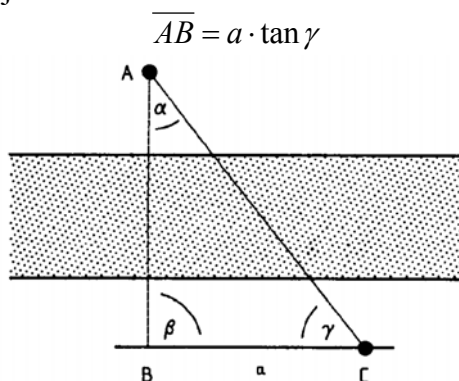


6.2 Optično merjenje razdalje

Optično merjenje razdalje s triangulacijo

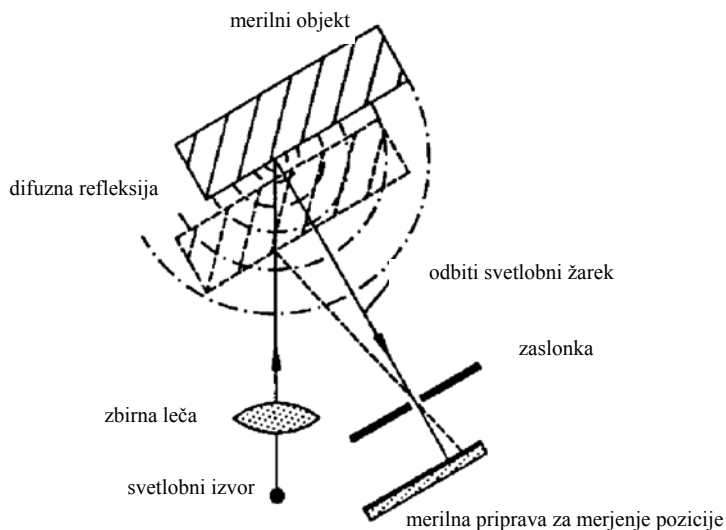
Merjenje razdalje na osnovi triangulacije je poznano iz geodezije, kjer razdaljo dveh oddaljenih, a optično vidnih točk A in B (slika 1) določimo z brezkontaktno metodo. Razdaljo določimo posredno z meritvijo dveh kotov in meritvijo razdalje.

Če izberemo kot $\beta = 90^\circ$, velja



Slika 1: Geometrična triangulacija

V modernejših elektronskih merilnih pripravah se razdalja do oddaljenega objekta se ugotavlja posredno prek difuzne refleksije vpadnega žarka (slika 2). Čim manjša je njegova valovna dolžina toliko močneje se žarek razprši (difuzija).



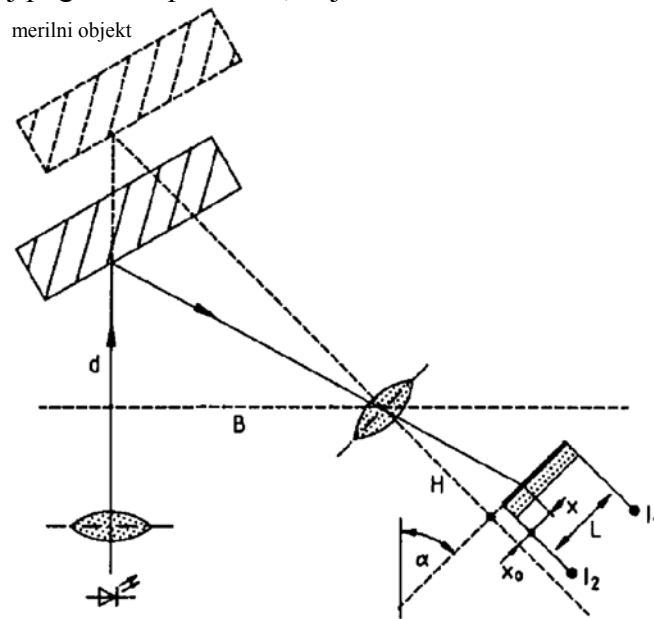
Slika 2: Optoelektrična triangulacija

Zato mora biti vpadni žarek zgoščen, usmerjen v eno točko. Najpogosteje uporabimo visokoenergijske laserje kot npr. He-Ne laser (zlasti tam, kjer je refleksija merjenega objekta majhna) ali usmerjeno svetlobo LED diod.

