

21 Valovanje

Val na vrvi – Valovanje na struni – Gladinski valovi – Fronte in žarki – Odboj – Lom – Uklon – Zvočni valovi – Merjenje zvoka – Glas in sluh – Glasbila in glasba – Frekvenčni zamik – Valovno čelo – Energija

21.1 Val na vrvi

Vrv in val Vihtenje vrvi pokaže, da se ta zvija v valovih. Za bolj nadzorovano preučevanje položimo vrv na gladka tla. Z enim koncem naj bo pritrjena na steno in na drugem koncu prosto gibljiva. Tam jo primemo z roko in hitro trznemo desno-levo. Na vrvi se pojavi prečni "hrib", ki potuje proti steni z enakomerno hitrostjo c in pri tem ohranja svojo obliko. Rečemo, da je to *val*. Njegova oblika je odvisna od tega, kako smo zamahnili z roko, njegova hitrost pa od lastnosti in napetosti vrvi. Ob času $t = 0$ naj ima val obliko $s = f(x)$; ob kasnejšem času t je odmik vala pri razdalji x enak, kot je bil odmik vala pri razdalji $x - ct$. Gibanje vala torej opišemo z enačbo

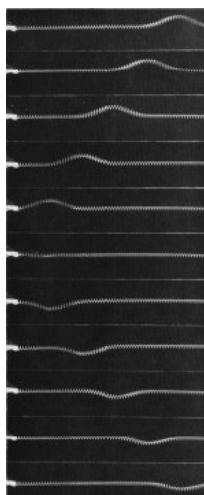
$$s(x, t) = f(x - ct). \quad (21.1)$$

Hitrost vala Naj se val giblje v desno s hitrostjo c glede na tla. Mislimo si, da se z vozičkom peljemo vstric njega. Potem val glede na nas stoji pri miru, skozenj – po njegovem obrisu – pa teče vrv v levo s hitrostjo c . Opazujmo izbrani kos vrvi dolžine dl in mase μdl , pri čemer μ označuje maso vrvi na dolžinsko enoto. Ob izbranem času se giblje opazovani kos vrvi po delu vala, ki ima krivinski radij R . Kako je radij velik, je odvisno pač od tega, koliko je val ukrivljen na tistem mestu. Kos vrvi torej za kratek čas kroži. Iz središča kroženja ga vidimo pod kotom $d\varphi = dl/R$. Nanj mora zato delovati centripetalna sila $\mu dl c^2/R$. Od kod pride ta sila? Na sprednjem in zadnjem koncu kosa vrvi vleče vsaka v svojo stran sila F , s katero je vrv napeta. Smeri teh sil ležita pod kotom $d\varphi$ in njuna rezultanta znaša $F d\varphi$. Izenačitev centripetalne sile s to rezultanto pove:

$$c^2 = \frac{F}{\mu}. \quad (21.2)$$

Hitrost vala je tem večja, čim močneje je vrv napeta in čim lažja je.

Odboj vala Ko pride val do stene, se odbije nazaj. Pri tem se oblika vala ne spremeni, le prezrcali se glede na vrv: hrib se spremeni v dolino in obratno. Ko se odbiti val vrne na izhodišče, se seveda spet odbije od naše roke (ki sedaj miruje) nazaj in tako potuje sem in tja po vrvi. Ker moti trenje s podlago, pa se gibanje prej ali slej ustavi, ponavadi celo prej, preden se odbije od naše roke.



Slika 21.1 Potujoči val na vrvi. Da se poskus lepše posreči, ima vrv obliko tanke kovinske spirale. Val potuje po njej proti levi, kjer je pritrjena na steno, in se odbije nazaj proti desni. (PSSC – Physical Science Study Committee)

Interferenca valov

Če medtem, ko se val vrača, pošlemo nov val vzdolž vrvi, se oba vala srečata. Ko prehajata drug skozi drugega, se zdi, kot da se njuni odmiki s ob vsakem času na vsakem mestu seštevajo: kjer pride vrh na vrh, se ustvari poudarjen vrh, in kjer pride vrh na dolino, se ustvari ravnina. Rečemo, da je to sestavljanje oziroma *interferenca* valov: $s = s_1 + s_2$. Ko prideta vala drug skozi drugega, nista nič spremenjena. Sestavimo lahko tudi dva vala, ki ju z vsakega konca vrvi pošlje tamkajšnji človek.

21.2 Valovanje na struni

Harmonično valovanje

Namesto da le enkrat trznemo z roko, lahko vrv vzbujamo z nihanjem s (krožno) frekvenco ω . V enem nihaju roke prepotuje nastajajoči val eno valovno dolžino. Odmik vala pri razdalji x ob času t je prav tak, kot je bil odmik roke ob prejšnjem času $t - x/c$. Vzdolž vrvi se zato s hitrostjo c širi val, ki ima obliko sinusoide z amplitudo s_0 in valovno dolžino λ :

$$s = s_0 \cos \omega(t - x/c) = s_0 \cos(kx - \omega t) \quad (21.3)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = 2\pi\nu$$

$$c = \lambda\nu = \frac{\omega}{k}.$$

Stoječe valovanje

Z odbitega konca se vrača enak val. Mislimo si neskončno dolgo vrv in glejmo le njen osrednji del. Z leve vanj prihaja val $s_0 \cos(kx - \omega t)$ in z desne $s_0 \cos(kx + \omega t)$. Vala se seštevata. Kakšna je njuna vsota? Za lažje računanje postavimo $s_0 = 1$. Spomnimo se izrekov za kosinus vsote in kosinus razlike (15.15) Med seboj ju seštejemo in dobimo izrek za vsoto dveh kosinusov ter nato iz njega

$$s = 2s_0 \cos kx \cos \omega t. \quad (21.4)$$

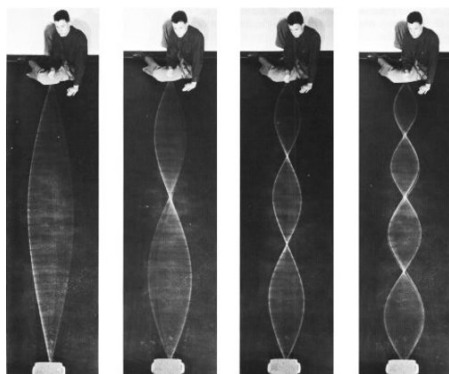
To je *stojече valovanje*. Vse točke na vrvi nihajo sočasno, njihove amplitude pa so različne: na nekaterih mestih, medsebojno

oddaljenih za $\lambda/2$, so amplitude enake nič; tam so *vozli* valovanja. Na sredini med vozli pa so amplitude maksimalne; tam so *hrbti* valovanja.

