

4 Ultrazvok

Pri tej vaji se bomo seznanili z osnovnimi značilnostmi ultrazvoka in njegove uporabe v medicini.

S človeškim ušesom lahko zaznamo zvok s frekvencami od približno 16 Hz do 20 kHz. Zvok, ki ima višje frekvence in je človeškemu ušesu neslišen, imenujemo *ultrazvok*. Zaradi svoje visoke frekvence in zato majhne valovne dolžine se ultrazvok uklanja manj od slišnega zvoka in ga je mogoče dobro usmerjati.

4.1 Osnovne lastnosti zvoka in ultrazvoka

Zvok se po prostoru prenaša kot nihanje snovi in zato po vakuumu ne more potovati. Pri zvočnem valovanju v plinih in kapljevinah je nihanje le v smeri potovanja zvoka, zato je tam zvočno valovanje vzdolžno (longitudinalno). Valovna dolžina (λ), frekvenca (ν) in hitrost (c) zvočnega valovanja so povezane z znano zvezo

$$\lambda = \frac{c}{\nu}. \quad (4.1)$$

Hitrost zvoka v snovi je v splošnem odvisna od njene gostote (ρ) in stisljivosti (χ) po naslednji enačbi:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\chi}}. \quad (4.2)$$

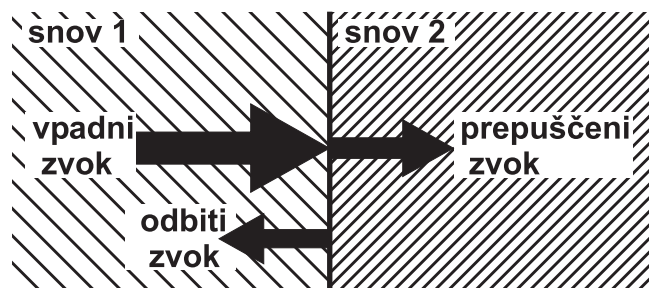
Stisljivost trdnih snovi in tekočin je zelo majhna, zato je hitrost zvoka v njih ponavadi velika. V zraku, ki je praktično idealni plin, se zgornja zveza poenostavi, saj sta gostota in stisljivost idealnih plinov med seboj povezani. Stisljivost idealnega plina pri hitrem (adiabatnem*) stiskanju je $\chi = 1/\kappa p$, kjer p tlak plina, κ pa je razmerje specifičnih toplot pri konstantnem tlaku in konstantni prostornini c_p/c_v . Pri zraku, ki je sestavljen v glavnem iz dvoatomnih plinov, je razmerje specifičnih toplot enako $\kappa = 1,4$. Ob upoštevanju splošne plinske enačbe $pV = (m/M)RT$ in zveze za gostoto $\rho = m/V$ dobimo

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}}, \quad (4.3)$$

kjer je R plinska konstanta, M molekulska masa plina, T pa temperatura. Vidimo, da se hitrost zvoka v plinih spreminja s temperaturo.

Ko zvočno valovanje prehaja med snovmi, se na meji med njimi delno odbija (slika 4.1). Odboj na meji je tem večji, čimbolj se snovi razlikujeta po gostoti in hitrosti zvoka. Ultrazvok se tako delno odbija na mejah organov v človekovem telesu. Ta pojav je uporaben pri ultrazvočnem slikanju, kjer je mogoče s pomočjo signalov, ki se odbijajo od tkiv, rekonstruirati sliko notranjosti telesa.

*Stiskanje in razpenjanje zraka pri zvočnem valovanju je adiabatni proces, saj se zgoščine in razredčine zraka menjavajo hitro in med njimi praktično ni prehajanja toplote.



Slika 4.1: Odboj ultrazvoka pri prehodu med dvema snovema. Del zvoka nadaljuje pot, ostali del pa se odbije. Odboj je tem večji, čimbolj se snovi razlikujeta po hitrosti zvoka in gostoti.

4.2 Dopplerjev pojav

Če se izvor ali sprejemnik valovanja gibljeta glede na snov, po kateri se širi zvok, sprejemnik ne zazna enake frekvence, kot jo oddaja izvor. Pojav se imenuje Dopplerjev pojav in je shematično prikazan na sliki 4.2.

