho ne može čuti. Iako ga ne doživljavamo kao zvuk ipak možemo osjetiti njegove vibracije. Jedan od začetnika proučavanja infrazvuka je bio francuski znanstvenik Vladimir Gavreau koji je pri proučavanju infrazvuka osjetio ostru bol u bubnjiću kao i trešnju laboratorijske opreme, a da pritom mikrofoni nije zabilježio nikakav zvuk. Infrazvuk emitiraju mnogi geofizički procesi poput potresa, erupcija vulkana, geomagnetskih aktivnosti, meteora i sl. Također postoje mnogi ljudski izvori infrazvuka poput vjetroelektrana, automobila, aviona, vlakova itd. Pomoću infrazvuka sporazumijevaju se slonovi, kitovi, nilski konji, nosorozi, žirafe, aligatori i mnoge druge životinje. Iako je nekim sisavcima način sporazumijevanja, infrazvuk kod čovjeka može dovesti do teških oštećenja poglavito kod trudnica. [5, 8]



Slika 23. Primjeri različitih zvukova u bliskom infrazvučnom te infrazvučnom području [5]

Gornja slika prikazuje tipične razine tlaka zvučnih signala kao funkciju frekvencije, koristeći se pragom ljudskog sluha kao referentnom točkom. Vertikalne skale su: a) lijevo u dB relativno prema 0,002 mikrobara (prag ljudskog sluha), b) desno je apsolutni pritisak. Prag sluha i osjeta se preklapaju u području 20 Hz, što znači da se frekvencije ispod toga osjećaju, ali ne čuju. Druge bitne točke su, npr., razine i frekvencije fiziološke buke te tipične promjene hidrostatskog tlaka koje se javljaju zbog malih promjena visine pri hodaњу ili trčanju. [5,16]

Raspon od 1 Hz do 20 Hz se naziva bliski infrazvuk (analogno bliskom infracrvenom području elektromagnetskog spektra). Frekvencije od 0,01 Hz do 1 Hz definiraju pravo područje infrazvuka, daleko od ljudskog sluha. Signali sa frekvencijama ispod 0,01 Hz ulaze u preklapajuće područje akustike i gravitacijskih valova, što znači da gravitacijska sila kao povratna sila i stlačivost medija utječu na svojstva signala.[3,8]

Senzori napravljeni do 1970-tih daju preciznost mjerenja (šum ispod 0,001 mikrobara) iznad one očekivane od mjerenja. To je zbog toga što buka zbog vjetra ili drugih izvora uvijek utječe na granice detekcije signala. Današnja veća kvaliteta elektronike dozvoljava upotrebu jednostavnijih elemenata za mjerenje tlaka.

8. BUKA

Dok je za neke buka zvuk koji dolazi iz slušalica slučajnog prolaznika, za druge je buka zvuk motora zrakoplova. Dakle, ono što netko smatra bukom je subjektivno te ovisi od pojedinca do pojedinca. Fizikalno buka se definira kao neželjeni zvuk koji na više načina ugrožava ljudsko zdravlje i sam sluh. Iako pod bukom u govoru najčešće podrazumijevamo zvukove koje čujemo, buka ima svoje mjesto i u području infrazvuka te je u ovakvom obliku možda čak i opasnija za čovjekovo zdravlje. Svjetska zdravstvena organizacija je bolest koja je nastala kao posljedica dugotrajne izloženosti infrazvuku nazvala vibroakustička bolest (*engl. vibroacoustic disease*, skraćeno *VAD*). Ona za posljedicu ima probleme pri vizualnoj percepciji, epilepsiju, moždani udar pa čak i smrt (duža izloženost frekvencijama od 1 Hz do 7 Hz). Djelovanje buke štetne za zdravlje čovjeka može biti akutno i kronično. Kod akutnog (kratkotrajnog) djelovanja dolazi do snažnog utjecaja zvučnih valova na unutrašnje uho koje oštećuje Cortijev organ u pužnici te osoba ima osjećaj zujanja u oba uha. Kritični nivo buke, koji dovodi do oštećenja sluha je zvuk intenziteta oko 140 dB u trajanju od nekoliko milisekundi. To može uzrokovati primjerice zvuk mlažnjaka ili pak običan pisak lokomotive. Kronična akustička trauma razvija se zbog dugotrajnog izlaganja akustičkim podražajima između 70 dB i 100 dB. Ovdje liječenja nema te je stanje nepovratno. Mogućnost prilagodbe na djelovanje buke je neznatna. [3]

Republika Hrvatska je razinu buke pokušala regulirati Zakonom o zaštiti od buke, Pravilnikom o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave, Pravilnikom o djelatnostima za koje je potrebno provesti mjere zaštite od buke te Pravilnikom o načinu izrade i sadržaju karata buke i akcijskih planova te o načinu izračuna dopuštenih indikatora buke. [32, 33, 34]

Zakonom o zaštiti od buke su se pokušale pravno utvrditi određene mjere za prevenciju i smanjenje štetnih učinaka buke u okolišu na zdravlje ljudi i to na način da se izrade karte buke na temelju metoda za ocjenjivanje buke u okolišu te da podaci budu dostupni široj javnosti. Same odredbe ovoga zakona ne odnose se na buku nastalu u izvanrednim situacijama kao što su primjerice buka koja nastaje pri uklanjanju štete nastale nakon elementarnih nepogoda, na onu buku koju izložena osoba izaziva sama (buka unutar vozila, iz stambenih prostora, radnome mjestu) kao ni na buku koja nastaje iz vjerskih objekata ili pak uporabnih predmeta koji predstavljaju kulturno dobro. [32, 33, 34]

U tablici 2 prikazane su najviše dopuštene ocjenske razine buke u dB. Vrijednosti navedene u tablici odnose se na ukupnu razinu buke imisije (prihvat i zadržavanje neke tvari iz udaljenoga izvorišta u dijelu okoliša (atmosfera, vodi, tlu) [21]) od svih postojećih i planiranih izvora buke zajedno.

Zona Buke	Namjena prostora	Najviše dopuštene ocjenske razine imisije buke u dB	
		za dan	noć
1.	Zona namijenjena odmoru, oporavku i liječenju	50	40
2.	Zona namijenjena samo stanovanju i boravku	55	40
3.	Zona mješovite, pretežito stambene namjene	55	45
4.	Zona mješovite, pretežito poslovne namjene sa stanovanjem	65	50
5.	Zona gospodarske namjene (proizvodnja, industrija, skladišta, servisi)	Na granici građevne čestice unutar zone – buka ne smije prelaziti 80 dB Na granici ove zone buka ne smije prelaziti dopuštene razine zone s kojom graniči	

Tablica 2. Najviše dopuštene ocjenske razine buke [32]

U smislu ovoga zakona dan traje 14 sati, od 6 do 20 sati, večer traje 2 sata, od 20 do 22 sata, a noć traje 8 sati, od 22 do 6 sati. Tablica 3 prikazuje najviše dopuštene ocjenske ekvivalentne razine buke u zatvorenim boravišnim prostorijama po zonama buke dane u prethodnoj tablici. Ove doze odnose se na 95% ukupnog vremena. Dakle u zoni 4 (zona mješovite, pretežito poslovne namjene sa stanovanjem) najviša dopuštena ocjenska razina imisije buke iznosi 65 dB, ali tijekom 95% vremena najviša dopuštena ekvivalentna razina buke je samo 40 dB.

