

Uklon ultrazvočnega valovanja[1]

Uvod v valovanje

Valovanje je širjenje motnje skozi snov ali prostor. Poznamo dve vrsti valovanj, in sicer longitudinalno (primer je valovanje zraka, ki ga slišimo kot zvok, valovanje na vzmeti ...) in transverzalno valovanje (valovanje na struni, elektromagnetno valovanje...)[2]. Pri longitudinalnem valovanju se delčki snovi odklanjajo od ravnovesne lege vzdolžno v smeri širjenja motnje. Pri transverzalnem valovanju pa delčki nihajo prečno oziroma pravokotno na smer širjenja motnje. Valovanje ne prenaša samo motnje, ampak tudi energijo.

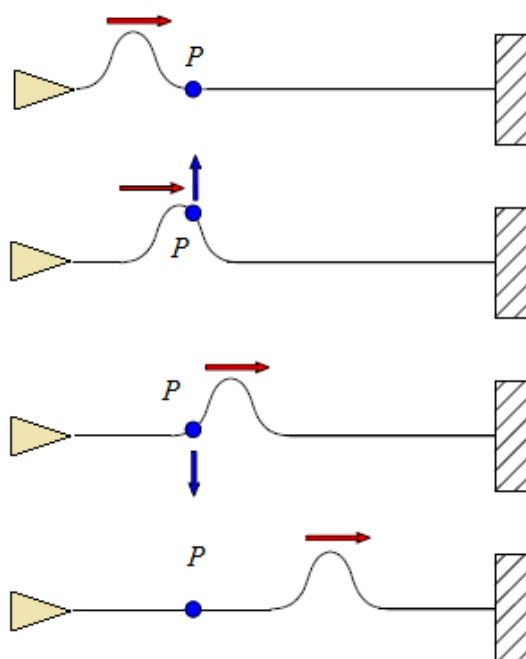
Valovanja lahko ločimo tudi glede na to, ali potujejo po nekem mediju (snovi) oz tista, ki potujejo tudi po praznem prostoru. Prvim pravimo mehanska valovanja, druga pa so elektromagnetna valovanja. Primeri mehanskih valovanj so zvok, valovanje na struni, valovanje na vodni gladini in druga. V teh primerih je snov prenosnik valovanja. Elektromagnetno valovanje pa ne potrebuje snovi za širjenje, potuje lahko tudi skozi vakuum. V tem delu se bomo osredotočili le na mehanska valovanja in od teh še posebej na zvok.

Širjenje motenj

V uvodu smo že omenili, da je valovanje širjenje motnje skozi snov in prenašanje energije iz delca na delec v tej snovi, brez spreminjanja lastnosti ali strukture snovi. Za razumevanje mehanskega valovanja moramo poznati vir motnje, snov, ki valovanje prenaša in fizikalne mehanizme, s katerimi delujejo nihajoči delci snovi na sosednje delce in omogočajo prenos valovanja.

Eden od načinov za ponazoritev potovanja valovanja je vrv, ki je na eni strani vpeta v steno, na drugi strani pa jo z roko napnemo (glej sliko 1). Če z roko, s katero napenjamo vrv enkrat sunemo gor in nato nazaj dol, opazimo, da smo na vrvi povzročili motnjo, ki se giblje v smeri stene z določeno hitrostjo. Slika 1 prikazuje štiri zaporedne posnetke potovanja motnje, ki jo lahko imenujemo val. Vrv je medij,

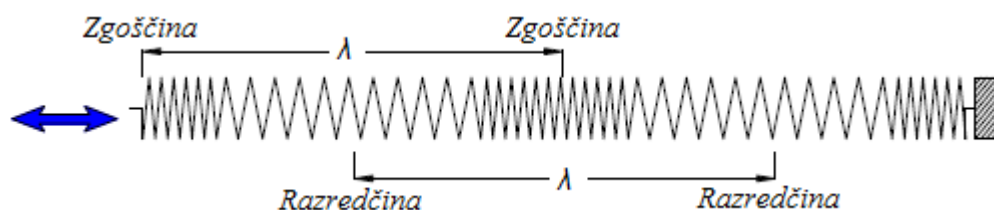
po katerem potuje valovanje. Hitrost s katero potuje val, določa napetost vrvi in masa vrvi na enoto dolžine [2].



Slika 1: Širjenje transversalnih valov na struni.

Na sliki 1 vidimo, da se točke na vrvi premikajo pravokotno na smer potovanja valov, kar pomeni, da je to valovanje transversalno. Motnja se prenaša iz delčka vrvi na sosednji delček v smeri potovanja vala, delčki ali točke pa se gibljejo pravokotno na ravnovesno lego vrvi.

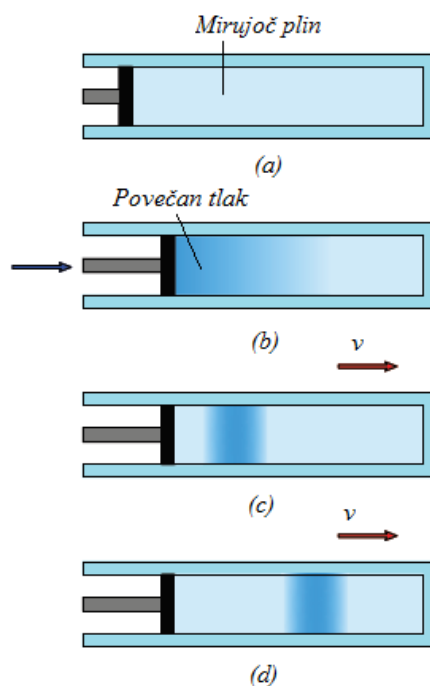
Primer longitudinalnega valovanja je valovanje na vzmeti. Za primer vzamemo dolgo vzmet, na enem koncu pritrjeno v steno, drugi konec pa napnemo. Če konec vzmeti na hitro napnemo in nato hitro popustimo, vidimo, da se pojavijo območja na vzmeti, nekatera zgoščena, nekatera pa redkejša, kot prikazuje slika 2. Če to početje nekajkrat ponovimo, vidimo, da deli vzmeti nihajo. Točke na vzmeti nihajo vzdolž širjenja motnje.



Slika 2: Prikaz longitudinalnega valovanja vzmeti.

Zvočno valovanje

Zvočno valovanje je longitudinalno kadar se motnja širi skozi plin. Skozi trdno snov se zvočno valovanje širi v dveh oblikah, kot stisljivo longitudinalno in strižno transverzalno. Motnja v zvočnem valovanju, ki potuje skozi zrak, je serija delčkov zraka v območju zgoščine, kjer je povečanje pritiska in serija delčkov zraka v razredčini, kjer je zmanjšan pritisk v primerjavi z nemotenim zrakom. Poudariti moramo, da ne potujejo deli zraka, temveč se prenaša motnja, to so zgoščine oz. razredčine v zraku. Te motnje lahko opišemo z lokalno spremembo tlaka in lokalno spremembo gostote zraka.



Slika 3: Potovanje spremembe tlaka skozi plin.

V cevi imamo stisljiv plin. Ko bat na levi premaknemo proti desni ustvarimo impulz. Plin v cevi je na začetku enakomerno razporejen (slika 3a). Ko premaknemo bat, se za batom plin zgosti in je temneje obarvan (slika 3b). Tlak in gostota plina sta v temneje obarvanem predelu višji, kot sta bili pred premikom bata. Zgoščina v cevi se premika proti desni strani, čeprav bat obstane na mestu (slika 3c, d). Zgoščina potuje proti desni s hitrostjo v , ki pa ni enaka hitrosti, s katero smo premaknili bat. Tako smo

ustvarili longitudinalni val v plinu. Fazna hitrost valovanja v plinu z gostoto ρ in modulom stisljivosti K je:

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}.$$

Ta izraz lahko primerjamo z izrazom za hitrost transverzalnega valovanja na vrvi:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

kjer je F natezna sila v vrvi in μ dolžinska gostota vrvi. V obeh primerih je hitrost odvisna od specifične mase medija in napetosti medija:

$$v = \sqrt{\frac{\text{elastične lastnosti}}{\text{vztrajnostne lastnosti}}}$$

Hitrost zvoka je odvisna tudi od temperature medija. Za potovanje zvoka skozi zrak je povezava med hitrostjo zvoka v in temperaturo zraka T sledeča [2]:

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{T}{T_0}},$$

kjer je $v_0 = 331$ m/s hitrost zvoka v zraku pri temperaturi $T_0 = 273$ °K. Hitrost zvoka pri sobni temperaturi 293 °K (20 °C) je 343 m/s.

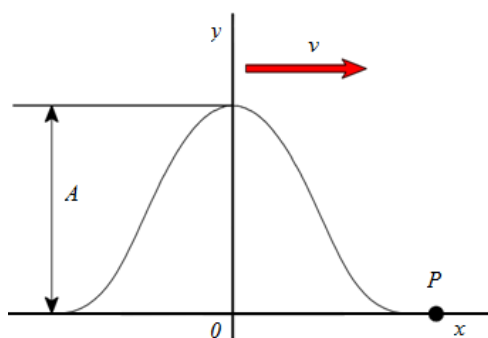
Zvočne valove delimo glede na frekvenco v tri skupine, in sicer:

- zvočni valovi, ki jih zazna človeško uho. Te valove povzročajo glasbila, glasilke ljudi, zvočniki... (razpon frekvenc od 20 Hz do 20 000 Hz);
- infrazvoki imajo frekvence nižje od našega slišnega spektra. Teh zvokov ne slišimo. Sloni jih uporabljajo za komuniciranje na zelo velike razdalje... (frekvence manjše od 50 Hz);

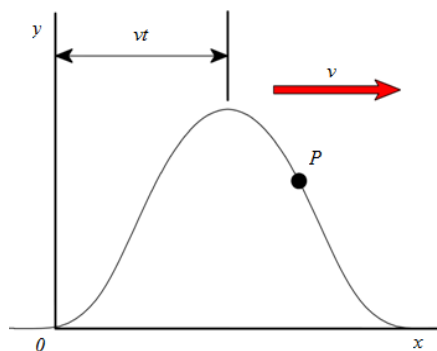
- ultrazvok je zvok s frekvencami višjimi od 20000 Hz in je človeškemu sluhu nezaznaven. Te zvoke uporabljajo netopirji za orientacijo v prostoru. Ultrazvok uporabljajo v medicini in tehniki [3].

Matematični opis potovanja vala

Vzamemo za primer valovanje na dolgi napeti vrvi. Slika 4 predstavlja položaj transverzalnega vala v odvisnosti od koordinate x v času $t = 0$. V tej točki lahko matematično opišemo obliko vala s funkcijo $f(x)$. Če je hitrost vala v , se ta val premakne v desno v času t za razdaljo vt (slika 5). Če se oblika vala s časom ne spreminja, je slika vala v času t enaka, kot je bila v času $t = 0$, le položaj vala je premaknjen.



Slika 5: Transverzalni val na vrvi
ob času $t = 0$.



Slika 4: Transverzalni val na vrvi
ob času t .

Na splošno lahko zapišemo za vse vrednosti na osi y in za vse čase t , ko potuje val proti desni strani osi x , da velja:

$$y(x, t) = f(x - vt).$$

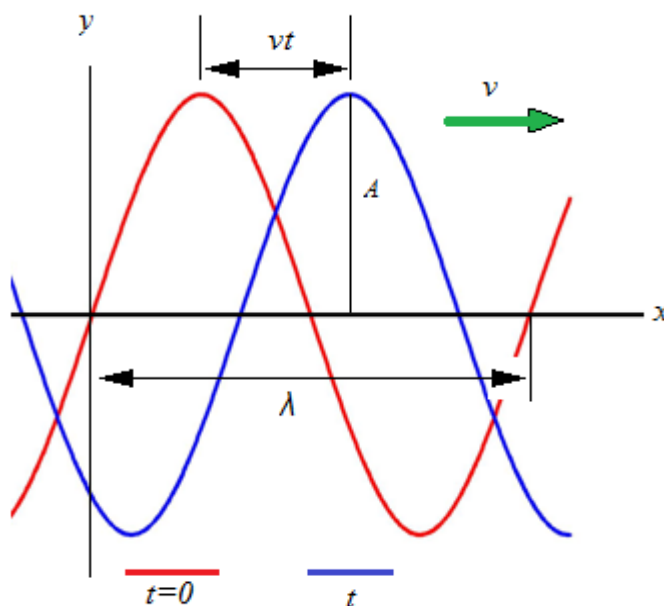
Prav tako velja tudi, ko val potuje proti levi strani osi x , da je:

$$y(x, t) = f(x + vt).$$

Funkcija valovanja $y(x, t)$ ponazarja spreminjanje vrednosti na osi y za vse točke na osi x , v katerem koli času t . Če pa na primer posnamemo dogajanje na vrvi, ko skozi potuje motnja (ob nekem določenem času), takrat funkcija $y(x)$ predstavlja dejansko geometrično obliko vala v tem času.