Leva slika prikazuje primer, ko izvor valovanja miruje, sprejemnik pa se mu približuje s hitrostjo v_s . Izvor oddaja valovanje s frekvenco ν , valovi se širijo enakomerno stran od izvora s hitrostjo c in valovno dolžino λ . Ker se sprejemnik giblje proti smeri valovanja, zaznava navidezno večjo hitrost valovanja $c' = c + v_s$, zaznana valovna dolžina valovanja pa se ne spremeni. Frekvenca, ki jo zaznava sprejemnik je tako

$$\nu' = \frac{c'}{\lambda} = \frac{c + v_s}{\lambda} = \nu \left(1 + \frac{v_s}{c}\right), \quad (4.4)$$

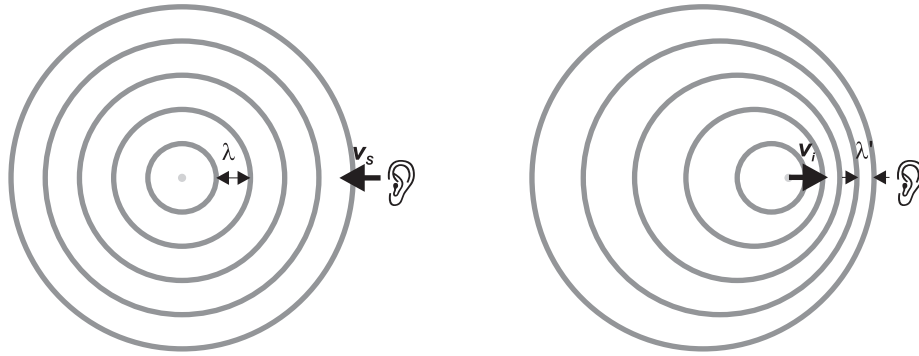
in je višja od oddane frekvence. V primeru, ko se sprejemnik oddaljuje od izvora, je hitrost v_s negativna in je frekvenca, ki jo zazna sprejemnik, nižja od oddane.

Desna slika prikazuje primer, ko sprejemnik miruje, izvor valovanja pa se približuje s hitrostjo v_s . V tem primeru sprejemnik zaznava nespremenjeno hitrost valovanja in zmanjšano valovno dolžino λ' , zato bo zaznana frekvenca višja od frekvence izvora. Zmanjšanje valovne dolžine je enako razdalji, ki jo prepotuje izvor v eni periodi valovanja. Premik izvora valovanja v eni periodi je $L = v_i \tau = \frac{v_i}{\nu} = \frac{v_i}{c} \lambda$, zato je frekvenca, ki jo zazna sprejemnik enaka:

$$\nu' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda - L} = \frac{c}{\lambda - \frac{v_i}{c} \lambda} = \nu \frac{1}{1 - \frac{v_i}{c}}, \quad (4.5)$$

Vrednost faktorja $\frac{1}{(1 - v_i/c)}$ je večja od 1, zato je zaznana frekvenca ν' večja od oddane frekvence ν . V primeru, ko pa se izvor oddaljuje od sprejemnika, ima v_i negativno vrednost in je zaznana frekvenca manjša od frekvence izvora.

Hitrosti gibanja so pogosto majhne v primerjavi s hitrostjo valovanja, $\frac{v}{c} \ll 1$. V takih primerih lahko uporabimo binomski razvoj, za katerega pri majhnih vrednostih x velja: $(1 \pm x)^m \approx 1 \pm mx$. Enačba 4.5 se tako poenostavi $\nu' = \nu(1 + v_i/c)$, kar je enako kot v primeru, ko se oddaljuje sprejemnik in izvor miruje. Pri majhnih hitrostih torej ni razlike



Slika 4.2: *Levo: izvor valovanja miruje, sprejemnik se premika s hitrostjo v_s . Desno: sprejemnik miruje, izvor valovanja pa se premika s hitrostjo v_i .*

med gibanjem izvora in sprejemnika, zato lahko spremembo frekvence zaradi Dopplerjevega pojava zapišemo preprosto kot:

$$\nu' = \nu \left(1 \pm \frac{v}{c} \right), \quad (4.6)$$

kjer je v relativna hitrost med izvorom in sprejemnikom in pozitivni predznak velja za približevanje. Zaznana frekvenca se torej poveča, če se izvor in sprejemnik približujeta in zmanjša, če se izvor in sprejemnik oddaljujeta. Če je medsebojna hitrost izvora in sprejemnika enaka 1% hitrosti zvoka, se bo tudi zaznana frekvenca spremenila za 1%.

