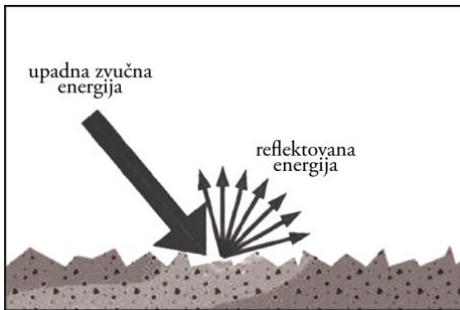


Fizička akustika, 5. deo

1.1 Difuzija zvuka

Kada zvučni talas pogodi neku prepreku deo zvučne energije se apsorbuje ili prođe kroz prepreku a deo se reflektuje. Ako se reflektovana energija odbije samo u jednom pravcu, pri čemu su upadni ugao i ugao refleksije isti, o čemu je bilo reči u odeljku 1.18, kažemo da se radi o spekularnoj refleksiji. Ukoliko se zvučna energija raspe uniformno u mnogo pravaca, slika 1.28, kažemo da se radi o difuznoj refleksiji ili difuziji zvuka.



Slika 1.28 – Šematski prikaz difuzije zvuka

Difuzija zvuka je veoma značajna u akustici jer sprečava pojavu jakih refleksija koje mogu višestruko da smetaju. Ona doprinosi utisku da zatvoreni prostor akustički izgleda („zvuči”) većim nego što je u stvarnosti. U akustičkoj obradi prostorija difuzija je često dobra alternativa apsorpciji zvuka jer se može primeniti za smanjenje refleksija uz jednovremeno zadržavanje „živosti” prostora tj. zadržavanje akustičke energije u prostoriji.

Difuzija zvuka nastaje kada se zvučni talasi reflektuju od konveksne površine, ili kada je prepreka neravna, pri čemu su dimenzije neravnina veće od talasne dužine zvuka. Takođe, do difuzije će doći i kada je površina na koju nailaze zvučni talasi prekrivena naizmenično refleksionim i apsorpcionim segmentima.

1.2 Apsorpcija zvuka

Kada zvučni talas naiđe na neku prepreku deo njegove energije će se reflektovati, a deo će biti apsorbovan (upijen) ili će proći kroz prepreku, slika 1.29. Deo koji prolazi kroz uobičajene prepreke u praksi (najčešće zidovi prostorija) je veoma mali u odnosu na energiju koja se reflektuje ili biva apsorbovan, pa o njemu ovde dalje nećemo voditi računa. U kakvom odnosu su reflektovana i apsorbovana energija je za praksu vrlo važno. Materijali, od kojih su prepreke sagrađene, imaju veoma različite osobine u pogledu apsorpcije i refleksije zvučnih talasa. Da bi se ove pojave mogle i brojno kvantifikovati uvedeni su koeficijenti apsorpcije i refleksije zvuka.

Intenzitet zvučnih talasa koji nailaze na prepreku, na slici 1.29, označićemo sa J , intenzitet reflektovanih talasa sa J_r i intenzitet apsorbovanih talasa sa J_α . Pošto smo zanemarili veoma mali deo energije koja je prošla kroz prepreku možemo pisati:

$$J = J_r + J_\alpha, \quad [J] = W/m^2 \quad (1.26)$$

Ako sve članove ove jednačine podelimo sa J , dobijamo:

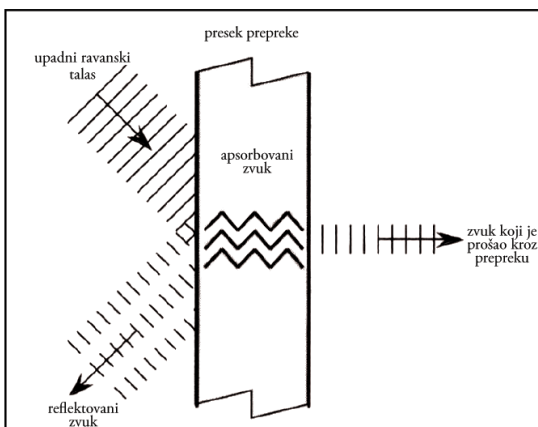
$$1 = \frac{J_r}{J} + \frac{J_\alpha}{J}, \quad (1.27)$$

gde je $\frac{J_r}{J} = r$ i naziva se koeficijent refleksije, a $\frac{J_\alpha}{J} = \alpha$ i predstavlja koeficijent apsorpcije zvuka.