Lastno nihanje strune

Stoječe valovanje med dvema poljubnima vozloma se ne spremeni, če oba vozla pritrdimo in zunanje dele vrvi odrežemo. Enaki valovi, ki so prej prihajali od zunaj, zdaj nastajajo ob odbojih. Dolžina l obrezanega kosa vrvi je mnogokratnik polovične valovne dolžine: $l = N \cdot \lambda/2$, $N = 1, 2, 3 \dots$

Na obeh koncih pritrjeno napeto vrv poimenujemo *struna*. Na struni dolžine l so očitno možna le stojna valovanja s točno določenimi valovnimi dolžinami, to je s točno določenimi frekvencami $\nu = N \cdot c/2l$, pri čemer je hitrost c določena z napetostjo in maso strune. Rečemo, da so to *lastne frekvence* strune. Najnižjo med njimi poimenujemo *osnovna frekvenca*, druge pa *višje frekvence*. Struna lahko niha tudi z več lastnimi frekvencami hkrati, vendar tedaj njihova vsota ni stoječe valovanje, temveč potuje sem in tja med obema koncema. Katere lastne frekvence se bodo pojavile v struni, je odvisno od tega, kako jo vzbujamo.



Slika 21.2 Stojno valovanje na struni. Struno vzbuja vrteč se mehanizem, človek pa uravnava njeno napetost ter s tem določa pravšnjo hitrost valovanja, da se pojavijo stojni valovi. Prikazana so štiri najnižja lastna nihanja. (PSSC – Physical Science Study Committee)

Lastna nihanja teles

Podobno kot napeta struna nihajo tudi napeta opna in nenapeta, a elastična telesa: na enem koncu vpet jeklen jeziček, na sredini podprta bronasta plošča ali obešen cerkveni zvon. Vsa ta telesa imajo svoje lastne frekvence. Namesto vozelnih točk pa se na ploščatih telesih pojavljajo vozelnice črte. Vsaka lastna frekvenca ima svoj vzorec točk ali črt. Na vodoravni plošči jih lahko naredimo vidne tako, da nanjo posujemo prah in jo na robu vzbujamo z drsnim lokom.

Dovolj hitra nihanja strun in drugih teles slišimo. Takšna je, na primer, jeklena struna dolžine 1 m in s presekom 1 mm^2 , napeta s silo 10 kp, ki ima – po računu – osnovno frekvenco nekaj čez 110 nihajev na sekundo. Enoti $1/s$ rečemo tudi *hertz* (Hz).

21.3 Gladinski valovi

Težni valovi

Kamen, ki ga vržemo v ribnik, naredi na gladini krožne valove, ki se širijo navzven. Na morju pa valove nenehno delajo vetrovi in

občasno tudi potresi. Opišemo jih tako kot pri vrvi: z amplitudo, valovno dolžino, frekvenco in hitrostjo. Sila, ki jih poganja, je teža, zato jim rečemo *težni valovi*. Z ladje opazimo, da se dolgi valovi gibljejo hitreje kot kratki. Pri obali pa se zdi, da bolj ko je morje plitvo, počasnejši so valovi.

V globoki vodi

Opazujemo valove, ki se gibljejo vzdolž pomola! Morje naj bo precej globlje od valovne dolžine opazovanih valov. Ti naj se gibljejo od leve proti desni s hitrostjo c glede na pomol. Zamašek, ki plava na gladini, se dviguje in spušča ter s tem kaže frekvenco valov. Hkrati pa se giblje v desno, ko je na grebenu, in v levo, ko je v dolini. Desni premik je enak levemu (v resnici je malo večji). Zato predpostavimo, da površinski del vode, ki obdaja zamašek, kroži s hitrostjo v glede na pomol. Radij kroga je enak amplitudi valov, torej $v = 2\pi s_0 \nu$. V mislih se peljimo z vozičkom po pomolu v desno s hitrostjo c . Val sedaj glede na voziček miruje, morje pa teče po valovnem obrisu od desne proti levi. Na vrhu vala ima hitrost $c - v$ in v dolini $c + v$. Povečanje kinetične energije je enako zmanjšanju težne energije, kar vodi do izraza $2\rho g s_0 = 2\rho c v$. Ko vstavimo izraz za hitrost v , dobimo:

$$c^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} = \frac{g}{k}. \quad (21.5)$$

Hitrost valov torej res narašča z njihovo dolžino. Val z dolžino 10 m, na primer, potuje po globokem morju s hitrostjo okrog 4 m/s. Poskusi kažejo, da je enačba uporabna vse do globine $H \approx \lambda$.

