

10. Predavanje

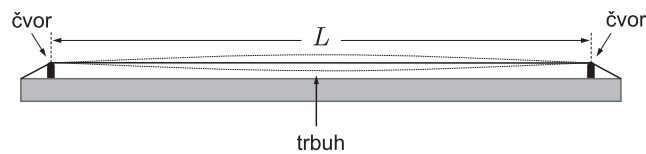
January 15, 2017

1 Osnovi akustike

Akustika je nauka o zvuku. Bavi se zvukom kao fizičkom pojavom (oscilovanje gustine materije ili oscilovanje materijalnih čestica), kao i stimulisanim nadražajem za doživljaj sluha. Oblast elektroakustike bavi se pretvaranjem mehaničkih oscilacija u električne i obrnuto. Krajnji cilj je kvalitetna reprodukcija i prenos zvuka. Fizička ili objektivna akustika bavi se zvukom kao nadražajem za čulo sluha (fizika proizvodnje, prenosa i primanja zvuka). Subjektivna akustika bavi se odnosima između subjektivnog doživljaja zvuka i njegovog objektivnog nadražaja, kao i doživljajem zvuka bez obzira na njegov nadražaj. U početku akustika se bavila samo zvučnim talasima koje može registrovati prosečno ljudsko uho (20Hz-20000Hz). Frekventni opseg čujnosti je karakteristika svakog živog bića koje ima čulo sluha, ali je i promenljiva kategorija. Akustika se danas bavi zvukom u širem smislu: infrazvukom (ispod 16 Hz), ultrazvukom (iznad 20 kHz) kao i hiperzvukom (iznad 10^{10} Hz).

1.1 Izvori zvuka

Vrlo jednostavan izvor zvuka je zategnuta žica koja je učvršćena na oba kraja (Slika 1). Ukoliko se žica izvede iz ravnotežnog položaja, ona će početi da osciluje pri čemu se duž žice formira stojeći talas sa jednim trbuhom i dva čvora.



Slika 1 Izvođenjem žice iz ravnotežnog položaja, koja je učvršćena na oba kraja i zategnuta, ona počinje da osciluje pri čemu formira stojeći talas sa dva čvora i jednim trbuhom.

Oscilacije žice se prenose na okolnu sredinu pri čemu nastaje zvučni talas. S obzirom da je žica učvršćena na oba kraja, talasna dužina proizvedenog talasa jednaka je dvostrukoj dužini žice. Ukoliko se žica pritisne na sredini, duž žice se može formirati stojeći talas sa tri čvora i dva trbuha. U tom slučaju talasna dužina jednaka je dužini žice, odnosno dvostrukoj dužini između prsta i mesta gde je zategnuta žica. Frekvencija proizvedenog zvučnog talasa je:

$$\nu = \frac{v_0}{\lambda} \quad (1)$$

pri čemu je brzina talasa formiran žicom:

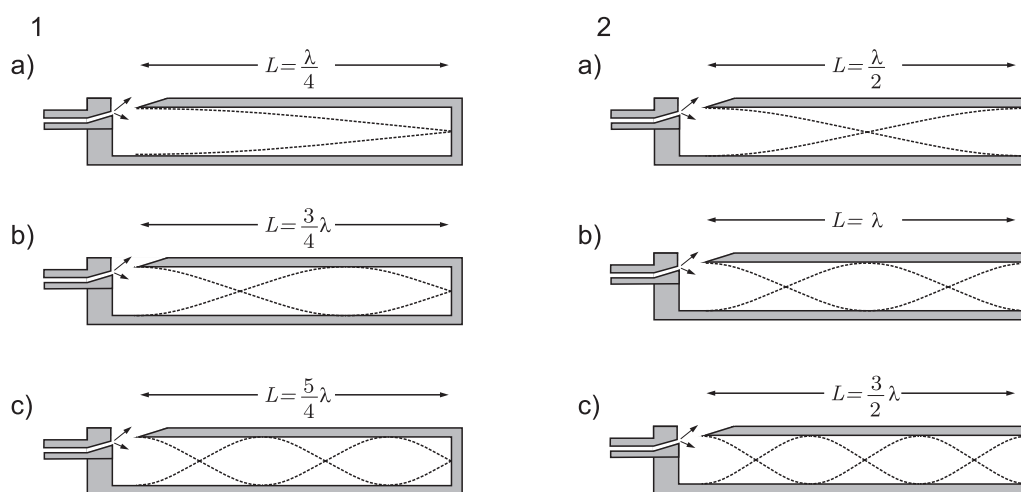
$$v_0 = \sqrt{\frac{F}{\gamma}} \quad (2)$$