Sinusno valovanje

Sinusno valovanje je periodično, tako kot je prikazano na sliki 6. Matematičen opis sinusnega vala je podan v enačbi (1). Tako valovanje lahko ustvarimo na vrvi, če en konec vrvi enakomerno nihamo z roko gor in dol in ustvarjamo preprosto harmonično gibanje.



Slika 6: Sinusni val, ki potuje v desno s hitrostjo v : rdeča črta – val ob času $t = 0$, modra črta – val ob poznejšem času t .

Rdeča krivulja na sliki 6 predstavlja sinusno valovanje ob času $t = 0$. Krivulja obarvana z modro pa predstavlja isto valovanje v kasnejšem času t . Opazimo, da se točke na vrvi gibljejo pravokotno na os x , medtem, ko se valovanje prenaša iz točke na točko v smeri x s hitrostjo v . Premik vala v času t je $\Delta x = vt$. Valovna dolžina λ je razdalja med dvema maksimumoma ali minimumoma (Slika 6). Maksimalen odmik točke iz ravnovesne lege imenujemo amplituda in ga bomo označevali z A . Fazni zamik je na sliki 6 označen kot razdalja med rdečim in modrim vrhom (vt). Čas, ki ga valovanje potrebuje, za premik za eno valovno dolžino, je čas ene periode oz. enega nihaja T . Frekvenca f označuje število nihajev v časovni enoti in je povezana z nihajnim časom T :

$$f = \frac{1}{T}.$$

Pogosto pri opisu valovanja vpeljemo dve novi količini, to je valovno število k in kotno frekvenco ω :

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{in} \quad \omega \equiv \frac{2\pi}{T},$$

Tako sinusni val, ki potuje v desno, opišemo z enačbo:

$$y = A \sin(kx - \omega t + \phi), \quad (1)$$

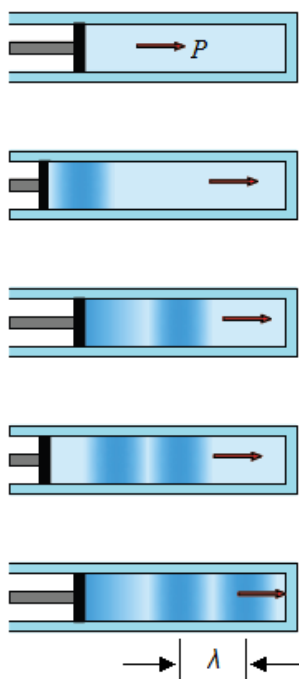
kjer je relacija med hitrostjo valovanja in frekvenco ter valovno dolžino podana z:

$$v = \frac{\omega}{k} \quad \text{oziroma} \quad v = \lambda f.$$

Fazna konstanta ϕ opiše fazni zamik valovanja.

Sinusno zvočno valovanje

Oglejmo si generiranje in potovanje sinusnega zvočnega vala od izvora (zvočnika) do detektorja. Za primer vzemimo cev s plinom ter gibajočim batom na levem koncu (slika 7). Bat bomo periodično (sinusno) premikali levo / desno. Ko bat potisnemo desno, se za batom plin zgosti in se poveča pritisk v tem območju. Zatem potisnemo bat v levo, v tem trenutku za batom nastane razredčina, kjer je pritisk v plinu manjši. Če tako nihanje bata nadaljujemo, v cevi s plinom ustvarimo longitudinalno sinusno valovanje. Razdaljo od ene zgoščine do druge imenujemo valovno dolžino λ .

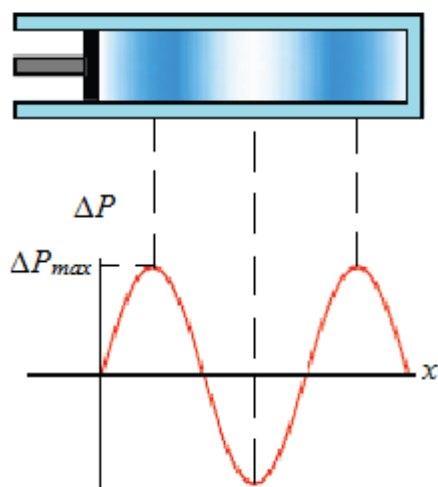


Slika 7 : Sinusno longitudinalno valovanje v plinu.

Zvočno valovanje lahko opišemo kot nihanje pritiska v plinu P :

$$\Delta P = \Delta P_{\max} \sin(kx - \omega t). \quad (2)$$

$\Delta P_{\max}$ je največja sprememba pritiska zraku. V nadaljevanju bomo amplitudo spremembe tlaka ($\Delta P_{\max}$) označevali z A zaradi krajšega zapisa. Grafično je sinusni zvočni val prikazan na sliki 8.



Slika 8: Grafični prikaz spremembe tlaka v sinusnem zvočnem valu.

Energijski tok, ki ga prenaša zvočno valovanje, je definiran kot energija E , ki jo prenaša sprememba pritiska v zraku na časovno enoto:

$$W = \frac{\Delta E}{\Delta t} .$$

Intenziteta zvočnega valovanja pa je definirana kot energijski tok na enoto površine:

$$I = \frac{W}{S}$$

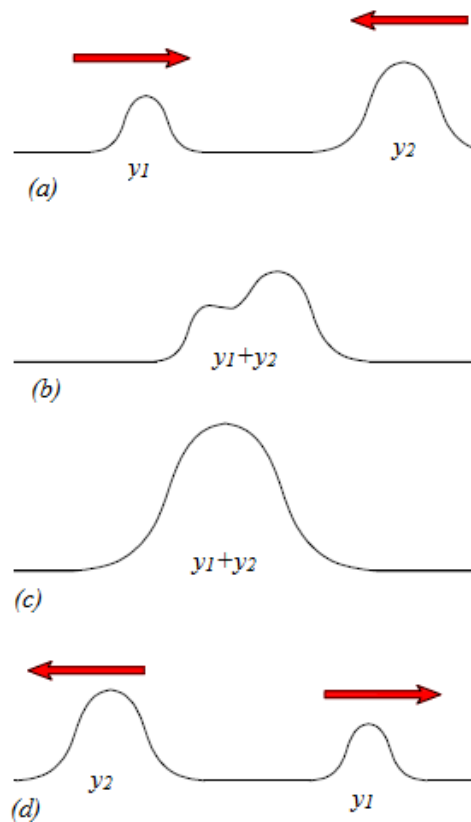
Intenziteta je sorazmerna s kvadratom amplitude spremembe tlaka A [2]:

$$I = \frac{A^2}{2\rho v}, \quad (3)$$

kjer je ρ specifična gostota zraka in v je hitrost zvočnega valovanja.

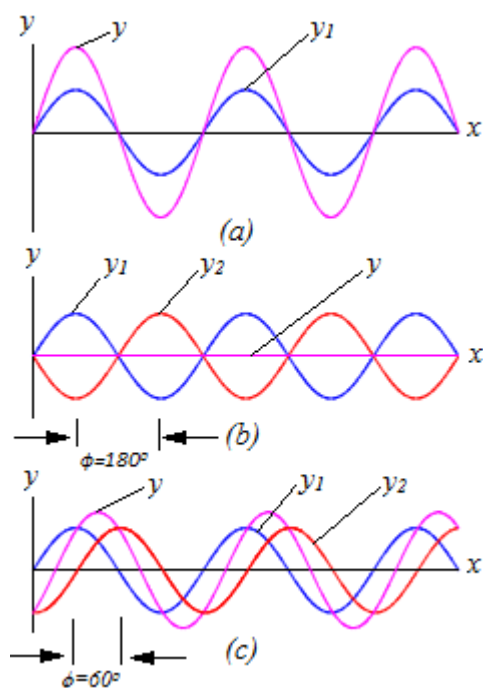
Interferenca valovanj

Kaj se zgodi, ko se dva vala srečata na istem mestu? Velja načelo superpozicije valov, čemur rečemo tudi interferenca. Pri interferenci se seštevajo amplitude valovanj. Primer je ilustriran na sliki 9 za dve valovanji na napeti vrvi.



Slika 9: Interferenca dveh valov na napeti vrvi.

Ko se dva vala srečata, potujeta en skozi drugega. Podoben pojav lahko srečamo, ko skozi zrak potujeta dve različni zvočni valovanja. Ob srečanju se ti dve zvočni valovanja seštevata oz interferirata. Interferenca je lahko konstruktivna, če sta odmika valovanj enako predznačena, ali destruktivna, ko sta odmika valovanj nasprotnega predznaka.



Slika 10: Superpozicija dveh enakih, fazno zamaknjenih sinusnih valovanj, ki potujeta v isto smer; a) vala v fazi, b) vala zamaknjena za pol valovne dolžine, c) vala zamaknjena za šestino valovne dolžine. Vala, ki interferirata, sta narisana z modro in rdečo črto, interferenčni val pa z vijolično. Na sliki a sta vala y_1 in y_2 označena modro, ker sta v fazi.

Načelo superpozicije torej pove, da če se dva ali več valov giblje po nekem mediju, je val v vsaki točki algebrična vsota vseh valov v tej točki. Če to načelo uporabimo za opazovanje dveh sinusnih valov z enako frekvenco, amplitudo in valovno dolžino, ki se razlikujeta le v fazi valovanja, kjer je ϕ fazni zamik med valoma, potem lahko zapišemo vsoto valov kot:

$$y = y_1 + y_2 = A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \phi)], \quad (4)$$

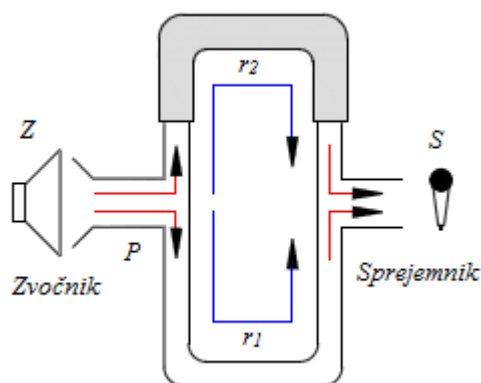
če uporabimo zvezo iz trigonometrije [2]:

$$\sin a + \sin b = 2 \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

dobimo izraz za vsoto valovanj:

$$y = 2A \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right). \quad (5)$$

Vidimo, da se dva enaka sinusna vala ki sta zamaknjena v fazi, seštejeta v sestavljeni val, ki se po frekvenci in valovni dolžini ujema z obema valoma, iz katerih je sestavljen. Amplituda sestavljenega vala pa je odvisna od faznega zamika med obema valoma: $2A \cos(\phi/2)$. Na sliki 10a je prikazan ta pojav za valovanje v fazi ($\phi=0$). Amplituda sestavljenega vala je enaka vsoti obeh amplitud posameznih valov. Slika 10b prikazuje interferenco dveh sinusnih valov, kjer je njun fazni zamik $\phi=180^\circ$. Amplituda vsote obeh valov je povsod nič. Valovanje destruktivno interferirata. Slika 10c prikazuje vsoto dveh sinusnih valov s faznim zamikom $\phi=60^\circ$. Amplituda vsote je le malo večja od amplitude posameznih valov.



Slika 11: Spreminjanje poti, zgornjo pot lahko daljšamo ali krajšamo po principu pozavne.

Za lažje razumevanje interference zvočnih valov si oglejmo sliko 11. Zvok, ki ga ustvarja zvočnik Z, pošljemo v cev skozi točko P, kjer je križišče cevi v obliki črke T. Pol zvočne moči potuje skozi zgornjo cev, pol skozi spodnjo cev. Spodnja cev ima dolžino r_1 in je konstantna, zgornja cev ima dolžino r_2 , ki jo lahko spreminjamo podobno kot pri pozavni.

Zvok, ki doseže sprejemnik S, potuje po obeh cevah. Če je razlika poti zvoka po obeh krakih $\Delta r = |r_2 - r_1|$ enaka nič ali enaka valovni dolžini ali večkratniku valovne dolžine

$$(\Delta r = n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots)$$

tedaj v sprejemniku S slišimo ojačen zvok. Grafična slika teh dveh zvokov ustreza sliki 10a, ker sta valovanji v fazi. Ko pa je razlika poti po obeh ceveh r enaka polovici valovne dolžine $\lambda/2$, ali $3\lambda/2, \dots, n\lambda/2$ (za vse lihe n), valovanji destruktivno interferirata. V sprejemniku ne za-znamo nobenega zvoka. To ustreza situaciji, ki jo kaže slika 10b.