4.3 Izvori in detektorji ultrazvoka

Navadni zvočniki in mikrofoni v splošnem niso primerni kot izvori oziroma detektorji ultrazvoka. V ta namen se največkrat uporabljajo piezoelektrični kristali. To so kristali, na katerih se ob majhnem mehanskem stiskanju ali raztegotanju pojavi električna napetost. Zvočno valovanje, ki pada na piezoelektrični kristal, povzroči izmenično stiskanje in raztezanje kristala in na kristalu se pojavi električni signal enake frekvence, kot je frekvenca vpadnega ultrazvoka. Pojav obstaja tudi v obratni smeri: ko piezoelektrični kristal priključimo na izmenično napetost, se začne izmenično raztezati in stiskati s frekvenco, ki je enaka frekvenci izmenične napetosti. Nihanje kristala se prenese na okoliško snov in kristal s tem oddaja ultrazvočno valovanje.

4.4 Uporaba ultrazvoka v medicini

Najbolj pogosta ultrazvočna tehnika v medicini je ultrazvočno slikanje (imenujemo jo tudi *ehografija* oz *sonografija*). Pri tej metodi uporabljamo ultrazvok šibke jakosti s frekvenco nekaj MHz. S pomočjo sonde v telo usmerimo ultrazvočne sunke in nato na osnovi signalov, ki se odbijajo na mejah med tkivi, rekonstruiramo sliko. Z ultrazvokom je možno enostavno slikati na primer organe v trebušni votlini, težje (a ne nemogoče!) pa je slikati skozi kosti ali zračne votline, pri katerih se gostota zelo razlikuje od okoliške in se zato tam večino

valovanja odbije, skozi pa gre le malo. Sodobne tehnike slikanja uporabljajo tudi Dopplerjev pojav ter na osnovi spremenjene frekvence odbitega signala določijo npr. hitrost pretakanja krvi po ožilju.

Fizikalni vplivi ultrazvoka na tkiva so predvsem mehansko nihanje in segrevanje tkiva zaradi absorpcije. Pri majhni jakosti ultrazvočnega valovanja, ki se uporablja pri slikanju, so ti fizikalni vplivi majhni in naj ne bi imeli stranskih posledic. Ker pa biološki vplivi ultrazvoka v celoti še niso povsem raziskani, se včasih kljub vsemu odsvetuje uporabo ultrazvočnega slikanja po nepotrebem. Po drugi strani fizikalne vplive ultrazvoka s pridom uporabljajo pri fizioterapiji, kjer naj bi pomagali pri lajšanju bolečin in celjenju ran. Poleg tega se v zadnjem času intenzivno raziskuje uporaba t.i. ultrazvočne kirurgije, pri kateri skalpel ni potreben, saj se npr. maligno tkivo uniči z natančno usmerjenim ultrazvočnim valovanjem zelo velike jakosti.

- Naloga:**
1. Izmerite frekvenco zvoka, ki ga oddajajo glasbene vilice.
 2. Izmerite frekvenco in nihajni čas ultrazvoka, ki ga boste uporabili pri vaji.
 3. Z uporabo Dopplerjevega pojava izmerite hitrost električnega vlakca.
 4. Izmerite hitrost ultrazvočnih signalov v zraku.
 5. Neobvezna naloga: Izmerite razdaljo med mizo in stropom v učilnici.

Potrebščine: Poleg osciloscopa boste pri vaji Ultrazvok uporabljali še dve škatli: v eni je merilnik frekvence, v drugi pa sta skupaj ojačevalnik in generator visokofrekvenčnih sunkov, ki imata tudi skupno napajanje.