Opisana merilna metoda je neodvisna od orientacije objekta, če se na njem vpadni žarek reflektira difuzno (v vse smeri enako). Iz reflektiranega snopa svetlobe izločimo vpadni žarek, kar najlažje dosežemo z vmesno zaslonko s čim manjšim premerom. Namesto nje lahko uporabimo tudi zbirno lečo.

Geometrija merilne priprave

Poznamo različne geometrije namestitve oddajnega vira svetlobe in sprejemnika, ki jih lahko zaobjamemo v najbolj pogosti razporeditvi, ki jo kaže slika 3.



Slika 3: Geometrija linearnega merilnika razdalje

Razdalja do merjenega objekta je

$$d = B \frac{H \cdot \tan \alpha - (x + x_0)}{H + (x + x_0) \tan \alpha},$$

kjer je razdalja x izmerjena s polprevodniškim linijskim detektorjem. Če izberemo $\alpha = 90^\circ$ in $x_0 = 0$, se enačba poenostavi

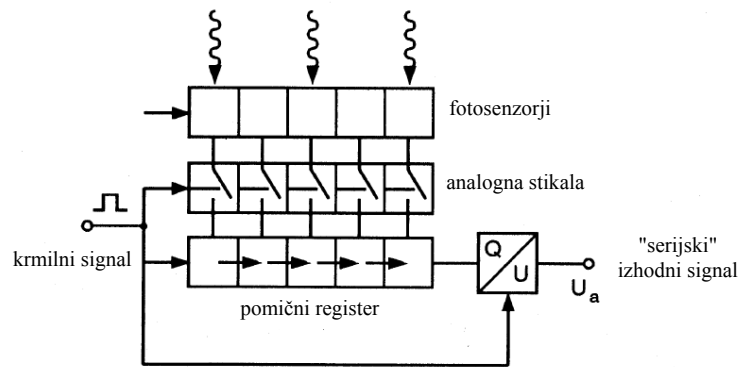
$$d = H \cdot B \frac{1}{x}$$

Pozicijo odbitega žarka, ki vpada skozi zaslonko ali lečo, določimo z:

1. Vrstična kamera (CCD).

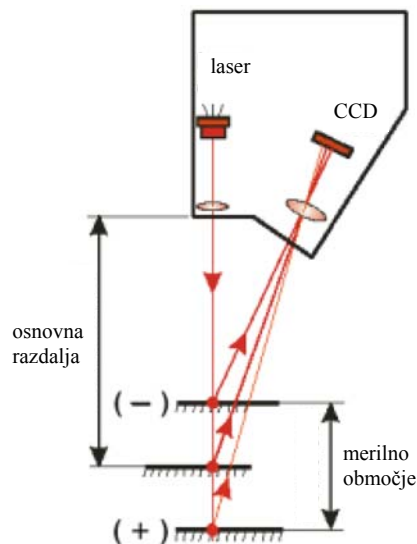
Rešitev je primerna le v kombinaciji z uporabo laserja in kjer se zahteva točnejša in obsežnejša obdelava podatkov.

CCD senzor (Charge Coupled Device) pretvarja krajevno porazdeljeno osvetlitev senzorja v časovno spremenljivo napetost. Senzor sestavlja večje število fotosenzorjev s pripadajočim analognim pomičnim registrom (slika 4). Ob osvetlitvi posameznega senzorja se generira določeno število fotoelektronov, ki tvorijo električni naboj. Slednjega se preko analognih stikal prenese v analogni pomični register, ki električni naboj posameznega senzorja nato ob vsakem prehodu urinega signala prenese na vhod Q/U pretvornika.