Pogosto je koristno, da izrazimo razliko poti v smislu faznega zamika med valovi. Razlika v poti za eno valovno dolžino ustreza faznemu zamiku 2π radianov. Od tod dobimo zvezo $\phi/2\pi = \Delta r/\lambda$ ali:

$$\Delta r = \frac{\phi}{2\pi} \lambda \quad (6)$$

To razliko poti lahko uporabimo tudi za izračun kota ϕ , pri katerem bomo imeli ojačitve valovanja in oslabitve valovanja. Torej, če imamo sode večkratnike $\lambda/2$, takrat je fazni zamik $\phi = 2n\pi$ (n so vsa naravna števila) in imamo ojačitve. Ko pa so lihi večkratniki $\lambda/2$, takrat je fazni zamik $\phi = (2n + 1)\pi$ (n so naravna števila) imamo oslabitve:

$$\Delta r = (2n) \frac{\lambda}{2} \text{ ojačitve;} \quad (7)$$

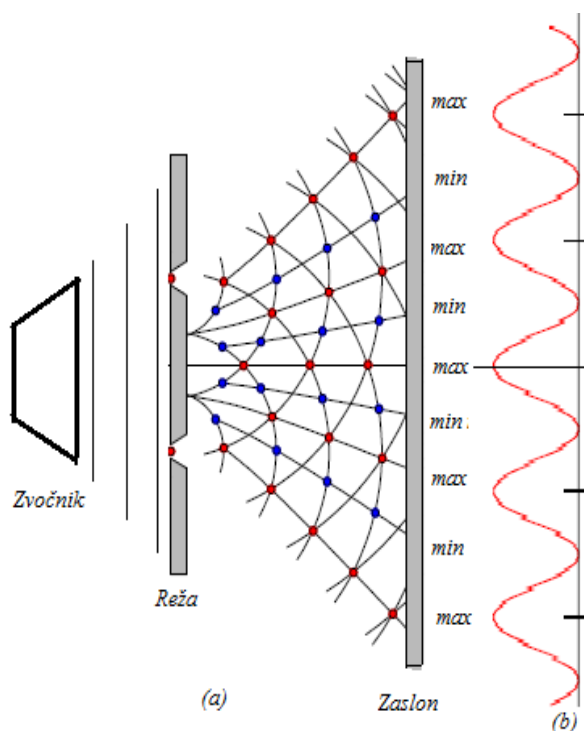
$$\Delta r = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ oslabitve.} \quad (8)$$

Interferenca zvočnega valovanja na dveh ozkih režah

Oglejmo si interferenco zvočnih valov, ki se širijo po prostoru v vseh smereh. Za predstavitev pojava se omejimo na ravninski primer, ko interferira zvočno valovanje, ki prehaja skozi dve reži v zaslonu (slika 12). Da lahko izvedemo tak poskus, moramo zadostiti dvema pogojema, in sicer: izvor zvočnega valovanja mora nenehno vzdrževati svojo lastno fazno zamaknjenost in imeti mora eno samo valovno dolžino.

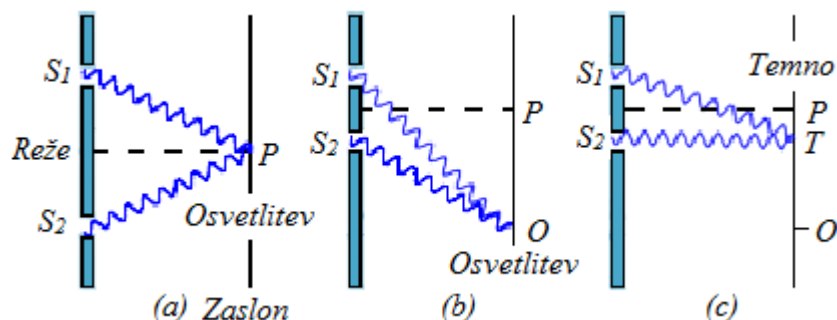
Eksperiment je prikazan na sliki 12. Zvočnik oddaja zvočne valove z eno samo frekvenco. Valovi prehajajo skozi reži na zaslon, se na režah uklanjajo in za režama

interferirajo med seboj. Ta poskus je za svetlobo (elektromagnetno valovanje) prvi demonstriral Thomas Young leta 1801. Ko zvok pride skozi reže, se za pregrado pojavijo območja ojačitev in oslabitev. Ojačitve so območja, kjer se zvočno valovanje seštevata, na zaslonu je tam večja vrednost, oslabitve so območja, kjer se zvočno valovanje izniči, zato je na zaslonu vrednost nič.



Slika 12: Youngov eksperiment z zvočnim valovanjem.

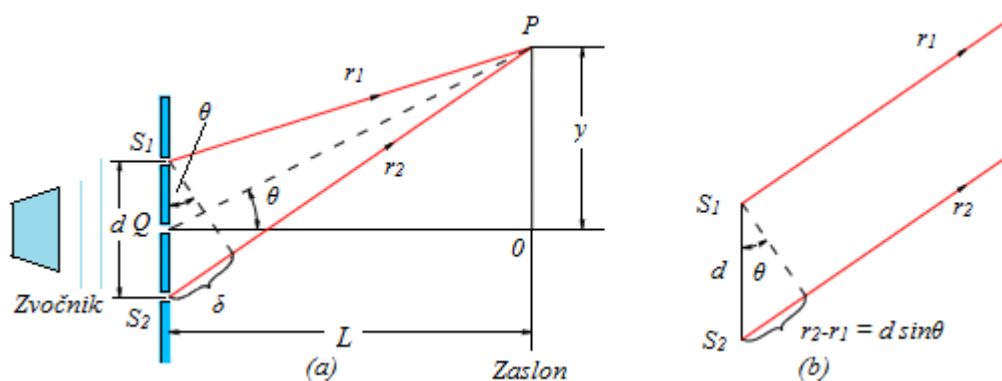
Slika 13a prikazuje, kako dve valovanji padeta na zaslon, ko potujeta po enako dolgi razdalji in sta v fazi. Ko dosežeta točko P, je na zaslonu območje ojačitve. Slika 13b prikazuje, ko dve valovanji dosežeta točko O izven simetrane med režama. Zgornje valovanje opravi za eno valovno dolžino daljšo pot kot spodnje. Kljub različnim potem sta vala v fazi in območje na zaslonu je tudi tu območje ojačitve. Slika 13c prikazuje dva vala, ki padata v točko T. Pot za zgornji val je daljša za pol valovne dolžine kot za spodnji val. Ta dva vala nista v fazi, zato je tu območje oslabitve.



Slika 13: Območja ojačitev in oslabitev glede na fazno zamaknjenost valov iz dveh rež.

Na sliki 14a je prikazana pregrada z dvema režama, ki sta med seboj oddaljeni za razdaljo d . Zaslona, kjer merimo intenziteto valovanja, je od rež oddaljen za razdaljo L . Upoštevajmo, da je razdalja L veliko večja od razmika med režama d ($d \ll L$). Pregrada in zaslon sta med seboj vzporedna. Ko se valovanji iz spodnje in zgornje reže srečata v točki P na zaslonu, opazimo, da je moralo valovanje iz spodnje reže opraviti daljšo pot, kot valovanje iz zgornje reže, in to za razliko $d \sin \theta$. To razdaljo imenujemo razlika poti in jo označimo z δ :

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (9)$$



Slika 14: Grafični prikaz za izračun razlike poti med valoma iz dveh rež v odvisnosti od kota širjenja glede na simetralo med režama.

Vrednost δ določa ali sta vala iz reže S_1 in S_2 v fazi, ko dosežejo točko P . Če je δ nič, ali večkratnik valovne dolžine, je na zaslonu valovanje ojačeno. Torej so ojačitve v točki P pri pogoju:

$$\delta = d \sin \theta = n\lambda, (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots), \quad (10)$$

kjer je n število ojačitve. Srednja ojačitev se imenuje ničta ojačitev. Ko je razlika poti večkratnik $\lambda/2$, tedaj sta vala v fazi zamaknjena za 180° in na zaslonu v točki P dobimo oslabitev valovanja:

$$\delta = d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda, (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (11)$$

Poiskati moramo uporabnejšo enačbo za iskanje ojačitev in oslabitev, gledano na lego na zaslonu. Ugotovili smo že, da je $d \ll L$. To seveda velja, če je θ majhen kot. Za majhne kote velja, da je $\sin \theta \approx \tan \theta$. Iz trikotnika OPQ na sliki 14a vidimo, da lahko zapišemo:

$$y = L \tan \theta \approx L \sin \theta$$

Tako lahko zapišemo še enačbo za vse ojačitve:

$$y_{\text{ojačaji}} = \frac{\lambda L}{d} n, (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (12)$$

Podobno velja tudi za oslabitve:

$$y_{\text{oslabitev}} = \frac{\lambda L}{d} \left(n + \frac{1}{2}\right), (n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (13)$$

Young je s takim eksperimentom s svetlobo dokazal, da interferenca na dvojni reži povzroča značilno interferenčno sliko, kjer se daleč od rež, na zaslonu, pojavijo ojačitve in oslabitve svetlobe. Področja z ojačitvami imajo večjo amplitudo od izvirnega svetlobnega vala iz ene reže. Na območjih z oslabitvami se valovanja izničijo in zaslon ni osvetljen.

Intenziteta valovanja pri interferenci za dvema ozkima režama

V prejšnji točki smo se osredotočali samo na področja, kjer so nastajala izrazita območja ojačitev in oslabitev valovanja. Sedaj pa bomo obravnavali celotni zaslon.

zanimala nas bo intenziteta valovanja povsod na zaslonu za dvema ozkima režama, ne le v točkah, kjer se pojavijo ojačitve in oslabitve.

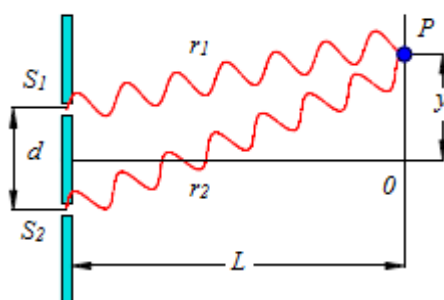
Razmik med režama naj bo večji od valovne dolžine valovanja. Reži sta ozki v primerjavi z valovno dolžino valovanja. Zopet moramo za primer vzeti, da je valovanje, ki prehaja skozi reži sinusno in z eno samo valovno dolžino. Intenziteto valovanja zvoka v posameznih točkah bomo izračunali po postopku, ki je analogen tistemu za svetlobo (elektromagnetno valovanje), se pravi za jakost električnega polja v posamezni točki P na zaslonu [2]. V točki P torej iščemo velikost amplitude spremembe tlaka A. Posamezni val iz vsake reže zato zapišemo:

$$A_1 = A_0 \sin \omega t \quad \text{in} \quad A_2 = A_0 \sin(\omega t + \phi)$$

Čeprav je valovanje pred režami v fazi, je njihov fazni zamik v točki P odvisen od razlike poti; $\delta = r_1 - r_2 = d \sin \theta$. Zaradi razlike poti, dobimo fazni zamik med valoma ;

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (14)$$

Ta enačba pove, kako se s kotom θ glede na simetralo med režama spreminja fazni zamik ϕ (slika 15).



Slika 15: Fazni zamik dveh valov iz dveh rež S_1 in S_2 v točki P na oddaljenem zaslonu.

Velikost amplitude spremembe tlaka v točki P, lahko izračunamo iz vsote obeh sinusnih valov:

$$A_p = A_1 + A_2 = A_0 [\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \theta)]$$

od koder dobimo po enakem postopku kot pri enačbi (5) :

$$A_p = 2A_0 \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\theta}{2}\right). \quad (15)$$

Dobljena enačba pove, da ima valovanje v točki P na zaslonu enako frekvenco in valovno dolžino kot pred režami, vendar je amplituda pomnožena s faktorjem $2 \cos(\theta/2)$. Če želimo preveriti skladnost tega rezultata z rezultatom iz prejšnjega poglavja (enačbi (10) in (11)), lahko preverimo, kje ima intenziteta minimum in kje maksimum. Upoštevamo, da če je $\phi = 0, 2\pi, 4\pi \dots$, potem je amplituda zvočnega valovanja v točki P je $2A_0$, kar pa ustreza maksimumu interference. Prav tako, če je $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$, potem je amplituda zvočnega valovanja v točki P enaka nič, kar ustreza minimumu interference oziroma oslabitvi valovanja.

