

5 SEKTORSKO OZVUČAVANJE

Sektorsko ozvučavanje prostorija primenjuje se kad prostorija ima veliko vreme reverberacije, kada je visok nivo buke u prostoriji, kada nema zgodnog mesta da se postavi zvučnička skupina ili kada se traži ujednačen, relativno visok nivo zvuka u prostoriji.

Ako su zvučnici kod sektorskog ozvučavanja raspoređeni vrlo gusto u tavanici, iznad glava slušalaca, imamo tzv. sistem došaptavanja. Kod ovog sistema treba da su varijacije direktnog zvuka na pozicijama glava slušalaca što manje. Jak direktni zvuk i homogeno zvučno polje kod sistema došaptavanja stvara uslove za dobru razumljivost govora. Zvučnici se obično ugrađuju u tavanicu u pravilnom rasporedu na jednakim međusobnim rastojanjima koja zavise od karakteristika usmerenosti zvučnika i visine i oblika prostorije.

Pri proračunu rasporeda zvučnika posebno se vodi računa o pokrivanju direktnim zvukom u trećini oktave ili oktavi sa centralnom frekvencijom od 2kHz. U ovom frekvencijskom opsegu su komponente govornog signala koje najviše doprinose razumljivosti. Treba nastojati da se proračun izvede i za frekvencije u okolini 4kHz jer su ispod ove frekvencije svi osnovni tonovi muzike i komponente zvuka na osnovu kojih slušalac određuje pravac dolaska zvučnih talasa.

Zavisno od akustičkih karakteristika prostorije i karakteristika usmerenosti zvučnika povoljne visine zvučnika pri ovakvom ozvučavanju su 3,5 do 7m. Pri manjim visinama za uniformno zvučno polje potreban je veliki broj zvučnika što je neekonomično rešenje. S druge strane, pri većim visinama postoji bojazan da će slušaoci biti izvan zone dobrog prijema. Izuzetno u prigušenijim prostorijama i pri malim nivoima buke zvučnici se mogu ugrađivati u tavanicu čija je visina i iznad 10m.

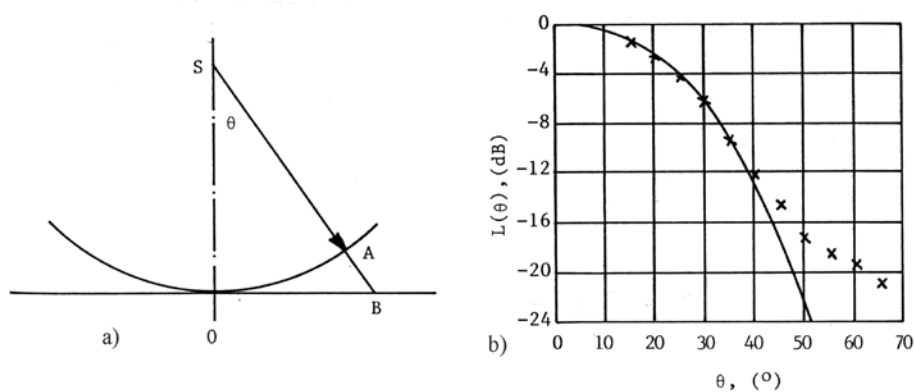
Za sisteme došaptavanja koriste se zvučnici različitih veličina od onih prečnika 10cm (4") pa sve do prečnika 40cm (16"). Standardne veličine u ovom rasponu su 10cm (4"), 12,5cm (5"), 20cm (5"), 30cm (12") i 40cm (16").

U najvećem broju slučajeva važi opšte pravilo da je veličina zvučnika koji će se koristiti u datoj prostoriji proporcionalna veličini prostorije, odnosno visini tavanice u prostoriji.

Zvučnici većih prečnika počevši od 20cm pa naviše danas se skoro isključivo izrađuju kao dvopojasne koaksijalne jedinice sa radnim frekvencijskim opsegom od 60Hz pa do 12 ili čak 15kHz. Dvopojasna konstrukcija takođe obezbeđuje širok ugao zračenja do najviših audio frekvencija.

5.1 Raspodela pritiska u ravni normalnoj na osu zvučnika

Za primenu zvučnika u sektorskim sistemima ozvučavanja, naročito kada se radi o sistemu došaptavanja korisno je znati raspodelu nivoa zvučnog pritiska u ravni normalnoj na osu zvučnika.



Sl.5.1. Nivo pritiska u ravni normalnoj na osu zvučnika; a) geometrijski uslovi, b) nivo pritiska u funkciji ugla u odnosu na osu zvučnika.

Ako prema sl.5.1 sa $L'(\theta)$ označimo razliku nivoa pritisaka u tačkama A i O tj.

$$L'(\theta) = L_A(\theta) - L_0 \quad (5.1)$$

onda je razlika pritisaka u tačkama B i O,

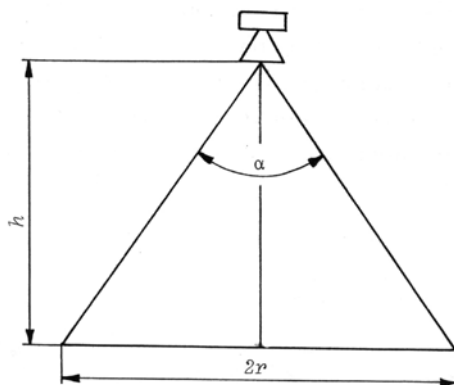
$$L(\theta) = L_A(\theta) - L_0 + 20 \log(\cos \theta) = L'(\theta) + 20 \log(\cos \theta) \quad (5.2)$$

Funkciju $L(\theta)$ koja predstavlja normalizovanu raspodelu pritisaka u ravni normalnoj na osu zvučnika, dobijamo tako što vrednosti uzete sa dijagrama zračenja za dati zvučnik korigujemo za $20 \log(\cos \theta)$, sl 5.1.

Krivu $L(\theta)$ moguće je predstaviti izrazom:

$$L(\theta) = -d\theta^g \quad (5.3)$$

gde su p i g konstante koje zavise od karakteristika usmerenosti zvučnika.



Sl.5.2 Ugao pokrivanja i zona pokrivanja zvučnika u ravni normalnoj na njegovu osu.

Tabela 1a. Korekcija nivoa u ravni slusanja pod datim uglom u odnosu na nivo po osi zvučnika

**POLAR-TO-LISTENING-PLANE
COVERAGE CONVERSION CHART**

Angle Off-Axis	Δ dB Correction Factor	Angle Off-Axis	Δ dB Correction Factor
5°	-0.0 dB	45°	-3.0 dB
10°	-0.1 dB	50°	-3.8 dB
15°	-0.3 dB	55°	-4.8 dB
20°	-0.5 dB	60°	-6.0 dB
25°	-0.9 dB	65°	-7.5 dB
30°	-1.3 dB	70°	-9.3 dB
35°	-1.7 dB	75°	-11.7 dB
40°	-2.3 dB	80°	-15.2 dB

To find the real 6dB-down point, we apply the correction factors and find that at 60° off axis (120° coverage), the sound is 6 dB down (again, polar dB down plus the additional dB down from the correction factor). Therefore, the real listening-plane coverage of a perfect 180° speaker is only 120°. Now, given the fact that speakers with a "spec" of 180° polar coverage can actually be down as much as 6 dB at the 180° point and still have a spec of 180°, the fact is that virtually all speakers have a real coverage of less than