V plitvi vodi

Če je globina vode mnogo manjša od dolžine vala, deli vode ne morejo več krožiti, ampak postane njeno gibanje neodvisno od globine. Naj bo globina vode H . Po njej se naj giblje val od leve proti desni s hitrostjo c . Gibljimo se še mi vzporedno z njim! Spet velja, da je povečanje kinetične energije v dolini enako zmanjšanju težne energije preko dveh amplitud. Le spremembo hitrosti v sedaj računamo iz pogoja o ohranitvi pretoka: $(H + s_0)(c - v) = (H - s_0)(c + v)$. Če predpostavimo $s_0 \ll H$ in zato $v \ll c$, dobimo

$$c^2 = gH. \quad (21.6)$$

V plitvi vodi se valovi res gibljejo počasneje. Val z dolžino 10 m, na primer, se v vodi globine 1 m giblje s hitrostjo 3 m/s, kar je za 1 m/s manj kot prej v globoki vodi. Ker je globina proti obali čedalje manjša, se valovi čedalje bolj gostijo. Hkrati se tudi njihovi zadnji deli narivajo na prednje - valovom naraščajo grebeni do te mere, da se prekucnejo naprej. To so tisti beli valovi, ki pljuskajo ob obale.



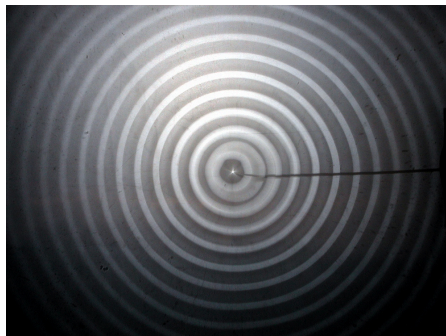
Slika 21.3 Lomljenje valov ob obali. Morski val se v plitvi vodi giblje počasneje kot v globoki. Ko vpada na obalo, se zato njegovo zadnji deli narivajo na prednje. Val se lomi. Prikazan je veličasten val v Kaliforniji. (Anon)

Podmorski potresi lahko ustvarijo valove z dolžino 100 km. Za tak val je celo ocean globine 1 km plitva voda in po njem se giblje z veliko hitrostjo 100 m/s. Ladja na morju vala sploh ne opazi, ker je predolg in preblag. Ko pa pride do obale, se upočasni, naraste do višine nekaj metrov in uniči vse pred seboj. To je *tsunami*, strah in trepet obalnih prebivalcev.

Kapilarni valovi Privzeli smo, da gladinske valove poganja le težnost. Površinsko napetost, ki tudi prispeva svoj del, smo zanemarili. To je v redu, dokler so valovne krivine dovolj blage, to je, dokler so valovi dovolj dolgi. Poskusi pokažejo, da je to dovoljeno vse do valovne dolžine okrog 5 cm.

21.4 Fronte in žarki

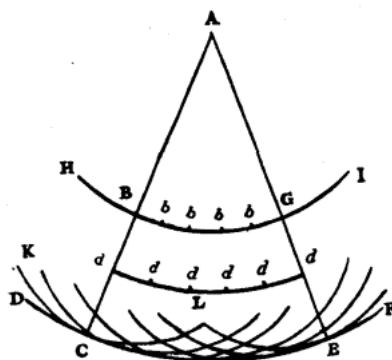
Valovna kad Če hočemo nadzorovano preučevati gladinske valove, moramo najprej izdelati pripravo za njihovo tvorjenje in širjenje. Najbolj priročna je plitva steklena kad z vodo. Valovanje v njej vzbuja s kroglico ali vodoravno palico, ki ju premikamo gor in dol s kolesjem z ročico. Primerna vzbujevalna frekvenca je 10 Hz, kar ustvarja kapilarne valove z dolžino ~ 2 cm. Kroglica ustvarja krožne valove in palica ravne valove. Dno kadi je ob robovih položno dvignjeno, da blaži odboje od sten.



Slika 21.4 Krožno valovanje na vodi. Vzbuja ga nihajoča kroglica v središču. Valovni grebeni in doline so koncentrični krogi in se širijo navzven. (Harvard University)

Fronte in žarki Pregled nad trenutno sliko ravnega ali krožnega valovanja kažejo kar grebeni ali doline valov – *valovne fronte*. Valovanje potuje pravokotno nanje. To lahko označimo s kratkimi puščicami. Če ustrezne puščice povežemo, dobimo *žarke*. Žarki kažejo smer valovanja in so pravokotni na fronte. Valovanje prikažemo s frontami ali z žarki; slednje je ponavadi lažje.

Elementarni valovi Vsako točko na izbrani fronti lahko obravnavamo kot izvor krožnih "elementarnih" valov. Ti valovi med seboj interferirajo in njihova ovojnica ustvarja novo fronto. To je *princip elementarnih valov* (HUYGENS). Ravna fronta ustvarja ravno fronto in krožna fronta ustvarja krožno fronto.



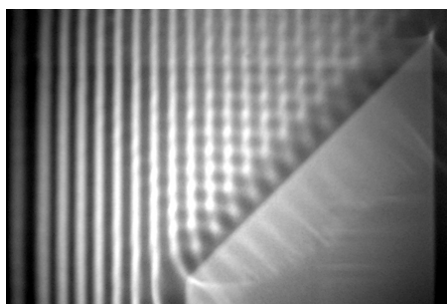
Slika 21.5 Princip elementarnih valov. Vsak del krožne fronte BG je izvir elementarnih krožnih valov. Ti med seboj interferirajo in tvorijo novo krožno fronto CB. Izvorna fronta je lahko poljubne oblike. (Huygens, 1678)

Elementarni valovi se, s postuliranjem, širijo samo naprej. Njihova hitrost je odvisna od globine kadi. Če je kad neenakomerno globoka, se oblika front ustrezno spreminja.