Zona	1	2	3	4	5
Najviše dopuštene ekvivalentne razine buke u dB					
– za dan	30	35	35	40	40
– za noć	25	25	25	30	30

Tablica 3. Najviše dopuštene ekvivalentne razine buke [32]

Zakonom su također regulirane i najviše dopuštene ocjenske ekvivalentne razine buke koju na radnom mjestu stvaraju proizvodni i neproizvodni izvori buke. Razine su različite za različita zanimanja te možemo primijetiti da je najniža, najviša dopuštena razina buke kod onih ljudi koji se bave znanstvenim radom.

Opis posla	Najviša dopuštena ekvivalentna razina buke u dB
Najsloženiji poslovi upravljanja, rad vezan za veliku odgovornost, znanstveni rad	35
Rad koji zahtijeva veliku koncentraciju i/ili preciznu psihomotoriku	40
Rad koji zahtijeva često komuniciranje govorom	50
Lakši mentalni rad te fizički rad koji zahtijeva pozornost i koncentraciju	65

Tablica 4. Najviše dopuštene ekvivalentne razine buke za pojedine poslove [32]

Objekti koji rade noću, u kojima se obavlja ugostiteljska djelatnost dopušteno je izvoditi glazbu najviše razine 90 dB.

Iz svega navedenog vidljivo je, da je danas u vremenu konstantne izloženosti buci, njeno mjerenje u svrhu njene sanacije od izuzetne važnosti. Preciznim mjerenjima svakako je najviše pridonio razvoj računala te modernih algoritama, kao što je primjerice Cross Spectral Matrix Beamforming, koji omogućavaju preciznu detekciju izvora buke te daju vizualnu reprezentaciju zvučnih pojava u prostoru u kojemu se iste mjere. Kako to izgleda vidjet ćemo u sljedećem poglavlju.

9. MJERENJA BUKE AKUSTIČKOM KAMEROM

Koristeći vid čovjek prikuplja brže te više informacija o svojoj okolini, nego bilo kojim drugim osjetilom. Iz tog razloga izuzetno je važna vizualizacija i onih kompleksnih pojava koje originalno nisu vidljive očima. Uz pojavu brzih računalnih softvera te kamera visoke razlučivosti počele su se razvijati i akustičke kamere pomoću kojih možemo vizualno analizirati složene akustičke probleme kao što je primjerice određivanje dominantnog izvora buke uslijed pojave više izvora. Akustička kamera korištena u našim mjerenjima prikazuje raspodjelu zvučnog tlaka na nekoj udaljenosti od izvora korištenjem akustičkih podataka svih istovremeno snimljenih mikrofonskih kanala (mreže mikrofona (*engl. beamforming*)). [51] Sam sustav za vizualizaciju zvuka sastoji se od tri glavne komponente, a to su mreža mikrofona i kamera, snimač zvuka te računalo sa softverima za analizu zvuka koji snimaju podatke te stvaraju akustičku sliku. Slika koju vidimo nastala je preklapanjem karte zvučnog tlaka (akustičke slike) dobivene mjerenjima niza mikrofona, s optičkim slikom snimljenom video kamerom te tako pruža brzu identifikaciju izvora zvuka. Razine zvučnog tlaka se prikazuju bojama te se stvara slika slična termalnoj slici. Ovom kamerom moguće je promatrati jedan, dva ili pak više izvora zvuka istovremeno kao i refleksiju zvuka od čvrstih ploha. Pomoću nje mogu se dobiti precizni prikazi gibajućeg izvora kao i različite prolazne akustičke pojave.

Mjerenja akustičkom kamerom rađena su 13. lipnja 2015. godine na nogometnom igralištu u Ivanovcima (kod Valpova) podalje od značajnijih izvora buke. Snimanja akustičkom kamerom vršio je tehnički direktor dioničarskog društva „Zavod za unapređivanje sigurnosti d.d.“ iz Osijeka, gospodin Darije Varžić, mag.ing.mech. Za snimanje je korištena akustička kamera tip SoundEye koju proizvodi Fakultet za strojništvo u Ljubljani [51]. Sama kamera može raditi u dvije konfiguracije:

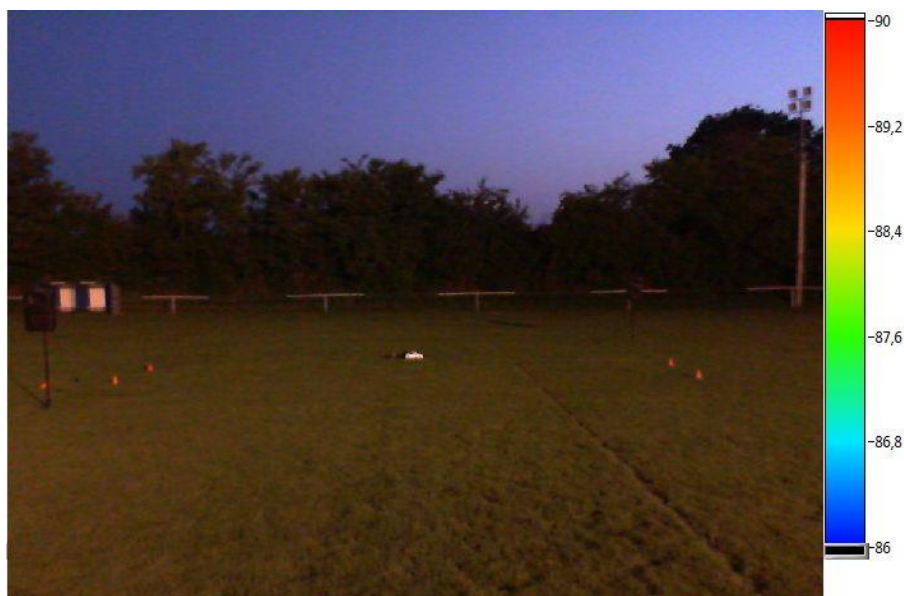
- osnovna
 - 30 mikrofona na kružnom nosaču
 - frekvencijski opseg snimanja od oko 800 Hz do 12 kHz
 - namijenjena je mjerenjima na manjim udaljenostima od izvora zvuka (od 1 m udaljenosti) i mjerenjima u zatvorenim prostorijama
- napredna
 - ukupno 54 mikrofona (osnovnih 30 + dodatne 3 ekstenzije sa po 8 mikrofona na svakoj
 - snimanje s dinamikom akustičke slike od 12 dB

- frekvencijski opsegu između 100 Hz i 12 kHz

Naše snimanje je obavljeno u konfiguraciji s 54 mikrofona, u frekvencijskom opsegu od 100 Hz do 12 kHz. Vrijeme snimanja zvučnog signala bilo je 1s. Rezolucija zvučne kamere bila je 100 pixela, dok je raspon skale koja pokazuje intenzitet zvuka bio 8 dB. Algoritam koji se koristi za proračun akustičke slike je Cross Spectral Matrix Beamforming.

