

Sažetak za 2. MI iz Elektroakustike

By: MatthewSHP

v1.0

5. Slušna akustika

Uho je najviši sudac!

Pojam **sluh** objedinjuje sve što je potrebno da bi se stvorio svjesni ili nesvjesni slušni doživljaj: uho (vanjsko, srednje unutrašnje), slušne živce, te višerazinsku nelinearnu dvokanalnu obradu signala.

Primarna zadaća sluha je očuvanje osobnog integriteta, zapravo spašavanje života.

Tek potom dolazi na red obrada (ne)korisnih i (ne)ugodnih informacija. Čovjek sluhom dobiva oko 86% svih komunikacijskih informacija.

Procesiranje slušne informacije ovisi o njoj samoj:

- ako je relevantna i promjenjiva, procesiranje je intenzivno;
- ako nije, klasifikacija će je potisnuti iz svijesti.

Sluh doslovce nikada ne spava!

5.1 Uho

Vanjsko uho sastoji se od:

- školjke (*pinna, concha*),
- slušnog kanala (*zvukovoda*),
- bubnjića.

Slušni kanal

Prva košćica je *čekić*, spojena je sa sredinom bubnjića te se zajedno s njim pokreće oko osi na obodu bubnjića. Gibanje čekića se prenosi na *nakovanj*, koji je pak vezan na *stremen*.

Prijenosni omjer tog polužnog sustava je promjenjiv, između 1,3:1 i 3:1, ali se konačno prilagođenje (veliki zvučni tlak u tekućini unutrašnjeg uha) postiže zahvaljujući omjeru površina *ovalnog prozorčića* i površine bubnjića u iznosu od 3:80 mm².

Time se mehanička sila povećava između 35 i 80 puta.

5.2. Slušni proces

Zvučna energija, prenesena na tekućinu unutrašnjeg uha, proizvodi hidraulički tlačni val koji pobuđuje bazilarnu membranu na titranje. Bazilarna membrana je na početnom dijelu kruta i zategnuta, a pri kraju je debela i mlohava. Zato će mjesto najvećih titrajnih pomaka ovisiti o frekvenciji. Visoke frekvencije će izazvati najveće gibanje na početnome, a niske na završnome dijelu membrane. Time membrana prostorno, po svojoj duljini razlaže kompleksni val u sinusne komponente, čime ona ima funkciju grubog spektralnog analizatora.

Stvarne amplitude su vrlo male: uz zv. tlak od 1 μ b amplitude je oko 1 nm.

Duž bazilarne membrane val se proširi za 5 ms.

Kod savijanja bazilarne membrane dlačice se odgovarajuće deformiraju, te se zbog mehaničkog naprezanja u cilijarnim stanicama mijenjaju elektrokemijski uvjeti (stvra se elektrostatski naboj i time negativni istosmjerni potencijal (do oko 80 mV), mijenja se otpor stanice i time dolazi do modulacije struje, te nastaju impulsi koji nose informaciju. Ti impulsi se dalje odводе snopom živaca koji završavaju *neuronima* na odgovarajućim mjestima u mozgu. Time se razlikuje *analogna kohlearna mikrofonska struja* i *živčana (neuronska) akciona struja*, koja je u obliku strujnih impulsa.

Signal se do mozga prenosi *pulsno-frekvencijski* moduliran, dakle u kodiranom obliku.

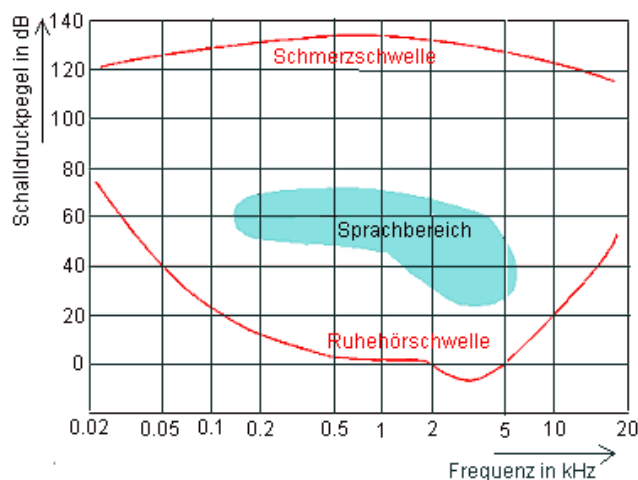
O broju impulsa koji protječu kroz neurone ovisi primarna obrada signala.

Bazilarna membrana titra frekvencijski selektivno, pa je se može podijeliti po dužini na 24 pojasa.

Ti pojasi, odnosno frekvencijske grupe imaju do oko 500 Hz pojasnu širinu od oko 100 Hz, a iznad 500 Hz im je približno jednaka terci.

Tonska grupa unutar svakog pojasa naziva se *bark* (prema Barkhausenu, koji je uveo jedinicu za mjerenje glasnoće, fon).

5.3. Svojstva sluha



Slušna ploha, prag čujnosti i bola

Promjene karakteristika praga čujnosti mogu biti prolazne (temporary threshold shift, TTS) ili trajne (PTS, permanent TS).

Naglušost i gubitak sluha mogu biti a) konduktivni i /ili b) perceptivni.

To znači a) gubitak sluha zbog mehaničkih poteškoća, i često je moguća kirurška pomoć.

b) perceptivna naglušost je posljedica degenerativnih promjena na cilijarnim stanicama i živčanih završetaka u pužnici.