ako (2) u vrstimo u (1) dobijamo frekvenciju zvuka koji se može proizvesti zategnutom žicom:

$$\nu = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{F}{\gamma}} \quad (3)$$

Na primer, frekvencija kojom osciluje žica gitare zavisi od: debljine žice (γ je masa po jedinici dužine), deblje žice imaju veću masu po jedinici dužine pa su one namenjene za proizvodnju tonova nižih frekvencija; sile F kojom je zategnuta žica (reguliše odgovarajućim zavrtnjem čime se podešava "štимуje" osnovni ton žice); i dužine žice jer se time podešava talasna dužina (talasna dužina oscilovanja žice gitare je $\lambda = 2L$, gde je L dužina žice između prsta koji je prislonjen na odgovarajući prag i kobilice-deo preko koga je žica zategnuta). U proizvodnji tona učestvuje deo žice između prsta i kobilice, tj. deo koji se okida prstom ili trzalicom. Intenzitet zvuka koji proizvode zategnute žice je slab, pa se obično one montiraju na drvenu kutiju odgovarajućeg oblika (rezonatorska kutija). U tom slučaju žice izazivaju prinudno oscilovanje vazdušnog stuba unutar kutije čime se zvuk znatno pojačava. Rezonatorska kutija ima složeni oblik koji omogućava pobudu stojećih talasa svih frekvencija koje mogu uzrokovati žice. Kod električnih gitara, frekvencijom kojom osciluje žica menja se i induktivnost kalema koji se nalazi u neposrednoj blizini žice. Ovde se zvuk direktno konvertuje u električni signal kojim se može manipulirati na beskonačno načina, a zatim pojačavati i ponovo konvertovati u zvučni talas odgovarajuće jačine.

Kod velikog broja muzičkih instrumenata ton nastaje usled oscilovanja vazduha u samom instrumentu. Na slici 2.1 i 2.2 su prikazane svirale (pištaljke) u kojima se formiraju stojeći talasi uduvanjem vazduha preko oštre ivice.



Slika 2 Stojeći talasi u svirali koja je 1) zatvorena na jednom kraju; 2) otvorena na oba kraja.

U svirali koja je zatvorena na jednom kraju (Slika 2.1) najniži (osnovni ton) ostvaren je pri formiranju stojećeg talasa sa jednim trbuhom i jednim čvorom (a). Prvi viši ton (prvi harmonik) ostvaren je kada se formiraju dva trbuha i dva čvora (b). Drugi harmonik ima tri trbuha i tri čvora, itd. Veze između talasnih dužina i dužina L vazdušnog stuba u svirali označene su na slici. Pri oscilovanju vazdušnog stuba u svirali moguće je da se istovremeno formiraju pored osnovnog tona i viši harmonici. Tada govorimo o složenom tonu, a amplitude oscilovanja osnovnog tona i viših harmonika daju karakterističnu "boju" tona. Na Slici 2.2 svirala je otvorena na oba kraja, pa se osnovni ton formira sa dva trbuha i jednim čvorom (a). Prvi harmonik ima tri trbuha i dva čvora (b), itd. Frekvencije tonova koje može generisati svirala biće date obrascem:

$$\nu_n = \frac{v_0}{\lambda_n} = \frac{1}{\lambda_n} \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} \quad (4)$$

pri čemu je talasna dužina kod svirale zatvorene na jednom kraju određena obrascem:

$$\lambda_n = \frac{4}{2n + 1} L \quad (5)$$

a kod svirale otvorene na oba kraja:

$$\lambda_n = \frac{2}{2n + 1} L \quad (6)$$

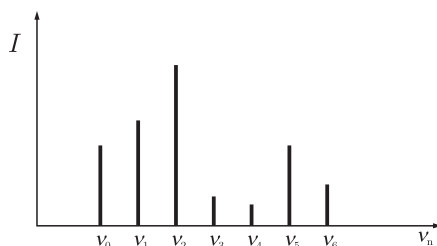
gde je $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Konačno, frekvencije svirale zatvorene na jednom kraju su:

$$\nu_n = \frac{2n + 1}{4} \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}, \quad (7)$$

a otvorene na oba kraja:

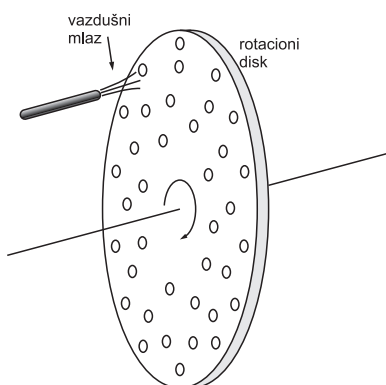
$$\nu_n = \frac{2n + 1}{2} \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}, \quad (8)$$

Kada se istovremeno formira osnovni ton i nekoliko viših harmonika u svirali, kažemo da ona daje čitav spektar tonova. Muzički instrumenti nikad ne daju samo osnovni ton već čitav niz viših harmonika različitih intenziteta. Skup intenziteta osnovnog tona i viših harmonika daju spektralnu karakteristiku odgovarajućeg instrumenta (Slika 3). Instrumente razlikujemo po boji tona, tj. razlikujemo po njihovoj spektralnoj karakteristici. Treba imati na umu da frekvencija tonova zavisi od uslova u kojima se nalazi instrument (gustina i pritisak vazduha, formule (7) i (8)), o čemu muzičari vode računa pred svaki nastup i neposredno pre nastupa proveravaju štim.



Slika 3 Spektralna karakteristika složenog tona.

Sirena za davanje uzbune generiše zvuk pomoću rotacionog diska na kome su načinjene rupe (Slika 4). Vazdušni mlaz velike brzine usmeri se na disk koji rotira, pri čemu on naizmenično nailazi na prepreke i otvore, pa se pri tome generiše zvuk vrlo visokog intenziteta. Frekvencija zvuka sirene je direktno proporcionalna ugaonoj brzini rotacije diska.



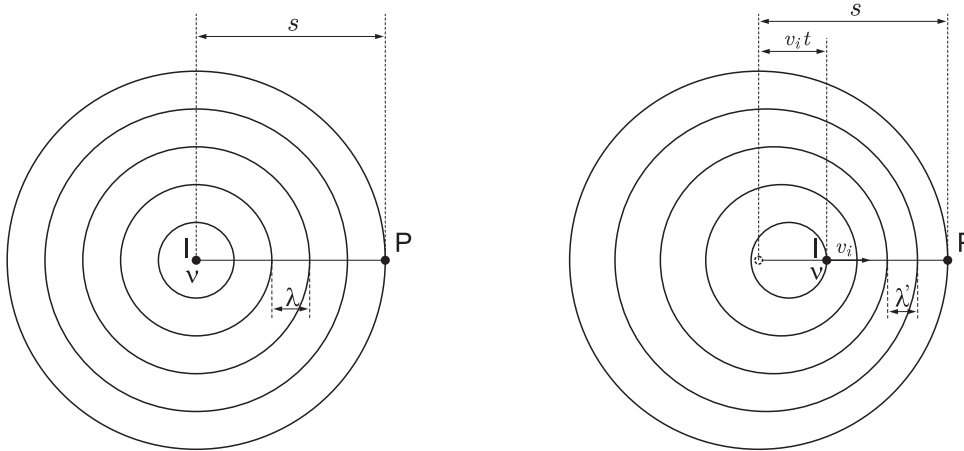
Slika 4 Princip rada sirene za davanje uzbune.