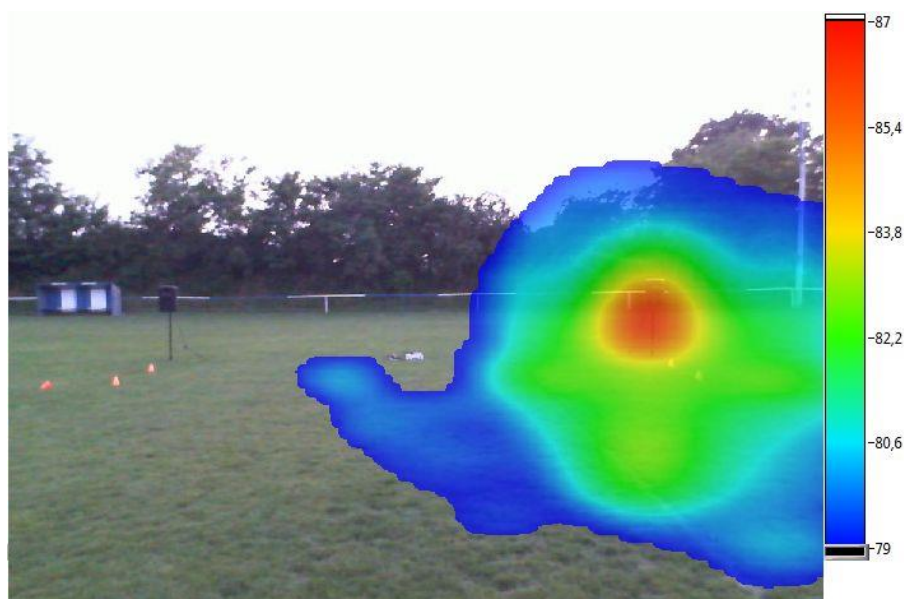


Slika 24. Akustička kamera korištena u mjerenjima



Slika 25. Akustička slika kada su oba zvučnika ugašena

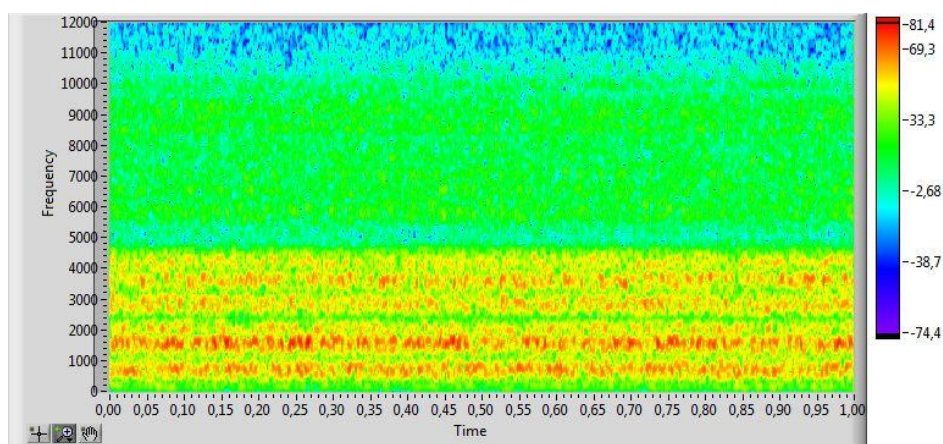
U prvom mjerenju promatrali smo zvučnu sliku koja je nastala radom desnog zvučnika koji je od akustičke kamere bio udaljen $d=18,48$ m.



Slika 26. Akustička slika desnog zvučnika ($d=18,48$ m).

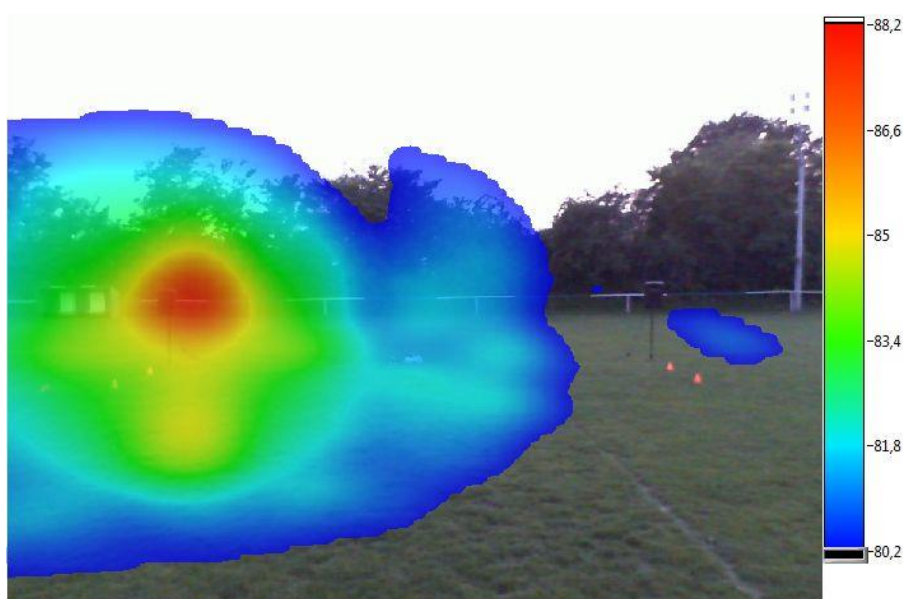
Na slici koju nam je dala akustička kamera vidimo da je intenzitet zvučnog signala podijeljena u regije koje čine gotovo koncentrične kružnice što je bilo za očekivati jer se radi o sfernim valovima. Najveći intenzitet zapažamo, logično, u blizini samog izvora te on iznosi oko 86dB.

Spektrogram mikrofonskog signala za isto mjerenje prikazan je na sljedećoj slici.



Slika 27. Spektrogram mikrofonskog signala za desni zvučnik (d=18,48 m)

Nakon snimanja karakteristika zvuka koje nam daje desni zvučnik, postupak smo ponovili za lijevi koji je bio na udaljenosti d=19,14m od zvučne kamere.

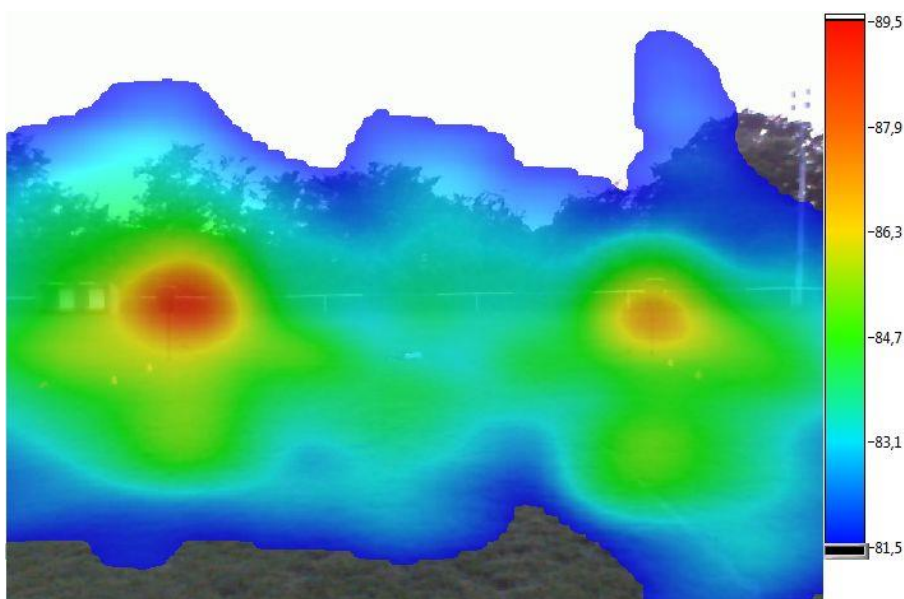


Slika 28. Akustička slika lijevog zvučnika (d=19,14m)

Na slici 28. zamjećujemo da je intenzitet zvučnog signala podijeljen u regije koje čine gotovo koncentrične kružnice, ali ovde zamjećujemo anomaliju od oko 80,2dB desno od našeg izvora. Treba zamijetiti da je ovaj puta skala koja mjeri intenzitet zvuka pomaknuta prema višem

inetnizitetu. Raspon je i dalje 8 dB, ali za razliku od prvog slučaja kada je raspon bio od 79,0 dB do 87,0 dB sada je raspon između 80,2 dB te 88,2 dB.