Audiometar je ambulantni/laboratorijski uređaj za mjerenje osnovnih svojstava sluha.

Kod oštećenja srednjeg uha, a sačuvanog unutrašnjeg, moguće je izmjeriti *audiogram* dovođenjem mjernog signala odgovarajućim vibratorom na mastoid, odnosno kost iza školjke.

5.3.2. OSJET GLASNOĆE

Glasnoća nekog zvuka mjeri se tako da se uspoređuje s glasnoćom tona frekvencije 1000 Hz. Za ljestvicu zvučnih tlakova na toj frekvenciji uzeta je skala decibela s nulom vrijednosti na referentnom zvučnom tlaku od 20 μPa .

Na temelju slušnog uspoređivanja može se, mijenjajući zvučni tlak na toj frekvenciji, ugoditi ista glasnoća koju ima mjereni zvuk. Ako se takvom usporedbom dobije da mjereni zvuk ima istu glasnoću kao ton frekvencije 1000 Hz na razini zvučnog tlaka od 80 dB iznad referentne razine, onda se smatra da mjereni zvuk ima razinu glasnoće od 80 fona.

Prema tome, jedinica za glasnoću je **fon**.

Osjet visine tona nije proporcionalan *iznosu* promjene frekvencije, nego *omjeru* promjene. Npr., porast frekvencije sa 100 na 120 Hz izaziva isti osjet promjene tona kao i promjena frekvencije s 5 kHz na 6 kHz.

Ako su tonovi npr. cjelobrojne vrijednosti malih brojeva osjet tih tonova je harmoničan. Npr. 1:2 je oktava, 1:3 terca, 3:2 kvinta.

Da bi se neki ton mogao prepoznati, mora trajati između 4 i 10 ms (za frekventijsko područje između 400 Hz i 10 kHz). Ispod 100 Hz vrijeme prepoznavanja je dulje od 30 ms.

Subjektivno čovjek razlikuje dvije tonske visine: *harmonijsku* i *melodijsku*.

Jedinica za osjetnu (subjektivnu) veličinu tonske visine je **mel** (prema *melodiji*).

Čovjek čuje oko 10 harmonijskih i 6,3 melodijske oktave.

Za osjet boje tona nisu značajne samo frekvencije i amplitude pojedinih harmonika kompozitnog audio-signala, nego prije svega *omjer* njihovih frekvencija, međusobnog rasporeda i *izobličenja vremena kašnjenja*.

Kolebanje tonske ovojnice frekvencije ispod 20 Hz osjeća se često kao podrhtavanje zvuka.

Jačina kolebanja izražava se jedinicom **vacil**.

Jačina kolebanja od 1 vacila je ako je sinusni ton frekvencije 1 kHz, razine 60 dB, moduliran s 4 Hz i dubine modulacije 1.

Kolebanje tonske ovojnice u frekventijskom području između 30 i 300 Hz osjeća se kao "promuknutost" odnosno grubost. Jedinica grubosti je **asper**.

Pri frekvenciji tona od 1 kHz, razine 60 dB, moduliranog sa 70 Hz i dubine modulacije 1, grubost tona iznosi 1 asper.

Zbog nelinearnosti uha nastaju *kombinirani tonovi*

Slušanjem tona dovoljne glasnoće u uhu će se pojaviti i njegovi *auralni harmonici*.

Npr.: slušajući $f_1 = 200$ Hz i $f_2 = 604$ Hz (dovoljno glasno) čuti će se treptaj koji je nastao od trećeg harmonika f_1 i samoga f_2 .

Lokaliziranje izvora zvuka

Uobičajena lokalizacija je *binauralna*.

Lokalizacija je većim dijelom bazirana na:

- vremenskoj razlici između lijevog i desnog uha (*interauralne vremenske razlike IVR, interaural time difference*)
- razlici u glasnoći lijevog i desnog uha zbog zasjenjivanja glave i školjki
- faznih razlika između oba uha pri kontinuiranom signal (*interauralne intenzitetne razlike IIR, interaural intensity difference*)
- dinamičkoj lokalizaciji pomicanjem glave
- spektralnoj razlici zvuka ovisno o smjeru dolaska i analizi zvučne scene

Procesiranje zvuka počinje 7... 35 μ s nakon što prva promjena zvučnog tlaka stigne do bubnjića.

Mjerenje i računanje **interauralne vremenske razlike IVR**:

$$\Delta s = -(\phi + \sin \phi)$$

Dva izvora zvuka između kojih je mala vremenska ili tlačna razlika stvaraju subjektivno jedan, *virtuelni* zvučni izvor.

Radi se o lokalizaciji na osnovi sumiranja, što se koristi kod *stereofonskog* prijenosa.

Ako je vremenska razlika između oba signala na mjestu slušatelja veća od 1 ms, pozicija slušnog doživljaja ovisi o poziciji izvora čiji signal je prvi stigao do slušatelja. Drugi izvor postaje irelevantan u lokalizacijskom smislu. Taj efekt, važan kod ozvučavanja, zove se **zakonom prvog valnog čela** (efekt predhodnosti, precedence effect, Cremer 1948.).

Prekorači li kašnjenje neku gornju granicu, nastaju dva slušna doživljaja, čije pozicije uglavnom ovise o pozicijama izvora. Drugi slušni doživljaj naziva se **jekom**.