1.2 Doplerov efekat

Ukoliko stojimo na stanici gde prolazi lokomotiva krećući se velikom brzinom sa uključenom sirenom možemo zapaziti da se frekvencija sirene menja kako se lokomotiva udaljava ili približava. Naime ukoliko se lokomotiva približava frekvencija sirene koju registrujemo je viša od odaslata, a ukoliko se udaljava, registrovana frekvencija je niža. Ova pojava naziva se Doplerov efekat i univerzalna je pojava za talasno kretanje, odnosno zapaža se takođe i kod elektromagnetnih talasa. Na Slici 5.a prikazan je izvor zvuka (I) koji odašilje sferni zvučni talas frekvencije ν . Prikazani su talasni frontovi koji odgovaraju istim fazama oscilovanja u jednom trenutku. Rastojanje između ovih talasnih frontova jednako je talasnoj dužini emitovanog talasa. Prijemnik (P) koji miruje i nalazi se na rastojanju s od izvora registruje istu frekvenciju koju je odaslao izvor. Ukoliko se sada izvor kreće (Slika 5.b) ka

prijemniku brzinom v_i talasni frontovi se zgušnjavaju između izvora i prijemnika, jer brzina talasa ne zavisi od kretanja izvora. Broj talasnih frontova formiran između izvora koji miruje i prijemnika je:

$$n = \frac{s}{\lambda} \quad (9)$$



Slika 5 Uz Doplerov efekat.

Takođe isti broj talasnih frontova je formiran u slučaju kada se prijemnik kreće ali na manjoj dužini usled kretanja izvora:

$$n = \frac{s - v_i t}{\lambda'} \quad (10)$$

gde je t vreme potrebno da zvučni talas pređe rastojanje s krećući se brzinom v_0 . S obzirom da je $s = v_0 t$, i ako izjednačimo (9) i (10), nalazimo:

$$\frac{v_0 t}{\lambda} = \frac{v_0 t - v_i t}{\lambda'} \quad (11)$$

Veza između frekvencije koju šalje izvor i talasne dužine je:

$$v_0 = \lambda \nu \quad (12)$$

, a između frekvencije koju registruje prijemnik kada se izvor kreće i talasne dužine

$$v_0 = \lambda' \nu' \quad (13)$$

Ako (12) i (13) zamenimo u (11), nakon skraćivanja nalazimo frekvenciju koju registruje prijemnik:

$$\nu' = \nu \frac{v_0}{v_0 - v_i} \quad (14)$$

Prema dobijenoj formuli frekvencija ν' koju registruje prijemnik je veća od odaslate ν , što je saglasno sa opažanjem. Sličnom analizom dolazimo do zaključka da ukoliko se izvor udaljava od prijemnika brzinom v_i , frekvencija koju registruje posmatrač je:

$$\nu' = \nu \frac{v_0}{v_0 + v_i} \quad (15)$$

Takođe moguća je situacija da izvor miruje, a prijemnik (posmatrač) se kreće ka izvoru brzinom v_p . U tom slučaju prijemnik registruje veću frekvenciju od odaslate, prema obrascu:

$$\nu' = \nu \frac{v_0 + v_p}{v_0} \quad (16)$$

Ukoliko se prijemnik udaljava, znak plus se zamenjuje sa znakom minus u formuli (16), pa je registrovana frekvencija:

$$\nu' = \nu \frac{v_0 - v_p}{v_0} \quad (17)$$

Dakle posmatrač udaljavajući se od izvora koji miruje registruje manju frekvenciju od odaslate. Ukoliko istovremeno postoji kretanje i izvora i prijemnika, koristeći formule (14), (15), (16) i (17), frekvenciju koju registruje prijemnik određujemo iz opšteg obrasca:

$$\nu' = \nu \frac{v_0 \pm v_p}{v_0 \mp v_i} \quad (18)$$

gde se izbor znakova minus i plus vrši u saglasnosti sa gornjim pojedinačnim primerima.

Prema formuli za doplerov efekat ukoliko je poznata odaslati frekvencija i frekvencija koju registruje prijemnik, moguće je odrediti brzinu prijemnika ili izvora što ima naročitu važnost za primenu. Na principu Doplerovog efekta rade uređaji za merenje brzine udaljenih objekata, zatim medicinski uređaji za određivanje protoka krvi, itd. U astrofizici Doplerov efekat se primenjuje za određivanje brzine kretanja udaljenih zvezda i galaksija jer je njihov spektar pomeren ka crvenoj boji (red shift) u odnosu na zemaljski. U živom svetu, evolucija je kod nekih vrsta razvila sistem za eholokaciju pri čemu se na osnovu Doplerovog pomaka određuje i brzina.

PRIMER:

Slepi miš krećući se ka steni emituje ultrazvučni signal tačno određene frekvencije. Odrediti brzinu kretanja slepog miša ako je frekvencija koju registruje slepi miš u odjeku za $\varepsilon = 1\%$ veća od odaslate. Brzina zvuka je $v_0 = 340\text{m/s}$.

REŠENJE

Stenu možemo smatrati prijemnikom koji registruje povećanu frekvenciju saglasno Doplerovom obrascu:

$$\nu' = \nu \frac{v_0}{v_0 - v_i} \quad (1)$$

Odbijeni signal ima frekvenciju ν' , a slepi miš je sada prijemnik koji se kreće ka izvoru, tako da on registruje frekvenciju:

$$\nu'' = \nu' \frac{v_0 + v_p}{v_0} \quad (2)$$

Ako u (2) uvrstimo (1), s obzirom da je $v_i = v_p = v$ (brzina slepog miša), nalazimo:

$$\nu'' = \nu \frac{v_0 + v}{v_0 - v} \quad (3)$$

Relativno povećanje frekvencije je sadržano u:

$$\frac{\nu''}{\nu} = \frac{\nu + \Delta\nu}{\nu} = 1 + \frac{\Delta\nu}{\nu} = 1 + \varepsilon \quad (4)$$

Ako (4) uvrstimo u (3), nakon sređivanja nalazimo brzinu kretanja slepog miša:

$$v = v_0 \frac{\varepsilon}{2 + \varepsilon} = 1,69\text{m/s} \quad (5)$$

1.3 Fiziološki intenzitet zvuka

Zvuk predstavlja prenošenje energije od izvora oscilovanja u okolni prostor. Različiti izvori generišu zvuk različitih intenziteta. U tabeli 1 dati su intenziteti nekih tipičnih izvora.