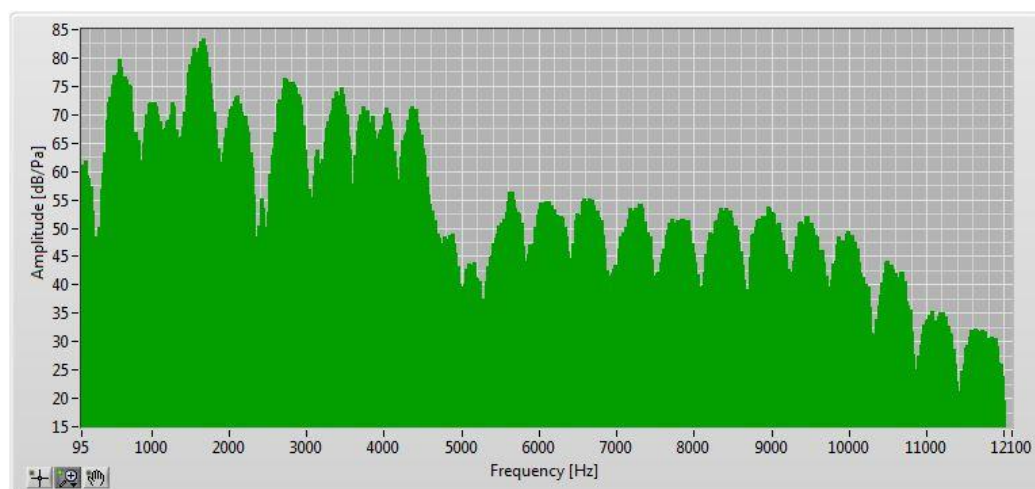
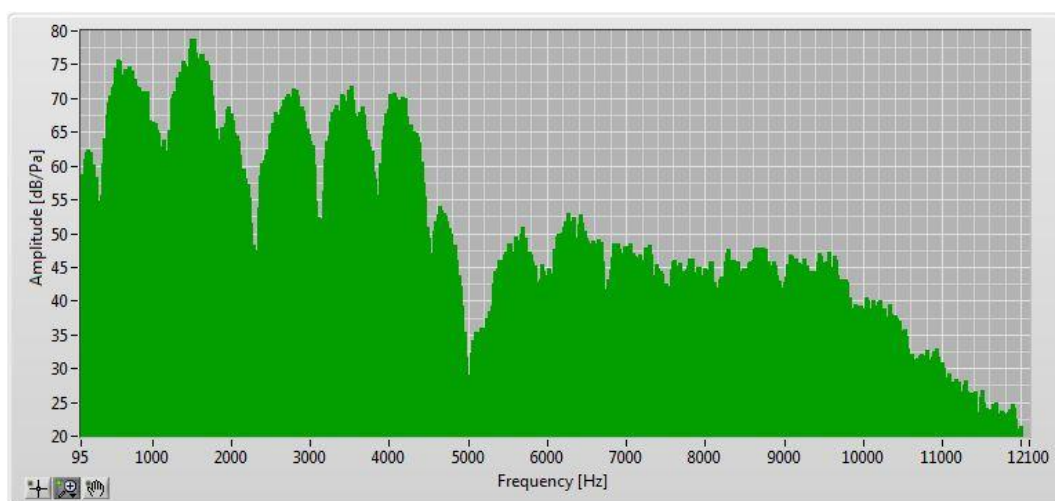
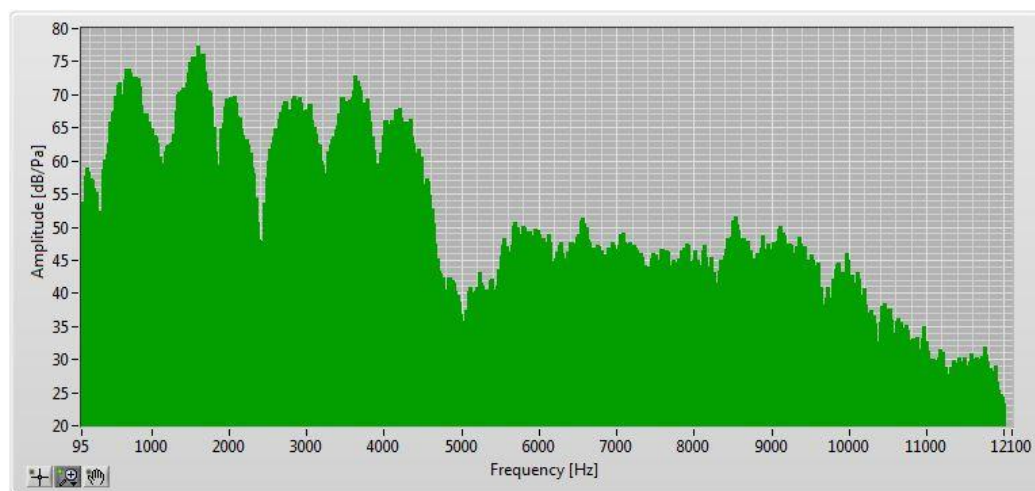
Nakon mjerenja karakteristika svakog zvučnika pojedinačno, snimili smo akustičku sliku kada su oba zvučnika radila te su se nalazili na prethodno spomenutim udaljenostima. Sljedeća slika prikazuje upravo tu situaciju.