Haas je ustanovio (1939.) da kasni li zvuk iz jednog izvora u odnosu na drugi (jednaki signali su iz oba izvora) za 5 - 35 ms (govor 10 - 20 ms), slušatelj čuje samo zvuk koji je stigao prvi. Uz kašnjenje od 35 - 50 ms čuje se i drugi zvuk, ali iz smjera prvoga (tada dolazi do subjektivnog povećanja zvučnog izvora).

Kod još većeg kašnjenja čuje se jasna jeka.

Uz kašnjenje od 5 - 35 ms može sekundarni zvuk biti i do 10 dB glasniji od primarnog a da ga slušatelj ne čuje.

Poznatiji efekti, npr.:

- Coctail-party efekt
- Franssenov efekt
- Cliftonov klik

6. Prostorna akustika

Svrha joj je da se ostvare uvjeti za *prirodno, kvalitetno i ugodno slušanje*.

6.1. Oblik prostorije

Pojavljuje se stojni val čija je osnovna frekvencija ovisna o udaljenosti zidova d :

$$f_0 = \frac{c}{2d} = \frac{1}{2d} [Hz]$$

kao i viši modovi ($2f_0, 3f_0, \dots$)

Najčešći oblik prostora je *paralelopipedni*. Uporabom valne metode lord Rayleigh je 1869. izračunao *prirodne (vlastite) frekvencije* nekog prostora paralelopipednog oblika:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{p^2}{d^2} + \frac{q^2}{s^2} + \frac{r^2}{v^2}}$$

gdje su p, q i r cijeli brojevi (0, 1, 2, 3...) koji označavaju mod titranja (aksijalni, tangencijalni, kosi, višestruki), a d, s i v su duljina, širina i visina (dimenzije) prostorije.

Broj rezonantnih frekvencija između nekih frekvencija f i $(f+df)$ se može približno izračunati po formuli

$$dN = \frac{4\pi V f^2 df}{c^3}$$

(V je volumen, c brzina zvuka)

Jeka i lepršajuća jeka

Jeka se može pojaviti u različitim prostorijama te loše utjecati na razumijevanje govora i opći slušni dojam.

Pojaviti se može i zbog višestrukih refleksija u prostoru.

Volumen

O volumenu djelomice ovisi najniža rezonantna frekvencija prostorije.

Polovica valne duljine najniže rezonantne frekvencije je upravo jednaka razmaku dvije suprotne stijene.

S obzirom na reflektogram definirano je više pojmova kojima se opisuje

- slušnost (akustička prikladnost prostora za govorne, glazbene ili druge svrhe)
- razumljivost govora
- prozirnost (jasnoća distinkcije istodobnih ili bliskih zvučnih događaja)
- prostorni dojam
- živost
- difuznost prostora.

6.3.1. Izračunavanje vremena odjeka

W.C. Sabine, 1895.:

“Vrijeme odjeka je ono vrijeme za koje zvučna energija padne na $1/1000000$. To odgovara padu zvučnog tlaka na $1/1000$, dakle za 60 dB.”

Ustanovljeno je da:

1. vrijeme utišavanja zvuka praktički je svuda u prostoriji **jednako**
2. vrijeme utišavanja zvuka praktički ne ovisi o **položaju** izvora
3. efikasnost apsorpcijskih materijala postavljenih u prostoriji ne ovisi o njihovoj **poziciji**

Vrijeme odjeka se može izračunati i mjeriti.

Računa se po jednostavnoj empirijskoj formuli, koja vrijedi samo za relativno ječne ($T > 0,8$ s) prostore:

$$T = 0,163 -$$

T = vrijeme odjeka u s, V = volumen u m^3 , A = ukupna apsorpcija

A je apsorpcija u m^2 “otvorenog prozora”, ili u sabinima.

Zapravo je $A = \alpha \cdot S$, gdje je α koeficijent apsorpcije (za otvoreni prozor $\alpha = 1$), a S je ukupna površina svih ploha u prostoriji. Ako prostorija ima različite plohe s površinama S_1, S_2, S_3, \dots od kojih svaka ima svoj $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$, prema Sabinu je

$$\alpha \cdot S = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots$$

Pri potpunoj apsorpciji ($A = 1$) vrijeme odjeka ipak nije 0, što ukazuje na samo djelomičnu upotrebljivost formule.

Stoga je *Eyring* 1930. izveo novu, točniju formulu, uzimajući u obzir broj refleksija u prostoru, srednji slobodni put i pad zvučne energije koji nastaje prilikom svake refleksije.

Srednji koeficijent apsorpcije α definirao je kao:

$$-\ln(1-\alpha) = \alpha/1 + \alpha^2/2 + \alpha^3/3 + \dots$$

pa je

$$T = 0,161 V / [-S \cdot \ln(1-\alpha)]$$

čime je Sabinova formula zapravo specijalan slučaj Eyringove.