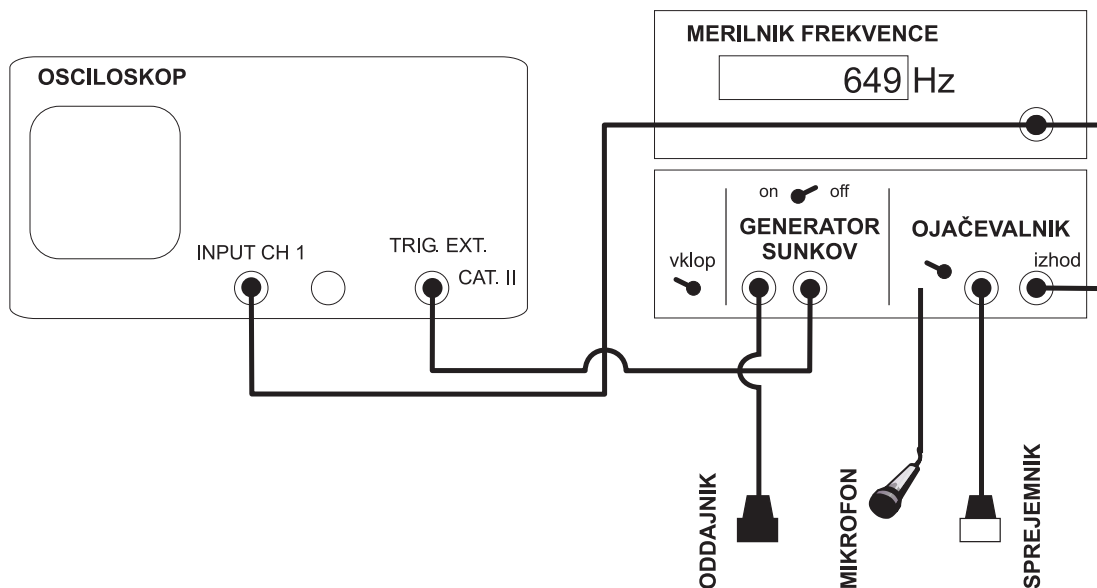
Ultrazvočni oddajnik. Pri vaji boste uporabljali dva oddajnika. Eden je v sondi s črnim robom in je priključen na generator visokofrekvenčnih sunkov, drugi pa je pritrjen na električni vlakec. Oba imata enako frekvenco, le da prvi ultrazvok oddaja v obliki kratkih sunkov, oddajnik na vlakcu pa oddaja neprekinjeno sinusno valovanje.

Ultrazvočni sprejemnik. Sprejeti ultrazvočni signal je zelo šibak, zato mora biti sprejemnik najprej priključen na ojačevalnik, ta pa je naprej povezan z osciloskopom in merilnikom frekvence (slika 4.3). Sonda s sprejemnikom ima bel rob.

Mikrofon. Mikrofon je prav tako kot ultrazvočni sprejemnik priključen na ojačevalnik. Na vhodu ojačevalnika je stikalo, s katerim izbirate med uporabo mikrofona in ultrazvočnega sprejemnika.

Osciloskop na zaslonu prikazuje časovni potek zaznanega signala. Na njem je veliko različnih gumbov, zato med izvedbo vaje natančno sledite navodilom za nastavitve, ki so mu priložena.

Merilnik frekvence signalu meri frekvenco in na zaslon vsako sekundo izpisuje njeno povprečno vrednost preko ene sekunde. Za zanesljivo pravičen rezultat mora meritev tako potekati nepretrgoma vsaj dve sekundi!



Slika 4.3: Shema vezave pri vaji ultrazvok.

Izvedba

- 1) **Naloga 1.** Na ojačevalnik priključite mikrofona in sprejemnik ultrazvoka (sonda z belim robom) ter ojačevalnik povežite z merilnikom frekvence in osciloskopom (slika 4.3). Oddajnik (sonda s črnim robom) povežite z generatorjem sunkov, sinhronizacijo generatorja sunkov pa z zunanjim proženjem osciloskopa (TRIG. EXT.).

Na ojačevalniku izberite uporabo mikrofona. Ultrazvoka pri tej vaji ne boste uporabljali, zato izklopite ultrazvočni oddajnik na vlakcu in generator sunkov. Osciloskop nastavite po priloženih navodilih. Glasbene vilice primite čisto pri spodnjem delu in z enim krakom vilic nežno udarite po robu mize. Ko vilice lepo zazvenijo, jih približajte mikrofona. Z osciloskopom opazujte obliko signala, z merilnikom frekvence pa izmerite njegovo frekvenco. Meritev z merilnikom frekvence mora potekati vsaj dve sekundi. Kakšen pa je signal na osciloskopu, če v mikrofona govorite (zapojete) "A" ali "Š"?