Slika 29. Akustička slika kada zvučnici rade istovremeno

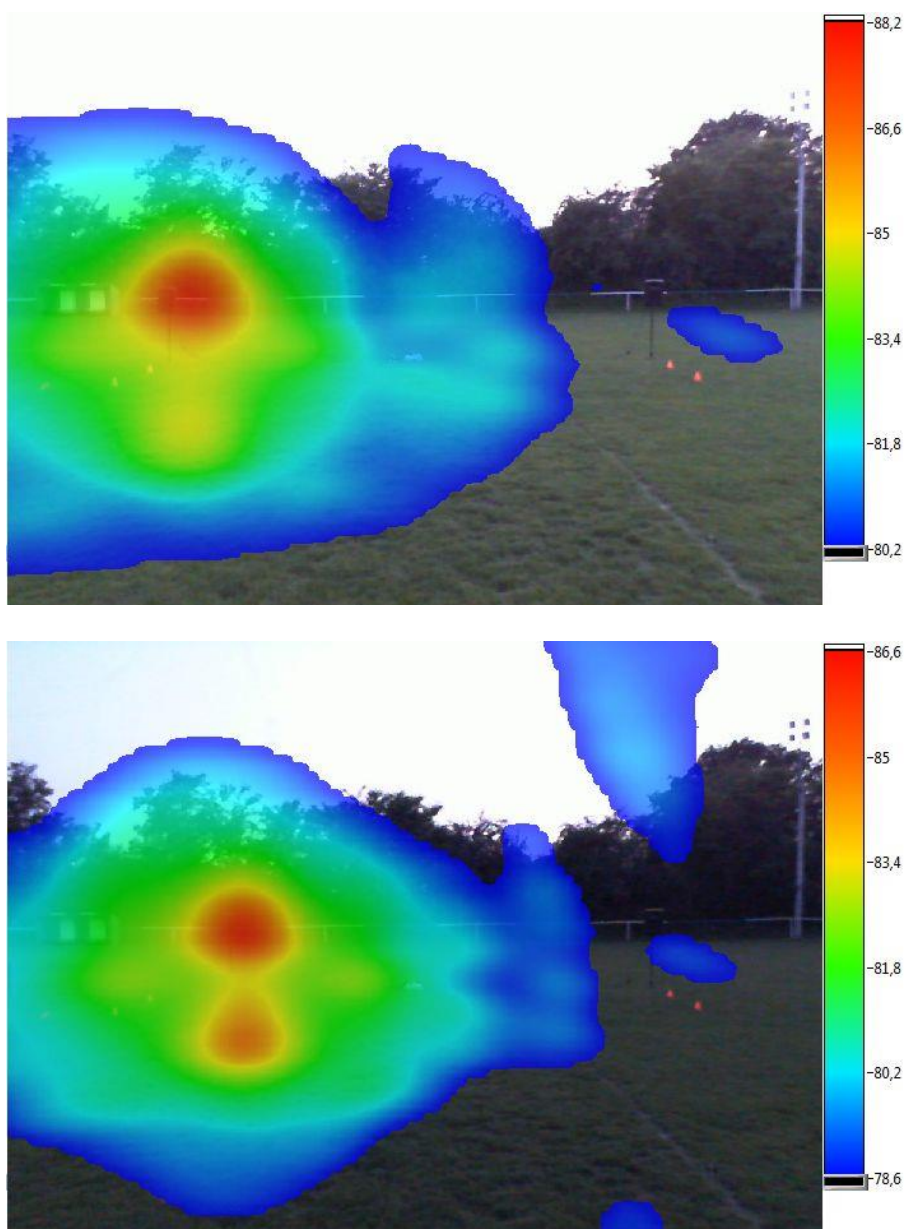
Na slici 29. možemo zamijetiti da lijevi zvučnik snažnije pridonosi ukupoj zvučnoj slici iako je dalje postavljen od akustičke kamere od desnog. Nadalje, ukoliko promotrimo sredinu slike možemo zamijetiti pojavu zeleno-tirkiznog područja intenziteta od oko 83,5 dB koje nije postojalo kada smo snimali svaki zvučnik posebno što je dokaz da je ovdje interferencija najveća.

Sljedeća slika prikazuje FFT (Fast Fourier Transformation) graf mikrofonskog signala prvog, drugog i trećeg slučaja.



Slika 30. FFT graf mikrofonskog signala

U sljedećem mjerenju lijevi zvučnik smo pomaknuli na udaljenost od 24,68m. Donja slika pokazuje nam kako se akustička slika mijenjala s povećanjem udaljenosti. Gornja slika prikazuje već prethodno pokazani slučaj kada je zvučnik od akustičke kamere bio udaljen 19,14m dok druga pokazuje akustičku sliku kada je zvučnik udaljeniji za 5,54m. Na slici je vidljivo da kako smo izvor udaljili od zvučne kamere da je njegov intenzitet slabiji (opet treba pripaziti na skale s desne strane svake slike).



Slika 31. Akustička slika lijevog zvučnika na dvije različite udaljenosti.

Na donjoj slici može se uočiti pojava dva crveno obojena područja – kao da imamo prisutna dva zvučnika. Razlog je taj što donje crveno područje predstavlja refleksiju zvučnog signala od tla koja ima nešto manji intenzitet (oko 84 dB) od zvučnika (86 dB).

10. METODIČKA OBRADA

U ovom poglavlju dana je metodička obrada, donosno priprema za izvođenje nastavne jedinice „Zvuk“ u trećem razredu gimnazije (obje inačice). Jer se radi o uvodnom satu u kojemu se učenici upoznaju s pojmom zvuka kao i njegovim osnovnim karakteristikama u zadacima su zastupljeni samo niže razine Bloomove taksonomije.

PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVE

Škola: SŠ Isidora Kršnjavog **Razred:** 3. OG

Mjesto: Našice

Mentor:

Student: Jelena Strišković **Smjer:** Fizika i informatika

Datum:

Nastavni predmet: Fizika

Nastavna cjelina: Valovi

Nastavna tema: Zvuk

Nastavna jedinica: Zvuk

SADRŽAJNI PLAN

Red. broj.	Podjela nastavne cjeline na teme	Broj sati	
		predavanja	vježbe

46.	Nastanak i vrste valova	1	0
47.	Brzine širenja vala	1	0
48.	Jednadžba harmonijskog vala	1	0
49./50.	Odbijanje (refleksija) i lom (refrakcija) vala	1	1
51.	<u>Zvuk</u>	<u>1</u>	0
52./53.	Intenzitet zvuka	1	1
54.	Ponavljanje	0	1
55.	Interferencija valova	1	0
56.	Stojni val	1	0
57.	Vlastite frekvencije	1	0
58.	Udari zvuka	1	0
59./60.	Dopplerov učinak	1	1
61.	Čeoni (udarni) val	1	0
62./63.	Ponavljanje	0	2
64.	Pismena provjera znanja	0	1
Ukupno sati cjeline Valovi			19

PLAN VOĐENJA NASTAVNOG PROCESA

Cilj (svrha) obrade metodičke jedinice:

Prepoznati zvuk kao valno gibanje, njegove karakteristike te upoznati matematičke modele koji opisuju brzinu širenja zvuka

Zadaci koje treba ostvariti da bi se cilj postigao:

-Materijalni (kognitivni) zadaci:

- * Definirati zvuk
- * Zapamtiti čujno područje zvuka
- * Opisati nastajanje zvuka
- * Objasniti kako čujemo
- * Definirati ton i šum i njihove karakteristike

-Funkcionalni (psihomotorički) zadaci:

- * Uočiti nastajanje različitih zvukova u svakodnevnicu te ih znati razlikovati prema određenim karakteristikama
- * Protumačiti sličnosti i razlike između infrazvuka i ultrazvuka kao i njihove primjene u svakodnevnom životu
- * Razvijati samostalnost kod donošenja zaključaka

- * Uočavati uzročno – posljedične veze među pojavama
- * Fizikalno razlikovati ton i šum

-Odgojni (afektivni) zadaci:

- * Razvijati interes za stjecanje znanja iz područja fizike povezivanjem fizikalnih pojmova sa svakodnevnim životom (umjetne pužnice, primjena ultrazvuka i infrazvuka)
- * Razvijati kritički način razmišljanja

Ključni pojmovi:

Zvuk, mehanički val, longitudinalni val, infrazvuk, ultrazvuk, intenzitet

Organizacija nastavnog rada –artikulacija metodičke jedinice:

Koraci nastavnog procesa	Sadržaj	Oblici nastave	Metode i postupci	Vrijeme
1. Uvod	Ponavljjanje gradiva potrebnog za današnji sat	frontalna	razgovor	5 min
2. Glavni dio	Što je to zvuk?	frontalna	razgovor, demonstracija	8 min
	Građa uha odnosno kako čujemo.	frontalna	razgovor, pisanje	5 min
	Infrazvuk i ultrazvuk	frontalna, individualna	demonstracija razgovor,	10 min
	Ton i njegova obilježja	frontalna	razgovor, pisanje	5 min
	Formule za širenje zvuka	frontalna	razgovor, pisanje	5 min
3.Završni dio	Zadaci – listići	individualna	pisanje	7 min

Nastavna sredstva, pomagala i ostali materijalni uvjeti rada:

LCD projektor, Power Point prezentacija, glazbena vilica, batić, opruga

Korelacija:

Biologija – građa uha
Matematika – manipulacija formulama
Glazbena kultura – ton, viši harmonici

Metodički oblici koji će se primjenjivati u toku rada:

Metoda razgovora, metoda pisanja, metoda rješavanja zadataka, metoda demonstracije

Izvori za pripremanje nastavnika:

- Andreis, T., Plavčić, M. Simić, N. (2006) *Fizika 3 – udžbenik za 3. razred gimnazije*, Profil, Zagreb
- Labor, J. (2014.) *Fizika 3 – udžbenik za treći razred gimnazije*, Alfa, Zagreb
- Internet

Izvori za pripremanje učenika:

- Labor, J. (2014.) *Fizika 3 – udžbenik za treći razred gimnazije*, Alfa, Zagreb

TIJEK IZVOĐENJA NASTAVE –NASTAVNI RAD:

1.Uvodni dio sata – ponavljanje

Na početku sata ponavljamo gradivo obrađeno na prethodnom satu kroz pitanja:

1. Što je val? – *Prenošenje bilo kakvog poremećaja određenim sredstvom nazivamo val*
2. Što se prenosi valom? – *Energija*
3. Kakav je to transversalni val i kroz kakva tijela se može širiti? *Val kod kojega se čestice sredstva gibaju okomito na smjer širenja vala. Može se širiti samo kroz čvrsta tijela.*
4. Kakav je to longitudinalni val? *Val kod kojega čestice sredstva se gibaju usporedno pravcem duž kojega se širi val. Mogu se širiti kroz čvrsta tijela, tekućine i plinove.*

Učenicima pomoću opruge demonstriram longitudinalni i transversalni val te ih upitam koje su karakteristike pojedinog vala.

2. Glavni dio

Zvuk je vrsta longitudinalnog mehaničkog vala kojeg registramo uhom.

- Učenici bi kroz video trebali uvidjeti da je za širenje mehaničkog vala neophodno neko sredstvo - video: <https://www.youtube.com/watch?v=b0JQt4u6-XI> – 2:45-3:55
- Da se mehanički valovi mogu širiti vakuumom u svemiru bi vladala strašna buka
- Zvuk se širi zbog elastične veze među molekulama medija
- Izvor zvuka – objekt koji titra – *Učenicima dam glazbenu vilicu. Jedan učenik batičem udari glazbenu vilicu, a drugi proba kako vibrira. Zatim se zamijene.*

Uho je organ čija je funkcija „hvatanje“ i prijenos valova od živaca koji mehaničke impulse pretvaraju u električne i proslijeđuju do mozga koji vrši obradu podataka.

- Na prezentaciji je slika uha
 - Ušna školjka služi za uhvat zvučnih valova koji se slušnim kanalom vode do bubnjića – elastične membrane
 - Titranje se prenosi koščicama (čekić, nakovanj, stremen) i zrakom do fine membrane koja zatvara unutrašnje uho – pužnicu – u pužnici je Cortijev organ koji

se sastoji od niza vlakana različite duljine (0,04 -0,5 mm) i napetosti, koja reagiraju (rezoniraju) na različite podražaje, odnosno nailaskom zvučnog vala dolazi do rezonancije onih vlakana čija je vlastita frekvencija jednaka frekvenciji vala.

Prozovem jednog učenika da ostatku razreda pušta nasnimljene zvukove različitih frekvencija

- Pitam učenike da kažu kada su čuli prvi puta zvuk, a kada su ponovno prestali čuti zvuk. Jesu li svu ugodni zvukovi? Naglasim da zvučni interval čujnih frekvencija ovisi o osobi. Za normalno, prosječno uho to je između 20Hz – 20KHz
- Valovi čija je frekvencija niža od 20 Hz nazivamo infrazvuk, a one čija je frekvencija iznad 20kHz ultrazvuk
- Pomoću infrazvuka se sporazumijevaju slonovi, kitovi, nilski konji, nosorozi, žirafe i aligatori. Kitovi se infrazvukom mogu sporazumijevati i na nekoliko stotina kilometara udaljenosti. Neki znanstvenici tvrde da se i ptice selice tijekom seobe sporazumijevaju infrazvukom.

Pitam učenike jesu li ikada prije čuli za te pojmove u svakodnevnom životu te koje su to situacije u kojima se ultrazvuk i infrazvuk spominju u svakodnevnom životu. Zatim s učenicima objasnim da na granici dvaju tkiva različitih gustoća val se djelomično odbija, a djelomično prelazi iz jednog tkiva u drugo. Mjesta na kojima je došlo do refleksije registrira računalo, a ta su mjesta granice organa.

Priupitam učenike ima li netko tko ide ili je išao u glazbenu školu te ako da može li definirati što je to ton. U osnovi zvukove možemo podijeliti na dvije skupine: šumove i tonove. Šum je zvuk koji nastaje nepravilnim titranjem zvučnog izvora pri čemu se frekvencija stalno mijenja. Zvuk kojeg čini harmonijsko titranje jedne frekvencije i onaj koji je sastavljen od više harmonijskih titraja različitih frekvencija, ali takvih da su pojedine frekvencije višekratnici najniže frekvencije među njima nazivamo ton. Učenici daju primjere za ton te primjere za zvuk u vidu frekvencija.

Najnižu frekvenciju složenog tona nazivamo osnovnom frekvencijom, a ostale viši harmonici. Harmonik je sinusoidalni doprinos određene frekvencije ukupnom periodičnom gibanju. Frekvencija pojedinog harmonika je višekratnik osnovne frekvencije.

Ton ima visinu i boju pri čemu je visina određena osnovnom frekvencijom, a boja višim harmonicima – ovo je izuzetno važno u glazbi. (npr. dva tona mogu imati jednaku visinu (osnovnu frekvenciju), ali različitu boju (više harmonike) pa različito zvuče *Pitam učenike da mi daju primjer za tu pojavu u svakodnevnom životu i kako bi to frekvencijski izgledalo (primjerice 2:4:8 vs. 2:6:12).*

Formula za širenje zvuka:

(Newtonova formula za brzinu širenja longitudinalnih valova) – čvrsta tijela

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

U plinovima:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}$$

$$v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \text{ gdje je } v_0 = 331 \text{ m/s}$$

Brzina zvuka u zraku temperature 20 °C iznosi 343 m/s. U vodi se kreće približnom brzinom od 1500 m/s, a u željeznoj žici oko 5000 m/s. *Učenicima kažem da posebnu pažnju obrate na oznake fizikalnih veličina. Primjerice E nije Energija već Youngov modul elastičnosti.*

Ukoliko ostane dovoljno vremena učenicima objasnim pojam zvučnog zida. *Pitam učenike jesu li se ikad susreli s tim pojmom te imaju li ideju kako bi tu pojavu mogli proizvesti sada u učionici?*

3. Završni dio

U završnom dijelu sata učenici ukoliko stignu rješavaju zadatke (što ne stignu za dz):

1. Kroz neko sredstvo šire se valovi koji imaju frekvenciju 660 Hz i amplitudu 0.3 mm. Duljina vala je 50 cm. Odredi: a) brzinu širenja vala i b) maksimalnu brzinu jedne čestice.
2. Zvuk frekvencije 150 Hz se širi zrakom pri temperaturi 25°C. Kolika je udaljenost između dviju susjednih čestica koje imaju jednake faze?
3. Glazbena vilica titra u vodi frekvencijom 400 Hz. Ako je brzina zvuka u vodi 4,3 puta veća nego u zraku gdje je brzina zvuka 340 m/s, koliko iznosi valna duljina zvuka u vodi?
4. Odredi brzinu zvuka na temperaturi
 - a. $t_1 = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - b. $t_2 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - c. $t_3 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - d. $t_4 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ te grafički prikaži ovisnost brzine i temperature
5. Brzina širenja zvuka u vodi je 1450 m/s. Izračunaj modul elastičnosti za vodu.