21.5 Odboj

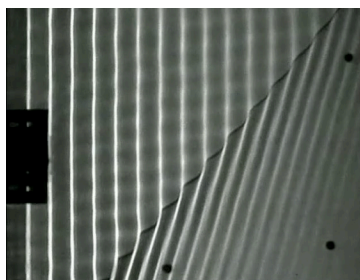
Pravokotni vpad Kako se vedejo valovi ob vpadu na oviro? V kad postavimo zid – navpično ravno ploščo, ki sega nad gladino. Ko ravna fronta vpade na ta zid pravokotno, se odbije naravnost nazaj: ob vsaki točki zida namreč sočasno zanihajo elementarni izvori in njihova ovojnica je spet ravna fronta. Ker vodna gladina ni privezana na zid, ampak lahko po njem drsi gor in dol, se grebeni valov odbijejo kot grebeni in doline kot doline. Pred zidom zato nastaja stojno valovanje, ki ima ob zidu nihalne maksimume.

Poševni vpad Pri poševnem vpadu pod kotom α_i glede na normalo se valovanje odbije na drugo stran normale pod odbojnim kotom α_r . Kaže, da je ta kot enak vpadnemu.



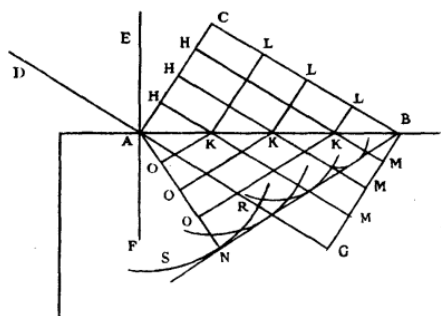
Slika 21.6 Odboj valovanja. Vodni valovi prihajajo z leve in se na poševni oviri odbijajo navzgor. Kjer se odbiti grebeni križajo z vpadnimi, je vidna njihova ojačitev. (Anon)

Voda ob vsaki točki ovire je izvor elementarnih valov. Morda lahko iz njihove interference ugotovimo, kako se vpadajoče fronte odbijajo?



Slika 21.8 Lom valov. Vodni valovi vpadajo z leve na poševni rob plitvine in se lomijo. Njihova hitrost in valovna dolžina se zmanjšata, frekvenca pa ostane ista. Vidni so tudi šibki odbiti valovi. (Anon)

Kakšna je smer lomljenega valovanja, poskusimo izpeljati iz principa elementarnih valov, prav kakor pri odboju.



Slika 21.9 Lomni zakon, izpeljan iz principa elementarnih valov. (Huygens, 1678)

Razmislek je podoben kot prej. Razlika je le v tem, da velja $CB/c_i = AN/c_t$, zato

$$\frac{\sin \alpha_i}{\sin \alpha_t} = \frac{c_i}{c_t}. \quad (21.8)$$

To je že poznani lomni zakon (12.3). Prepuščeno valovanje je prav takšno kot pri pravokotnem vpadu, saj je naravi vseeno, v katero smer potujejo valovi po plitvini. To pomeni, da ima isto frekvenco, a manjšo hitrost in krajšo valovno dolžino kot vpadno valovanje. Lomni kot je manjši od vpadnega – valovanje se lomi proti vpadni pravokotnici.

Popolni odboj Namesto da spuščamo valove na območje z manjšo hitrostjo, jih lahko spuščamo obratno. Poskusa ni treba zares opraviti, saj lahko v mislih zavrtimo prejšnji poskus nazaj. Lomni zakon velja v nespremenjeni obliki. Le valovanje se zdaj lomi proč od vpadne pravokotnice. Težava nastane, če je vpadni kot tako velik, da lomni kot preseže 90° . Sklepamo, in poskus to potrdi, da tedaj ne pride več do loma, ampak se celotno valovanje odbije nazaj po odbojnem zakonu. Rečemo, da je to *popolni odboj*. Mejni kot zanj znaša $\sin \alpha_i = c_i/c_t$. Pri svetlobi smo ga že spoznali [12.3].

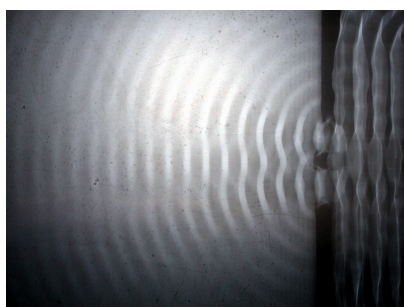
21.7 Uklon

Dosedanje ovire so bile razsežne: njihove robove smo postavili v neskončnost. Kako pa se ravno valovanje širi skozi odprtino v zidu ali mimo njegovega roba?

Ozka reža Najpreprostejša je ozka reža v ravnem zaslonu, na katerega vpada ravno valovanje. Reža naj bo mnogo ožja od valovne

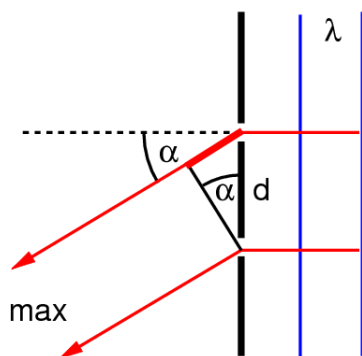
dolžine. Nihanje vode v njej ima potem iste posledice, kot da bi tam vodo zbujali s kroglico: reža "ustvarja" krožno valovanje. Rečemo, da se valovanje na reži *uklanja*.

Dve reži Kaj pa dve reži na medsebojni oddaljenosti d , primerljivi z valovno dolžino? Nanju naj pravokotno vпада ravno valovanje. To sta potem dva točkasta izvora, ki nihata sočasno in ustvarjata vsak svoje krožne elementarne valove. Oboji se seštevajo v skupno interferenčno sliko.



Slika 21.10 Ukon valov za dvema režama, na kateri z desne vпада ravno valovanje. Uklonjeno valovanje je v nekaterih smereh ojačano, v drugih oslabljeno. (Harvard University)

Na določenih mestih je uklonjeno valovanje ojačano. To je tam, kjer je razlika poti od obeh izvorov enaka mnogokratniku valovne dolžine λ .