Slika 4: Principielna zgradba CCD senzorja

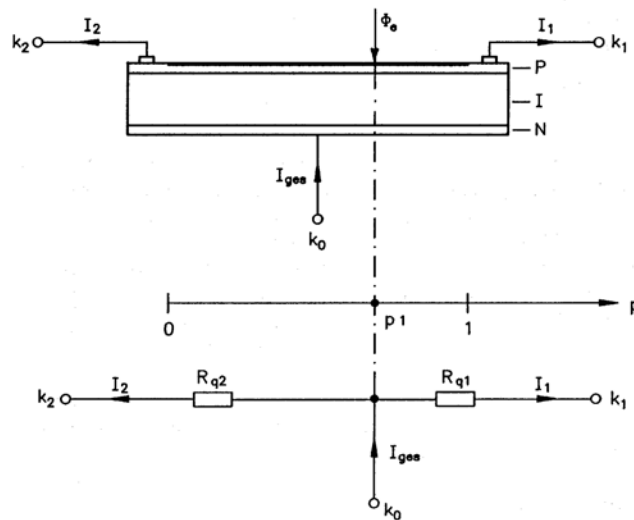
Iz takšnega, diskretiziranega analognega signala je moč ugotoviti maksimalno napetost, ki ustreza točki maksimalne osvetlitve. Za razliko od polprevodniških linijskih detektorjev omogočajo CCD senzorji detekcijo krajevnih porazdelitev osvetlitve, s čimer tvorijo ti senzorji zanesljive in precizne merilnike razdalje. Slabost je kompleksno elektronsko vezje za določanje krajevnih osvetlitve. Odlikujejo se po visoki ločljivosti (0,005 % glede na merilni doseg). Zaradi pomničnega registra imajo relativno nizko zgornjo frekvenčno mejo (čas osvežitve je relativno dolg).



Slika 5: Razporeditev sestavnih delov profesionalnega merilnika razdalje s podanimi omejitvami merilnega območja

2. Polprevodniški linijski detektor svetlobe.

Osnovo linijskega detektorja tvori polprevodniška fotodioda s progasto oblikovano plastjo P-tipa, ki je občutljiva na osvetlitev (slika 6). Medtem ko je spodnja N last metalizirana preko cele ploskve, je zgornja ploskev metalizirana zgolj na obeh koncih, ki tvorita dve priključni sponki k_1 in k_2 . Ko osvetlimo poljubno točko senzorja s točkastim izvorom svetlobe, se na tem mestu zaradi prejete energije osvobodi večje število prostih elektronov, ki vplivajo na tokovno porazdelitev med točkami $k_0 - k_1$ in $k_0 - k_2$. Razmerje tokov je zato odvisno od osvetljene lege, pri čemer pa se razmerje ne spreminja od jakosti osvetlitve. S tem postane meritev razdalje neodvisna od faktorja refleksije merjenega objekta.



Slika 6: Principielna izvedba polprevodniškega linijskega detektorja

Glede na povedano velja

$$R_{q2} = p_1 \cdot R_q \text{ in } R_{q1} = (1 - p_1) \cdot R_q$$

$$p_1 = \frac{I_1}{I_1 + I_2}.$$

V primeru, ko razdaljo vpadnega žarka merimo iz sredine senzorja navzven je razdalja proporcionalna $(I_1 - I_2 / I_1 + I_2)$. Ker senzor ni deljen na rastre, kot je to primer pri CCD, je elektronsko vezje za zajem svetlobnega žarka in določitev razdalje dosti enostavnejše.

Vpadni žarek mora biti ustrezno fokusiran. V nasprotnem primeru končna (prevelika) površina vpadnega žarka zmanjša merilno ločljivost senzorja oziroma poveča merilni pogrešek, saj je središča točka vpadnega žarka ter s tem tudi pozicija objekta določena s pomočjo porazdelitve vpadne svetlobe preko celotne površine senzorja. Neenakomerna struktura površine merjenega objekta se zato odraža v odstopanju merilne veličine.

6.3 Meritev razdalje na osnovi zakasnitve merilnega signala

Razdalje oddaljenih objektov lahko merimo tudi posredno prek merjenja zakasnitve merilnega signala, ki ga le-ta potrebuje, da prepotuje razdaljo med oddajnikom in sprejemnikom. Njuno razdaljo popišemo z enačbo

$$d = v_w \cdot t,$$

kjer je v_w hitrost merilnega signala skozi medij v katerem potuje in t čas, v katerem merilni signal prepotuje razdaljo d med oddajnikom in sprejemnikom. Če se oddajnik in sprejemnik nahajata na istem mestu se enačba preoblikuje

$$d = \frac{v_w \cdot t}{2}.$$

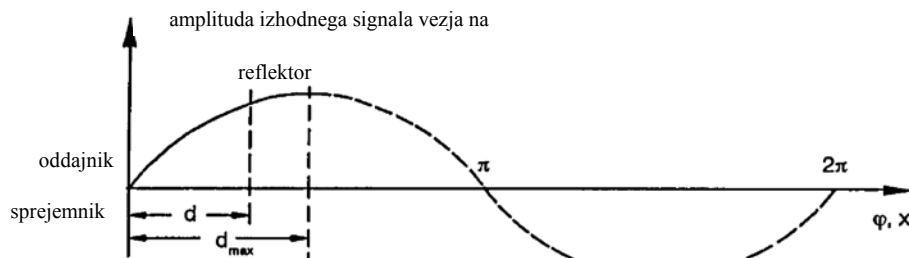
Kot merilni signal uporabljamo elektromagnetno in zvočno valovanje.