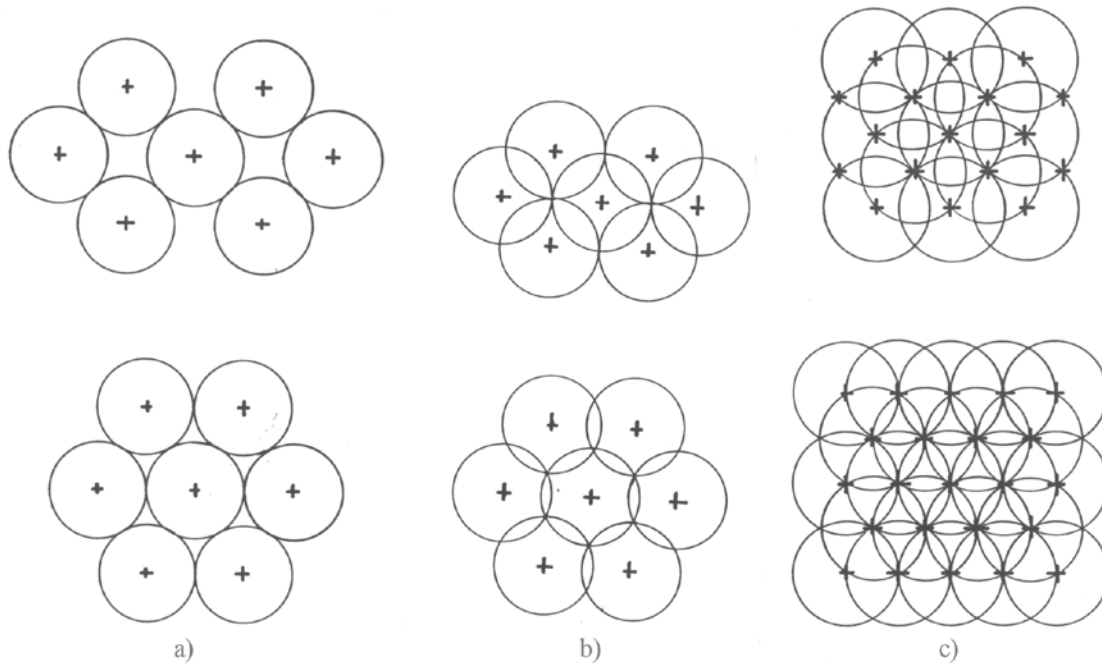
Iz izraza (5.3) ili grafički, sl.5.1, može se odrediti ugao θ pod kojim je nivo pritiska u ravni normalnoj na osu zvučnika manji za 6dB u odnosu na nivo pritiska po osi zvučnika. Ovaj ugao se označava sa $\theta(-6)$ a njegova dvostruka vrednost $\alpha = 2\theta(-6)$, slika 5.2, naziva se uglom pokrivanja zvučnika. Uglu $\theta(-6)$ u ravni normalnoj na osu zvučnika odgovara krug poluprečnika

$$r(-6) = h \tan \theta(-6) = h \tan \frac{\alpha}{2} \tag{5.4}$$

Površinu kruga čiji je poluprečnik $r(-6)$ nazivamo zonom pokrivanja zvučnika u datoj ravni normalnoj na osu zvučnika.

5.2 Raspored zvučnika u tavanici

Da bi uniformno rasporedili zvučnike u tavanici potrebno je odabrati prostu i ponovljivu osnovnu ćeliju. Pri ovakvom rasporedu svaki zvučnik mora biti na jednakim rastojanjima od najbližih zvučnika "suseda". Ovakav zahtev će biti ispunjen ako zvučnike postavimo u centru i temenima pravilnog poligona. Da bi se ovi poligoni mogli slagati i preklapati potrebno je da im se unutrašnji ugao sadrži ceo broj puta u 360° kao i da im se centralni ugao naspram jedne strane sadrži ceo broj puta u unutrašnjem uglu. Ove osobine imaju kvadrat i šestougao (heksagon).



Sl.5.3 Kvadratni i heksagonalni raspored zvučnika sa preklapanjem: a) od ivice do ivice, b) minimalnim, c) od ivice do centra

U praksi se stoga najčešće primenjuju dva načina rasporeda zvučnika: kvadratni i heksagonalni. U oba ova slučaja uobičajena su tri stepena međusobnog preklapanja zona pokrivanja zvučnika. To su: preklapanje od ivice do ivice, minimalno preklapanje i preklapanje od ivice do centra, sl.5.3.

Broj zvučnika N potreban za pokrivanje određene površine A_c dobija se iz odnosa ove površine i pravougaone površine koja pripada samo jednom zvučniku, sl.5.4.

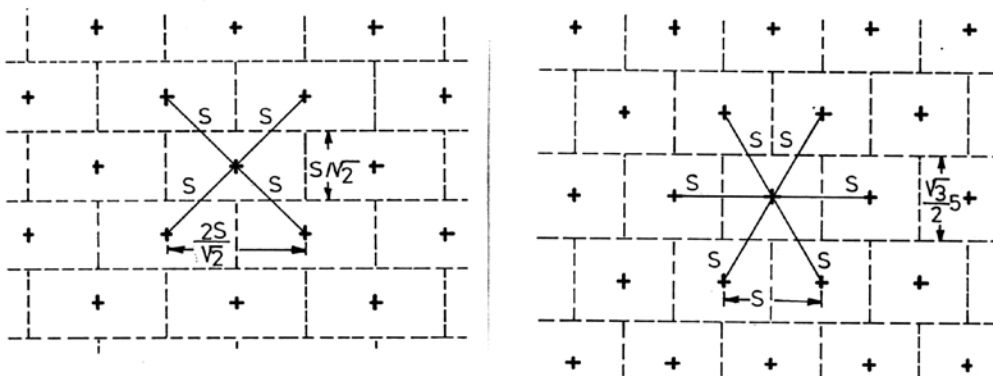
Tako je broj zvučnika za kvadratni N_k i heksagonalni N_h raspored, respektivno:

$$N = N_k = \frac{A_c}{s^2} \tag{5.5}$$

$$N = N_h = \frac{A_c}{\frac{\sqrt{3}}{2}s^2} \tag{5.6}$$

gde je s rastojanje izmedju zvučnika.

Izrazi (5.5) i (5.6) pokazuju da je pri heksagonalnom rasporedu broj zvučnika za oko 15,5% veći nego pri kvadratnom, ukoliko je rastojanje izmedju zvučnika isto. Medjutim, izbor izmedju ove dve šeme rasporedjivanja treba izvršiti tek pošto se razmotri gustina pokrivanja.



Sl.5.4. Odredjivanje broja zvučnika potrebnih za pokrivanje date površine

Gustina pokrivanja σ ili prosečan broj zvučnika na površini zone pokrivanja jednog zvučnika $r^2\pi$ dat je u opštem slučaju, relacijom:

$$\sigma = r^2\pi \frac{N}{A_c} \quad (5.7)$$

Tabela 5.1. Međusobno rastojanje s , ukupan broj zvučnika N i gustina pokrivanja σ za 6 standardnih oblika rasporeda zvučnika (h je rastojanje od zvučnika do nivoa ušiju slušaoca)

RASPORED	PREKLAPANJE	S	N	σ
KVADRATNI	od ivice do ivice	$2h \tan \frac{\alpha}{2}$	$\frac{A_c}{4 [h \tan \frac{\alpha}{2}]^2}$	$0,785 \frac{\pi}{4}$
	minimalno preklapanje	$\sqrt{2} h \tan \frac{\alpha}{2}$	$\frac{A_c}{2 [h \tan \frac{\alpha}{2}]^2}$	$1,571 \frac{\pi}{2}$
	od ivice do centra	$h \tan \frac{\alpha}{2} = r$	$\frac{A_c}{[h \tan \frac{\alpha}{2}]^2}$	$3,142 \pi$
HEKSA-GONALNI	od ivice do ivice	$2h \tan \frac{\alpha}{2}$	$\frac{A_c}{2\sqrt{3} [h \tan \frac{\alpha}{2}]^2}$	0,907
	minimalno preklapanje	$\sqrt{3} h \tan \frac{\alpha}{2}$	$\frac{2A_c}{3\sqrt{3} [h \tan \frac{\alpha}{2}]^2}$	1,209
	od ivice do centra	$h \tan \frac{\alpha}{2} = r$	$\frac{2A_c}{\sqrt{3} [h \tan \frac{\alpha}{2}]^2}$	3,628

gde je N ukupan broj zvučnika (N_k ili N_h) na površini A_c , dok je N/A_c prosečan broj zvučnika na jedinici površine.

U tabeli 5.1 dato je međusobno rastojanje s , ukupan broj zvučnika N i gustina pokrivanja σ za svih 6 prethodno navedenih standardnih oblika rasporeda zvučnika. Ovde je h visina tavanice u odnosu na ravan ušiju slušalaca.

Ako je broj zvučnika N manji od 5 ne može se primeniti ni jedna od napred navedenih ćelija, pa zvučnike treba rasporediti na neki drugi način na jednakim međusobnim rastojanjima.