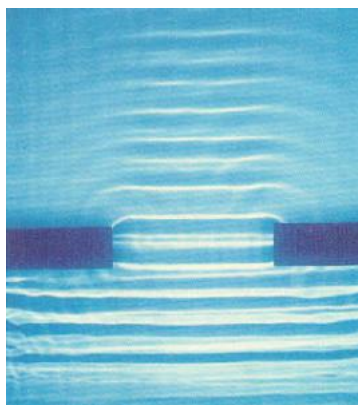
Slika 21.11 K uklonu na dveh režah. Prikazana je smer proti oddaljenemu maksimumu. Žarka do njega sta skoraj vzporedna.

Če opazujemo valovanje pri veliki oddaljenosti od zaslona, ležijo ojačitve v smereh α , ki so določene s pogojem

$$d \sin \alpha = N\lambda, N = 0, 1, 2 \dots \quad (21.9)$$

Enačba omogoča, da določimo valovno dolžino vodnega valovanja, če izmerimo enega ali več ojačitvenih kotov po prehodu skozi dve reži. Če uporabimo več rež z enako medsebojno razdaljo, ostanejo smeri curkov nespremenjene, curki sami pa so ojačani in zoženi.

Široka reža Ko valovna fronta zadene zid, doprinašajo k njenemu napredovanju le tisti elementarni izvori, ki jim zid ne zapira poti. Odprt izvor tik ob robu zida nima dejavnih sosedov na zaprti strani, zato njegovo valovanje ne interferira z njihovimi in se – v prvem približku – širi za rob v nespremenjeni, polkrožni obliki.



Slika 21.12 Uklon valov za široko režo. Vodni valovi vpadajo na režo v oviri. Za njo nastaja curek valovanja, katerega robovi so uklonjeni proč od prvotne smeri. (University Melbourne)

Uklon za robom zida tudi kaže, kakšen uklon je pričakovati za kratkim zidom ali za ozko režo v zidu; obe oviri namreč sestavljata po dva robova. Opazovanja potrdijo: pri prehodu skozi režo se valovanje uklanja navzven in pri vpadu na zid se uklanja navznoter. Uklon je tem močnejši, čim ožja je ovira v primerjavi z valovno dolžino.

21.8 Zvočni valovi

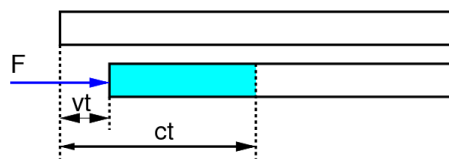
Kompresijski valovi

Nihajočo struno slišimo – očitno se njeni tresljaji prenašajo po zraku do ušes kot neke vrste valovi. Recimo jim *zvočni valovi* ali kar *zvok*. Da je za širjenje zvoka res potreben zrak, pokaže poskus z zvoncem pod izčrpano posodo. Zvok se širi tudi pod vodo, kakor ve vsak, ki se je kdaj potapljal. Tudi skozi tanko steno slišimo: zvok torej prav tako potuje skozi trdnine. Ker zrak in voda nista strižno elastična, zvočni valovi ne morejo biti *prečni* na smer gibanja, kakor so, na primer, pri struni ali opni.

Predstavljamo si, da so valovi *vzdolžni*: deli zraka nihajo v smeri valovanja in tvorijo zaporedne zgoščine in razredčine. Rečemo, da so to *kompresijski valovi*. Valovi se uklanjajo in odbijajo: slišimo glasove izza stavb in odmeve od ukanja v gorah.

Hitrost zvoka

Kakšna je hitrost zvoka? Od česa je odvisna?



Slika 21.13 Shema za izpeljavo hitrosti zvoka v plinu ali tekočini.

Predstavljajmo si vodoravno cev preseka S , napolnjeno s plinom. Na enem koncu naj začne nanj delovati bat s silo F . Pred sabo ustvarja čedalje daljšo homogeno zgoščino, katere vsak del se giblje s hitrostjo v , njeno čelo pa s hitrostjo c . V času t prepotuje valovno čelo razdaljo ct ; masa nastale zgoščine znaša $m = \rho Sct$. Bat medtem prepotuje razdaljo vt . Za toliko se nastala zgoščina skrči. Sila bata ima dve posledici: skrči zgoščino relativno za vt/ct

in podeli ji hitrost v . Prvo zapišemo kot $F = KSv/c$ in drugo kot $F = mv/t$. Po izenačenju obeh izrazov dobimo

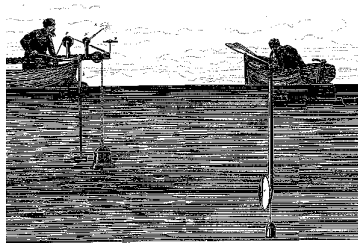
$$c^2 = \frac{K}{\rho}. \quad (21.10)$$

Hitrost je neodvisna od frekvence. Ista enačba velja tudi za tekočine. Pri plinih dodatno vemo, da znaša njihova stisljivost $K = p$ [20.4]. Pri trdninah pa moramo upoštevati, da se elastična palica ne krči in razteza samo vzdolžno, ampak se hkrati tudi prečno debeli in tanjša. Hitrost zvoka je zato v trdnini odvisna tudi od tega, kakšne oblike je telo: po okrogli palici se širi drugače kot po plošči ali po neomejenem sredstvu.