Sličan rezultat je dobio i *Millington*, koji je pretpostavio da za vrijeme odjeka nastaje N refleksija na površini S , pa onda i N_1 na S_1 , N_2 na S_2 itd. Pretpostavio je i da je broj refleksija razmjerni površini, pa je dobio:

$$T = 0,161 V / [-S_1 \cdot \ln(1-\alpha_1) - S_2 \cdot \ln(1-\alpha_2) - \dots - S_i \cdot \ln(1-\alpha_i)]$$

$$T = 0,161 V / [-\sum S_i \cdot \ln(1-\alpha_i)]$$

6.3.2. Mjerenje vremena odjeka

Moguće je na nekoliko načina:

1. *praskom*, koji je zadovoljavajućeg intenziteta kako bi se postigao zvučni tlak barem 60 dB iznad granice smetnje
2. *šumom*, kojim se može postići slično kao i s praskom. Oba mjerenja su terčna u području od 63 Hz do 4 kHz.
3. *TEF- Techron mjerna metoda*: integracijom zv. energije u određenom vremenu (Schröderova integracija) može se prema njezinom padu izračunati vrijeme odjeka
4. *B&K impulsna metoda*: rađena prema Schröder-Kuttruffovoj metodi (kratak pravokutni impuls propušten kroz terčni filter pobuđuje prostoriju, te se nakon prijema mikrofonom pojačava, filtrira, kvadrira i integrira, te je time usrednjen i bez nepotrebnih istitravanja. Time je ponovljiv i pouzdan za mjerenje).

6.3.4 Apsorpcija zvuka u zraku

Apsorpcija zraka ovisi o relativnoj vlažnosti s frekvencijom.

Ekvivalentna apsorpcijska površina zraka izražena je članom (4 m V), pa je onda korigiran izraz:

$$T = 0,161 \text{ V} / (4mV + A)$$

$$T = 0,161 \text{ V} / [4mV - S \ln (1-\alpha)]$$

gdje je m koeficijent apsorpcije zraka, a V je volumen.

6.3.5. Odječni radijus dvorane r_H

r_H se povećava s volumenom, ali se smanjuje s povećanjem vremena odjeka

$$r_H = 0,057 \sqrt{V} \text{ [m]}$$

U realnosti nema neusmjerenih izvora zvuka, pa treba uzeti u obzir i njihov koeficijent usmjerenosti Q i u izračun efektivnog odječnog radijusa

$$r_{H \text{ eff}} = 0,057 \sqrt{V} \text{ [m]}$$

Prostori namijenjeni prvenstveno govornim svrhama procijenjuju se na osnovi *slogovne razumljivosti* S_r :

$$S_r = 96 \cdot k_g \cdot k_0 \cdot k_b \text{ [%]}$$

k_g je faktor ovisan o glasnoći, k_0 o vremenu odjeka, a k_b o buci.

Mjerenje se provodi subjektivno, bilježeći razumljivost određenog broja logatoma.

Uz $S_r = 85-96\%$ razumljivost je vrlo dobra, uz $75-85\%$ razumljivost je dobra, $65-75\%$ govor se prati s naporom, manje od 65% razumljivost nije zadovoljavajuća.

Gubitak artikulacije suglasnika (articulation loss of consonants) je također odlučujući za razumljivost.

Prema Peutz i Kleinu je:

- idealna razumljivost ("vrlo dobro") ako je $Al_{\text{cons}} < 2\%$
- dobra razumljivost ("dobro") ako je $Al_{\text{cons}} 2...7\%$
- zadovoljavajuća razumljivost ("zadovoljavajuće") ako je $Al_{\text{cons}} > 7\%$
- nezadovoljavajuća razumljivost ("loše") ako je $Al_{\text{cons}} > 20\%$

7. Apsorberi, rezonatori, difuzori

Služe za:

- smanjenje vremena odjeka
- korekciju karakteristike vremena odjeka
- smanjenje buke i neželjenog zvuka određene frekvencije ili pojasa
- poboljšanje raspodjele zvučnog polja i smanjenje efekata usmjerenosti
- poništavanje jeke

7.1. APSORBERI

Prolaskom zvuka kroz razne materijale dolazi do njegove apsorpcije

$$A = 1 - r^2$$

gdje je r koeficijent refleksije (omjer amplitude tlaka reflektiranog vala prema amplitudi upadnog vala)

U praksi se upotrebljavaju 3 tipa apsorbera:

1. porozni
2. membranski
3. rezonatorski

7.1.1. Porozni apsorberi

Koeficijent apsorpcije poroznih materijala ovisi o:

- debljini sloja
- frekvenciji
- otporu strujanja
- poroznosti
- faktoru structure

S debljinom sloja raste apsorpcija.

α poroznih materijala se može u praksi povećati odmicanjem materijala od stijene.

7.1.2. Membranski apsorberi

Membrana može titrati na više načina. Najveća apsorpcija nastaje na osnovnoj, rezonantnoj frekvenciji.

$$f_r = 600 \text{ _____ [Hz]}$$

M je masa membrane u kg/m^2 , a d debljina (visina) zračnog jastuka (u cm) između membrane i stijene.

7.2. Rezonatori

Najveća apsorpcija postiže se na rezonantnoj frekvenciji:

$$f_r = (c/2\pi) \frac{1}{\sqrt{V/l_k}}$$

S je presjek grla, c je brzina zvuka, V je volumen, a l_k je korigirana duljina grla. Naime, efektivna duljina grla je veća jer titra i zrak izvan samog grla. Uz duljinu grla l i polumjer R

$$l_k = l + 1,57 R$$

grlo je u usporedbi kutije maleno.

To je *Helmholtzov rezonator*.

U rezonatorsku kutiju se može dodati prigušni materijal (npr. pepeo ili mineralna vuna) kako bi se proširilo aktivno područje rezonatora.

Time se smanjuje oštrina rezonantne karakteristike, *koeficijent dobrote* Q .

$$Q = f_0/\Delta f \quad (\Delta f \text{ za pad amplitude od } -3 \text{ dB})$$

Spojeni rezonatorski sustavi (panelni rezonatori) izvedeni su tako da se čvrsta ploča s okruglim ili duguljastim rupama učvrsti na odgovarajućoj udaljenosti od zida.