Končno lahko dobimo izraz za intenziteto valovanja v poljubni točki P na zaslonu za dvojno rezo. Ker je intenziteta valovanja sorazmerna s kvadratom amplitude spremembe tlaka (enačba 3), lahko zapišemo enačbo za intenziteto valovanja kot smo definirali v enačbi (15):

$$I \propto A_0^2 = 4A_0^2 \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin^2\left(\omega t + \frac{\theta}{2}\right). \quad (16)$$

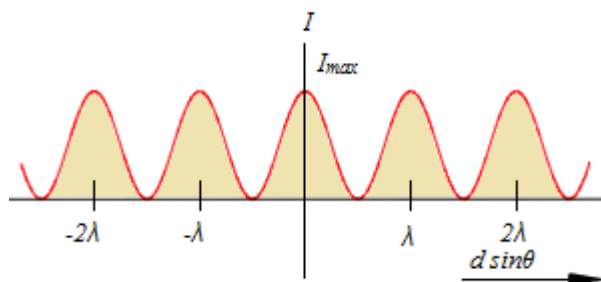
Tako lahko zapišemo, da je povprečna intenziteta zvočnega valovanja na zaslonu podana z:

$$I = I_{\max} \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right). \quad (17)$$

Kjer je $I_{\max} = 4 A_0^2$ največja intenziteta zvočnega valovanja. Od tod dobimo odvisnost intenzitete zvoka od kota θ glede na smer vpadnega valovanja (smer simetrale med režama):

$$I = I_{\max} \cos^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right). \quad (18)$$

Grafično je intenziteta zvoka v odvisnosti od kota θ za dve ozki reži prikazana na sliki 16, za primer, ko je $d \ll L$ in da je vrednost θ majhna.



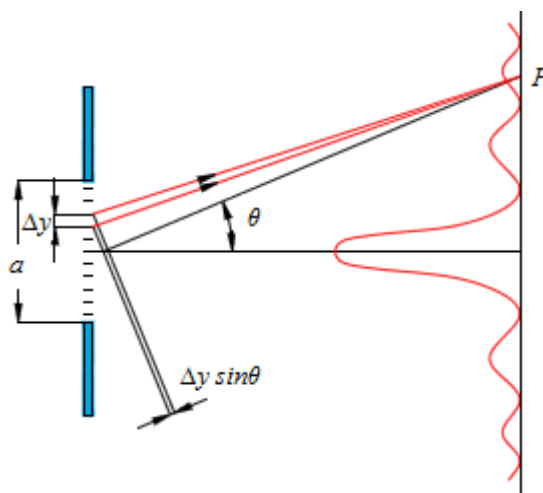
Slika 16: Graf intenzitete valovanja za dvema ozkima režama v odvisnosti od kota glede na smer simetrane med režama, pri izbrani razdalji med režama d .

interferenca valov za VEČ režami

Poglejmo podrobneje, kako se valovanje obnaša po prehodu skozi več širokih rež. Sistematično bomo pojav obravnavali za primer ene široke reže in nato še dve, tri, štiri, pet in šest širokih rež.

Uklon valovanja na široki reži

Za razlago uklona valovanja na eni široki reži bomo uporabili kazalčni diagram [2]. Predstavljajmo si, da je naša reža razdeljena na več ozkih rež, ena zraven druge. Skozi vsako od teh rež prehaja sinusno valovanje z eno samo valovno dolžino. V neki točki P na zaslonu vsak val, ki prehaja skozi naše namišljene ozke režice, prispeva k intenziteti valovanja v tej točki P. Slika 17 prikazuje pot valovanja skozi režice do točke P na zaslonu.

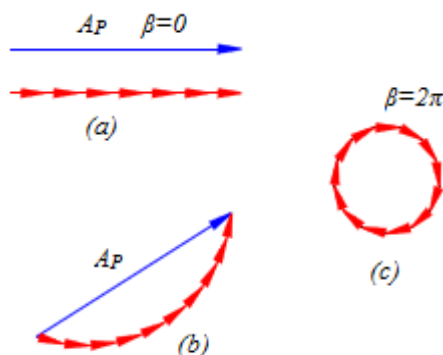


Slika 17: Vzorec uklona na široki reži.

Vsako valovanje, ki prehaja skozi namišljene režice in pride do opazovane točke, je v fazi zamaknjeno za $\Delta\beta$. S podobnim načinom za izračun jakosti valovanja smo se srečali pri Youngovem eksperimentu. Intenziteta valovanja je sorazmerna z velikostjo kvadrata amplitude spremembe tlaka (enačba (3)). V faznem diagramu so posamezni vektorji amplitude spremembe tlaka v fazi premaknjeni za kot $\Delta\beta$, ki ga izrazimo:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta y \sin \theta \quad (19)$$

Če želimo najti velikost amplitude spremembe tlaka, v kateri koli točki na zaslonu in za vse vrednosti θ , moramo sešteti vse vektorje, ki predstavljajo amplitude spremembe tlaka ΔA , ki jih prispevajo posamezne ozke reže po celotnem območju široke reže. Za male kote θ lahko domnevamo, da so vrednosti ΔA enake. Za predstavitev tega je najprimernejši fazni diagram, kot ga prikazuje slika 18b.



Slika 18: Fazni diagrami amplitude spremembe tlaka.

V našem primeru je amplituda spremembe tlaka v točki P na zaslonu A_P vektorska vsota vseh ΔA iz vseh režic Δy . Kot je prikazano na sliki 18b, je vrednost A_P tetiva loka, ki jo tvorijo posamezni vektorji ΔA . Popolna fazna razlika β med zgornjim in spodnjim delom reže je:

$$\beta = N\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda} N\Delta y \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta, \text{ ker je}$$

$$a = N\Delta y, \text{ kar je širina reže.}$$

Slika 18a prikazuje, kako vsi vektorji ΔA iz posameznih režic tvorijo najdaljšo vsoto A_P , ko je kot θ enak nič. V tem položaju se nahaja središče ojačitve. Slika 18c prikazuje vsoto vseh vektorjev ΔA , kjer je zaradi zajetega kota 2π vektor A_P zopet na izhodiščni točki, torej enak nič. Zato lahko zapišemo $\beta = N\Delta\beta = 2\pi$ in vidimo:

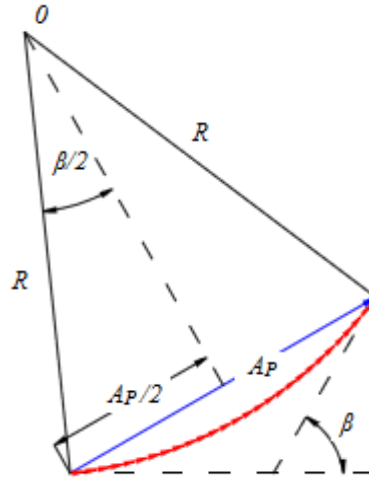
$$2\pi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta_{\min}, \text{ torej je}$$

$$\sin \theta_{\min} = \frac{\lambda}{a}.$$

To pomeni, da se prvi minimum interference pojavi, ko je $\sin \theta_{\min} = \lambda/a$ in vsaki naslednji pri kotih:

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{a}, \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (20)$$

Sedaj lahko ponazorimo velikost spremembe amplitude tlaka in jakosti interference za vsako točko na zaslonu. V našem primeru, kot ga prikazuje slika 17, lahko vse Δy zmanjšamo na zelo majhne dele (dy) in dobimo zelo veliko število zelo ozkih rež N . Ko seštejemo vse infinitezimalne vektorje dA , dobimo velikost vektorja A_P , tako kot nam prikazuje slika 19.



Slika 19: Kazalčni diagram za izračun spremembe amplitude tlaka na eni široki reži.

Tako lahko izračunamo velikost spremembe amplitude tlaka in intenzitete valovanja v vsaki točki na zaslonu. Iz trikotnika, ki vsebuje kot $\beta/2$ vidimo, da velja:

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{A_p/2}{R},$$

kjer R je radij loka. Dolžina loka je produkt $R\beta$, kjer se kot β meri v radianih. Združitev teh podatkov s prejšnjimi nam da izraz:

$$A_p = 2R \sin \frac{\beta}{2} = 2 \left(\frac{A_0}{\beta} \right) \sin \frac{\beta}{2} = A_0 \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right].$$

Intenziteta valovanja je torej podana z:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2, \quad (21)$$

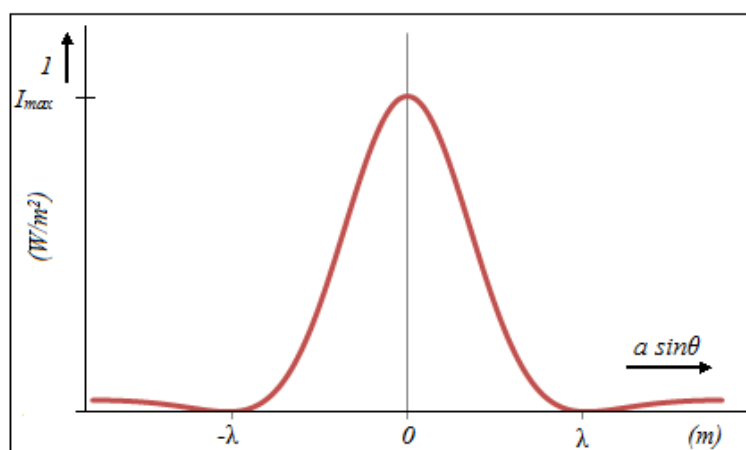
kjer je $I_{\max}$ intenziteta valovanja pri kotu $\theta = 0$ (to je v centralnem maksimumu). Če upoštevamo:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta,$$

dobimo izraz, ki nam opiše intenziteto uklonjenega valovanja za eno široko režo:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \quad (22)$$

Rezultat je grafično prikazan na sliki 20. Enačba (20) podaja mesto prvega uklonskega minimuma (uklonski minimumi se pojavljajo ob vseh celih vrednostih valovne dolžine). Če je reža večja od valovne dolžine valovanja, je steber prvega uklonskega maksimuma ožji, če pa je reža ožja od valovne dolžine valovanja, se reža obnaša podobno, kot da je izvor valovanja in nimamo uklonskih minimumov.



Slika 20: Prikaz porazdelitve jakosti valovanja za eno režo. Kot vidimo je največja jakost $I_{\max}$ pri kotu $\theta=0$.

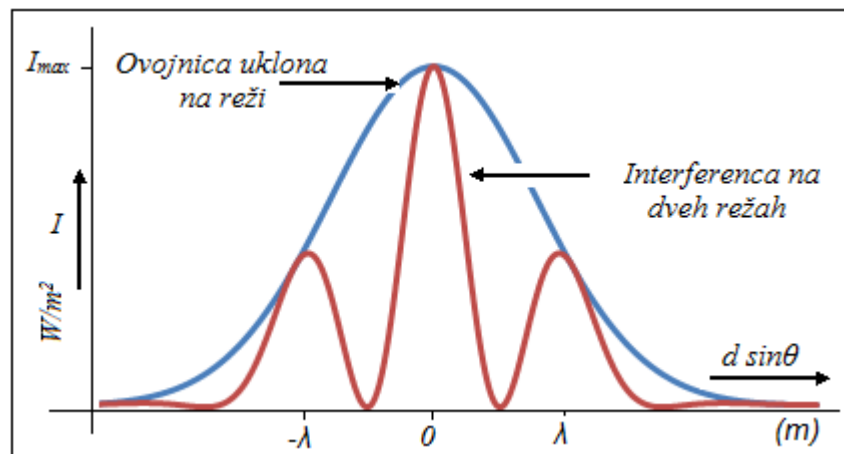
Intenziteta valovanja pri interferenci za dvema širokima režama

Ko imamo prisotni dve ali več širokih rež, nimamo opravka samo z uklonom zvoka na eni reži, ampak hkrati z interferenco valovanj iz več rež. V primeru dveh rež na zaslon prihajata dve različni valovanji, ki sta posledica uklona na vsaki posamezni reži. Valovanji, ki prihajata iz posameznih rež, interferirata. Intenziteto valovanja na zaslonu opišemo s produktom dveh enačb (18) in (22), ki smo jih že obravnavali v prejšnjih poglavjih:

$$I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \quad (23)$$

Enačba podaja intenziteto valovanja za dvema širokima režama širine a , ki sta razmaknjeni za razdaljo d . Grafično si rezultat lahko predstavljamo kot interferenčno

sliko za dve ozki reži $\cos^2(\pi d \sin \theta / \lambda)$, kjer intenziteto stranskih maksimumov določa ovojnica, ki je podana z intenziteto uklona valovanja na eni široki reži $[\sin(\pi a \sin \theta / \lambda) / (\pi a \sin \theta / \lambda)]^2$.