- Stoječi zvok** Po zgledu strune, na kateri so možna le valovanja s točno določenimi frekvencami, pričakujemo isto za stolpec zraka, ki je zaprt v cevi. Razlika je le v tem, da zrak niha vzdolžno in da je cev lahko zaprta na dveh ali na enem koncu. Takšni cevi z zrakom rečemo *piščal*. Na enem koncu jo vzbujamo s pihanjem v režo ali skozi nastavek z jezičkom. Na drugem koncu je vozel ali nihajni ekstrem. Vmes se zvrsti sodo ali liho število četrtnink valov. S tem so lastne frekvence določene in sicer zgolj z dolžino piščali. Če v cev izvrtamo luknje in jih pokrivamo s prsti, spreminjamo njeno dolžino in s tem zvok. Takšno piščalko je izdelal že pračlovek, do danes pa so jo glasbeniki razvili v raznovrstna pihala in trobila.
- Resonanca** Gotovo ima tudi zrak v poljubni votlini, ne le v cevi, svoja lastna nihanja. Ta so trodimenzionalna. Kakšne so ustrezne vozelné ploskve, je odvisno od velikosti in oblike votline. Votlinski zrak vzbujamo skozi odprtino v steni. S pravo frekvenco vzbujanja začne doneti. To lepo slišimo, ko pihamo mimo ustja prazne steklenice. Če stene votline niso toge, imajo tudi one lastna nihanja. Kadar se oboja nihanja ujamejo, votlina posebno močno doni. Rečemo, da je *resonantna* z vzbujevalno frekvenco. Tudi to so odkrili že davni predniki, ko so naredili prvi boben (nad votlino razpeto opno) in lutnjo (nad votlino napete strune). Do danes so iz njiju nastala različna tolkala, brenkala in godala.

21.9 Merjenje zvoka

- Hitrost** Hitrost zvoka v zraku zlahka izmerimo. Na primernem hribu ustrelimo s topom in na drugem hribu merimo čas med bliskom eksplozije in njenim gromom. Pri tem predpostavljamo, da se svetloba širi mnogo hitreje kot zvok. Tako ob različnih stanjih ozračja izmerimo okrog 340 ± 10 m/s. Vsakokratna meritev je za 20 % večja, kot napoveduje enačba (21.10). Domnevamo, da je kriva stisljivost zraka: pri hitrih stiskanjih in raztezanjih v valovanju morda ni takšna, kot je pri počasnih spremembah, ampak je večja: $K = \kappa p$, $\kappa = 1.4$. V vodi na mirnem jezeru pa izmerimo hitrost okrog 1500 m/s, kar se dobro ujema z izračunom.



Slika 21.14 Meritev hitrosti zvoka v vodi. Prikazana je meritev na Ženevskem jezeru preko razdalje 10 milj. (Colladon, 1826)

Ko poznamo hitrost zvoka, lahko izračunamo, kako dolge zvočne valove oddajajo nihajoče strune. Tista, ki niha s frekvenco 110 Hz, oddaja valove z dolžino 3 metre.

Frekvenca Lastne frekvence strune in piščali znamo izračunati. Kako pa bi izmerili (glavno) frekvenco neznanega izvora, recimo človeškega glasu ali brenčanja komarja? Ni druge, kot da uporabimo primerno merilno struno dolžine l_0 s premičnim mostičkom. To struno najprej z vijačnim natezalom uglasimo, s poslušanjem, na frekvenco ν_0 referentnih glasbenih vilic. (Frekvenco teh vilic smo predhodno in enkrat za vselej določili po struni z nastavljivo obremenitvijo). Potem s poskušanjem premaknemo mostiček v tako lego, da zveni nihajoči del strune l enako kot merjenec. S tem je določena tudi neznana frekvenca: $\nu = (l_0/l)\nu_0$. Namesto merilne strune lahko uporabimo kitaro ali klavir, ki pa ju je predtem seveda tudi potrebno uglasiti.

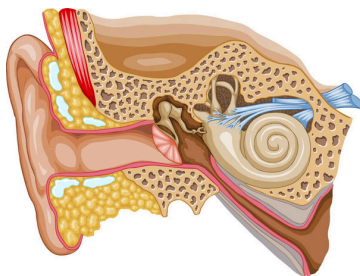
Valovna dolžina Valovno dolžino zvoka merimo na stoječih valovih. Vodoravno stekleno cev, v kateri je natrosen plutovinast prah, zapremo na enem koncu s premičnim batom in na drugem z gumijasto opno. To vzbuja z zvočilom – preko vmesnega zraka ali napete žice. Ob tem premaknemo bat v tako lego, da v cevi nastane stojno valovanje: pokaže ga prah, ki se nakopiči v vozlih; tam namreč zrak miruje. Tedaj je dolžina cevi nek mnogokratnik valovne dolžine zvoka. Razdalja med dvema sosednjima vozla znaša polovico valovne dolžine.

21.10 Glas in sluh

Glasilke Človek nosi s seboj svoje lastno zvočilo – *glasilke*, ki jih trese tok zraka iz pljuč in ki jih z mišicami bolj ali manj napenjamo. Nastale zvočne valove nadalje oblikujemo v ustni votlini s spreminjanjem njene oblike in velikosti. Dosegljivo nam je frekvenčno območje med 80 Hz (moški bas) in 1000 Hz (ženski sopran). Odrasli imajo daljše in debelejše glasilke kot otroci, zato so njihovi glasovi nižji od otroških.

Uho Zvok slišimo zato, ker v našem ušesu vzvalovi *slušne resice*. Najbolj zanihajo tiste, ki imajo podobne lastne frekvence kot poslušani zvok. Poskusi z različnimi strunami in piščalmi (za katere znamo frekvence izračunati) povejo, da slišimo frekvence med 20 in 20 000 Hz. Na stara leta se zgornja meja močno niža. To je človekov *slušni obseg*. Iz hitrosti zvoka izračunamo, kakšne

so ustrezne valovne dolžine: segajo od 17 metrov do 1,7 centimetra.