Rezonantna frekvencija je :

$$f_r = (c/2\pi) \frac{1}{\sqrt{V/l_k}}$$

P je postotak perforacije (omjer površine rupa prema površini ploče $\times 100$), l je efektivna duljina grla ($l = b + 0,8 d$, b je debljina ploče, d je promjer rupe), h je udaljenost ploče od zida, c je brzina zvuka.

Kod *rezonatora s rasporom* jedna je dimenzija mnogo veća od valne duljine na rezonantnoj frekvenciji:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{V/l_k}}$$

c je brzina zvuka, b je širina raspora, l je dubina raspora a S je presjek rezonatora u ravni okomitoj na raspor.

7.3. Mjerenje koeficijenta apsorpcije

a) Cijevna metoda

Najčešće se upotrebljava *Kundtova cijev*, u kojoj se generiraju stojni valovi. S jedne strane cijevi je zvučnik i mikrofoni, a na drugoj je mjereni apsorpcijski materijal. Mikrofonom, koji se može odgovarajuće pomicati unutar cijevi mjeri se maksimum i minimum zvučnog tlaka.

Ako se s A označi amplituda zv. tlaka koji stvara zvučnik, a s B amplituda reflektiranog vala, njihov odnos n bit će:

$$n = (A+B)/(A-B) = p_{\text{maks}}/p_{\text{min}}$$

Time je koeficijent apsorpcije α :

$$A = 1 - r^2 = 1 - B^2/A^2 = 4/[n + (1/n) + 2]$$

b) Metoda odječne komore

Uporabom standardizirane odječne komore moguće je izmjeriti koeficijente apsorpcije raznih tipova apsorbera.

Volumen komore je veći od 180 m³ (ISO). Površina mjerenog materijala je oko 10% ukupne površine komore.

Najniže dopušteno vrijeme odjeka je:

125	250	500	1k	2k	4k
5.0 s	5.0 s	5.0 s	4.5 s	3.5 s	3.0 s

c) Metoda s impulsnim tonom

Emitiranjem kratkog impulsnog tona određenog spektralnog sastava moguće je izbjeći interakcijske utjecaje okolnog prostora i utvrditi samo degradaciju ispitnog signala nakon refleksije o mjereni materijal.

7.4. Difuzori

Zvučni intenzitet I_{dif} i gustoća zvučne energije E_{dif} su konstantni i neovisni o orijentaciji ozvučene površine

$$I_{dif} = c \cdot E_{dif} = p_{ef}^2 / \rho \cdot c$$

U nekoj točki je dio zvučnog intenziteta

$$dI_{dif} = c \cdot dE_{dif}$$

određen sumacijom svih dijelova prostornog kuta $d\vartheta$, pa je uz $E/d\vartheta = E/4\pi$ na površini S snaga difuznog zvuka

$$P_{dif} = p_{ef}^2 \cdot S / 4\rho \cdot c$$

Ako je reflektirana zvučna snaga približno jednaka snazi upadnog difuznog zvuka

$$P_{ref} \approx P_{upad} - \alpha P_{upad} \quad (\alpha \ll 1)$$

onda je i

$$P_{ref} = P_{dif} = -I_{dif} \cdot S,$$

pa slijedi da je

$$I_{dif} = [4P_{upad}(1-\alpha)]/S$$

Schröder-ov difuzor

Osim uobičajenih kutijastih, okruglih, valjkastih itd. Oblika razvijen je poseban tip difuzora koji se zasniva na efektu difrakcijske rešetke.

Uz jednu (ili više) kompletnih binarnih sekvenci maksimalne duljine riječi, kod koje je udubina ili izbočina (1 bit) duga točno $\lambda/2$, a dubina udubine točno $\lambda/4$ postići će se stohastička jednolikost distribucije refleksija.

Npr, difuzor aktivan u području od 700 Hz do 1,4 kHz imati će jednostruki period dužine oko 1,5 m.

8. Buka i vibracije

Prema definiciji buka je neželjeni zvuk, koji na više načina ugrožava ljudsko zdravlje i sam sluh.

Osim buke u **čujnom** dijelu zvučnog spektra postoji i buka u infrazvučnom i ultrazvučnom dijelu spektra.

I vibracije, koje mogu potjecati od najrazličitijih izvora, vrlo loše utječu na ljudsko zdravlje, pa je potrebno odgovarajućim zahvatima provesti zaštitu.

Buka na čovjeku odmah izaziva nekoliko promjena, koje ako su česte ostavljaju ireverzibilne promjene, a ustanovljive su kao npr:

- proširenje zjenica, lupanje srca, reakcije mišića
- lučenje adrenalina, hormona štitnjače i nadbubrežne žlijezde
- pojačana peristaltika želuca i crijeva i sužavanje krvnih žila
- porast krvnog tlaka

Privremeni (TTS - Temporary Threshold Shift) i trajni gubitak (PTS - Permanent TS) sluha, odnosno pomak praga čujnosti uslijed buke nastaje tek od oko 80 dBA i pri dužem izlaganju.