Slika 21: Graf intenzitete interference valovanja na dveh širokih režah (rdeča črta). Opazimo centralni primarni maksimum in dva stranska primarna maksimuma. Z modro črto je narisana ovojnica interferenčne slike, ki je posledica uklona na širokih režah.

Širjenje reže povzroča na grafu zmanjševanje vrednosti obeh primarnih maksimumov prvega reda, medtem ko z večanjem razdalje med režami, povzročamo manjšanje razmika med primarnimi maksimumi in seveda posledično večje število primarnih maksimumov skladno z enačbo (10). Če bi opazovali enake reže z enako razdaljo med režami pri valovanju z manjšo valovno dolžino, bi opazili, da se podobno obnaša, kot v primeru, ko večamo širino reže in razmik med režami.

Intenziteta valovanja za tremi širokimi režami

Interferenčno sliko valovanja za tremi režami dobimo na podoben način kot za dve reži. Pomagamo si s faznim diagramom, da bi našli intenziteto valovanja v smeri θ (slika 22):

$$A \sin(a + \delta) = A_0 \sin a + A_0 \sin(a + \delta) + A_0 \sin(a + 2\delta)$$

$$\text{za } a = \omega t \text{ in } \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

Za izračun amplitude v točki P seštejemo projekcije posameznih amplitud valovanja iz posameznih rež:

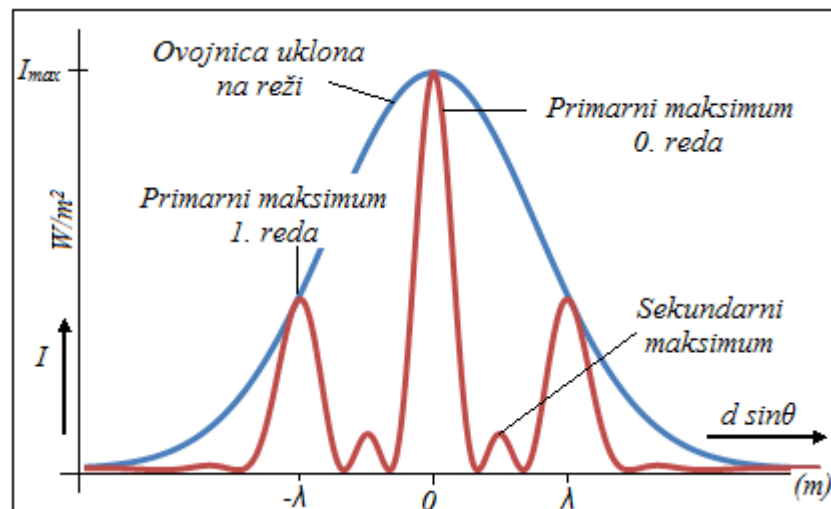
$$A_p = A_1 + A_0 + A_2, \text{ kjer je } A_1 = A_2,$$

$$A_p = 2A_1 + A_0, \text{ kjer je } \delta = \delta \text{ in } A_1 = A_0 \cos \delta, \text{ zato je } A_p = A_0(2 \cos \theta + 1).$$

Od tod dobimo enačbo za intenziteto, pri čemer upoštevamo še faktor, ki je posledica končne širine posamezne reže:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \left[2 \cos \left(\frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + 1 \right]^2, \quad (24)$$

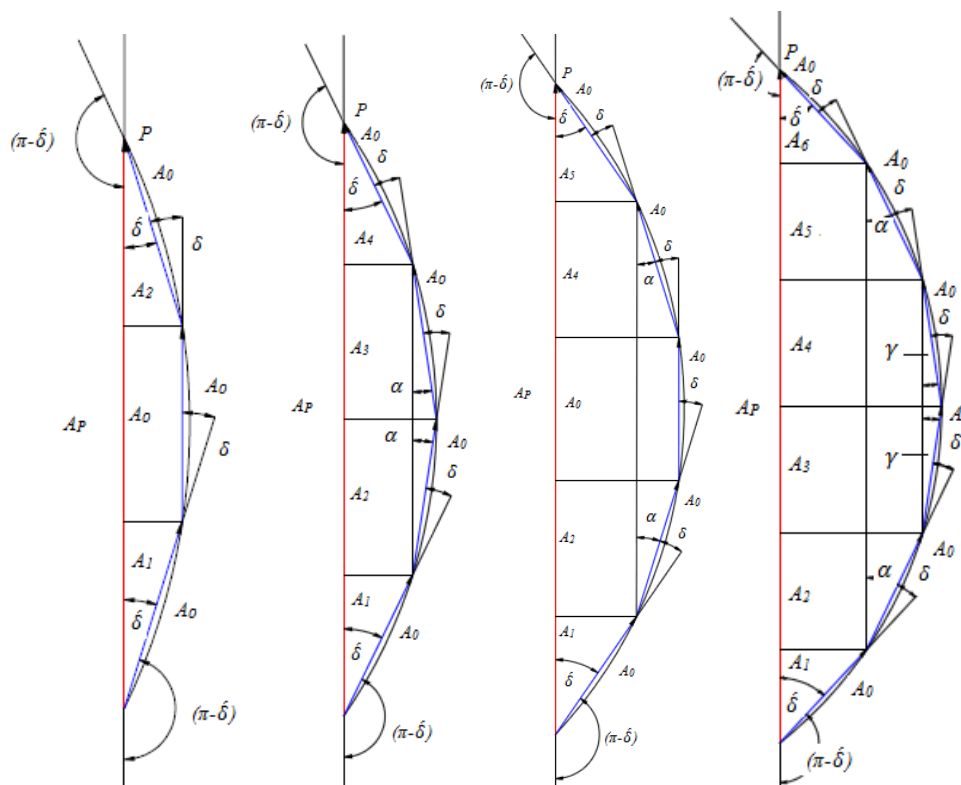
$$\text{kjer je } \beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta, \quad \text{in} \quad \delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta.$$



Slika 22: Graf intenzitete valovanja za tremi režami (rdeča črta označuje interferenco valovanja za tremi velikimi režami, modra pa obliko ovojnice zaradi uklona na eni širokih režah).

Širina reže a , razdalja med režami d in valovna dolžina λ so tudi tu v enakem razmerju, kot v primeru interference na dveh režah, opisanem pod sliko 21.

Slika 22 prikazuje graf zvočnega valovanja za tremi režami. Na sredini vidimo centralni maksimum in naslednja dva primarna maksimuma na razdaljah $+\lambda$ in $-\lambda$. Opazimo, da se pojavi med primarnimi maksimumi tudi manjši, sekundarni maksimum. Primarni maksimumi so ožji, kot v primeru dveh rež.



Slika 23: Kazalčni diagram amplitude spremembe tlaka za tremi, štirimi, petimi in šestimi režami.

Intenziteta valovanja za štirimi širokimi režami

Intenziteta interference valovanja za štirimi režami poiščemo podobno kot v prejšnjih primerih. Najprej s pomočjo kazalčnega diagrama dobimo vsoto amplitude spremembe tlaka v točki P, pri poljubnem kotu θ .

Slika 23 ponazarja vsoto amplitud v točki za režo. Amplitude interference je vsota projekcij primarnih amplitud ultrazvoka. Ker imamo štiri reže, je amplituda interference vsota štirih osnovnih amplitud valovanja ultrazvoka.

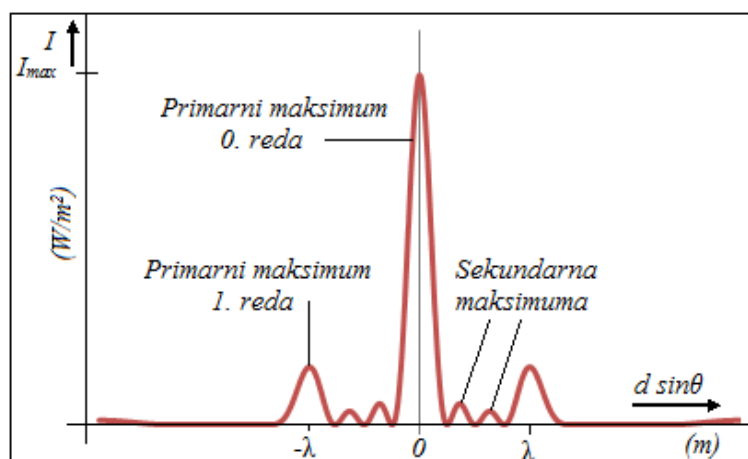
$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$, kjer velja, da je $A_1 = A_4$ in $A_2 = A_3$. Poiščemo še povezavo med koti δ, δ in α : $\delta = \delta + \alpha$, torej je $\alpha = \delta - \delta = \delta/2$ in $2(\pi - \delta) + 3\delta = 2\pi$, torej je $\delta = 3\delta/2$. Ker velja, da je $A_1 = A_0 \cos \delta$ in $A_2 = A_0 \cos \alpha$, dobimo iz zgornjih enakosti slednji izraz

$$A_p = 2A_0 \left(\cos \frac{3\pi d \sin \theta}{\lambda} + \cos \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda} \right)$$

Intenziteta valovanja je sorazmerna s kvadratom amplitude, in če v enačbi upoštevamo še uklon valovanja na široki reži, dobimo:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \left[\cos\left(\frac{3\pi d \sin \theta}{\lambda}\right) + \cos\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right) \right]^2, \quad (25)$$

kjer je $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$, in $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$.



Slika 24: Graf intenzitete valovanja za štirimi režami.

Slika 24 prikazuje graf intenzitete valovanja za štirimi režami na oddaljenem zaslonu. Med primarnimi maksimumi se pojavita dva sekundarna. Širina sekundarnih maksimumov se manjša z večjim številom rež.

Intenziteta valovanja za petimi širokimi režami

Intenziteto valovanja za petimi režami predstavimo kot v prejšnjih primerih. S pomočjo kazalčnega diagrama (slika 23) poiščemo vsoto amplitude spremembe tlaka valovanja v točki P, pri poljubnem kotu θ .

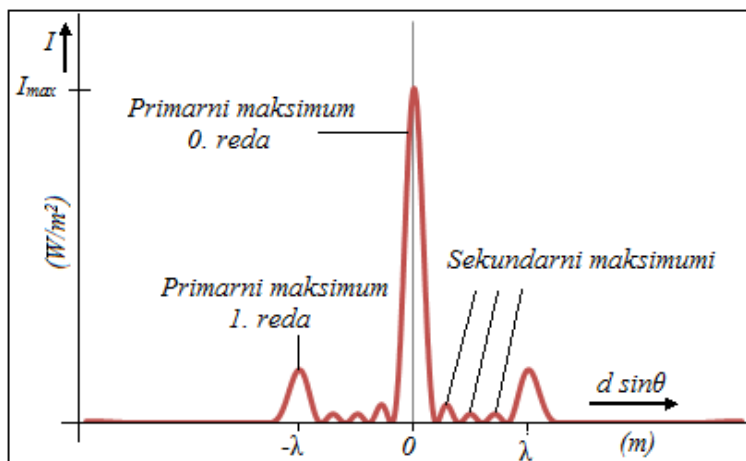
$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$, kjer velja, da je $A_3 = A_0$, $A_1 = A_5$ in $A_2 = A_4$. Poiščemo še povezavo med koti δ, δ in α : $\delta = \delta + \alpha = 2\delta$, torej je $\alpha = \delta - \delta = \delta$. Ker velja, da je $A_1 = A_0 \cos \delta$ in $A_2 = A_0 \cos \alpha$, dobimo iz zgornjih enakosti slednji izraz

$$A_p = A_0 \left(2 \cos \frac{4\pi d \sin \theta}{\lambda} + 2 \cos \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} + 1 \right)$$

Intenziteta valovanja je sorazmerna s kvadratom amplitude spremembe tlaka. Upoštevamo še uklon valovanja za enojno rezo in dobimo:

$$I = I_{\max} \left[\frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi a \sin \theta / \lambda} \right]^2 \left[2 \cos \left(\frac{4\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + 2 \cos \left(\frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda} \right) + 1 \right]^2, \quad (26)$$

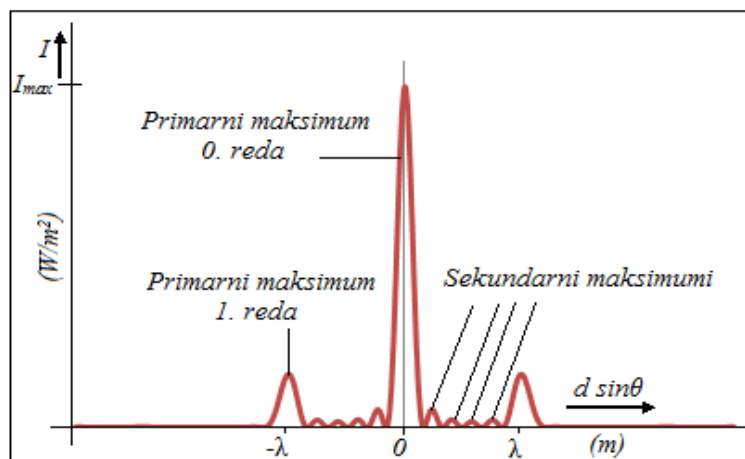
kjer je $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$ in $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$.