Slika 21.15 Presek človeškega ušesa. Zvok trese bobnič. Tresenje se preko koščic prenaša v polžasto cev, napolnjeno s tekočino. V cevi so dlačice različnih dolžin. Tiste, ki so v resonanci z zvokom, zanihajo. (Maine Academy of Audiology)

Infrazvok in ultrazvok

Prenizkih in previsokih tonov ljudje ne slišimo. To pa ne pomeni, da ne obstajajo: saj lahko strune in druga telesa nihajo počasneje ali hitreje od slišnih frekvenc. Rekli bomo, da oddajajo *infrazvok* oziroma *ultrazvok*. Kaže, da nekatere živali proizvajajo in slišijo te "neslišne" frekvence. Netopirji, na primer, imajo velika ušesa in pri letanju stalno odpirajo gobčke, kot da bi kričali. Verjetno oddajajo ultrazvok (ker so majhni) in poslušajo odmeve ter s tem "gledajo" oziroma "tipajo" okolico. Podobno se zdi za delfine v vodi, ko lovijo ribe. Plavanje kitov pa kaže, da se sporazumevajo na velike razdalje, verjetno z infrazvokom (ker so veliki).

21.11 Glasbila in glasba

Kitara

Kaj bi bil človek brez petja in glasbe? Med mladimi je zelo priljubljena kitara.



Slika 21.16 Španska kitara. Ima šest strun. Z eno roko jih krajšamo, z drugo brenkamo po njih. Za ojačanje zvoka poskrbi resonančna votlina. (Anon)

Sodobna kitara je plod dolgotrajnega razvoja. Ima šest vzporednih, enako dolgih strun različne debeline. Druga struna po vrsti (od debelih proti tankim) je takšna in tako napeta, da niha z osnovno frekvenco 110 Hz. Krajšamo jo s pritiskanjem ob podložne prečke. Ena izmed prečk, dvanajsta po vrsti, leži natanko na polovici strune. Tam skrajšana struna ima zato dvakrat višjo frekvenco od neskrajšane. Prečke so nameščene v takšnih presledkih, da zaporedne frekvence naraščajo v razmerju $2^{1/12}:1 \approx 1,06:1$. Vsaka naslednje frekvenca je torej za 6 % višja od predhodne. Rečemo, da je višja za en "polton". Vseh prečk je ponavadi devetnajst: na zadnjo prečko skrajšana struna ima zato frekvenco povišano za faktor $2^{19/12} = 3,00$.

Preostale strune imajo druge osnovne frekvence. Strune 2, 3 in 5, skrajšane na šesti prečki, imajo isto frekvenco kot njim sledeče odprte strune. Struni 1 in 4 je treba krajšati na peti prečki. Na ta način pripade šesti struni na peti krajšavi frekvenca 440 Hz. Zvok kitare sega od okrog 80 Hz (odprta najdebelejša struna) do preko 1000 Hz (najbolj skrajšana najtanjša struna). To je tudi razpon človeškega glasu od moškega basa do ženskega soprana. Kitaro uglasimo tako, da najprej uglasimo odprto drugo struno z glasbenimi vilicami, nato pa z ustreznimi krajšavami še vse ostale po vrsti. Začnemo lahko tudi s šesto struno na peti krajšavi.

Harmonija Zakaj je interval med osnovno in dvakratno frekvenco razdeljen ravno na 12 delov? In zakaj so zaporedne strune na kitari tako čudno medsebojno uglasene? Zato, da s čim manj prijemi in premiki tiste roke, ki skrajšuje strune, izbiramo "lepo" zveneča zaporedja in vzporedja tonov – glasbo.

Glasbeniki so namreč odkrili naslednje. Različne kombinacije tonov vzbujajo v nas različne občutke. Tako, na primer, dve frekvenci, ki sta v razmerju 2:1, zvenita "sozvočno". Med takima frekvencama je, po definiciji, 12 poltonov: $2^{12/12}:1 = 2:1$. Podobno je s frekvencama v razmerju 3:2, ki sta tudi sozvočni. Zapišemo ju lahko kot $2^{7/12}:1 = 1,50:1 = 3:2$; med njima je torej 7 poltonov. Razmerju 4:3, tudi sozvočnem, pa ustreza izraz $2^{5/12}:1 = 1,33:1 = 4:3$; med obema frekvencama je zdaj 5 poltonov. Kaže, da ljudje kot sozvočne čutimo takšne frekvence, ki so v nizkih celoštevilčnih razmerjih. Ta razmerja pa učinkovito ustvarimo z 12-stopenjsko delitvijo. Z bolj grobo delitvijo ne bi mogli tako natančno ustvariti zahtevanih celoštevilskih razmerij. Bolj drobna delitev pa bi zahtevala krajše razmike med prečkami ali daljše in močnejše napete strune. Absolutna vrednost 440 Hz je bila izbrana dogovorno za poenoteno uglasitev vseh vrst glasbil, da se lepo ujamejo, ko igrajo skupaj.

21.12 Frekvenčni zamik

Gibanje opazovalca Ladja, ki pluje proti valovom, prejme v časovni enoti več valov, kot če bi mirovala. Zakaj ne bi to veljalo tudi za zvočne valove v zraku? Poslušalec, ki se giblje proti zvočilu, bi zato moral slišati povišano frekvenco. Kakšno? V časovni enoti Δt zadane mirujočega poslušalca $\nu \Delta t$ valov. Ko se bliža izvoru s hitrostjo v , napravi v enakem času pot $v \Delta t$, na katero odpade $v \Delta t / \lambda$ valov. Ti valovi se dodajo onim, ki bi jih slišal v mirovanju. Skupno število valov, preračunano na časovno enoto, in upoštevajoč $c = \lambda \nu$, pove, kakšno frekvenco ν' zazna (DOPPLER):

$$\frac{\nu'}{\nu} = 1 + \frac{v}{c}. \quad (21.11)$$

Če se torej poslušalec giblje s hitrostjo 20 m/s, se frekvenca poveča za 6 %, kar je približno za polton oziroma za eno letvico

na kitari. To je povsem zaznavno. Zapisana enačba velja tudi za oddaljujočega se poslušalca, le predznak hitrosti moramo obrniti.