Iz jednačine (1.27) se dolazi do jednostavne relacije koja glasi:

$$\alpha + r = 1 \quad (1.28)$$

Zbir koeficijenata apsorpcije i refleksije je uvek jedinica. Što je jedan veći to je drugi manji. Njihove vrednosti se kreću u granicama: $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq r \leq 1$.



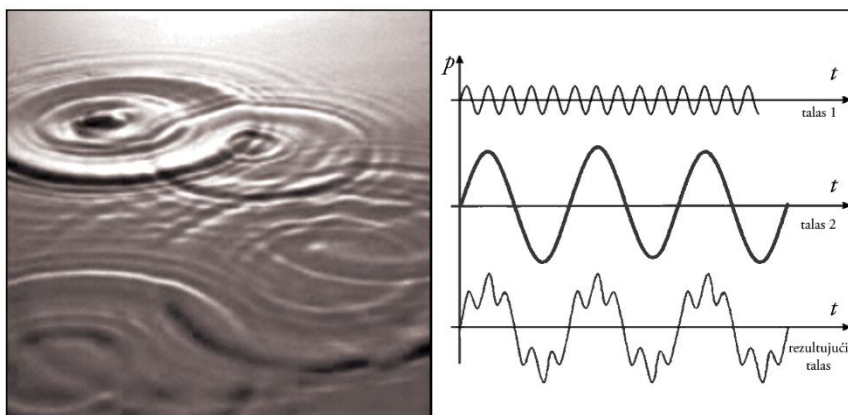
Slika 1.29 – Šematski prikaz apsorpcije, refleksije i transmisije zvučnih talasa

Postoje materijali koji veoma dobro upijaju zvuk, a to znači da će za te materijale α biti blizu jedinice, a r blizu nule. Isto tako ima materijala koji obrnuto reaguju pri dolasku zvučnih talasa.

Po pravilu se, u praksi, daju podaci za koeficijente apsorpcije datih materijala, a ako je potrebno, koeficijenti refleksije se lako mogu izračunati.

1.3 Princip superpozicije zvučnih talasa

Kada dva ili više talasa zahvate isti deo sredine onda je njihovo ukupno dejstvo jednako zbiru delovanja koje bi svaki talas imao kada bi samo on stigao u datu tačku. To sabiranje delovanja talasa se naziva superpozicija, a njen rezultat se može videti na slici 1.30 levo, gde su prikazani superponirani talasi na vodi. Slična je situacija i sa zvučnim talasima.



Slika 1.30 – Superpozicija talasa: levo - talasi na vodi, desno - sinusni talasi različitih frekvencija [28]

Intenzitet zvuka u tački preseka talasa pri superpoziciji, može biti veći ili manji od intenziteta koji potiče od pojedinih superponiranih talasa. Princip superpozicije se može sagledati na primeru sinusnih talasa prikazanih na slici 1.30 desno, gde je amplituda rezultujućeg, jednaka zbiru amplituda pojedinih talasa.

Specijalni oblici superpozicije zvučnih talasa su interferencija, difrakcija, izbijanje i stojeći talasi.

1.4 Interferencija zvučnih talasa

Interferencija je specijalni slučaj superpozicije, pri kojoj se superponirani talasi ili značajno pojačavaju (konstruktivna interferencija) ili značajno poništavaju (destruktivna interferencija). Drugim rečima to znači da interferencija može nastati samo između talasa iste ili približno iste frekvencije i konstantne fazne razlike tj. između *koherentnih* zvučnih talasa.

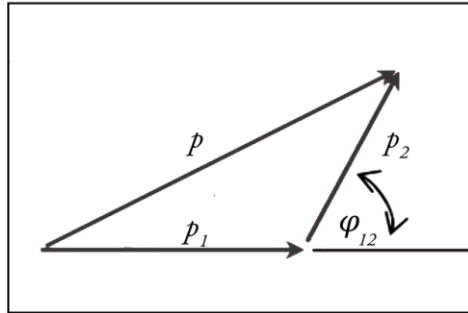
Da bi međusobno poništavanje ovakvih talasa bilo značajno, njihove amplitude treba da budu što približnijih vrednosti. Takvi talasi su oni koji potiču od istog izvora (direktni talas i njegova refleksija) ili od različitih izvora ali imaju iste odnosno približno iste frekvencije (dva ili više identičnih zvučnika povezani na isti električni signal čistog tona).