Meritev razdalje na osnovi fazne premaknitve moduliranega svetlobnega žarka

Imamo izvor svetlobnega žarka, ki mu jakost žarka moduliramo s krmilnim signalom konstantne amplitude in frekvence. Žarek ni nujno monokromatičen oziroma koharenten. Frekvenco modulatorskega signala izberemo tako, da pri maksimalni zakasnitvi žarka na določeni razdalji nastane fazni premik manjši od 180° .

Povezavo med časom zakasnitve, faznim premikom in modulatorsko frekvenco podaja enačba

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \quad \omega = 2\pi \cdot f_m.$$



Slika 7: Fazni premik kot indikator razdalje

Čas, ki ga potrebuje žarek, da prepotuje razdaljo med oddajnikom, reflektorjem in nazaj k sprejemniku, je enak

$$\Delta t = \frac{2 \cdot d}{c},$$

kjer je c svetlobna hitrost ($2,9979 \cdot 10^8$ m/s). Z združitvijo enačb () in () dobimo

$$2\pi \cdot f_m = \frac{\Delta\varphi \cdot c}{2d}$$

od kjer izhaja

$$d = \frac{\Delta\varphi \cdot c}{4\pi \cdot f_m}.$$

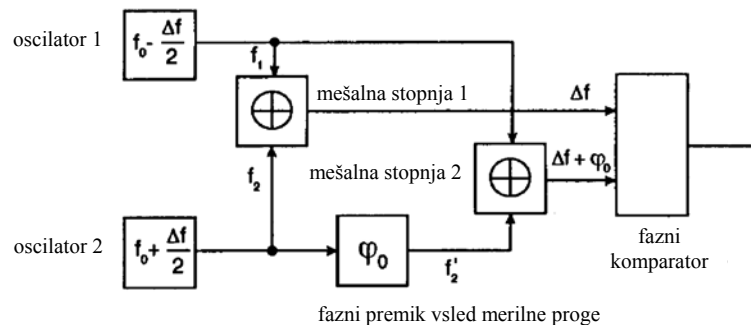
Razdalja d je preposorazmerna fazni premaknitvi svetlobnega žarka. Maksimalna razdalja, ki jo je moč izmeriti po tem principu in ki nastopi pri mejnem primeru $\Delta\varphi = \pi$ (kar ustreza fazni premaknitvi $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ od reflektorja) je enaka

$$d_{\max} = \frac{c}{4 \cdot f_m}.$$

Številčni primer: modulatorska frekvenca $f_m = 8 \text{ MHz}$ omogoča meritev razdalj do $d_{\max} = 9,375 \text{ m}$.

Merilna priprava

Fazno premaknitev merimo z merilno pripravo (slika 8), ki vsebuje oddajnik svetlobnega žarka, sprejemnik in elektronsko vezje za moduliranje svetlobnega žarka in izračun fazne premaknitve.



Slika 8: Merilno vezje za določanje razdalje na osnovi fazne premaknitve

Merilno vezje vsebuje referenčni oscilator 1 s frekvenco f_1 , ki je za Δf manjša od frekvence oscilatorja 2, ki napaja oddajni svetlobni vir. Svetlobni žarek, ki se odbije od reflektorja zazna sprejemnik. Zaradi končno velike zakasnitve skozi merilno progo je merilni signal s frekvenco f_2 fazno premaknjen za φ_0 .

Na izhodu prve mešalne stopnje dobimo signal s frekvenco Δf brez fazne premaknitve, medtem druga mešalna stopnja kombinira signal iz merilne proge

$$f_2^* t = (f_0 + \Delta f / 2) \cdot t + \varphi_0$$

s signalom

$$f_1 \cdot t = (f_0 - \Delta f / 2) \cdot t.$$

Njegov izhodni signal ima frekvenco Δf , a je glede na izhodni signal prve mešalne stopnje fazno premaknjen za φ_0 .