Gibanje izvora

Kaj pa, če se giblje zvočilo proti mirujočemu poslušalcu? V času Δt odda izvor $n = \nu \Delta t$ valov. Stisnejo se na razdaljo $l = c\Delta t - v\Delta t$. Sprejemnik zato opazi valovno dolžino $\lambda' = l/n$, kar ob upoštevanju $c = \lambda'\nu'$ pomeni (DOPPLER)

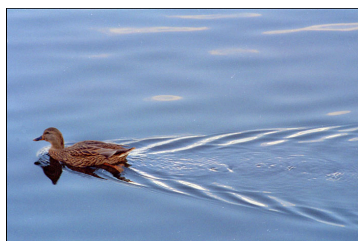
$$\frac{\nu'}{\nu} = \frac{1}{1 - v/c}. \quad (21.12)$$

Če $v \ll c$, se enačba poenostavi v obliko iz prejšnjega primera. Za oddaljujoči se izvor je treba obrniti predznak njegove hitrosti. Ne smemo tudi pozabiti, da so vse hitrosti mišljene glede na morje ali zrak in ne na trdna tla. Enačbe kvalitativno preverimo tako, da spustimo sani s piščalkarjem po hitrem klancu, se postavimo ob progo ter poslušamo spremembo piska ob mimohodu.

21.13 Valovno čelo

Hitro gibanje

Hitrost tekmovalnega čolna na vesla je večja od hitrosti valov, ki jih povzroča, zato teh pred njim ne more biti. To velja tudi za raco, ki plava po ribniku.



Slika 21.17 Valovno čelo. Raca plava hitreje, kot se širijo kratki vodni valovi, ki jih povzroča. Njihova ovojnica se kaže kot koničasta valovna sled. (Anon)

V času Δt se čoln premakne iz trenutne lege za $v\Delta t$, elementarni krožni val pa le za $c\Delta t$. Tangenta iz kljuna čolna na ta val določa ovojnico – koničasto *valovno čelo*. Nagib čela glede na smer čolna je določen z razmerjem premikov čolna in polmera elementarnega vala:

$$\sin \theta = \frac{c}{v}. \quad (21.13)$$

Podobno velja za let puškine kroglice z nadzvočno hitrostjo po zraku. Ko te preleti, slišiš valovno čelo kot rezek pok. Tudi konec spretno zavihtenega biča je hitrejši od zvoka in slišimo njegov tlesk.

21.14 Energija

Valovna energija

Posamezni deli strune so nihala, ki nihajo okrog svojih ravnovesnih leg in imajo vsako svojo kinetično ter prožnostno energijo. Podobno velja za gladinske in zvočne valove, le da imajo prvi potencialno energijo zaradi teže in drugi zaradi prožnosti. Vsoto kinetičnih in potencialnih energij vseh nihal v opazovanem prostoru ob izbranem času poimenujmo *valovna energija* W . Ta

energija, preračunana na ustrezno prostorsko enoto – dolžino, ploščino ali prostornino – definira *gostoto energije*. Za zvočno valovanje zapišemo

$$w = \frac{W}{V}. \quad (21.14)$$

Energijski tok Ko valovanje potuje, nosi s sabo energijo. Koliko energije preide na časovno enoto skozi opazovani presek, povemo z *energijskim tokom*

$$P = \frac{W}{t}. \quad (21.15)$$

Tok preračunamo na normalno ploskovno enoto in s tem definiramo *gostoto (energijskega) toka*; pri zvoku ji rečemo tudi *glasnost*:

$$j = \frac{P}{S}. \quad (21.16)$$

V času t preide skozi opazovani normalni presek S z valovanjem $wSct$ energije, zato

$$j = cw. \quad (21.17)$$

Energijski tok, ki ga zvočilo seva v ozek prostorski kot $\Omega = S/r^2$, se ohranja, če sprotni odboji, lomi in dušenja na ovirah niso premočni. Tedaj gostota toka pojema z oddaljenostjo vzdolž žarka takole:

$$j = \frac{P/\Omega}{r^2} = \frac{I}{r^2}. \quad (21.18)$$

Kadar je sevanje v vse smeri enako, *izotropno*, se enačba poenostavi v $j = P/4\pi r^2$. Čim dalj smo od zvočila, tem šibkejši zvok slišimo.

Energijski spekter Pri harmoničnem nihalu je vsota kinetične in potencialne energije v vsakem trenutku konstantna. To pomeni, da je kar enaka maksimalni kinetični ali maksimalni potencialni energiji. Za harmonično valovanje zato velja

$$w = \frac{1}{2} \rho v_0^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 s_0^2. \quad (21.19)$$

Gostota energije na nekem mestu je torej sorazmerna s kvadratom frekvence in amplitude tamkajšnjega harmoničnega nihanja. Če je to nihanje sestavljeno iz več harmoničnih komponent, pa velja povedano za vsako komponento posebej. Rečemo, da je energija porazdeljena po frekvencah. To porazdelitev poimenujemo *valovni spekter*. Različne zvočne spektre sliši uho kot tone, zvene in šume.

Zapisana enačba omogoča, da izračunamo gostoto energije – in vse z njo povezane količine – v primerih, ko je valovanje približno

harmonično in mu lahko izmerimo frekvenco in amplitudo. Slednje zmoremo za struno in za gladinsko valovanje, ne pa tudi za zvok. Lahko pa enačbo uporabimo v nasprotni smeri – za oceno velikosti zvočnih amplitud. Najprej izračunamo, kakšna je energija nihajoče kitarske strune. Potem ocenimo čas, v katerem se struna ustavi, in s tem oddajani energijski tok. Tako sta določena tudi gostota toka in gostota energije na primerni razdalji. Iz ene ali druge sledi, da imajo "pogovorne" zvočne amplitude neverjetno majhen red velikosti: $s_0 \sim 0,1 \mu\text{m}$ in $v_0 \sim 0,1 \text{ mm/s}$! Uho je torej res silno občutljiv merilnik. $\square$