I kvadratna i heksagonalna ćelija mogu se orjentisati u bilo kojem smeru zavisno od oblika površine koju treba pokriti.

Na sl.5.5 su prikazana dva najčešća načina orjentacije kvadratne ćelije. U prvom slučaju, sl.5.5a, stranice ćelije su paralelne stranicama površine koja se ozvučava dok su u drugom slučaju, sl.5.5b, pod međusobnim uglovima od 45° . Rastojanje izmedju redova zvučnika p je:

$$p = \begin{cases} s, & \text{kada su stranice pod uglom od } 45^\circ \\ \frac{s}{\sqrt{2}}, & \text{kada su stranice paralelne} \end{cases} \quad (5.5)$$

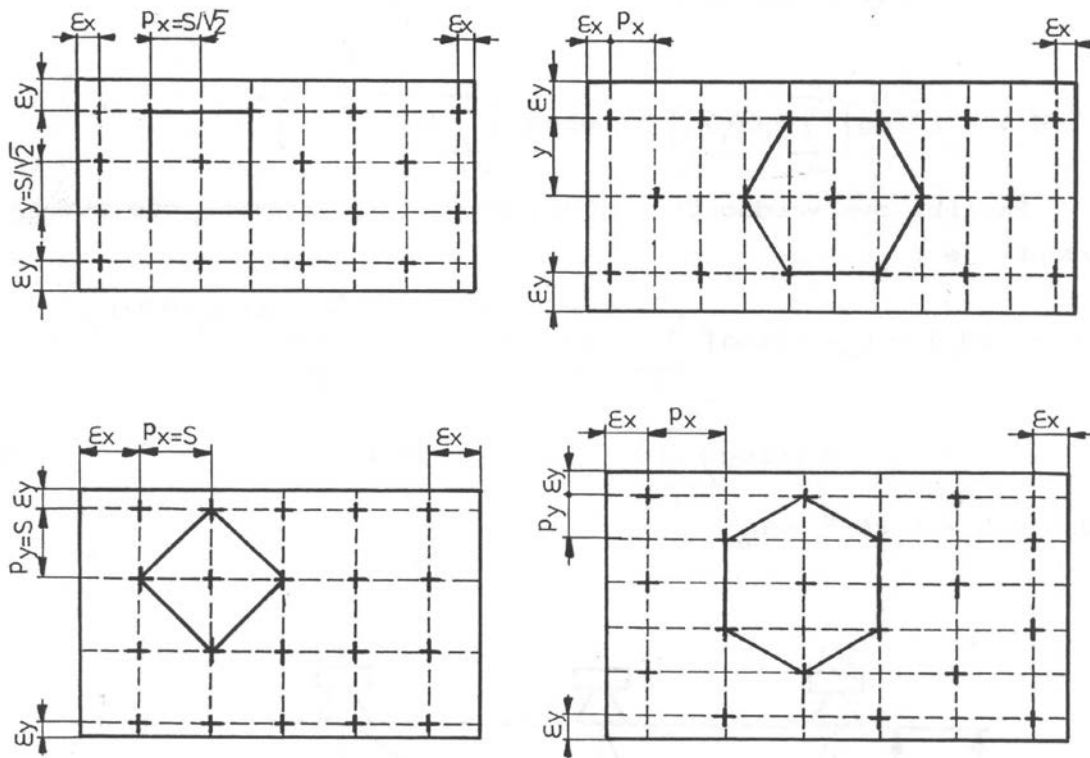
Za heksagonalnu ćeliju ovde ćemo prikazati jedan od mogućih načina orjentacije, sl 5.5c. Rastojanje izmedju redova u pravcu x i y ose ovde je različito i iznosi:

$$p_x = s \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.9)$$

$$p_y = \frac{s}{2} \quad (5.10)$$

Nekada se rastojanje krajnjih redova od ivica površine ozvučavanja ε može poboljšati ako se heksagonalna ćelija zarotira za 90° , sl.5.5d. U ovom slučaju p_x i p_y međusobno menjaju vrednosti date izrazima (5.9) i (5.10).

Pri utvrđivanju konačnog rasporeda zvučnika za bilo koju osnovnu ćeliju treba posebno voditi računa i o rastojanju ε krajnjih redova od ivice površine koju pokrivamo. Treba nastojati da ε uvek bude u granicama $0,3p < \varepsilon \leq 0,5p$. Pri ovom uslovu krajnji redovi neće biti previše blizu niti



Sl.5.5. Mogući načini orijentacije kvadratne (a,b) i heksagonalne (c,d) ćelije u odnosu na ivice površine koja se ozvučava

previše daleko od ivica sektora koji se ozvučava.

Neka je a jedna od dimenzija pravougaonog sektora, a p rastojanje između redova. Tada njihov količnik δ možemo pisati u obliku :

$$\delta = \frac{a}{p} = \delta_1 + \delta_2 \quad (5.11)$$

gde je δ_1 - ceo broj,

δ_2 - broj < 1 .

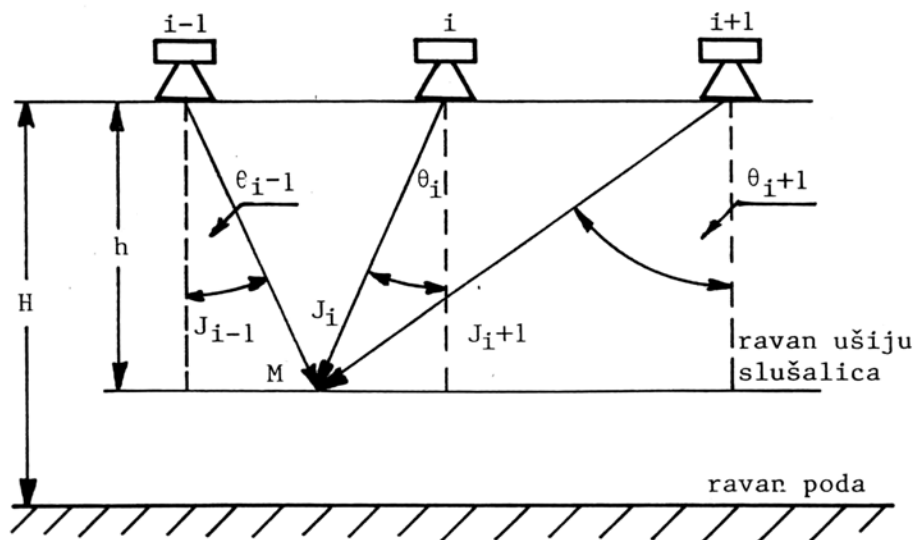
Za različite vrednosti δ broj redova N_r i rastojanje krajnjih redova od ivica sektora ε_r dati su u tabeli 5.2.

Tabela 5.2 Broj redova N_r i rastojanje ε_r krajnjih redova od ivica sektora koji se ozvučava.

δ_1, δ_2	N_t	ϵ_t
$\delta_1 + \delta_2 \leq 1,6$	1	$\frac{a}{2}$
$\delta_2 \leq 0,6$	δ_1	$\frac{1 + \delta_2}{2} p$
$\delta_2 > 0,6$	$\delta_1 + 1$	$\frac{\delta_2}{2} p$

5.3. Uniformnost pokrivanja

Neka je u tavanici ugradjeno N zvučnika i neka je visina tavanice u odnosu na nivo ušiju slušalaca h , sl.5.6. Nivo zvučnog pritiska L u bilo kojoj tački u ravni ušiju određuje se iz zbira intenziteta zvuka svih N zvučnika u toj tački.



Sl.5.6. Nivo pritiska koji stvara N izvora u tački slušanja

Drugim rečima:

$$L(\theta_i) = 10 \log \left(\sum_{i=1}^N J_i(\theta_i) \right) = 10 \log \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_i(\theta_i)}{10}} \right) \quad (5.12)$$

Razlika ove vrednosti i nivoa zvuka koji u smeru ose stvara jedan zvučnik je:

$$L = L(\theta_i) - L_o = 10 \log \left(\sum_{i=1}^N \frac{J_i(\theta_i)}{J_o} \right) = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{0,1[L_i(\theta_i) - L_o]} = 10 \log \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_i} \quad (5.13)$$

gde je $L_i = L_i(\theta_i) - L_o$.