Plan ploče:

Učenicima naglasim koje dijelove svakako trebaju imati zapisane u bilježnici, a ostale su stvar učenikovih preferencija

PRILOZI

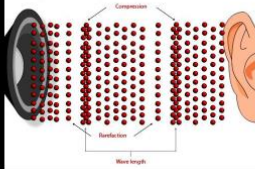
ZVUK



3.A OG 09.04.2015.

ŠTO JE ZVUK?

Longitudinalni mehanički val

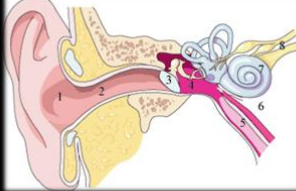



I ZAŠTO SE ZVUK ŠIRI?

- Zvuk se širi zbog elastične veze među molekulama medija
- Nastaje kada izvor zvuka titra



KAKO ČUJEMO



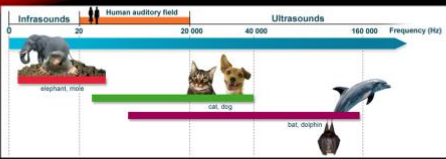
- 1 – vanjsko uho
- 2 – ušna cijev
- 3 – bubnjić
- 4 – srednje uho
- 5 – Eustahijeva cijev
- 6 – unutarnje uho
- 7 – pužnica
- 8 – živac

ČUJETE LI?



Thank You For listening

40 Hz	2000 Hz	10000 Hz	18000 Hz
50 Hz	3000 Hz	12000 Hz	20000 Hz
100 Hz	4000 Hz	14000 Hz	
440 Hz	5000 Hz	15000 Hz	
1000 Hz	6000 Hz	16000 Hz	



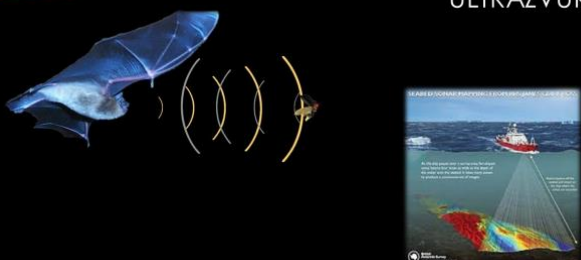
- Normalno ljudsko uho može čuti zvukove u frekvenciji od 20 Hz do 20 000 Hz

INFRAZVUK

Sources of Infrasound



ULTRAZVUK



SOUND of NOISE

ŠUM I TON

• ŠUM – zvuk koji nastaje nepravilnim titranjem zvučnog izvora pri čemu se frekvencija stalno mijenja.

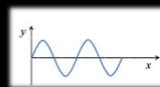


• TON – zvuk koji nastaje nastaje pravilnim titranjem zvučnog izvora, a frekvencija je stalna

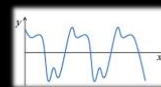


ŠUM VS TON

ČISTI I SLOŽENI TON



Čisti ton



Složeni ton

Najnižu frekvenciju složenog tona nazivamo osnovnom frekvencijom, a ostale viši harmonici

VISINA I BOJA

Visina je određena osnovnom frekvencijom



Boja je određena višim harmonicima

• dva tona mogu imati jednaku visinu, ali različitu boju

BRZINA ŠIRENJA ZVUKA

• Čvrsta tijela $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ E – Joungov modul elastičnosti

• Plinovi $v = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}$

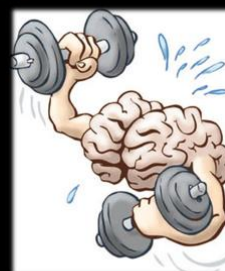
κ – adijabatska konstanta
R – univerzalna plinska konstanta
M – molarna masa

• u zraku $v_t = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{273}}$



$$v = \lambda f$$

BRŽE OD SVJETLOSTI ZA SADA NE IDE, A OD ZVUKA?



11. ZAKLJUČAK

Zvuk kao mehanički longitudinalni val širi se kako u čvrstim tijelima tako i u fluidima. Upravo o sredstvu kojim se širi ovisi brzina njegova širenja. Brzina zvuka u tekućinama mnogo je veća, nego u plinovima, a u krutim tijelima je najveća. Nadalje, pokazali smo da zvuk pokazuje neka tipična svojstva valova kao što su refleksija kod koje je upadni kut dolazne valne zrake jednak kutu odbijanja (refleksije) valne zrake, lom gdje se valna zraka lomi prema okomici ukoliko zvuk prelazi iz gušćeg u rjeđe sredstvo, ogib koji se događa ako je prepreka bitno manja od njegove valne duljine te apsorpcija pri kojoj se velik dio energije pretvara u toplinu. Priča o zvučnim valovima zasigurno ne bi bila potpuna bez Dopplerova efekta koji opisuje promjenu frekvencija vala zbog gibanja samog izvora ili promatrača vala pa tako pomicanje izvora smanjuje valnu duljinu u slučaju da se on približava, a povećava u slučaju da se udaljava.

Kao što smo vidjeli, u osnovi zvukove možemo podijeliti na dvije skupine, a to su šumovi i tonovi. Šum je zvuk koji nastaje nepravilnim titranjem zvučnog izvora promjenjive frekvencije. Zvuk kojeg čini harmonijsko titranje jedne frekvencije kao i onaj zvuk koji je sastavljen od više harmonijskih titraja različitih frekvencija takvih da su one cjelobrojni višekratnici najniže među njima, nazivamo ton. Sama analiza zvučnih pojava, odnosno spektralna analiza najčešće se provodi Fourierovom analizom baš kao i u našim mjerenjima.

Fizikalno buka se definira kao neželjeni zvuk koji na više načina ugrožava ljudsko zdravlje i sam sluh. Zakonom o zaštiti od buke regulirane su dopuštene razine buke kao i kazne ukoliko se tih istih razina fizički i pravni subjekti ne pridržavaju. Upravo ovdje možemo vidjeti najveću upotrebu akustičkih kamera pomoću kojih možemo analizirati složene akustičke probleme kao što je primjerice određivanje dominantnog izvora buke uslijed pojave više izvora. Kao što je vidljivo na slikama iz provedenih mjerenja, kamera prikazuje raspodjelu zvučnog tlaka na nekoj udaljenosti od izvora korištenjem akustičkih podataka svih istovremeno snimljenih mikrofonskih kanala (u našem slučaju 54 mikrofona, u frekventijskom opsegu od 100 Hz do 12 kHz). Također, na slikama je jasno vidljivo da udaljenost od izvora buke izravno utječe na akustičku sliku baš kao i broj izvora - što imamo više izvora, razina buke je veća. Kako su razine zvučnih tlakova prikazane bojama pomoću akustičke kamere jasno možemo odrediti dominantni izvor, no algoritmi koji daju točne podatke o pojedinom izvoru buke u situaciji u kojoj imamo više izvora, još uvijek su u fazi razvoja.

12. LITERATURA

*svim internetskim stranicama zadnji put je pristupljeno 10.10.2015.