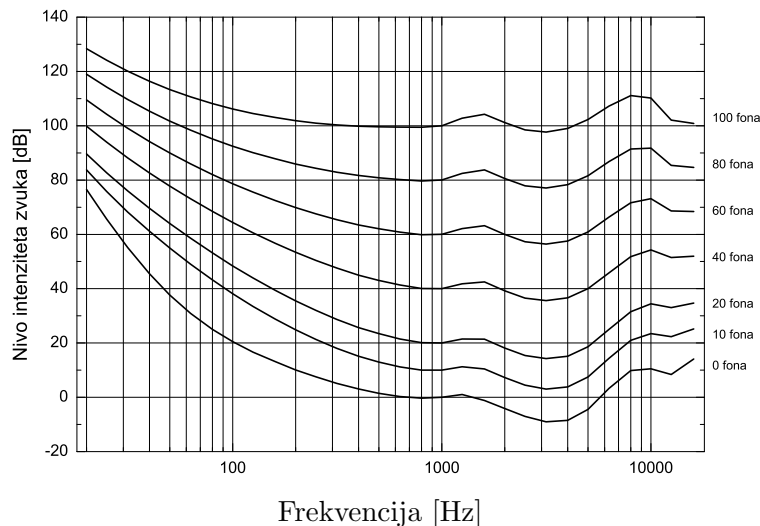
Tabela 1

Intenziteti pojedinih izvora			
Izvor zvuka	Snaga [W]	Izvor zvuka	Snaga [W]
Orkestar od 75 muzičara	70	Flauta	0,06
Bas bubanj	25	Klarinet	0,05
Orgulje	13	Bas ljudski glas	0,03
Cimbal	10	Alt ljudski glas	0,01
Trombon	6	Govor srednje jačine	$2,4 \times 10^{-5}$
Klavir	0,4	Violina najtiše	$3,8 \times 10^{-6}$
Bas saksofon	0,3		

Ljudsko uho može da razlikuje veoma veoma širok dijapazon intenzitete zvuka. Zbog toga se za opisivanje intenziteta zvuka koristi logaritamski sistem, definisan kao nivo inteziteta zvuka:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (6)$$

gde je $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$ na frekvenciji 1kHz. To je proizvoljno određen intenzitet koji odgovara najtišem zvuku koje prosečno zdravo ljudsko uho može da registruje (prag čujnosti). Jedinica nivoa intenziteta zvuka je decibel [dB]. Zvuk maksimalnog intenziteta koje ljudsko uho može da podnese bez oštećenja je 120dB što odgovara fizičkom intenzitetu od $10^{-8} \frac{W}{m^2}$. Zvuk istog fizičkog intenziteta različitih frekvencija izaziva osećaj različitog intenziteta kod čoveka. Zbog toga se uvodi pojam fiziološkog intenziteta zvuka koji je odlika svakog pojedinca. Jedinica fiziološkog intenziteta zvuka je fon. Za osnov ove skale uzet je ton od 1kHz. Na toj frekvenciji decibel i fon imaju iste vrednosti. Na Slici 6 prikazan je audiogram tipičnog ljudskog uha.



Slika 6 Audiogram ljudskog uha.

Na grafiku se vidi da fiziološki intenzitet od na primer 10 fona na frekvenciji 100Hz odgovara nivou jačine od oko 40dB. Dakle zvuk frekvencije 1000Hz nivoa 10dB i zvuk frekvencije 100Hz nivoa jačine 40dB izazivaju osećaj istog inteziteta. Audiogram se dobija eksperimentalnim putem, pri čemu individua u zvučno izolovanoj sobi sa slušalicama registruje zvuk određene frekvencije i jačine. Operater pušta zvuk određene frekvencije postepeno pojačavajući intenzitet, a slušalac pritiska taster u

momentu kad registruje zvuk. Audiogrami su karakteristika svakog pojedinca.

PRIMER:

U hali nekog postrojenja jedna mašina stvara zvuk nivoa jačine 90dB. Koliki nivo jačine stvara 10 istovremeno uključenih takvih mašina? Ako je poznato da mašine proizvode zvuk frekvencije $\nu = 100Hz$, proceniti na osnovu audiograma koliki je fiziološki intenzitet ovog zvuka.

REŠENJE

Nivo jačine koji stvara jedna mašina je

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \tag{1}$$

Ukoliko je uključeno 10 identičnih mašina, onda je fizički intenzitet 10 put veći pa je nivo jačine:

$$L' = 10 \log \frac{10I}{I_0} \tag{2}$$

Ako iskoristimo osobinu logaritma ($\log(ab) = \log a + \log b$), nalazimo:

$$L' = 10 \log 10 + 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 + L = 100dB \tag{3}$$

Na osnovu audiograma prikazanog na Slici 6 za frekvenciju od 100 Hz i nivo jačine 100dB procenjujemo da je fiziološki intenzitet oko 90 fona.