Slika 25: Graf intenzitete valovanja za petimi režami na oddaljenem zaslonu.

Na sliki 25 je prikazana uklonska slika valovanja na petih režah. Poleg centralnega maksimuma opazimo maksimume prvega reda in med njimi po tri sekundarne maksimume.

Intenziteta valovanja za šestimi širokimi režami



Slika 26: Graf intenzitete valovanja za šestimi režami.

V tem poglavju si bomo ogledali še intenziteto valovanja za šestimi režami. Izpeljava enačbe tudi tu temelji na kazalčnem diagramu (slika 23), kjer iščemo vsoto amplitude spremembe tlaka v nekem poljubnem kotu θ .

$A_p = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6$, kjer velja, da je $A_1 = A_6$, $A_2 = A_5$ in $A_3 = A_4$. Poiščemo še povezavo med koti δ, γ in α : $\delta = \delta + \alpha = 2\delta + \gamma$, kjer velja $2(\pi - \delta) + 5\delta = 2\pi$, zato je $\delta = 5\delta/2$, $\gamma = 5\delta/2 - 2\delta = \delta/2$ in $\alpha = 3\delta/2$. Ker velja, da je $A_1 = A_0 \cos \delta$ in $A_2 = A_0 \cos \alpha$, dobimo iz zgornjih enakosti slednji izraz

$$A_p = 2A_0 \left(\cos \frac{5}{2}\delta + \cos \frac{3}{2}\delta + \cos \frac{\delta}{2} \right)$$

in sedaj, če upoštevamo, da je $I \propto A_p^2$ in $\delta = 2\pi/\lambda d \sin \theta$, potem je :

$$I = I_{max} \left[\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right]^2 \cdot \left[\cos(5\delta/2) + \cos(3\delta/2) + \cos(\delta/2) \right]^2 \quad (27)$$

kjer je $\beta = 2\pi/\lambda \cdot a \sin \theta$ in $\delta = 2\pi/\lambda \cdot d \sin \theta$.

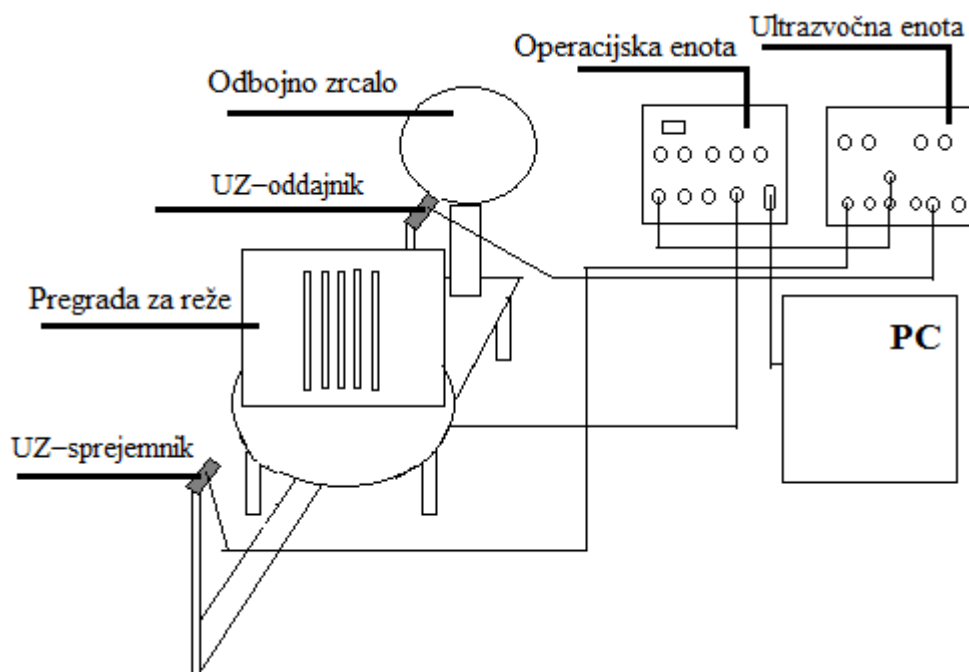
Na sliki 26 je prikazana uklonska slika valovanja na šestih režah. Širina centralnega maksimuma in maksimumov prvega reda se oža z večjim številom rež, lege maksimumov pa ostanejo na istih mestih. Med glavnimi maksimumi, so štirje sekundarni maksimumi, ki postajajo čedalje šibkejši, z večanjem števila rež.

Hipoteza

- Primerjaj izmerjene vrednosti jakosti ultrazvoka z teoretičnimi izračuni v odvisnosti od kota uklona.
- Smer ojačitve in oslabitve jakosti ultrazvoka je odvisna od valovne dolžine ultrazvoka in od oblike rež.

Opis meritve

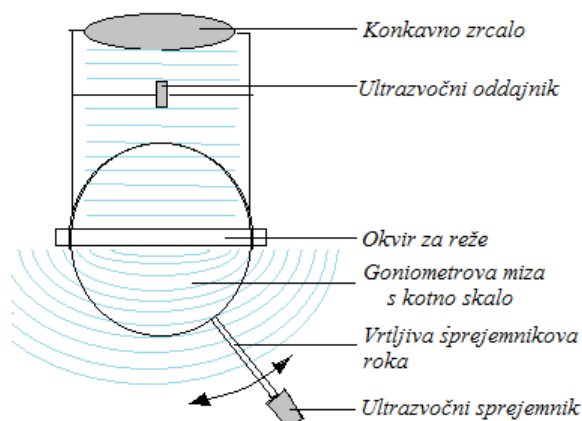
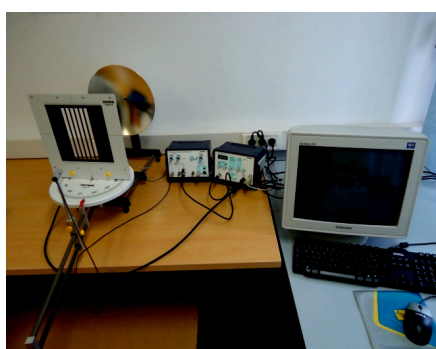
Merilni sistem za izvedbo meritve intenzitete valovanja pri uklonu in interferenci ultrazvoka na režah je prikazan na sliki 27. Sestavljajo ga goniometer z odbojnim zrcalom, operacijska enota, ki upravlja gibanje goniometra, ultrazvočni oddajnik in sprejemnik z ultrazvočno enoto, reže in osebni računalnik za zajemanje in prikaz podatkov.



Slika 27: Shematični prikaz postavitve eksperimenta za merjenje uklona ultrazvoka na režah.

Ultrazvočno valovanje ustvarja ultrazvočni oddajnik, ta je usmerjen proti konkavnemu zrcalu in je nameščen v fokus pred konkavnim zrcalom. Na ta način

dobimo po odboju od zrcala ravne valove, ki so usmerjeni na režo. Ultrazvočno valovanje, ki prehaja skozi reže, detektira ultrazvočni sprejemnik premera 5 mm. Pritrjen je na vrtljivi roki, ki se vrti okrog centra mize goniometra, na katero so postavljene reže. Na mizi goniometra je postavljen okvir za reže, v katerega ustavljamo različne reže. Pripomočki za sestavo reže so kovinske plošče različnih dimenzij, pa tudi plošče z že izdelanimi režami. Ultrazvočni sprejemnik in oddajnik sta povezana z ultrazvočno enoto, ta pa z operacijsko enoto goniometra, ki krmili zajemanje podatkov med meritvijo.



Slika 28: Fotografija eksperimenta za merjenje uklona ultrazvoka na režah in tloris goniometra.

Operacijska enota goniometra krmili roko sprejemnika, tako da lahko avtomatsko spreminjamo kot roke, na katero je montiran sprejemnik. Na ta način izmerimo intenziteto ultrazvoka za režami v razponu kotov od -90 do 90 stopinj, glede na vpadno smer valovanja.

Navodila

Za primer vzemimo meritev uklona ultrazvočnega valovanja z valovno dolžino $8,6$ mm na dveh širokih režah. V pregrado za reže vstavimo ploščo z režama. Pregrada ima milimetrski trak, tako lahko natančno namestimo širino rež in razmik med njima. V našem primeru smo izbrali dve reži s širino $a = 11$ mm in razmikom med njima $d = 41$ mm. Na osebni računalniku določimo želeni razpon kotov merjenja intenzitete ultrazvoka za režama. Merili bom med kotoma $+90^\circ$ in -90° po korakih 1 stopinje.

Dobljen spekter intenzitete ultrazvoka v odvisnosti od kota je prikazan na sliki 29(modra črta).

Iz enačbe (10) izračunamo kote ojačitev za ta primer interference:

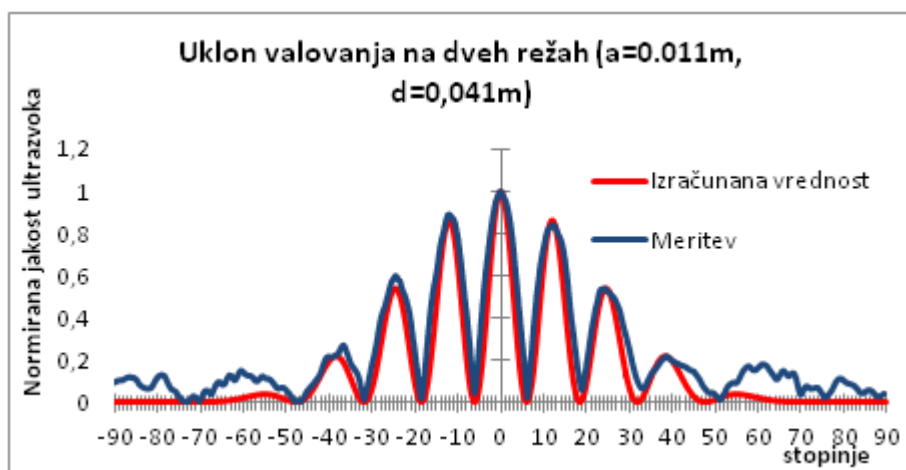
$$\theta_0 = 0, \theta_1 = \pm 12.1^\circ, \theta_2 = \pm 24,8^\circ, \theta_3 = \pm 39^\circ, \theta_4 = \pm 57^\circ.$$

S pomočjo enačbe (11) pa dobimo kote oslabitev interference:

$$\theta_0 = \pm 6^\circ, \theta_1 = \pm 18,3^\circ, \theta_2 = \pm 31,6^\circ, \theta_3 = \pm 47,2^\circ, \theta_4 = \pm 70,7^\circ.$$

Iz slike 30 vidimo, da koti ojačitev in oslabitev interference povsem sovpadajo s teoretičnimi izračuni.

Izmerjene vrednosti intenzitete sipanega valovanja za režama primerjamo s teoretično napovedjo (slika 29, rdeča črta), ki jo podaja enačba (23).



Slika 29: Graf primerjave teoretične interference ultrazvočnega valovanja za dvema velikima režama s praktično meritvijo.

Vidimo, da se teoretično izračunan spekter tesno prilega izmerjenemu spektru intenzitete ultrazvoka v odvisnosti od kota za dvema režama širine 11 mm in razdalje med režami 41 mm. Pri večjih kotih opazimo v izmerjenem spektru šum, ki je posledica sipanja ultrazvoka v okolici merilne naprave.

Na podoben način opravimo meritve intenzitete zvočnega valovanja za ozkimi režami širine $a=1\text{mm}$ (ožje od valovne dolžine) razmaknjenimi za $d=16\text{mm}$ in širokimi režami širine $a=11\text{mm}$ (širše od valovne dolžine) razmaknjenimi za $d=16\text{mm}$. Meritve

izvedemo za primere interference zvočnega valovanja za dvema, tremi, štirimi, petimi in šestimi ozkimi in širokimi režami. V vseh primerih normiraj intenziteto valovanja na izmerjeno vrednost pri kotu 0 stopinj.

Natančnejša navodila se nahajajo v dodatku na koncu dokumenta. V njih je prikazan tudi postopek, kako preverimo pravilno delovanje sistema.