- 2) **Naloga 2.** Frekvenco ultrazvoka določite z merilnikom frekvence. Uporabili boste le oddajnik na vlakcu, ki oddaja neprekinjeno sinusno valovanje, zato se prepričajte, da je generator ultrazvočnih sunkov še vedno izključen. Na začetek tračnic namestite sprejemnik in vanj usmerite oddajnik na vlakcu. Vlasec mora pri tej nalogi mirovati! Osciloskop nastavite tako, kot je zahtevano v priloženih navodilih, ojačevalnik pa nastavite na uporabo ultrazvoka. Če je vse pravilno povezano in nastavljeno, se na zaslonu osciloskopa pokaže periodični signal, ki mora izginiti, če z roko zaslonite sprejemnik ali če oddajnik usmerite v stran. Z merilnika frekvence odčitajte frekvenco uporabljenega ultrazvoka ν . Na osciloskopu izmerite en nihajni čas valovanja, pri

čemer pravilno upoštevajte nastavljeno časovno enoto. Preverite, če je recipročna vrednost nihajnega časa zares enaka izmerjeni frekvenci, $\tau = 1/\nu$.

- 3) **Naloga 3.** Dopplerjev pojav. Pri tej nalogi boste opazovali, kako se zaradi premikanja izvora ultrazvoka spremeni zaznana frekvenca ν' . Iz meritve ν' boste lahko po enačbi 4.6 izračunali hitrost izvora. Spet boste uporabili le oddajnik na vlakcu, sprejemnik pa naj bo na začetku tračnic. Vključite napajanje vlakca in oddajnik na vlakcu. Na osciloskopu se enako kot pri nalogi 2 pokaže sprejeti sinusni signal, merilnik frekvence pa meri sprejeto frekvenco ν' . Vlakcu nastavite hitrost ter ga vozite sem in tja po tračnicah. Opazujte, kaj se dogaja s sprejeto frekvenco, če se vlakec približuje oziroma oddaljuje od sprejemnika. Pri tem morate biti pozorni na to, da meritev frekvence poteka nepretrgano vsaj dve sekundi. Če vlakec tračnice prevozi prej kot v dveh sekundah, mu zmanjšajte hitrost. Med vožnjo se signal včasih izgubi, kar lahko za trenutek zmede merilec frekvence. Ali je sprememba frekvence res večja pri večji hitrosti vlakca? Ali je sprememba frekvence odvisna od oddaljenosti vlakca od sprejemnika?

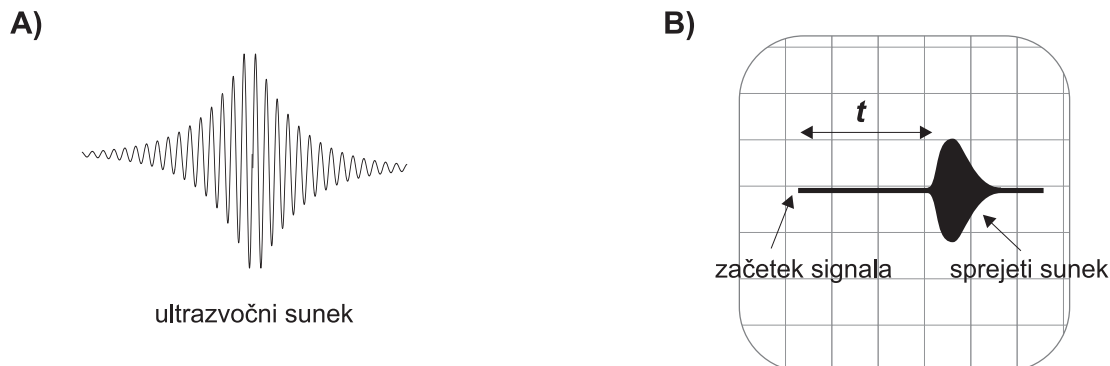
Vlakcu izberite primerno hitrost ter izmerite sprejeto frekvenco ν' , če se vlakec približuje sprejemniku in če se od njega oddaljuje. Meritvi obeh frekvenc ponovite vsaj trikrat in izračunajte povprečni vrednosti. Iz izmerjenih frekvenc boste lahko po enačbi 4.6 določili hitrosti vlakca v med približevanjem oziroma oddaljevanjem. V računu uporabite izmerjeno frekvenco oddajnika v mirovanju ν iz naloge 2, ter hitrost zvoka c , ki jo boste izmerili v nalogi 4.

Hitrost vlakca določite še neposredno, t.j. z meritvijo časa, ki ga vlakec potrebuje za pot 1,5 m, ter primerjajte to meritev z meritvijo, dobljeno preko Dopplerjevega pojava.