U opštem slučaju, kada je fazna razlika između dva zvučna talasa φ_{12} , a efektivne vrednosti njihovih pritiska u tački posmatranja p_1 i p_2 , iz fazorskog dijagrama sa slike 1.31 imamo da je efektivna vrednost ukupnog pritiska:

$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2 \cdot p_1 \cdot p_2 \cdot \cos \varphi_{12}} \quad (1.29)$$

Na slici 1.32a je prikazan slučaj kada se dva izvora i slušalac nalaze na istoj liniji i izvori emituju identične sinusne talase. Kada su talasi u fazi (što odgovara faznoj razlici $\varphi_{12} = 2m\pi$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$) rezultat interferencije je novi talas iste frekvencije i duplo veće amplitude, slika 1.32c. Kažemo da je u ovom slučaju došlo do konstruktivne interferencije.

Da bi talasi bili u fazi rastojanje između izvora mora imati vrednost $\Delta d = 2m(\lambda/2)$, gde je λ talasna dužina zvuka.



Slika 1.31 – Fazorski dijagram pritiska p_1 , p_2 i resultantnog pritiska p

Kada su talasi u protiv-fazi (fazna razlika $\varphi_{12} = (2m + 1)\pi$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$) rezultat interferencije je nula, tj. talasi se međusobno poništavaju, slika 1.32b, i tada kažemo da je nastala destruktivna interferencija. U ovom slučaju rastojanje između izvora zvuka je $\Delta d = (2m + 1)(\lambda/2)$.

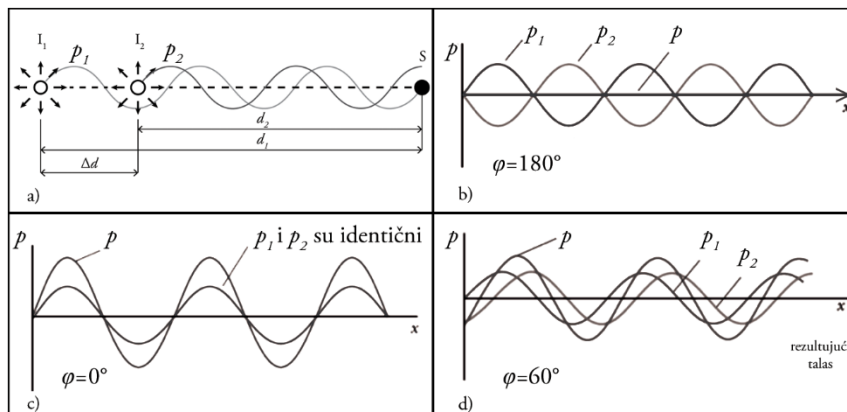
Kada je fazna razlika između talasa 60° ili $\pi/6$, dobija se kao rezultat interferencije novi talas nešto veće amplitude nego što je amplituda pojedinačnih talasa, slika 1.32d. Tada je rastojanje između izvora zvuka $\Delta d = (1/6)(2m + 1)(\lambda/2)$, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Ako umesto zvučnih pritisaka poznamo nivoe zvuka, koje stvaraju pomenuta dva izvora, onda se ukupni nivo zvuka može izračunati prema izrazu:

$$\begin{aligned} L &= 20 \log p = \\ &= 20 \log \sqrt{(10^{L_1/20})^2 + (10^{L_2/20})^2 + 2(10^{L_1/20})(10^{L_2/20}) \cos \varphi_{12}}. \end{aligned} \quad (1.30)$$

U tabeli 1.3 dat je ukupan nivo zvuka ako oba izvora sa slike 1.32a imaju isti nivo od 70 dB ali se menja rastojanje Δd između njih ili fazna razlika φ_{12} između zvučnih talasa koje emituju, što je isto.

Kao što se vidi iz tabele 1.3, kada je fazna razlika između dve komponente zvučnog pritiska jednaka nuli (u fazi su) onda je ukupni nivo pritiska veći za 6 dB od nivoa pojedinačnih komponenti. Ako je ova razlika 180° (u protiv fazi su) onda je teorijski ukupni nivo pritiska jednak nuli, odnosno dejstvo ove dve komponente zvučnog pritiska se u tački posmatranja međusobno poništava.