Analiza meritev

- Prikaži pet meritev jakosti ultrazvoka od kota pri uklonu na eni reži. Spreminjaj širino reže v območju od 1 mm do 15 mm. Na grafih označi kot prve oslabitve. Na grafu prikaži sinus kota prve oslabitve kot funkcijo širine reže. Iz grafa, s pomočjo metode najmanjših kvadratov in linearnega modela poišči valovno dolžino ultrazvoka. Oцени napako.
- Za vsako meritev pokaži izmerjeno jakost ultrazvoka v odvisnosti od kota in izračunano jakost ultrazvoka v odvisnosti od kota. Na grafu meritve označi ključne oslabitve in ojačitve
- V tabeli prikaži vrednosti ojačitev in oslabitev za vsako meritev posebej. Zraven pripiši tudi izračunane vrednosti.
- Razloži izvor šuma, ki nastane pri večjih kotih uklona

Uporabljena oprema

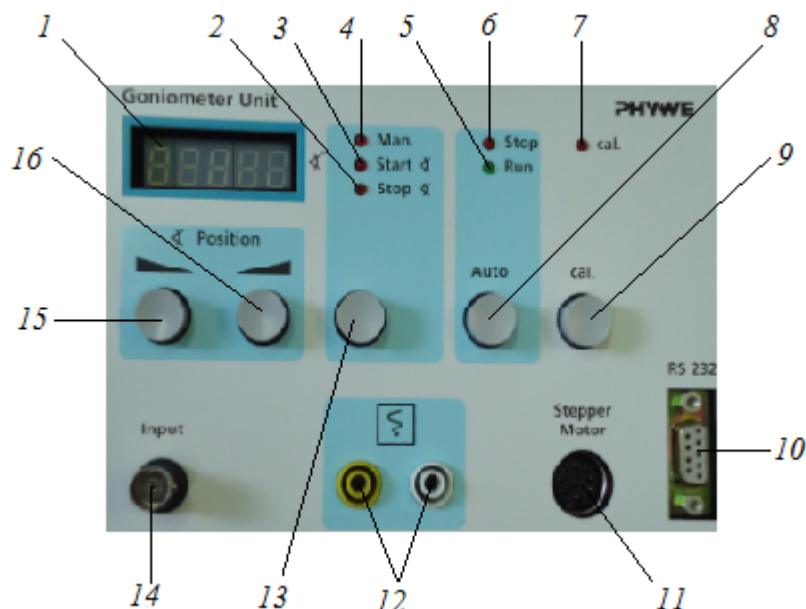
1. Goniometer z odbojnim zrcalom (13903.00),
2. Operacijska enota goniometra (13903.99),
3. Ultrazvočna enota (13900.00),
4. Napajalnik za ultrazvočno enoto, 5 VDC, 12 W (13900.99),
5. Ultrazvočni oddajnik (13901.00),
6. Ultrazvočni sprejemnik (13902.00),
7. Okvir rež (13904.00),
8. Uklonske reže (13905),
9. 9-pin SUB-D vtičnica za RS 232 podatkovno povezavo s PC-jem (14602.00),
10. Metrski trak (09936.00),
11. Kontrolna in napajalna žica kotnega motorja goniometra BNC (07542.11),
12. Koaksialni kabel (07542.00),
13. Adapter za koaksialni kabel (07542.27),
14. Phywe measure 4 programska oprema (14523.61),
15. Digitalni multimeter (07128.00).

Literatura

1. Bratina, S., *Postavitev in preizkušanje merilne opreme za študentske inštrumentalne vaje z ultrazvokom*, 2012, University of Nova Gorica: Nova Gorica.
2. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J, *Fundamentals of Physics*. 4 ed2004, New York: John Wiley & Sons.
3. Krautkramer, J., Krautkramer, H. , *Ultrasonic Testing of Materials*1990, UK: Hardcover.

Dodatek

Operacijska enota goniometra

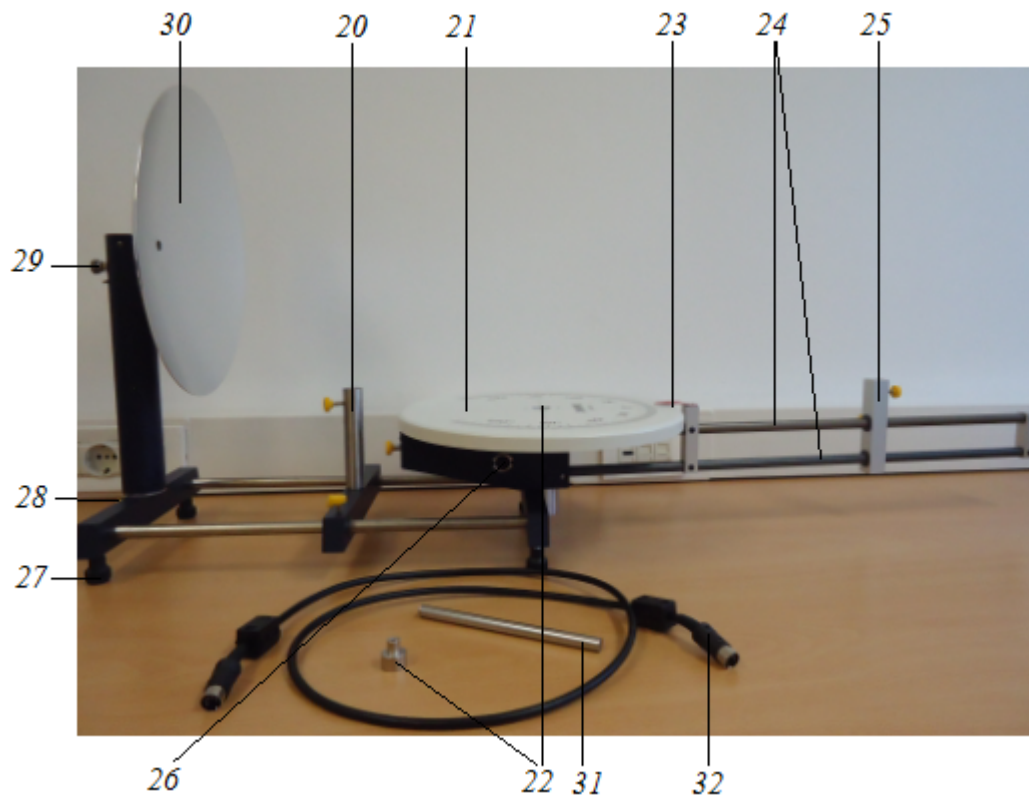


Slika 30: Pogled na čelno ploščo operacijske enote goniometra.

1. 5-mestni monitor za odčitavanje kota;
2. LED »stop« za določanje končnega kota;
3. LED »start« za določanje začetnega kota;
4. LED »man« za ročno upravljanje enote;
5. LED »run«, led lučka gori, ko se merilna roka goniometra premika, (med meritvijo ali pa ko se giblje na začetno mesto ali se vrača s končnega mesta mirjenja);
6. LED »stop«, lučka sveti, ko se merilna roka ustavi;
7. LED »cal«, označuje, da je operacijska enota vključena v kalibracijskem načinu;
8. »Auto« tipka je namenjena zagonu meritve ali prekinitvi merjenja;
9. »Cal« tipka za umirjanje merilne roke v kotu 0, pritisnemo dvakrat, na začetku in na koncu kalibracije;
10. 9-pin SUB-D vtičnica za RS 232 podatkovno povezavo z osebnim računalnikom;
11. »Step motor« vtičnica za povezavo s kotnim motorjem na mizi goniometra 13903.99, je napajalni in kontrolni priključek;
12. vtičnica za izhodni analogni podatek kota;
13. Tipka za izbiranje funkcije: z zaporednim pritiskom na tipko izbiramo operacijsko možnost ročnega upravljanja, izbiro začetnega kota in končnega kota merjenja;
14. BNC vtičnica za analogni vhod;
15. Tipka za določanje kota, v ročnem načinu uporabimo za določanje kota v negativni smeri in za kalibracijo operacijske enote;

16. Tipka za določanje kota, enako kot tipka 15, le v pozitivni smeri.

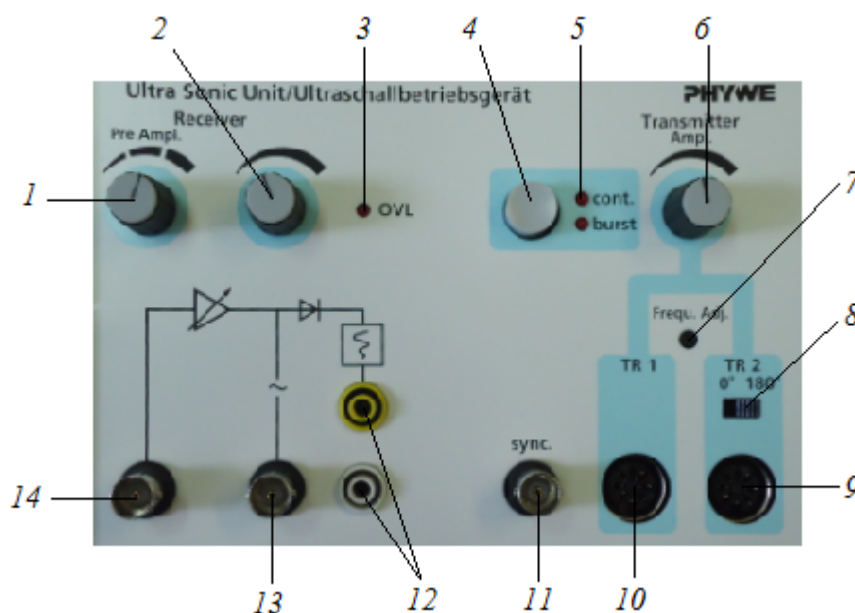
Goniometer z odbojnim zrcalom



Slika 31: Goniometer z odbojnim zrcalom.

- 20. Premični nosilec oddajnika,
- 21. Miza goniometra,
- 22. Centralni vtič za nosilec rež,
- 23. Označevalec kota,
- 24. Premična roka sprejemnika,
- 25. Premični nosilec sprejemnika,
- 26. Vtičnica kotnega motorja goniometra,
- 27. Nosilne regulacijske noge goniometra,
- 28. Pritrdilni vijak nosilca konkavnega zrcala,
- 29. Vijak za nastavitev kota konkavnega zrcala,
- 30. Konkavno zrcalo,
- 31. Distančnik za nastavitev kota zrcala in višine ter smeri oddajnika,
- 32. Kontrolna in napajalna žica kotnega motorja goniometra.

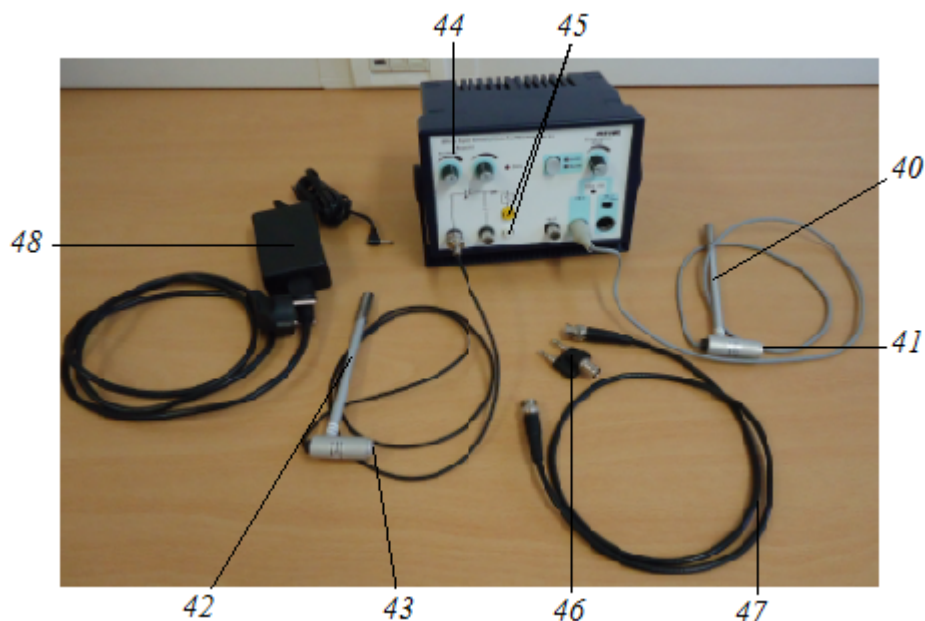
Ultrazvočna enota



Slika 32: Ultrazvočna enota.