U [6] je pokazano da L zavisi od položaja tačke u kojoj se nalazi slušalac kao i od gustine zvučnika u tavanici.

Vrednosti za L za šest standardnih oblika rasporeda, za tipičan zvučnik date su u tabeli 5.3 [6]. Ovi podaci predstavljaju srednje vrednosti za pet tipova zvučnika u dva različita frekvencijska opsega (trećine oktava na 2kHz i na 4kHz). Pojedinačne vrednosti za pojedine zvučnike, u trećinama

oktava na 2kHz i na 4kHz, date su u Prilogu III (tabele III.1 do III.5). Kao što se iz navedenih tabela vidi, ovde L predstavlja tri skupa vrednosti: maksimalne (L_{max}), minimalne (L_{min}) i razliku ove dve vrednosti ($\Delta L = L_{max} - L_{min}$).

U opštem slučaju, L se može približno aproksimirati izrazom [6]:

$$L = a + b \ln \sigma \quad (\text{dB}) \quad (5.14)$$

gde je, kao što smo već rekli, $L = (L_{min}, L_{max}, \Delta L)$ i gde su a i b konstante. Za tipičan zvučnik je:

$$L_{max} = -0,085 + 3,22 \ln \sigma \quad (\text{dB}) \quad (5.15)$$

$$L_{min} = -2,530 + 5,27 \ln \sigma \quad (\text{dB}) \quad (5.16)$$

i

$$\Delta L = L_{max} - L_{min} = 2,44 - 2,05 \ln \sigma \quad (\text{dB}) \quad (5.17)$$

Krive date jednačinama (5.15) do (5.17) prikazane su grafički na slici 5.7. Na istim graficima su označene i diskretne vrednosti za L date u tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Vrednosti L_{max} , L_{min} i ΔL za tipičan zvučnik.

KARAKTERISTIKA	PREKLAPANJE	σ	L_{max} [dB]	L_{min} [dB]	ΔL [dB]
kvadratna	od ivice do ivice	0,785	0,05	-6,66	6,71
heksagonalna	od ivice do ivice	0,907	0,07	-3,43	3,5
heksagonalna	minimalno preklapanje	1,209	0,89	-1,18	1,47
kvadratna	minimalno preklapanje	1,571	0,89	0,04	0,85
kvadratna	od ivice do centra	3,142	3,65	3,49	0,16
heksagonalna	od ivice do centra	3,628	4,25	4,14	0,11

Sa slike 5.7 se vidi da je u praksi moguće primeniti i druge gustine pokrivanja σ različite od diskretnih vrednosti datih u tabeli 5.3.

Iz izraza (5.19) se dobija da je gustina pokrivanja :

$$\sigma = e^{(L-a)/b} \quad (5.15)$$

a iz izraza (5.5), (5.7) da je rastojanje izmedju zvučnika za kvadratnu ćeliju:

Tabela 5.3a. Vrednosti L_{max} i ΔL prema JBL „Designing better Sounding in Ceiling Busines Music Systems”

Raspored	Preklapanje	L_{max} (dB)	ΔL (dB)
Kvadratni raspored	Od ivice do centra (puno preklapanje)	+5,2	1,4
	Minimalno preklapanje	+2,0	2,0
	Od ivice do ivice	+0,7	4,4
	1,4 od ivice do ivice	+0,4	6,8
	2,0 od ivice do ivice	+0,2	10,4
Hekagonalni raspored	Od ivice do centra (puno preklapanje)	+5,4	1,2
	Minimalno preklapanje	+1,4	2,6
	Od ivice do ivice	+1,0	5,4
	1,4 od ivice do ivice	+0,5	10,2
	2,0 od ivice do ivice	+0,3	17,3

$$s = r \sqrt{\frac{\pi}{\sigma}} \quad (5.19)$$

Zamenom (5.15) u (5.19) dobijamo:

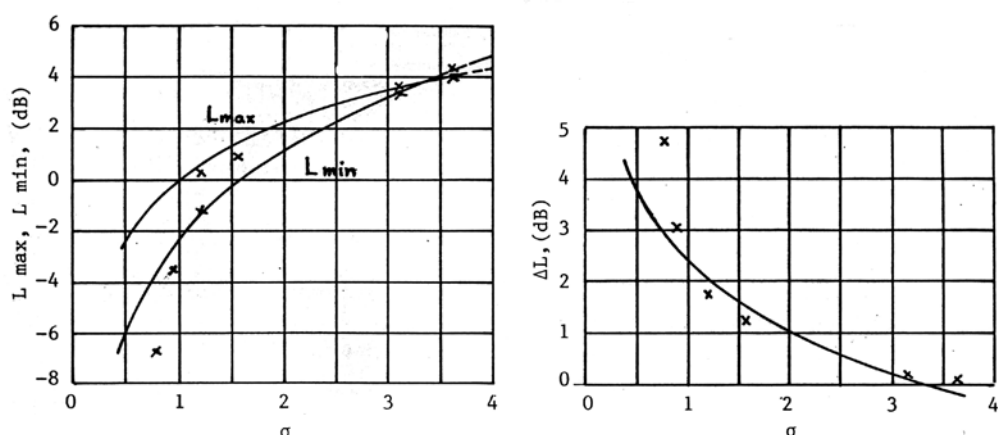
$$s = r \sqrt{\pi e^{-(L-a)/b}} \quad (5.20)$$

odakle je dalje:

$$\frac{s}{h} = c e^{-L/2b} \quad (5.21)$$

Za heksagonalnu ćeliju se, s obzirom na izraze (5.6), (5.7) i (5.15) dobija:

$$\frac{s}{h} = 1,075 c e^{-L/2b} \quad (5.22)$$



Sl.5.7. Vrednosti L u funkciji σ za tipičan zvučnik, prema izrazima (5.13) do (5.15) (grafici) i tabeli 5.3 (označene zvezdicama).

Vrednosti parametara a , b i c za tipičan zvučnik date su u tabeli 5.4. Vrednosti ovih parametara za pojedine zvučnike za trećine oktave sa centralnim frekvencijama na 2kHz i na 4kHz date su u prilogu IV (tabelle IV.1 do IV.3).

Tabela 5.4. Vrednosti parametara a, b i c za tipičan zvučnik [6].

L	a	b	c	$2b$
L_{max}	-0,085	3,22	1,43	6,44
L_{min}	-2,53	5,27	1,14	10,54
$\Delta L = L_{max} - L_{min}$	2,44	-2,05	0,98	-4,10

Prilikom proračuna sistema došaptavanja prvo treba odabrati željenu vrednost za uniformnost pokrivanja ΔL ili pak vrednost L_{max} odnosno L_{min} .

Za ove veličine mogu se uzeti vrednosti iz tabelle 5.3 u kom slučaju se ograničavamo na jedan od šest standardnih oblika rasporeda zvučnika. Rastojanje između zvučnika s i potreban broj zvučnika N tada određujemo direktno iz tabelle 5.1.

Ukoliko nas ne zadovoljavaju vrednosti za $L = (L_{\min}, L_{\max}, \Delta L)$ date u tabeli 5.3, tada po izboru željene vrednosti, nalazimo iz jednačina (5.26) i (5.27) rastojanje izmedju zvučnika. Iz jednačina (5.5) i (5.6) zatim nalazimo potreban broj zvučnika N za pokrivanje date površine A_c . Rezultati će biti tačniji ako se za dati zvučnik imaju stvarni podaci za L , a , b i c u oktavama sa centralnim frekvencijama na 2kHz i 4kHz za koje se najčešće i vrše proračuni. Ukoliko te podatke nemamo, možemo iskoristiti tabele za različite tipične zvučnike, date u priložima I do IV [6], ili pak tabele 5.3 i 5.4 sa srednjim vrednostima za tipičan zvučnik.

Rastojanje p izmedju redova i rastojanje ε od krajnjih redova do ivice zone koja se ozvučava određuje se prema postupku datom u glavi 5.2.