Slika 1.32 – Interferencija zvučnih talasa dva identična izvora za različite vrednosti fazne razlike φ_{12} između talasa: a) izvori I_1 , I_2 i slušalac S su na istoj liniji, b) $\varphi_{12} = 180^\circ$, c) $\varphi_{12} = 0^\circ$, d) $\varphi_{12} = 60^\circ$

Kada su u pitanju dva izvora koji emituju identične sferne sinusne talase postupak interferencije je nešto komplikovaniji, međutim i tada važi opšte pravilo da konstruktivna interferencija nastaje u onim tačkama prostora gde je putna razlika između dva talasa $\Delta r = 2m(\lambda/2)$, ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$), a destruktivna u tačkama gde je $\Delta r = (2m + 1)(\lambda/2)$, ($m = 0, 1, 2, 3, \dots$). Koncentrični krugovi na slici 1.33a predstavljaju talasne frontove talasa koji potiču od dva identična izvora. Rastojanje između talasnih frontova jednako je talasnoj dužini zvuka λ . Na slici su naznačene linije na kojima se nalaze tačke u kojima dva talasa imaju istu putnu razliku Δr . Tamo gde je ova razlika jednaka parnom broju $\lambda/2$ nastaje konstruktivna interferencija, a tamo gde je razlika jednaka neparnom broju $\lambda/2$ dolazi do destruktivne interferencije. Na slici 1.33b prikazana je vizuelna predstava dobijenog rezultata superpozicije.

U praksi smo često izloženi zvuku koji emituju dva zvučnika u stereo postavci, ali nam iskustvo govori da se tada ne primećuju zone izrazito jakog i izrazito slabog intenziteta zvuka. To je zato što muzički signal koji se tada reprodukuje preko zvučnika sadrži veliki broj zvučnih talasa različitih frekvencija od kojih se neki dodatno reflektuju o zidove prostorije, i na mesto slušanja stižu sa najrazličitijim putnim razlikama pa se efekat izrazite interference gubi.

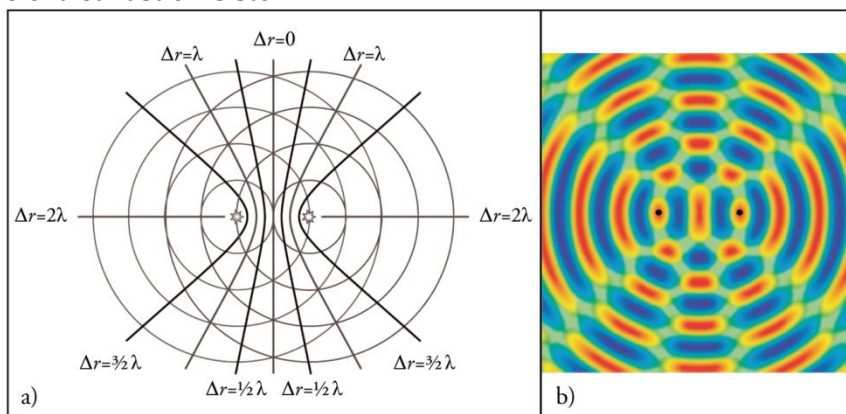
Interferencija zvučnih talasa ima mnogo primena. Jedna od interesantnijih je njeno korišćenje za slabljenje neželjenih zvukova odnosno buke i šumova. Naime, piloti aviona kao i drugih letilica sa velikim nivoima buke u kabini, koriste specijalno napravljene slušalice, takve da se u njima dešava destruktivna interferencija čiji je rezultat redukcija buke koja dolazi od motora.

Tabela 1.3 - Ukupan nivo zvuka koji stvaraju dva zvučna izvora čistog tona iste frekvencije, istog nivoa od 70 dB i različitih početnih faza.

L_1 (dB)	70										
L_2 (dB)	70										
φ_{12} (°)	0	10	30	40	50	100	120	150	160	170	180

L (dB)	76,02	75,99	75,72	75,48	75,17	72,18	70,00	64,28	60,81	54,83	0
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	---

Destruktivna interferencija se takođe primenjuje pri redukciji buke u ventilacionim kanalima, u kabinama putničkih aviona na komercijalnim letovima, kao i u unutrašnjosti putničkih automobila. Da bi se to postiglo koriste se elektroakustički pretvarači (mikrofoni i zvučnici) u kombinaciji sa elektronskim komponentama koje vrše veoma brzu analizu buke i na osnovu toga generišu signal šuma suprotnog dejstva. Kada se radi o destruktivnoj interferenciji zvučnih talasa, ne u okolini jedne tačke kao u slušalicama, već u širem prostoru, onda se moraju primeniti komplikovaniji elektroakustički sistemi.



Slika 1.33 – Superpozicija sfernih talasa koje emituju dva identična izvora: a) linije iste putne razlike talasa, b) vizuelna predstava zona konstruktivne i destruktivne interferencije [22]