1.4 Ultrazvuk

Kao što je rečeno ultrazvuk predstavlja mehaniček talase frekvencije iznad 20kHz. Ulktrazvuk se proizvodi pomoću uređaja koji su bazirani na pieoelektričnom efektu i magnetostrikcionom efektu. Pieoelektrični materijali menjaju svoje dimenzije pod dejstvom električnog polja. Ukoliko se na njih primeni oscilatorno električno polje, koje igra ulogu prinudne sile, pieoeletrični materijal osciluje frekvencijom kao i polje. Slično se ponašaju i magnetostrikcioni materijali ali pod dejstvom promenljivog magnetnog polja. Zbog osobine ultrazvuka da se slabije absorbuje u materijalnim sredinama, i da se može generisati uzak slabo divergirajući snop koji se može fokusirati, ultrazvuk je našao primenu u tehnicu, biologiji, medicini i drugim oblastima. Takođe ubrazanja čestica koje prenose ultrazvuk su znatna, pa se javljaju jake sile i velike promene pritiska u oblasti dejstva ultrazvuka. Za merenje dubine, određivanja konfiguracije podvodnog dna, lokacije jata riba koriste se ultrazvučne sonde koje generišu signale različitih frekvencija. Takođe metodom ultrazvuka mogu se detektovati nepravilnosti u strukturi određenih materijala. Pod dejstvom ultrazvuka vrlo velikog intenziteta mogu se spajati (variti) površine metala. Takođe u oblasti dejstva fokusiranog ultrazvučnog snopa mogu se javiti veoma visoke temperature. Određeni ultrazvuk može imati štetno dejstvo na žive ćelije jer može razarati hemijske veze.

Ultrazvukom se neka živa bića koriste za komunikaciju. Mačke mogu da registruju ultrazvuk do oko 64kHz, što je oblast komunikacije mnogih vrsta koje one love. Miševi međutim mogu komunicirati na frekvenciji i do 91kHz što im omogućava da budu neprimećeni od mnogih predatorskih vrsta. Približan opseg frekvencija koje čuju neke životinje je dat u Tabeli 2.

Tabela 2

Oblast frekvencija koje čuju neke životinje			
Životinja	Frekventni opseg [Hz]	Životinja	Frekventni opseg [Hz]
Pas	67-45000	Mačka	45-64000
Krava	23-35000	Konj	55-33500
Ovca	100-30000	Zec	360-42000
Pacov	200-76000	Miš	1000-91000
Oposum	500-64000	Slepi miš	2000-110000