Mešalna stopnja-osnove

Imamo dva signala, ki se razlikujeta za frekvenco Δf

$$f_1 = (f_0 - \Delta f / 2)$$

$$f_2 = (f_0 + \Delta f / 2)$$

in sta fazno premaknjena za φ_0

$$u_1(t) = \hat{U}_1 \cdot \sin[2\pi(f_0 - \Delta f / 2) \cdot t - \varphi_0 / 2]$$

$$u_2(t) = \hat{U}_2 \cdot \sin[2\pi(f_0 + \Delta f / 2) \cdot t + \varphi_0 / 2].$$

Mešanje signalov ustreza pravzaprav njunemu množenju, kjer dobimo

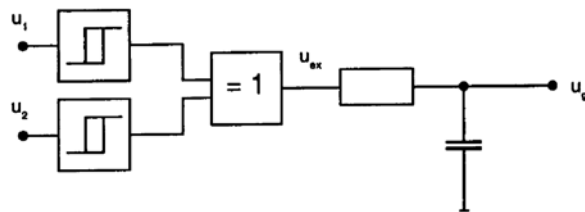
$$u_m(t) = \frac{\hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2}{2} \cdot [\cos(2\pi \cdot \Delta f \cdot t + \varphi_0) - \cos(4\pi \cdot f_0 \cdot t)].$$

Če takšen signal pošljemo preko nizkopasovnega filtra, bo izhodni signal vseboval le še nizkofrekvenčni del

$$u_m^*(t) = \frac{\hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2}{2} \cdot [\cos(2\pi \cdot \Delta f \cdot t + \varphi_0)].$$

Izhodni signal mešalne stopnje ima torej frekvenco, ki je enaka razliki frekvenc obeh vhodnih signalov, medtem ko se fazni premik vhodnih signalov prenese na izhodni signal brez spremembe.

V merilni pripravi za merjenje razdalje imata izhodna signala obeh mešalnih stopenj enaki frekvenci, a sta fazno premaknjena za φ_0 . Fazno premaknitev, ki je preprosto razmerje merjeni razdalji, določimo s pomočjo enostavnega faznega detektorja (slika 9).



Slika 9: Blokovna shema faznega detektorja

Na vhod pripeljemo oba izhodna signala mešalnih stopenj, ki imata sinusen potek. Na vhodu ju zato s pomočjo histereznega komparatorja najprej pretvorimo v pravokoten signal, ki ga lahko nato obdelujemo z digitalnim vezjem. Osrednji del faznega detektorja – merilnika faznega premika tvorijo XOR vrata. Srednja vrednost izhodnega signala teh vrat je največja pri fazni premaknitvi 180° in je enaka nič pri sofaznih vhodnih signalih.

Meritev razdalje na osnovi zakasnitve ultrazvoka

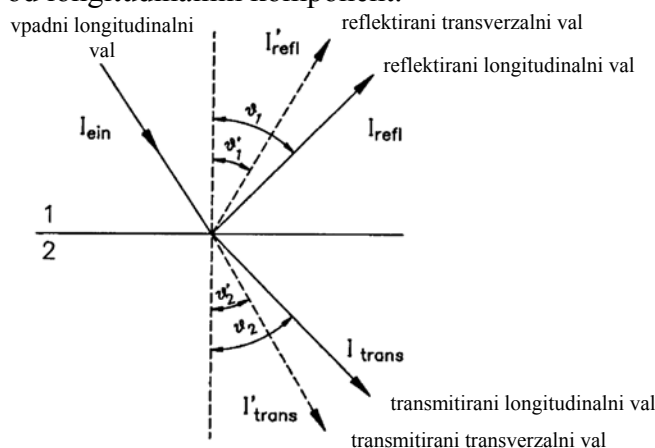
Merjenje časa potovanja ultrazvoka od oddajne k sprejemni anteni uporabljamo na večih področjih; tako ga na primer uporabljajo pomorščaki za določitev globine (sondiranje z ultrazvokom), za določitev višine ali katerekoli razdalje v vodi ali zraku. Omenjeni pojav izkoriščamo tudi na področju medicine in kontroli materialov – ultrazvočna diagnostika.