Mjerenje buke

- za okolišnu buku standardno se koristi ekvivalentna razina buke u decibelima A (A je karakteristika subjektivne glasnoće prema preporuci IEC)
- C - težinska krivulja (uzima u obzir niže frekvencije)
- G - težinska krivulja (ISO7196, 1995.) predviđena specijalno za infrazvuk
- Z - težinska krivulja (ravna od 10 Hz do 20 kHz)
- **Rezultat mjerenja:** dobiva se usrednjavanjem kroz period vremena
- mjereni podaci prolaze kroz filter (težinska funkcija)
- korištenjem ekvivalentnih razina zapostavlja se karakter, kvaliteta i spektralni sastav buke
- spektralna analiza buke
- mjerenje umjetnom glavom (binauralno)

Ekvivalentna razina buke

Karakteristična veličina buke koja se mjeri i na osnovi koje se ocjenjuje je *ekvivalentna razina buke* u decibelima **A** (L_{Aeq} u dB(A)) (A je karakteristika subjektivne glasnoće, ovisna o frekvenciji, prema preporuci IEC).

Najviše dopuštene razine buke u boravišnim prostorijama stambenih zgrada ne smiju prijeći vrijednost od 25 dB(A) noću (23h - 07h) i 35 dB(A) danju (07h - 23h).

Ako je buka povremena ili neujednačena, tada ukupno tri 15-minutne ekvivalentne razine u toku dana ili noći ne smiju prijeći navedene granice.

$$L_{eq} = 10 \log \left(- \frac{^2_A dt}{p_{ref}^2} \right) [dB]$$

Zaštita od buke

Buka se može pojaviti:

- ako se stvara u prostoriji u kojoj smeta
- kao uzdušna buka koja dolazi izvana
- kao strukturna buka koja se prenosi preko građevinske ili neke druge tvrde structure

STRUKTURALNA BUKA

- zvuk kroz zidove prolazi:
- kroz rupe
- longitudinalnim titranjem u materijalu zida
- titranjem zbog savijanja zida

Sniženje buke apsorpcijskim materijalima u prostoriji u kojoj se ona stvara (uz difuzno polje) je $R = 10 \log (A_{\text{prije}}/A_{\text{poslije}})$ gdje su A_{prije} brojevi apsorpcijskih jedinica prije, a A_{poslije} brojevi apsorpcijskih jedinica poslije akustičke obrade.

Povećanjem broja apsorpcijskih jedinica deset puta snizit će se razina buke za 10 dB.

Prolazak buke kroz razdjelne zidove

Zvuk kroz zidove prolazi:

- kroz rupe i pore
- longitudinalnim titranjem u materijalu zida
- titranjem savijanja zida

Zvučna propusnost q zida definirana je

$$q = P_2/P_1$$

gdje je P_1 snaga koja dolazi na pregradu, a P_2 snaga koja prolazi kroz pregradu.

Zvučno prigušivanje R je

$$R = 10 \log 1/q = 10 \log P_1/P_2$$

a budući da se kod mjerenja mjeri zv. tlak p ispred i iza pregrade

$$R = 10 \log p_1/p_2$$

Ako je valna duljina savijanja na nekoj frekvenciji upravo jednaka emitiranoj valnoj duljini, radi se o *koincidentnoj frekvenciji*, na kojoj zid emitira mnogo zvučne energije pa se zvučno prigušivanje jako smanji.

Jednostavan porozan zid

Zvuk prolazi kroz pore i titranjem zida. Prigušenje zida je malo (1).

Zatvaranjem pora, npr. žbukanjem (2), masa će se relativno malo povećati, ali će prigušenje znatno porasti.

Dvostruk neporožan zid

Dvostrukom ili višestrukom pregradom, ali relativno male mase po jedinici površine može se postići veliko prigušenje.

Zbog vlastitog titranja pregrada jedne prema drugoj pada prigušenje na nekoj frekvenciji gotovo na nulu. Zračni jastuk između pregrada je to krući što je razmak između njih manji, pa je rezonantna frekvencija sve viša.

Mjerenje zvučnog prigušivanja pregrade

Prema ISO-preporukama veličina komora mora biti takva da se osigura velika difuznost zv. polja (najmanje 50 m³), a površina pregrade 10 m². Mjeri se frekvencijski moduliranim tonom ili uskopojasnim šumom.

Dubina modulacije je $\pm 10\%$ (ispod 500 Hz: ± 50 Hz), s modulacijskom frekvencijom od 6 Hz. Mjeri se od 100 Hz do 4 kHz po tercama.

Zvučno prigušivanje R dobije se kao zbroj svih pojedinačnih prigušivanja podijeljen zbrojem svih mjernih frekvencija smanjenim za 1 zbog polovičnih vrijednosti rezultata najniže i najviše mjerne frekvencije.

Omjer zvučne snage u prostoriji izvora prema snazi u prijemnoj prostoriji daje stupanj zvučnog prigušivanja r

$$r = P_1/P_2 = p_1^2 S / p_2^2 A_2$$

uz S je površina pregrade, a A_2 apsorpcija prijemne prostorije.

Prigušivanje je (u dB)

$$R = 10 \log r = 20 \log (p_1^2 / p_2^2) + 10 \log (S / A_2)$$

Mjerenje zvučne izolacije stropne pregrade

Mjerenje se provodi ISO - standardiziranim *topotnim strojem*.

U donjoj, prijemnoj prostoriji oktavno (ili terčno) izmjerena razina buke naziva se *razinom udarne buke*.

Mjerenje se može izvesti i bez topotnog stroja ako se u gornju prostoriju postave izvori zvuka čija se razina zvučnog tlaka u obje prostorije mjeri pomoću mikrofona. Ta metoda se koristi za mjerenje zvučne izolacije materijala manje mase, koji se koriste primjerice u avionima.