- 4) **Naloga 4.** Hitrost ultrazvočnega valovanja v zraku boste določili z meritvijo časa, ki ga ultrazvočni sunek potrebuje za pot od oddajnika do sprejemnika. Pri tej nalogi oddajnika na vlakcu ne boste potrebovali, zato ga izključite in vlakec odmaknite stran od sprejemnika. Izključite tudi napajanje vlakca.

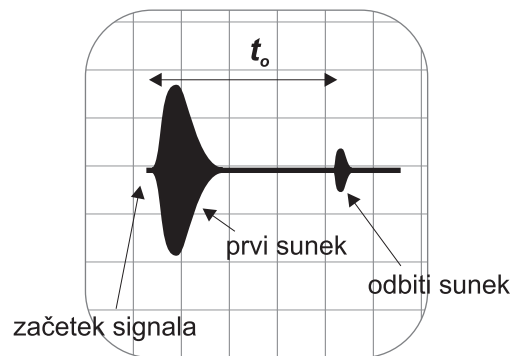
Vključite generator sunkov in oddajnik (sonda s črnim robom) usmerite proti sprejemniku. Osciloskop nastavite po navodilih, ki so priložena vaji. V ultrazvočnih sunkih, ki jih oddaja oddajnik, je ultrazvočno valovanje enake frekvence, kot pri nalogi 2 (slika 4.4 A). Če je vse pravilno povezano in nastavljeno, se na zaslonu osciloskopa pokaže signal sprejetega sunka (slika 4.4 B). Pri tem se zaradi sinhronizacije med osciloskopom in oddajnikom časovna os na zaslonu osciloskopa začne v trenutku, ko oddajnik sunek odda. Čas od začetka signala do začetka prejetega sunka (t) je torej enak času, ki ga ultrazvočni sunek potrebuje za pot med oddajnikom in sprejemnikom. Čas t izmerite kar z zaslona osciloskopa. Če izmerite še razdaljo x med sprejemnikom in oddajnikom, lahko hitrost zvoka izračunate kot $c = x/t$. Pri merjenju razdalje si lahko pomagata z merilom na tračnicah. Meritev ponovite pri treh različnih oddaljenostih med oddajnikom in sprejemnikom (vse naj bodo večje od 50 cm!) in izračunajte povprečno vrednost tako izmerjene hitrosti zvoka.

Izmerite temperaturo zraka v učilnici ter hitrost zvoka izračunajte še po enačbi 4.3 (v računu privzemite, da je zrak idealni dvoatomni plin z molsko maso 29 g/mol. $R = 8300 \text{ J kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$). Ali se vrednosti ujemata?



Slika 4.4: (A) V ultrazvočnem sunku je ultrazvočno valovanje enake frekvence, kot pri nalogi 2. (B) Slika na osciloskopu pri nalogi 4. Čas potovanja ultrazvočnega sunka od oddajnika do sprejemnika (t) je enak času med začetkom signala in zaznanim sunkom.

- 5) **Naloga 5 (neobvezna).** Oddajnik in sprejemnik nastavite enako kot pri nalogi 4, le časovno enoto na osciloskopu nastavite na 2 ms. Sprejemnik odstranite z začetka tračnic ter ga skupaj z oddajnikom usmerite v strop. Ultrazvočni sunek tako potuje od oddajnika do stropa, se tam odbije in pripotuje nazaj v sprejemnik. Snop uporabljenega ultrazvoka ni zelo ozek in pričakujete lahko tudi odboje od sten in polic na steni. Najlepši signal boste tako dobili, če boste oddajnik in sprejemnik držali čim dalj od stene. Na zaslonu osciloskopa boste opazili dva sunka. Na začetku časovne osi je sunek, ki pripotuje neposredno od oddajnika do sprejemnika. Drugi, veliko šibkejši sunek, je od stropa odbiti signal (slika 4.5). Čas od začetka signala do začetka drugega sunka t_o je ravno čas, ki ga ultrazvok potrebuje za pot do stropa in nazaj. Če sonde približate stropu, se na zaslonu lepo vidi, kako se čas do odbitega sunka skrajša. Ker iz naloge 4 poznate hitrost ultrazvoka v zraku, lahko brez težav izračunate višino stropa h . Pri tem morate seveda upoštevati, da ultrazvok na poti od oddajnika do stropa in nazaj prepotuje pot $2h$.



Slika 4.5: Slika na osciloskopu pri nalogi 5. Čas potovanja zvočnega sunka od oddajnika do stropa in nazaj (t_o) je čas med začetkom signala in sprejetim odbojem.