Pod pojmom ultrazvok označujemo akustična valovanja v frekvenčnem področju nad 20 kHz, torej onstran slišnega področja. V nasprotju z elektromagnetnim valovanjem se zvočni valovi lahko razširjajo le skozi materijo - medij (valovanje v vakuumu ni možno). Zvočni val je povezan s krajevnim in časovnim nihanjem-kolebanjem gostote, tlaka in temperature medija skozi katerega se val razširja. Razširjanje je pravtako odvisno od krajevnih in hitrostnih porazdelitev posameznih delcev medija. Vse naštetne veličine varirajo okoli neke srednje vrednosti. Osnova za razširjanje zvoka je torej elastičnost materiala.

Prenos in odboj ultrazvočnega valovanja

Podobno kot elektromagnetno valovanje tudi zvočno valovanje na stiku dveh različnih medijev prehaja iz prvega v drugega ali se na stični ploskvi odbije. V splošnem amplituda zvočnega valovanja pri razširjanju skozi medij slabi. Če je eden izmed medijev trdo telo, v

katerem so prisotne tlačne sile, potem se longitudinalni vpadni zvočni val na stični ploskvi deloma odbije (reflektira), del zvočnega vala pa prehaja v drug medij (transmisija). Če pa so v trdnem telesu prisotne tudi strižne sile, se pri vpadu longitudinalnega vala pojavita tudi transverzalni komponenti odbitega vala in vala, ki prehaja v drug medij. V splošnem sta njuna vpadna kota različna od longitudinalnih komponent.



Slika 10: Prehod ultrazvočnega vala na stiku dveh medijev

Vstopni in izstopni koti posameznih komponent so določljivi na osnovi lomnega zakona

$$\frac{c_1}{\sin \vartheta_1} = \frac{c_1^*}{\sin \vartheta_1^*} = \frac{c_2}{\sin \vartheta_2} = \frac{c_2^*}{\sin \vartheta_2^*},$$

kjer indeksa 1 in 2 označujeta različna medija, medtem ko c , c^* ter ϑ , ϑ^* označujejo hitrost razširjanja zvočnega valovanja ter vstopni oziroma izstopni kot longitudinalnega in transverzalnega vala.

Mehanska impedanca

Če mehansko telo periodično vzbuja s silo F oziroma tlakom p in s hitrostjo v , potem njuno razmerje imenujemo mehanska impedanca oziroma valovna impedanca

$$Z_m = \frac{p}{v} = \frac{F}{A \cdot v} = \rho \cdot c,$$

kjer je ρ gostota medija in c hitrost zvočnega valovanja.

Tabela 1: Hitrost zvoka, gostota in mehanska impedanca izbranih snovi

	c [msec ⁻¹]	ρ [kgm ⁻³]	Z_m [kgm ⁻² sec ⁻¹]
zrak	331	1,29	427
voda	1468	1000	$1,47 \cdot 10^6$
jeklo	594	$7,8 \cdot 10^3$	$46 \cdot 10^6$

Na intenzivnost oziroma jakost posameznih valovnih komponent je odločilna valovna impedanca, ki je za ravni (ploski) zvočni val v vsakem trenutku in vsaki točki prostora konstantna. Stopnji refleksije in transmisije lahko tako izrazimo glede na intenziteto vpadnega (pravokotnega) vala

$$T = \frac{I_{trans}}{I} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

$$R = \frac{I_{refl}}{I} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}.$$

Pri prehodu zvočnega valovanja iz plinastega medija v tekočino ali trdno telo je faktor refleksije blizu vrednosti 1, medtem ko je faktor transmisije praktično zanemarljiv. Vzrok temu je za nekaj velikostnih razredov manjša valovna impedanca plinastih snovi v primerjavi s tekočinami in trdnimi telesi.

Absorbcija, slabljenje

Slabljenje zvočnega valovanja popišemo z zmanjšanjem (spremembo) dp zvočnega tlaka na določeni infinitezimalni poti razširjanja dx

$$\frac{dp}{p} = -\alpha \cdot dx,$$

kjer je koeficient α faktor slabljenja.