5.4 Efektivni Q faktor zvučnika u sistemu došaptavanja

Za jedan zvučnik ugrađen u tavanicu Q faktor pod uglom θ_i iznosi:

$$Q(\theta_i) = \frac{4\pi J(\theta_i) D_x^2}{P_a} \quad (5.23)$$

Kada imamo N identičnih zvučnika u tavanici tada je ukupni intenzitet zvuka u tački slušanja:

$$J(\theta_i) = J_o \sum_{i=1}^N \frac{J_i(\theta_i)}{J_o} \quad (5.24)$$

a ukupna akustička snaga:

$$P_{at} = \sum_{i=1}^N P_{ai} = NP_a \quad (5.25)$$

Efektivni Q faktor jednog zvučnika u sistemu od N identičnih zvučnika ugrađenih u tavanicu je, prema (5.23), (5.24) i (5.25):

$$Q_{eff}(\theta_i) = \frac{4\pi J(\theta_i) D_x^2}{\sum P_{ai}} = \frac{4\pi D_x^2 J_o}{NP_a} \sum_{i=1}^N \frac{J_i(\theta_i)}{J_o} \quad (5.26)$$

S obzirom na izraz (5.13), konačno je:

$$Q_{eff}(\theta_i) = \frac{4\pi D_x^2 J_o}{NP_a} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_i} = \frac{Q_0}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_i} \quad (5.27)$$

Vrednost zbira u izrazu (5.27) varira od minimalne do maksimalne zavisno od tačke u kojoj se nalazi slušalac. Tako i za Q_{eff} imamo granične vrednosti:

$$Q_{eff \max} = \frac{Q_0}{N} 10^{0,1L_{\max}} \quad (5.28)$$

$$Q_{eff \min} = \frac{Q_0}{N} 10^{0,1L_{\min}} \quad (5.29)$$

gde su L_{\max} , L_{\min} funkcije definisane jednačinama (5.15) i (5.16), a Q_0 faktor usmerenosti jednog zvučnika u smeru ose.

5.5 Kritično rastojanje

Kada imamo N identičnih izbora u prostroji, kritično rastojanje jednog izbora će se promeniti zbog uticaja ostalih $(N-1)$ izbora. Efektna vrednost kritičnog rastojanja je tada:

$$D_{c(eff)} = 0,057 \sqrt{Q_{eff} \frac{V}{T}} \quad (5.30)$$

gde je Q_{eff} efektivna vrednost Q faktora jednog izvora u grupi data jednačinom (5.27).

5.6 Razumljivost govora

Predikcija razumljivosti u sektorskim sistemima ozvučavanja sa N identičnih izvora može se izraziti jednačinom (6.1) ako se Q faktor izvora zameni vrednostima datim izrazima (5.25) i (5.29):

$$AL_{\text{cons}}(\text{min}) = \frac{200h^2T^2N}{VQ_o10^{0,1L_{\text{max}}}}, [\%] \quad (5.31)$$

$$AL_{\text{cons}}(\text{max}) = \frac{200h^2T^2N}{VQ_o10^{0,1L_{\text{min}}}}, [\%] \quad (5.32)$$

gde je: h - visina tavanice u odnosu na nivo ušiju slušalaca

T - vreme reverberacije prostorije

N - ukupan broj zvučnih izvora u prostoriji

Q_o - Q faktor izvora u pravcu ose

$L_{\text{max}}, L_{\text{min}}$ - relativni maksimalni i minimalni nivoi zvučnog pritiska dati jednačinama (5.15) i (5.16).

Kada je $D_x > D_L$ ($D_L = 3,16D_C$), AL_{cons} se računa po obrascu (6.2), pa je minimalna vrednost AL_{cons} , data manjim

od izraza (6.2) i (5.31), a maksimalna vrednost većim od izraza (6.2) i (5.32).

5.7 Sistem došaptavanja u prostorijama sa kosim podom i/ili plafonom

Prostoriju sa kosim podom i/ili plafonom možemo predstaviti modelom prikazanim na sl.5.8. Plafon predstavlja ravan xOy a pod ravan b koje međusovno zaklapaju ugao α .

Ono što nas ovde interesuje je raspodela nivoa zvučnog pritiska koji stvara zvučnik u ravni b ako je ugrađen u ravni xOy .

Neka se zvučnik nalazi u koordinatnom početku O na sl.5.5 okrenut prema dole, tako da mu se osa poklapa sa z -osom koordinatnog sistema xyz . Paralelno sa ravni plafona (xOy) na rastojanju h nalazi se ravan a koja je prema ravni poda (ravan b) nagnuta pod uglom α . Tačka B (x, y, h) pripada ravni a normalnoj na osu zvučnika. Tačka P (x, y, z) nalazi se u ravni poda (ravan b).

Prema oznakama na sl.5.8 koordinate tačke P su:

$$x = r \cdot \sin \alpha \quad (5.33)$$

$$y = r \cdot \cos \alpha \quad (5.34)$$

$$z = h + y \cdot \tan \alpha \quad (5.35)$$

$$\text{gde je: } r = z \cdot \tan \theta \quad (5.36)$$

Iz jednačina (5.35) i (5.36) se dobija:

$$\frac{r}{h} = (\text{ctg} \theta - \cos \varphi \cdot \tan \alpha)^{-1} \quad (5.37)$$

$$OP = \frac{r}{\sin \theta} \quad (5.35)$$

$$OB = \frac{h}{\cos \theta} \quad (5.39)$$

Iz (5.35) i (5.39) je sada :

$$\frac{OP}{OB} = \frac{r \cdot \text{ctg} \theta}{h} \quad (5.40)$$

dok se iz (5.37) i (5.40) dobija:

$$\frac{OB}{OP} = 1 - \tan \theta \cdot \cos \varphi \cdot \tan \alpha \quad (5.41)$$

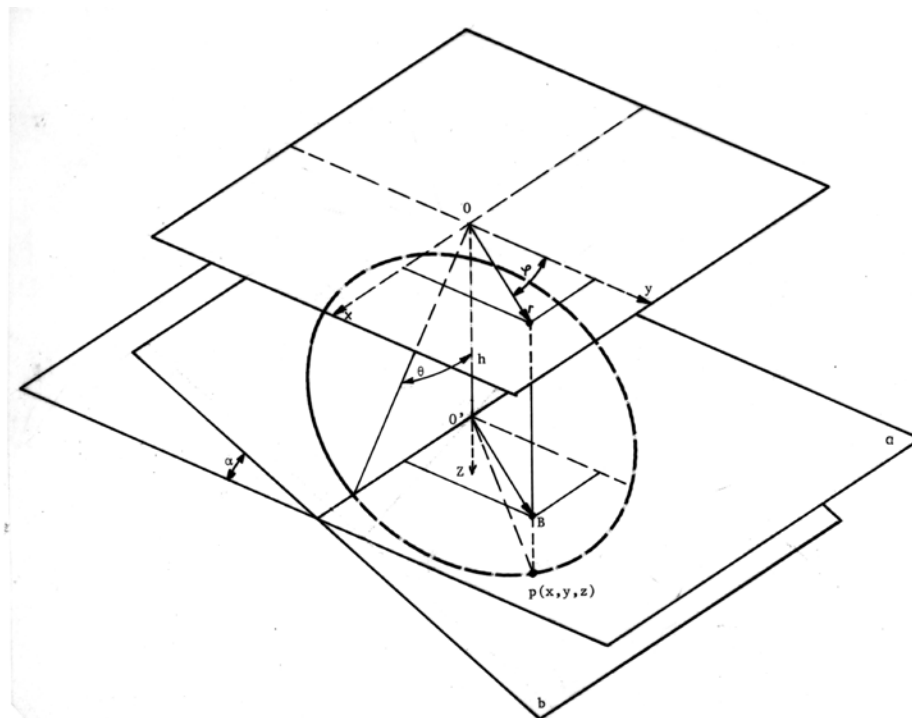
Razlika nivoa zvučnih pritisaka u tačkama P i B je :

$$SPL(P) - SPL(B) = 20 \log \left(\frac{OB}{OP} \right) \quad (5.42)$$

Kako je prema (5.3):

$SPL(B) = -d\theta^8$ (dB), to je:

$$SPL(P) = 20 \log(1 - \tan \theta \cdot \cos \varphi \cdot \tan \alpha) - d\theta^8 \quad (5.43)$$