Vibracije i potresanje

Čovjek ih prima s više organa istodobno.

Pri *potresanju* se cijelo tijelo giba uglavnom kao cjelina, dok se kod *vibracija* (zapravo je to mnogo brže potresanje) pomiču samo dijelovi tijela.

U praksi se pojavljuju potresanje i vibracije istodobno.

U dijelu tijela između kukova i ramena nastaju pri frekvencijama 3 - 6 Hz jasne rezonantne pojave.

Sistem glava - vrat ima 20 i 30 Hz, očne jabučice 60 - 90 Hz, a donje čeljusti 100 - 200 Hz.

Referentne vrijednosti su:

- nulta razina za pomak $s_0 = 10^{-11} \text{ m}$
- titrajna brzina $v_0 = 10 \text{ nm/s} = 10^{-8} \text{ m/s}$
- akceleracija $a_0 = 10 \text{ } \mu\text{m/s}^2 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$

9. Ultrazvuk i hidroakustika

$$\lambda \cdot f = 1500 \text{ m/s}$$

U ultrazvučnom polju nastaju **primarni** i **sekundarni efekti**.

Primarni su linearni efekti, npr. tlak ultrazvučnog snopa, istosmjerno strujanje, pilasta deformacija valnog oblika, kavitacija, apsorpcija i trenje na graničnim plohami itd.

Sekundarni efekti su mehanički (orijentacija i separacija), termički, električki, optički, kemijski i biološki.

Linearno i nelinearno širenje ultrazvučnog vala

- velike amplitude tlaka (MPa) - nelinearno širenje

- male amplitude tlaka (100kPa) – linearno širenje

9.1. OSNOVE

- Ultrazvučno polje velike snage u tehnološkim i energetskim procesima ima velik broj mehaničkih titraja, npr. 20 kHz je 20000 udara u sekundi.

- mehanički pomaci x su relativno mali : 50 – 100 μm

- srednja titrajna brzina čestica je umjerena

$$(2 \pi 50 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3 = 6,28 \text{ m/s});$$

- vrlo su velike akceleracije čestica $a = \omega_o^2 x_o \quad 8 \cdot 10^4 \text{ g}$

- mogući su vrlo različiti intenziteti energije:

od mW/cm^2 do kW/cm^2 .

UZ je karakteriziran **linearnim** veličinama:

- tlak p
- titrajna brzina v
- specifični akustički otpor $\rho \cdot c$
- brzina širenja vala c
- pomak čestice x
- akceleracija a

i **energetskim** veličinama

- zvučna snaga Pa
- zvučni intenzitet I
- gustoća zvučne energije E

Zvučni val može biti:

- kuglast
- ravan
- cilindričan

pa se javljaju pojave:

- refrakcija
- refleksija
- ogib
- apsorpcija

U ovisnosti o udaljenosti od površine pretvarača razlikuje se *blisko* (Fresnelovo) i *daleko* (Fraunhoferovo) polje.

Brzina širenja vala ovisit će i o svojstvima materijala, tj.

$$c^2 = K_a / \rho,$$

gdje je K_a adijabatski modul krutosti recipročan adijabatskoj stlačivosti fluida G_a , a ρ je gustoća sredstva kroz koje se val širi.

Budući da veličine K_a i ρ ovise o temperaturi, slanosti i hidrostatskom tlaku (dubini), brzina zvuka je hidrološka karakteristika morske sredine.

Pojednostavljena formula Leroya u većini slučajeva je primjenjiva za praktičnu primjenu i ima oblik:

$$c = 1412 + 3,21T + 1,19S + 0,0167Z \text{ [m/s]}$$

Brzina zvuka c je izražena u m/s, temperatura T u °C, slanost S u ‰, a dubina Z u m.

Točnost formule iznosi oko 0,1 m za T 20°C i $Z < 8000$ m.

Osnovni zakon emisije zvuka u tekućinama

Brzina zvuka u tekućinama ovisi o njihovoj stlačivosti G (adijabatskoj konstanti) i gustoći ρ_0 :

$$c =$$

Rad, koji izvor (UZ) izvrši u jednoj sekundi protiv sile reakcije sredine u kojoj se nalazi je *akustička snaga*.

Sila reakcije sredine F_s koja djeluje na cijelu emitirajuću površinu S je

$$F_s = p S \text{ (} p \text{ je zvučni tlak, } S \text{ je površina emisije)}$$

a ovisnost tlaka o titrajnoj brzini v je dana pomoću akustičke impedancije Z_a

$$p = v Z_a$$

$$\text{pa je osnovni zakon emisije } F_s = S Z_a v = Z_s v$$

odnosno

$$Z_s = Z_a S = F_s / v = \rho_0 c$$

Z_s je impedancija zračenja (emisije), koja se može pisati kao

$$Z_s = Z_a S = (R_a + jX_a) S = R_s + jX_s$$

gdje je R_s aktivna (realna) komponenta, a X_s reaktivna komponenta impedancije zračenja.