1. Aleksić, Z., *Akustika prostorija –diplomski rad*, Prirodno – matematički fakultet Departman za fiziku Novi Sad, 2007.
2. Applied Piezo, *Piezoelectric effect*,
<http://www.applied-piezo.com/about/piezoelectric-effect.php>
3. AudioLogs, *Izrada karte buke*,
http://www.audiologs.com/ozrenbilan/03_buka.pdf
4. Australian Government – Bureau of Meteorology, *About Doppler Wind Images*
http://www.bom.gov.au/australia/radar/about/doppler_wind_images_intro.shtml
5. Bedard, A.J., *Infrasonic and Near Infrasonic Atmospheric Sounding and Imaging*, Boulder,
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/programs/infrasound/infrasonic.html>
6. Berg, R.E.; Stork, D.G., *The physics of sounds*, Prentice-Hall, inc., New Jersey.
7. Cindro, N., *Fizika 1 Mehanika – Valovi – Toplina*, Školska knjiga Zagreb, 1991.
8. Cook, R.K.; Bedard, A.J., *On the measurement of Infrasound*, 1972.
9. Dive and Discover, *Mapping the Ocean Floor with Echo Sounding*,
<http://www.divediscover.whoi.edu/tools/sonar-singlebeam.html>
10. Đerek, V., *Analiza zvuka*, 2009.
<http://vdjerek.net/stty/analiza%20zvuka%20v2.pdf>
11. Eden, A., *The search for Christian Doppler*, Beč: Springer-Verlag, 1992
12. Electricalfacts, *History of Sound*,
<http://www.electricalfacts.com/Neca/Science/sound/history.shtml>
13. Encyclopedia Britannica, *Acoustics*,
<http://www.britannica.com/science/acoustics>
14. Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/3_fourierova_transformacija.pdf
15. Glumac, Z., *Matematičke metode fizike- kratki uvod*, Osijek,
<http://gama.fizika.unios.hr/~zglumac/ummf.pdf>
16. Hansenhttp, C.H., *Fundamentals of Acoustics*, University of Adelaide,
http://www.who.int/occupational_health/publications/noise1.pdf
17. Hillenbrand. J.M., *The Physics of Sound*, Western Michigan University
<http://homepages.wmich.edu/~hillenbr/206/ac.pdf>

18. Holler, F.J.; Skoog, D.A; Crouch, S.R., *Principles of Instrumental Analysis*, Chicago, 2007.
19. Hrvatska enciklopedija, *Apsorpcija*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža,
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=3445>
20. Hrvatska enciklopedija, *Uho*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža,
<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=63037>
21. Hrvatski leksikon, *Imisija*, <http://www.hrleksikon.info/definicija/imisija.html>
22. Hrvatsko fizikalno društvo <http://nastava.hfd.hr/simpozij/2001/2001-Bakac.pdf>
23. Hyperphysics, *Fast Fourier Transforms*,
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/math/fft.html>
24. Jambrošić, K., *Zvuk i okoliš*, FER - Sveučilište u Zagrebu, 2014.
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ZIO_01_Osnove_zvuka_2014.pdf
25. Jelavić, T., *Zvuk, sluh, arhitektonska akustika*, Školska knjiga, Zagreb
26. Karagioza, *Reflection*
<http://karagioza.com/?p=780>
27. Katedra za Telekomunikacije, *Uvod u akustiku*, Elektrotehnički fakultet – Beograd
http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/te4e/Akustika_01_Uvod_u_akustiku.pdf
28. Katedra za Telekomunikacije, *Refleksija zvuka*, Elektrotehnički fakultet – Beograd
http://telekomunikacije.etf.bg.ac.rs/predmeti/te4e/Akustika_06_Refleksija_zvuka.pdf
29. Labor, J. (2014.) *Fizika 3 – udžbenik za treći razred gimnazije*, Alfa, Zagreb
30. Lesić, I. *Vizualizacija akustičnih pojava – diplomski rad*, Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb, 2006.,
http://www.phy.pmf.unizg.hr/~dandroic/nastava/diplome/drad_ivan_lesic.pdf
31. Mihaljčić, Ž.; Petrijevcćanin, D., *Diskretna Fourierova transformacija*, Osijek, 2008.
<http://www.mathos.unios.hr/~scitowsk/MP/17-Mihaljcic-Petrievcćanin-2.pdf>
32. Narodne novine, *Pravilnik o najvišim dopuštenim razinama buke u sredini u kojoj ljudi rade i borave* (NN br. 145/04 i 46/08)
33. Narodne novine, *Pravilnik o uvjetima glede prostora, opreme i zaposlenika pravnih osoba koje obavljaju stručne poslove zaštite od buke* (NN br. 91/07)
34. Narodne novine, *Zakon o zaštiti od buke* (NN br. 30/09 i 55/13)
35. Novelline, R., *Squire's Fundamentals of Radiology*, Harvard University Press, 1997.,
36. Papadakis, E.P., *Ultrasonic Instruments & Devices*, Academic Press, 1999
37. Pharma Medica, *Oštećenje sluha*,
<http://www.pharmamedica.rs/otorinolaringologija/ostecenje-sluha/>

38. Pierce, A.D., *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, Acoustical Society of America, <http://asa.aip.org/pierce.html>
39. Planinić, J., *Osnove fizike 3, Filozofski fakultet - Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku*, 2005.
40. Porta Contreras, A.; Stern Forgach, C.E., *Principles Of Acoustics*, Fundamentals of Physics Vol. 1.
<http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-06b-01-05.pdf>
41. Rienstra, S.W.; Hirschberg, A., *An Introduction to Acoustics*, Eindhoven University of Technology, 2015.
<http://www.win.tue.nl/~sjoerdr/papers/boek.pdf>
42. Schuster, G.T., *Basics of Seismic Wave Theory*, University of Utah, 2007.,
http://utam.gg.utah.edu/tomo06/06_seg/basicseisbook.pdf
43. Sideway, *Acoustic Plane Wave Properties*,
<http://output.to/sideway/default.asp?qno=100900023>
44. Strojarski fakultet Slavonski brod
http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/3_2.pdf
45. Šoškić, Z., *Opisivanje buke - Seminar o zaštiti od buke urbanih sredina – Kraljevo*, 2011.,
http://www.mfkv.kg.ac.rs/urbanoise/media/s1112_01_Opisivanje_buke.pdf
46. The Physics Classroom, *The Human Ear*,
<http://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-2/The-Human-Ear>
47. Young H.D.; Freedman, R.A.; Ford, A.L., *University physics* (13th edition). Addison-Wesley, 2012.
48. Vuković, B., *Predavanja iz osnova fizike 3*, Odjel za fiziku Osijek
49. Whealy, *Acoustics*
<http://www.whealy.com/acoustics/behaviour.html>
50. Wikipedia, *Ultrasound*, <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>
51. Zavod za unapređivanje sigurnosti, *Akustička kamera*, Osijek,
http://www.zus.hr/pdf/akusticka_kamera.pdf
52. Zvučna izolacija, *Zvuk*,
<http://www.zvucnaizolacija.com/zvuk.pdf>

ŽIVOTOPIS

Jelena Strišković rođena je 13. listopada 1989. godine u Našicama. Nakon srednjoškolskog obrazovanja (prirodoslovno – matematička gimnazija, SŠ Isidora Kršnjavog Našice) upisuje preddiplomski studij matematike na Odjelu za matematiku u Osijeku, a godinu nakon toga i preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku. 2013. godine upisuje diplomski studij fizike i informatike – smjer nastavnički na Odjelu za fiziku u Osijeku.