Sl.5.8. Geometrijske veze u prostoru sa kosim podom i/ili plafonom

Iz jednačine (5.43) moguće je odrediti relativni nivo zvučnog pritiska u odnosu na vrednost koju imamo po osi zvučnika ($SPL(0^\circ)$) za bilo koju tačku u kosoj ravni. Za različite uglove α raspodela nivoa zvučnog pritiska neće biti simetrična oko tačke O' , slika 5.9. Maksimalna vrednost nivoa zvučnog pritiska je pomešana uz strmu ravan u odnosu na tačku O' za ugao γ [5]. Vrlo približno ugao γ se može predstaviti izrazom:

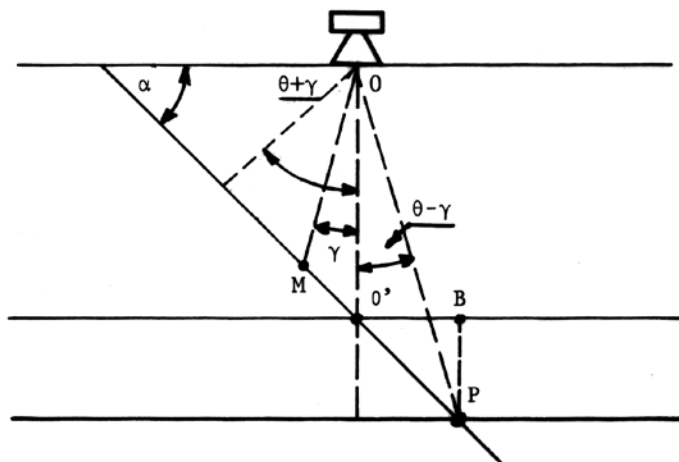
$$\gamma = u\alpha^q \quad (5.44)$$

gde u i q zavise od tipa zvučnika koji se koristi, tabela 5.5.

Tabela 5.5 Vrednosti konstanti u i q za tipične zvučnike

ZVUČNIK	2kHz		4kHz	
	u	q	u	q
5"	0.39	1.27	0.21	1.17
8"	0.41	1.02	0.054	1.21
8"(coax)	0.33	1.03	0.19	1.16
12"(coax)	0.47	1.01	0.11	1.28
16"(coax)	0.52	1.06	0.24	1.09

Konture konstantnog nivoa zvučnog pritiska u kosoj ravni su približno koncentrični krugovi sa centrom u tački maksimalnog pritiska (tačka definisana uglom γ na preseku ravni b i ravni $x = 0$).



Sl.5.9. Ugao pokrivanja i zona pokrivanja zvučnika u prostoriji sa kosim podom i/ili plafonom

Raspored zvučnika u tavanici kod prostorija sa kosim podom i/ili plafonom određuje se na dva načina [5] zavisno od zadatih početnih uslova . U jednom slučaju kao početni uslov uzima se uniformnost pokrivanja ΔL (razlika maksimalnog i minimalnog nivoa direktnog zvuka u ravni glava slušalaca, dok se u drugom slučaju uzima konstantna gustina zvučnika po jedinici površine plafona.

U daljem tekstu će biti detaljnije objašnjena oba pomenuta načina.

5.7.1 Konstantna uniformnost pokrivanja u ravni slušanja

Kako smo prethodno videli, određenoj uniformnosti pokrivanja $\Delta L = L_{\max} - L_{\min}$ u ravni slušanja odgovara određeno rastojanje izmedju zvučnika s , odnosno polu-ugao pokrivanja:

$$\theta = \arctan \frac{s}{h} = \arctan \frac{c}{2} e^{-L/2b} \quad (5.45)$$

gde au sve veličine prethodno definisane.

Prostoriju sa kosim podom i plafonom u vertikalnom preseku možemo predstaviti kao na slici 5.10. Pod je nagnut prema horizontali pod uglom α , a plafon pod uglom β , a visina zadnjeg dela prostorije do ravni slušanja (visina ušiju slušalaca) je h_r . Horizontalni presek prostorije dat je na sl.5.11 gde su širine zadnjeg i prednjeg dela w_r i w_f , respektivno.

Položaji zvučnika u plafonu označeni su na sl.5.10 tačkama Z_1, \dots, Z_n . Normale u ovim tačkama prolaze kroz ravan ušiju slušalaca u tačkama O_1, \dots, O_n , a njihove dužine su h_1, \dots, h_n .

Osa maksimalnog nivoa zvuka za jedan zvučnik u ravni slušanja zaklapa sa geometrijskom osom zvučnika ugao γ . Ovaj ugao je kako smo prethodno rekli definisan izrazom:

$$\gamma = u(\alpha - \beta)^q \quad (5.46)$$

gde je $(\alpha - \beta)$ ugao izmedju ravni poda i plafona, odnosno izmedju ravni slušanja i plafona, što je isto.

Rastojanja izmedju redova zvučnika su označena sa: p_1, \dots, p_n , a rastojanja zvučnika od zadnje ivice plafona su: a_1, \dots, a_n . Normala od zadnje ivice ravni slušnja na plafon ima dužinu h_0 , a prolazi kroz

plafon na rastojanju p_0 od njegove zadnje ivice. Ukupna dužina prostorije pokrivena zvučnim izvorima je l_c , a pokrivena slušaocima je l_s .

Za odabranu uniformnost pokrivanja ΔL dredjujemo, iz izraza (5.45) polu-ugao pokrivanja θ a iz izraza (5.46) ugao γ .

Iz geometrijskih odnosa sa sl.5.10 se dalje dobija:

$$p_0 = h_r \sin \beta \quad (5.47)$$

$$h_0 = h_r \cos \beta \quad (5.45)$$

$$p_1 = h_0 \tan(\theta + \gamma) \quad (5.49)$$

$$h_n = h_0 + \tan(\alpha - \beta) \sum_{i=1}^n p_i = h_{n-1} + p_n \tan(\alpha - \beta) \quad (5.50)$$

$$p_n = h_{n-1} \frac{\cos(\alpha - \beta) \sin 2\theta}{\cos \eta \cdot \cos(\theta + \gamma)} = h_{n-1} F, n > 1 \quad (5.51)$$

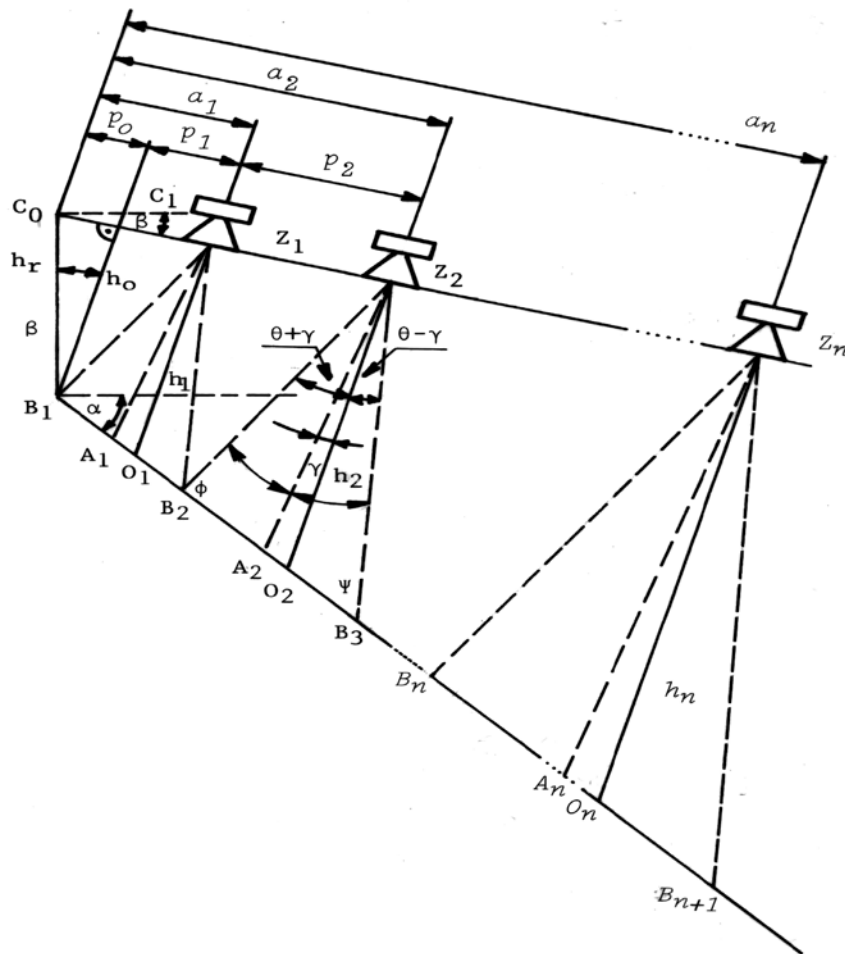
$$a_n = \sum_{i=0}^n p_i \quad (5.52)$$

gde je:

$$F = \frac{\cos(\alpha - \beta) \cdot \sin 2\theta}{\cos \eta \cdot \cos(\theta + \gamma)} \quad (5.53)$$

i

$$\eta = 90^\circ - \psi = \theta + \alpha - \beta - \gamma \quad (5.54)$$



Slika 5.10. Vertikalni presek prostorije

Sa sl.5.10 se takodje vidi da je ukupna dužina pokrivena zvučnim izvorima (na nivou ušiju slušalaca):

$$l_c = \frac{D_n - d_0}{\cos(\alpha - \beta)} + \Delta \quad (5.55)$$

gde je:

$$\Delta = h \frac{\sin(\theta - \gamma)}{\cos \eta} = \overline{O_n B_{n+1}} \quad (5.56)$$

poluprečnik zone pokrivanja n-tog reda zvučnika.

Ukupna dužina koju pokrivaju slušaoci je l_s . Broj redova n odredjujemo iz uslova:

$$l_c + \Delta > l_s \quad (5.57)$$

što znači da je $|l_s - l_c| < \Delta$ odnosno da je razlika ovih dužina manja od poluprečnika zone pokrivanja n -tog reda zvučnika.

Ako projektant nadje za shodno može tačku O_n pomeriti uz ili niz strmu ravan (zavisno od znaka $l_s - l_c$ za $0,5(l_s - l_c)$ tako da na obe strane ostanu delovi razlike dužina l_s i l_c koji su manji od polovine odgovarajućih poluprečnika zona pokrivanja. Sada je:

$$a_i = a_1 - \frac{h_1}{h_n} \cdot \frac{(l_s - l_c) \cdot \cos(\alpha - \beta)}{2} \quad (5.58)$$

$$p_i = p_1 + \frac{h_1}{h_n} \cdot \frac{(l_s - l_c) \cdot \cos(\alpha - \beta)}{2} \quad (5.59)$$

Ostala rastojanja izmedju redova sada se odredjuju korišćenjem izraza (5.50) i (5.51) uz početne uslove date jednačinama (5.55) i (5.59).

Medjusobno rastojanje izmedju zvučnika u i -tom redu s_i nalazi se prema izrazu (5.21) samo što je ovde umesto visine h visina h_i , tj.:

$$s_i = h_i c e^{-L/2b} \quad (5.60)$$

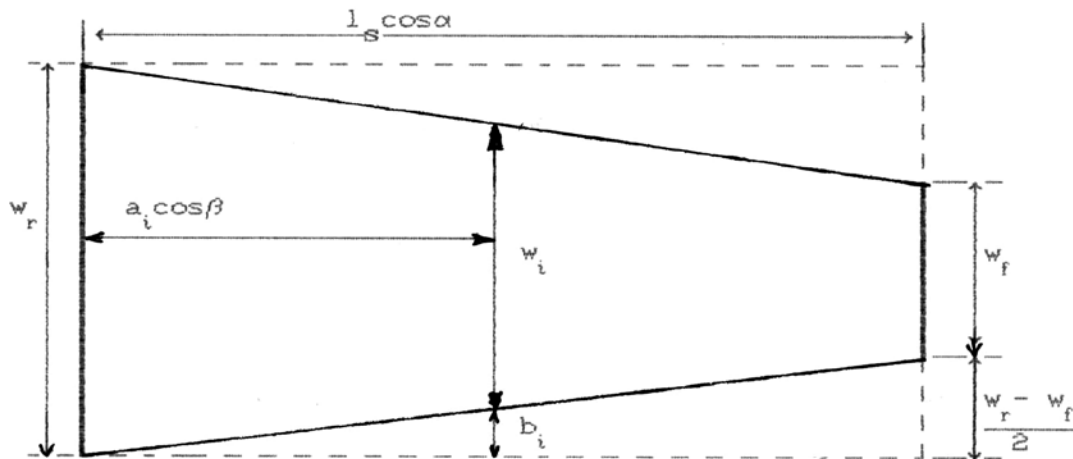
Širina plafona na poziciji i - tog reda, sl 5.11, je:

$$w_i = w_r - 2b_i = w_r - \frac{a_i (w_r - w_f) \cdot \cos \beta}{l_s \cdot \cos \alpha} \quad (5.61)$$

gde su w_r i w_f širine zadnjeg i prednjeg dela prostorije.

Sada je broj zvučnika n_i u i -tom redu:

$$n_i = \text{celobrojnavrednost} \left(\frac{w_i}{s_i} - 0,5 \right) \quad (5.62)$$



Slika 5.11. Horizontalni presek prostorije

Rastojanje od zidova do prvih zvučnika na obe strane reda je:

$$\varepsilon_i = \frac{w_i - s_i(n_i - 1)}{2} \quad (5.63)$$

Ukupan broj zvučnika N_t je:

$$N_t = \sum_{i=1}^m n_i \quad (5.64)$$

gde je m ukupan broj redova.

Ako želimo da u ravni slušanja obezbedimo isti nivo direktnog zvuka onda je snaga potrebna za napajanje jednog zvučnika u i -tom redu za iznos:

$$20 \log \frac{h_i}{h_1} \text{ dB} \quad (5.65)$$

veća od snage za napajanje jednog zvučnika u prvom redu. Drugim rečima potrebna električna snaga za jedan zvučnik u i -tom redu P_{E_i} iznosi:

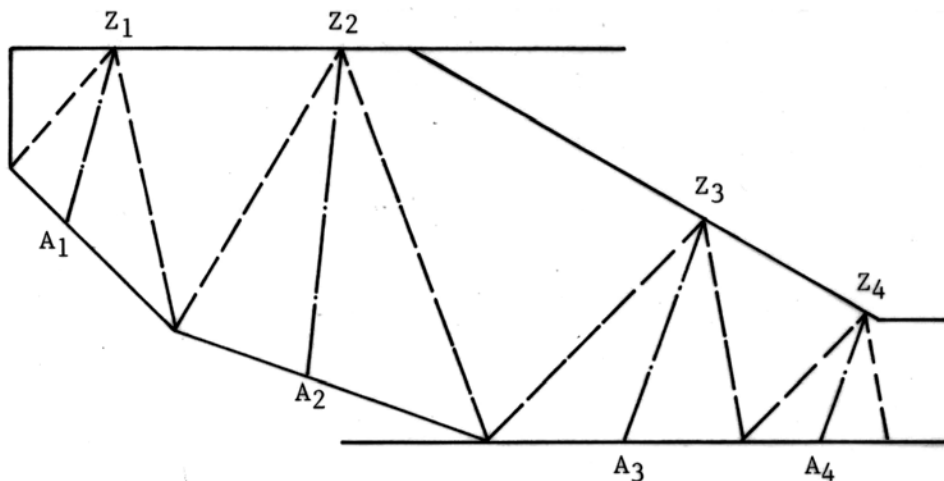
$$P_{E_i} = P_{E_1} \cdot 10^{20 \log(h_i / h_1)}$$

gde je P_{E_1} snaga potrebna za napajanje jednog zvučnika u prvom redu koja se izračunava po obrascu (7.15), gde je rastojanje od zvučnika do slušaoca h_1 .

5.7.2 Konstantna gustina zvučnika po jedinici površine plafona

Kod prostorija sa paralelnim podom i plafonom intenzitet direktnog zvuka u smeru ose jednog zvučnika opada sa kvadratom rastojanja između zvučnika i ravni slušanja. Ako držimo konstantno rastojanje između zvučnika u plafonu gustina pokrivanja u ravni slušanja će se povećavati sa kvadratom rastojanja između plafona i ove ravni. Stoga je ukupni zvučni pritisak u ravni slušanja približno konstantan.