Kompleksni karakter je ovisan o faznoj razlici između F_s i v , koja je određena faznim kutem Φ

$$\Phi = \arctan X_s / R_s$$

Ako je titranje harmonično

$$F_s = F_m \sin \omega t,$$

pa je i

$$v = v_m (\sin \omega t - \Phi)$$

te se integriranjem po vremenu dobije akustička snaga zračenja

$$P_a = -F_m v_m \cos \Phi \cdot 10^{-7} \text{ [W]}$$

$$\text{Budući da je } |Z_s| = \sqrt{R_s^2 + X_s^2}$$

$$P_a = -v_m^2 |Z_s| \cos \Phi \cdot 10^{-7} \text{ [W]}$$

Definiran je koeficijent refleksije r_p

$$r_p = p_{mr}/p_m = (1 - R_{a1}/R_{a2}) / (1 + R_{a1}/R_{a2})$$

i koeficijent apsorpcije α_p

$$\alpha_p = p_{mt}/p_m = 2 / (1 + R_{a1}/R_{a2})$$

kao odnosi amplituda tlakova reflektiranog, odnosno refraktiranog vala i upadnog vala.

Veza između kuteva i brzine širenja ultrazvučnih valova prema *Snellovom* zakonu je:

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = c_1 / c_2$$

odnosno za longitudinalni i transverzalni (reflektirani i preneseni) val:

$$c_{11}/\sin \theta_1 = c_{12}/\sin \theta_2 = c_{t1}/\sin \theta_3 = c_{t2}/\sin \theta_4$$

9.2 Primjena ultrazvuka

- a) Dubinomjeri
- b) Istraživanje i eksploatacija podmorja
- c) Ratna mornarica, vojska
- d) Industrija i tehnika
- e) Medicina

9.3. Kavitacija

Kavitacijom se naziva stvaranje mjehurića u fluidnim medijima kao posljedica smanjenja tlaka medija.

Pojavljuju se velike trenutne vrijednosti promjene tlaka (veće od 10 MPa), uz temperature više od 120000K.

Kao popratne pojave javljaju se sonoluminiscencija, generiranje subharmonika i karakterističan zvučni prasak.

Granica intenziteta za pojavljivanje kavitacije kreće se od 0,14 do 17,5 W/cm² u frekvenzijskom području od 0,25 do 4 MHz.

Frekvencija od 10 MHz predstavlja praktički gornju granicu nastajanja kavitacije.

Razlog tome je što ne postoji dovoljno mala jezgra u tekućini koja bi imala rezonantnu frekvenciju ispod 10 MHz i kao takva omogućila nastajanje kavitacija.

9.5. UTJECAJ ULTRAZVUKA NA TKIVO

Pri aplikaciji ultrazvuka na tkivo 5 je glavnih parametara koji omogućuju željeni učinak: *frekvencija, intenzitet, dužina ekspozicije, fokusiranje i način uporabe UZ glave.*

U *dijagnostičkim* sustavima intenziteti su najčešće manji od 0,05 W/cm²,

- za *fizikalne* terapije intenziteti su u rasponu od 0,5-4 W/cm²,

- au *UZ kirurgiji* se koriste intenziteti velikih snaga, tipično veće od 10 W/cm², s vršnim vrijednostima ponekad većim i od 1 kW/cm².

Uobičajene frekvencije UZ:

- u dijagnostici su između 1 i 10 MHz,
- u terapiji između 0,75 MHz i 3 MHz,
- dok se kirurški UZ koristi frekvencijama između 24 i 32 kHz, alii 1 – 4 MHz (fokusirani).

Pri uporabi dijagnostičkog UZ teži se *nikakvom* utjecaju na tkivo, a kod terapijskog i kirurškog on mora biti *potpuno kontroliran*.

- **Toplinsko djelovanje**
- **Koagulacija (zgrušavanje)**
- **Kavitacija.** Mehanizam kavitacije i njezini efekti još nisu do kraja objašnjeni, ali uočena je njezina ovisnost o vrsti tkiva i lokaciji.
- **Kemijsko djelovanje.**
- **Fiziološko djelovanje.**

9.9 HIDROAKUSTIKA

Hydroakustika (od grčke riječi χυδop – voda, ακουστός – čujni) kao specijalizirana grana znanosti i tehnike danas je našla široku primjenu u sustavima za promatranje pod morem, u podvodnim komunikacijama, navigaciji (dubinomjeri, Doppler-navigacijski sistemi, brzinomjeri i dr.), podvodnoj telemetriji, podvodnim oružanim sustavima, istraživanju biosfere mora akustičkim metodama, u području istraživanja podmorja itd.

9.9.1 PODVODNA AKUSTIKA

Pod normalnim uvjetima brzina zvuka u vodi je oko 1500 m/s, a ovisi uglavnom o temperaturi, salinitetu i dubini vode.

Akustički valni otpor vode je oko 3700 puta veći od otpora zraka i iznosi $1,535 \cdot 10^6 \text{ N s/m}^3$.

Kao nulta razina tlaka u vodi uzima se $p_0 = 10^{-6} \text{ N/m}^2 = 1 \mu\text{Pa}$.

Slabljenje jakosti zvuka u vodi dano je za ravni val izrazom $I = I_p 10^{-ax/10}$

gdje je I_p početni intenzitet, x je prevaljeni put i a je koeficijent gušenja, koji za čistu vodu iznosi $a = 2,08 \cdot 10^{-15} f^2 \text{ [dB/cm]}$

(f je frekvencija).

Gubici TL (transmission loss) pri širenju mogu se razmatrati kao zbroj gubitaka uslijed *divergencije čela* vala i gubitaka kao posljedice *gušenja*.

Gubici širenja akustičke energije na udaljenosti r su:

$$TL = 20 \log (r_2/r_1) + 10 \log (r/r_2)$$

a za $r_1 = 1\text{m}$:

$$TL = 20 \log r_2 + 10 \log (r/r_2)$$