1.5 Infrazvuk

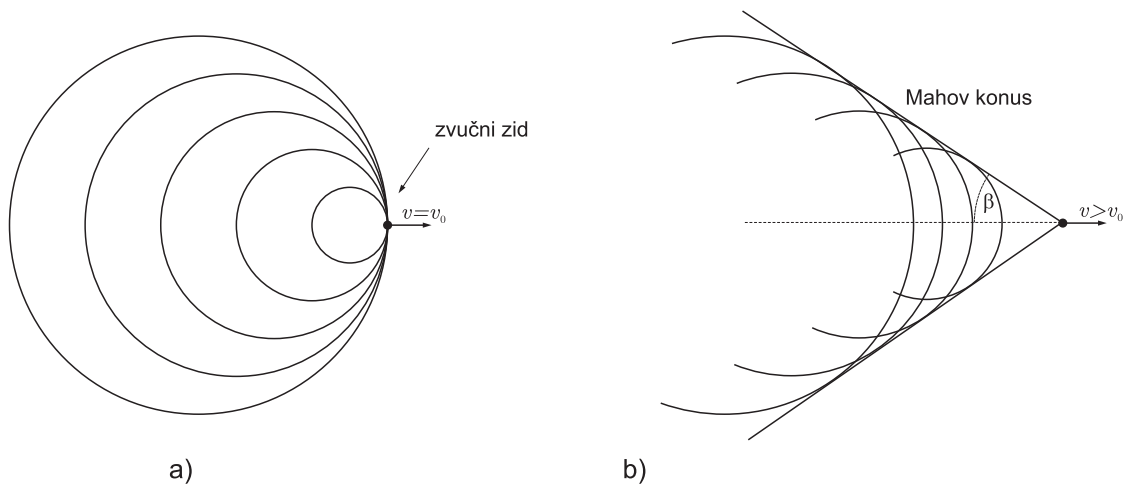
Obuhvata zvuk frekvencije ispod 20Hz. Infrazvuk je prisutan stalno i na svakom mestu. Njegovi prirodni uzroci su olujni vetrovi, erupcija vulkana, zemljotresi itd. Infrazvuk velikog intenziteta proizvode dizel motori pri niskim obrtajima (lokomotive, brodovi), ventilatori, vetroturbine, mašine u proizvodnim pogonima itd. Infrazvuk velikog intenziteta je štetan jer izaziva živčanu zamorenost više od ultrazvuka i buke. Dovodi do živčanih oboljenja u industrijskim gradovima. Protiv njega ne postoje nikakve mere zaštite jer je akustična apsorpcija proporcionalna frekvenciji. Jedini je način zaštite sprečavanje stvaranja infrazvuka u izvoru.

1.6 Mahov konus

U razmatranju Doplerovog efekta formule su izvedene pod pretpostavkom da je brzina izvora manja od brzine zvuka u datom medijumu. Međutim, kako se izvor približava brzini zvuka talasni frontovi se zgušnjavaju. Pri brzini izvora vrlo blizu brzine zvuka uz sam izvor vladaju ekstremni fizički uslovi, velika gustina, pritisak i temperatura. U nekom smislu zaista se formira prepreka za izvor koja predstavlja zvučni zid (Slika 7.a). Kad izvor savlada zvučnu barijeru, ne postoji talasni front ispred izvora i formira se Mahov konus (Slika 7.b). Mahov konus ima ugao otvora:

$$\sin \beta = \frac{v_0}{v} \quad (4)$$

gde je v_0 brzina zvuka, a v brzina izvora.



Slika 7 a) Formiranje zvučnog zida pri brzini izvora jednako brzini zvuka; b) Mahov konus formiraju talasni frontovi formirani iza izvora zvuka.

Mahov konus se ponaša kao udarni talas. Unutar udarnog talasa u toku kratkog vremenskog intervala nastaju vrlo visok pritisak, gustina i temperatura. Ovaj udarni talas pri prolasku pored slušalaca uzrokuje jak zvuk poznat kao proboj zvučnog zida.

Mahov konus nastaje i u vodi pri kretanju čamca brže od kretanja talasa u vodi. U idealnom slučaju iz vode izlaze dve Mahove linije pri kretanju čamca.

Sličan efekat javlja se i pri kretanju elektrona kroz transparentnu sredinu brzinom većom nego što je brzina svetlosti u datoj sredini. Duž "Mahovog konusa" elektrona formira se talasni front plavičaste svetlosti koja se naziva Čerenkovljevo zračenje.

Zadaci za samostalni rad: 4.4; 4.5; 4.6; 4.7; 4.8;4.9;4.10;4.11 iz: Zbirka zadataka iz fizike - mašinski odsek, Ljuba Budinski-Petković, Ana Kozmidis-Petrović, Milica Vučinić Vasić, Ivana Lončarević, Aleksandra Mihailović, Dušan Ilić, Robert Lakatoš.
FTN Izdavaštvo, Novi Sad.