1. Ojačenje ultrazvočnega signala (Pre Ampl) v treh stopnjah;
2. Neprekinjena nastavitev ojačenja ultrazvočnega signala;
3. LED dioda (OVL) signalizira prevelik ultrazvočni signal;
4. Tipka za nastavitev načina delovanja, ultrazvočni oddajnik lahko deluje neprekinjeno (cont.) ali v impulzih (burst);
5. LED diode označujejo, kateri način je izbran;
6. Gumb za večanje ali manjšanje oddajne amplitude;
7. Stikalo za fino nastavljanje oddajnega signala (Freq. Adj.);
8. Stikalo za spremembo faznega zamika ultrazvočnega oddajnika 13901.00;
9. Vtičnica ultrazvočnega oddajnika 13901.00;
10. Vtičnica ultrazvočnega oddajnika 13901.00;
11. Izhod za spremljanje oddajnega signala;
12. Prečiščen izhod sprejetega signala;
13. Izhodna izmenična napetost sprejetega signala;
14. Priklop ultrazvočnega sprejemnika 13902.00.

Ultrazvočna enota deluje na frekvenci 40 kHz. Leva stran čelne plošče ultrazvočne enote je sprejemni del, desni del pa je oddajni del. Potrebno je slediti sprejemnim amplitudam, da ne prihaja do premočnega signala. To lahko reguliramo z zmanjševanjem oddajne amplitude in zmanjševanjem ojačenja sprejemnega signala. Valovna dolžina ultrazvočnega valovanja oddajnika je $\lambda \cong 8,6 \text{ mm}$.



Slika 33: Komplet ultrazvočne enote.

- 40. Ultrazvočni oddajnik,
- 41. Izhodna odprtina ultrazvočnega oddajnika,
- 42. Ultrazvočni sprejemnik,
- 43. Vhodna odprtina ultrazvočnega sprejemnika,
- 44. Ultrazvočna enota,
- 45. Izhod sprejemnega signala,
- 46. Adapter,
- 47. Koaksialen kabel,
- 48. Napajalna enota.

Navodilo za sestavo in povezavo goniometra

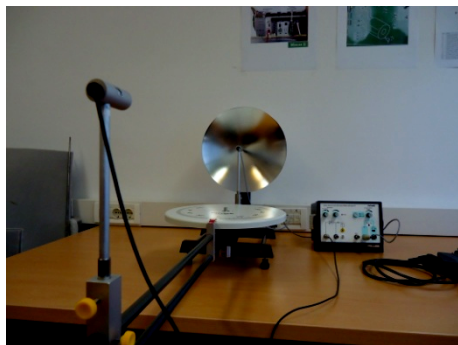
V prejšnjih poglavjih je predstavljena oprema za izvedbo instrumentalne naloge. Opremo je potrebno sestaviti, po naslednjem postopku.



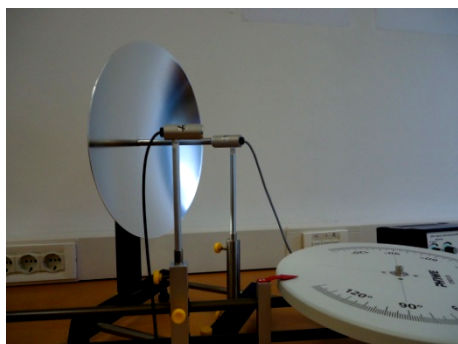
Z vijakom za regulacijo naklona konkavnega zrcala (29) je potrebno namestiti konkavno zrcalo (30), da bo postavljeno čim bolj vertikalno.



V središče konkavnega zrcala vstavimo distančnik (31). V nosilec oddajnika (20) vstavimo oddajnik (40) tako, da bo odprtina oddajnika (41) obrnjena proti distančniku. Pritrdimo oddajnik, nato vzamemo distančnik iz središča zrcala in pritrdimo na spodnji del nosilca oddajnika na razdaljo distančnika odmaknjeno od središča zrcala. To je 15,5 cm.

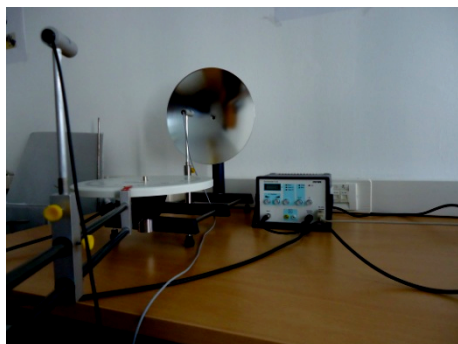


Vrtljivo sprejemno roko (24) poravnamo v položaj 0 na mizi goniometra (21). Premični nosilec sprejemnika (25) povlečemo do kraja proč od zrcala. V nosilec vstavimo sprejemnik (42) tako, da je sprejemna odprtina obrnjena (43) proti zrcalu.



Vrtljivo sprejemno roko povlečemo čim bliže zrcalu. Tako lahko sprejemnik postavimo v isto višino, kot je oddajnik. Zopet postavimo sprejemno roko v položaj 0 in sprejemnik poskušamo čim natančneje usmeriti v center konkavnega zrcala. Tako

sta oddajnik ultrazvočnega valovanja kot tudi sprejemnik ultrazvočnega valovanja usmerjena v središče zrcala.



Uporabimo kabel (32) in povežemo enoto goniometra s kotnim motorjem (26) na mizi goniometra. Izvedemo še preostale povezave. Uporabimo adapter (46) in koaksialni kabel (47) ter povežemo operacijsko enoto goniometra (14) z ultrazvočno enoto (45). Priklopimo še sprejemnik in oddajnik ultrazvočnega valovanja ter operacijsko enoto goniometra (10) z osebnim računalnikom, na katerem je instalirana programska oprema Measure 4.



Zgornja slika prikazuje povezavo goniometra z odbojnim zrcalom, operacijsko enoto goniometra, ultrazvočno enoto in kabel za povezavo z osebnim računalnikom.

Kotna kalibracija operacijske enote goniometra

Kotno kalibracijo z električno energijo je potrebno izvesti in prilagoditi s kotno lestvico na mizi goniometra. To je običajno potrebno le, če je instrument prvič uporabljen, ali pa ga zopet uporabimo po dolgem času. Poskrbimo, da je goniometer stabilno poravnan na stojnih nogah. Postopek za prilagoditev kota je sledeč:

- A) Preverimo, če je kabel (32) za povezavo povezan z operacijsko enoto goniometra.
- B) Operacijsko enoto goniometra izklopimo na hrbtni strani.
- C) Zopet vklopimo stikalo, obenem pritiskamo tipko »Cal« (9). Sedaj smo v prilagoditvenem načinu in zaslon instrumenta (1) izpiše »C -70«.
- D) Uporabimo tipke za naprej in nazaj (15) in (16), za premik premične sprejemne roke na pozicijo -70° .
- E) Pritisnemo tipko (13) in tedaj instrumentov zaslon prikaže izpis »C 70«.
- F) Uporabimo zopet tipke za naprej in nazaj (15) in (16), dokler premična sprejemna roka ne doseže kota 70° .
- G) Pritisnemo tipko (13) in instrumentov zaslon izpiše »070.0«. Sedaj smo zapustili postopek prilagoditve in se nahajamo v ročnem načinu.

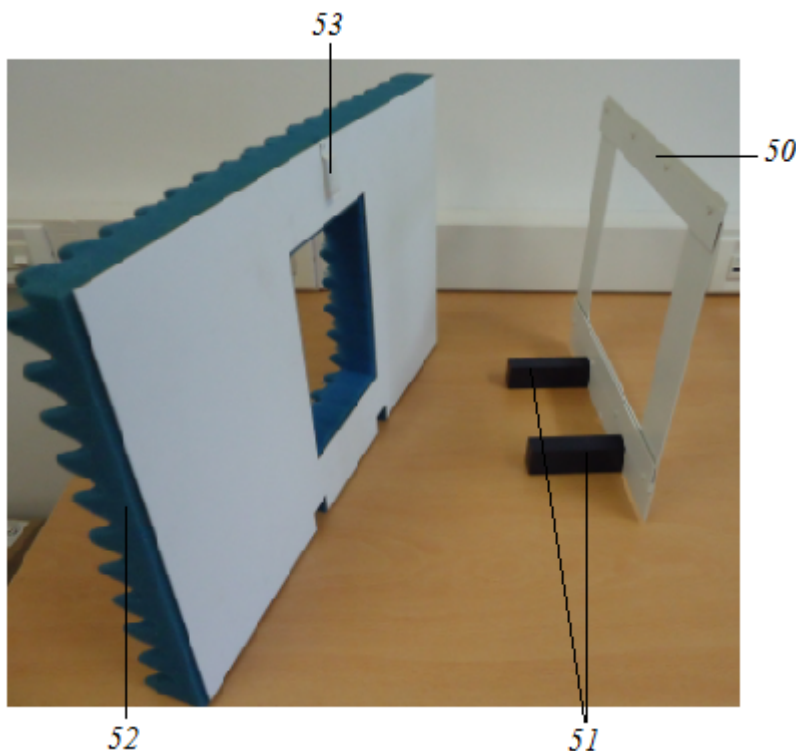
Sedaj potrebujemo še natančno določitev položaja 0 roke sprejemnika in kotnega motorja:

- A) Pritisnemo tipko »Cal« (9). Sprejemna premična roka je sedaj prosto premikajoča in zaslon instrumenta (1) je temen. Posvetila je signalna dioda »Cal« (7).
- B) Premaknemo sprejemno premično roko v položaj 0° .
- C) Zopet pritismo tipko »Cal« (9). Sprejemna premična roka ni več prosto premikajoča in na zaslonu je izpisano »000.0«. Zopet smo prešli iz kalibracijskega načina v ročnega. Operacijska enota goniometra je umirjena in instrument je pripravljen za izvedbo meritev.

Pregrada in okvir rež

Najprej vstavimo centralni vtič za nosilec rež (22). Potisnemo vijake na nogah okvirja rež (51) za dobro stabilnost. Okvir rež (50) vstavimo v vtič na mizi goniometra tako, da so noge okvirja usmerjene proti konkavnemu zrcalu. Okvir rež poravnamo, da je v

liniji z 90° na mizi goniometra. V okvir vstavimo režo, tako da je odprtina reže simetrična glede na linijo 0° na mizi goniometra. Sedaj lahko natakemo protizvočno pregrado (52) tako, da je spužvasti del obrnjen proti konkavnemu zrcalu, in je pritrdilni jeziček pregrade (53) na vrhu okvirja rež.



Slika 52: Okvir reže in protizvočna pregrada.

- | | |
|----|------------------------------|
| 50 | Okvir reže, |
| 51 | Noge okvirja reže, |
| 52 | Protizvočna pregrada, |
| 53 | Pritrdilni jeziček pregrade. |

Priprava eksperimenta za preizkus delovanja

Za preizkusni eksperiment izvedemo uklon ultrazvočnega valovanja za eno režo. Širina reže $a = 6 \text{ cm} = 0.06 \text{ m}$, $\lambda = 8,6 \text{ mm} = 0,0086 \text{ m}$. Režo moramo postaviti simetrično na os 0° , se pravi, da se mora začeti pri -3 cm in končati pri $+3 \text{ cm}$ na milimetrskem traku na okvirju reže. Najprej preklopimo operacijsko enoto goniometra na ročen način. Sprejemno premično roko postavimo v položaj 0° . Na ultrazvočni enoti na vtičnicah (12) s pomočjo voltmetra in gumbov (1), (2) in (6), nastavimo sprejemno napetost na maksimalno vrednost $3,5 \text{ V}$, da ne bi med merjenjem prihajalo do premočnega sprejema. Na osebni računalniku zaženemo program Measuring 4.

V zgornjem levem koto kliknemo na polje z rdečo piko. Odpre se nam aplikacija, v kateri moramo določiti kot območja merjenja uklona. Izberemo kot od -45° do $+45^\circ$. Ko to potrdimo, se nam odpre merilna stran. V okencu se izpišejo dve možnost: »Stop meritev« ali »Pojdi na začetni položaj«. Izberemo drugo možnost, merilna roka pa že potuje na začetno pozicijo -45° . Ko prispe, nam ponudi aplikacijo »Start meritev«. Po potrditvi steče merjenje. Na zaslonu lahko spremljamo graf merjenih količin, spreminjanje kota, merjena napetost v digitalni in analogni obliki. Measuring 4 program lahko izvede do 16 različnih merenj v enem aplikacijskem sklopu.

Če analiziramo dobljen graf vidimo, da je prvi minimum levo in desno v kotu $8,2^\circ$.

Ta rezultat lahko potrdimo tudi s teoretično z enačbo:

$$\sin\theta_{\min} = n \lambda/a, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad \lambda = 0.0086 \text{ m}, a = 0,06 \text{ m}, n = 1,$$

in tako dobimo, da je $\theta_{\min} = 8,24^\circ$.

Sedaj sta goniometer in oprema pripravljena za izvajanje meritev.