Ako ovu logiku primenimo na prostorije sa kosim podom i plafonom imaćemo da pri pravilnom rasporedu zvučnika u plafonu, na jednakim međusobnim rastojanjima i sa istom električnom snagom na svakom zvučniku intenzitet zvuka u ravni slušanja bude približno konstantan. Pri tome pod i plafon ne moraju biti ravne površine konstantnog nagiba već se mogu sastojati iz više ravnih segmenata kako je prikazano na sl.5.12.



Slika 5.12 Prostorija sa kosim podom i plafonom sastavljena iz više sekcija

Postupak proračuna međusobnog rastojanja položaja zvučnika i potrebne električne snage isti je kao kod prostorija sa paralelnim podom i plafonom sa rastojanjem između plafona i ravni slušanja jednakim minimalnoj vrednosti za datu prostoriju.

Redovi kao i zvučnici u jednom redu mogu se translirati prema jednoj od strana prostorije, slično kako je prethodno opisano, s namerom da se poboljša pokrivanje uz ivice površine slušanja.

Prednosti ove metode su prost proračun i ista električna snaga za svaki zvučnik. Za mesta sa najvećom visinom plafona potrebni su zvučnici manje snage. Uniformnost pokrivanja je najlošija na mestu najmanjeg rastojanja između plafona i ravni slušanja i jednaka je zadatoj vrednosti. Na svim ostalim mestima bolja je od ove vrednosti.

Loša strana ovog metoda je ta što on zahteva veći broj zvučnika istog tipa nego što je potrebno kod metoda sa konstantnim pokrivanjem.

5.7.3 Gubitak razumljivosti suglasnika

Da bi odredili gubitak razumljivosti suglasnika AL moramo znati L_{\min} i L_{\max} . Pošto se prilikom proračuna kao početni podatak uzima jedan od ova dva parametra ili pak parametar ΔL , ostali se mogu odrediti korišćenjem izraza (5.15) do (5.17) ili izraza (5.14) i odgovarajućih tabela sa koeficijentima a i b za dati zvučnik.

Kod sistema projektovanih po metodu konstantnog pokrivanja izrazi (5.31) i (5.32) se mogu prikazati u sledećoj formi:

$$AL_{\text{cons}}(\text{min}) = \frac{200 \cdot V \cdot T^2 \cdot N_t}{S_c^2 \cdot Q_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{\min}}} \% \quad (5.66)$$

$$AL_{\text{cons}}(\text{max}) = \frac{200 \cdot V \cdot T^2 \cdot N_t}{S_c^2 \cdot Q_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{\max}}} \% \quad (5.67)$$

gde je : V - zapremina prostorije, T - vreme reverberacije prostorije, N_t - ukupan broj zvučnika, Q_0 - Q faktor jednog zvučnika u smeru ose i S_c - površina poda ili plafona prostorije projektovana na horizontalnu ravan.

Granična vrednost AL_{cons} data je i ovde izrazom (6.2).

Kod sistema projektovanih po metodu konstantne gustine zvučnika za određivanje gubitka razumljivosti AL koriste se jednačine (6.4), (5.31) i (5.32), s tim, što treba uzeti minimalnu

vrednost rastojanja h_r između plafona i ravni slušanja. Isto se odnosi i na prostorije složenijeg tipa kakva je recimo ona na sl.5.12.

LITERATURA

1. Cable, C. R., "The Qualification of Loudspeaker Directivity Factor in Sound Reinforcement System Design", *J. Audio Eng. Soc.*, vol 23, No 6, pp 434-441, July-August 1975.
2. Сапожков, М.А., *Збукофікація помещеній - проєктированије и расчјот*, Москва, СВјаз, 1979.
3. Ahnert, W., Reichardt, W., *Grundlagen der Beschallungstechnik*, Verlag Technik, Berlin 1951.
4. *Design Layout of Distributed Sound Systems*, Altec Training Manual, 1951.
5. Sinclair, R., "Distributed Sound Systems for Sloped Floors and Ceilings", *72nd AES Convention*, Preprint 1952, October 1952.
6. Sinclair, R., "The Design of Distributed Sound System from Uniformity of Coverage and Other Sound-Field Consideration", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol 30, No 12, pp 571-551, December 1952.
7. *Design of Distributed Sound Systems for Rooms with Inclined Floors and Ceilings*, Altec Training Manuals, 1952.
5. *Sound System Design Reference Manual*, JBL, 1952.
9. Sinclair, R., "Articulation Loss of Consonants for Distributed Sound Systems", *ALtec Technical Letter* No 266.
10. Sinclair, R., Uzzle, T., "Axes Performance of Multiple Loudspeakers", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 31, No 5, pp 305-319, May 1953.
11. AES Recommended Practice for Specification of Component Used in Professional Audio and Sound Reinforcement, (ANSI S4. 26-1954) *J. Audio Eng. Soc.*, No 2, February 1954.
12. Davis, D., Davis, C., *Sound System Engineering*, Howard W. Sams, Indianapolis, 1957.
13. Gerzon, M. A., "Calculating the Directivity Factor γ of Transducers from Limited Polar Diagram Information", *Audio Eng. Soc.*, No 6, June 1975.
14. Peutz, W. M. A., "Articulation Loss of Consonants as a Criterion for Speech Transmission in a Room", *Audio Eng. Soc.*, No 6, June 1975.
15. Kurtović, Š. H., *Osnovi tehničke akustike*, Naučna knjiga, Beograd 1977.
16. Electro-voice, USA, Prospekti za zvučnike.
17. JBL, USA, Prospekti za zvučnike.
15. Altec, USA, Prospekti za zvučnike.

Rasporedjivanje zvučnika

Postoji više načina za rasporedjivanje zvučnika u plafonu i svaki od njih ina različitu gustinu zvučnika po jedinici površine poda ili plafona. Način rasporeda i gustina zvučnika utiču na:

Ravnomernost pokrivanja,
Nivo zvuka koji sistem može da obezbedi,
Razumljivost,
Potrebnu električnu snagu
Cenu.

Generalno uzevši treba primenjivati kada je god to moguće kvadratni raspored zvučnika. Kad se uzmu u obzir sve mane i prednosti jednog i drugog rasporeda a naročito ravnomernost pokrivanja, potreban broj zvučnika i složenost izvođenja u praksi prednosti su na strani kvadratnog rasporeda.

U primeni su tri stepena gustine kod rasporedjivanja zvučnika. U opštem slučaju pri većoj gustini zvučnika imamo veći i ravnomerniji nivo zvuka kao i bolji odnos signal/šum na poziciji ušiju slušalaca. Međutim, često cena može biti odlučujuća u izboru stepena gustine.

Kod povećane gustine nivo zvuka je veći jer više zvučnika jednovremeno pokriva istu površinu. To povećanje nije tako veliko s obzirom da signali od pojedinih zvučnika zbog različitih puteva koje su prešli pre dolaska u istu tačku nisu koherentni tabela ... U istoj tabeli su date i varijacije nivoa zvučnog pritiska na visini ušiju slušalaca zavisno od gustine i oblika rasporeda zvučnika.

Kao određeni putokaz treba imati na umu da je u relativno prigušenoj prostoriji sa malim nivoom buke i malim potrebnim nivoom zvuka dovoljna je gustina od ivice do ivice. U prostoriji sa dosta reflektujućih površina, sa velikim nivoom buke i potrebnim nivoom zvuka za reprodukciju poziva ili pojačanje živog zvuka potrebno je minimalno ili preklapanje od centra do centra. Najveći stepen preklapanja je svakao potreban kada je u pitanju kvalitetan sistem za pojačanje živog zvuka.

Varijacije u nivou signala su prihvatljivije tamo gde se slušaoci kreću, kao što je recimo situacija na aerodromu, nego tamo gde miruju, odnosno sede, kao u nekom restoranu.

U prostorijama sa visokim plafonom treba birati usmerenije zvučnike, sa manjim uglom pokrivanja. Oni će obezbediti veći nivo zvuka u smeru ose a time i veći nivo direktnog zvuka na mestu slišalaca. To će doprineti boljoj razumljivosti govora i manjoj interferenciji muzičkog signala usled uticaja reverberantnog zvuka. Ukoliko se uz visoki plafon radi i o velikoj prostoriji može doći do ozbiljnih problema sa razumljivošću govora.