Iz enačbe je razvidno, da je zmanjšanje zvočnega tlaka na dolžinsko enoto konstantno. Pri razširjanju zvočnega valovanja s frekvencami do 200 kHz v zraku je faktor slabljenja podan z enačbo

$$\alpha = f^2 \cdot 30 \cdot 10^{-12} \text{ s}^2/\text{m}.$$

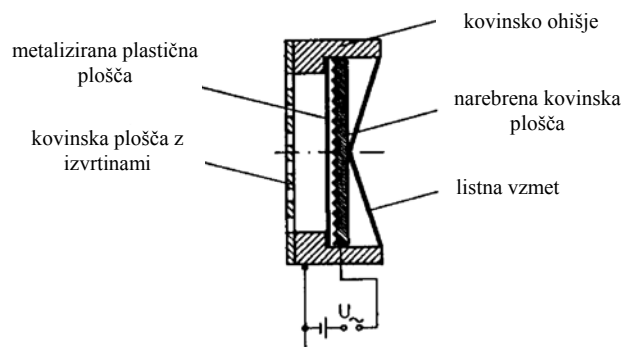
Kvadratična frekvenčna odvisnost razkriva, da je ultrazvočno valovanje z naraščanjem frekvence močno dušeno.

Ultrazvočni oddajniki in sprejemniki

Pretežno uporabljamo ultrazvočne pretvornike, ki bazirajo na piezokeramiki. Pretvorniki, ki izkoriščajo magnetostrikcijo se zaradi manjše intenzitete zvočnega vala uporabljajo redkeje. Izmed piezoelektričnih pretvornikov so še posebej razširjeni elektrostatični.

Elektrostatični ultrazvočni pretvornik

Pretvornik (slika 11) sestoji iz tanke metalizirane plastične membrane in narebrenе kovinske plošče, ki tvorita kondenzator. Ko nanj priključimo izmenično napetost, deluje med metalizirano folijo in kovinsko ploščo privlačna elektrostatična sila.



Slika 11: Shematična ponazoritev elektrostatičnega ultrazvočnega pretvornika

Izmenična napetost prisili membrano k nihanju z dvakratno vrednostjo vsiljene frekvence. To preprečimo z enosmerno prednapetostjo, ki dodatno zmanjša razdaljo med metalizirano folijo in ploščo, s čimer se občutno poveča sila povzročena z izmenično komponento.

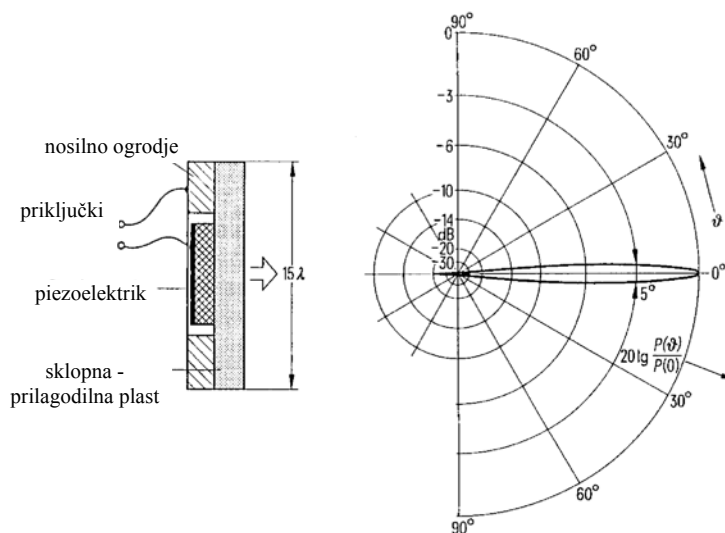
Kovinska plošča je vpeta z listno vzmetjo, ki omogoča uravnavanje frekvence nihanja sistema (do 500 kHz). Zračna blazina med metalizirano folijo in kovinsko ploščo mora biti hermetično zaprta.

Lastnosti: širokopasovnost, kratki časi vnihanja in iznihanja, relativno nizek zvočni tlak.

Piezoelektrični ultrazvočni pretvornik

Izkoriščamo reverzen pojav, ko se piezoelektrik (slika 12) zaradi električnega vzbujanja krči oziroma širi. Snovi pri katerih je piezoelektrični efekt tehnično najbolj izrazit imajo tudi to ugodno lastnost, da je valovna impedanca snovi, če piezoelektrik vzbujamo z resonančno frekvenco, enaka nič. Slednje je dobrodošlo pri izgradnji ultrazvočnega oddajnika ali sprejemnika, saj stik dveh medijev ne predstavlja ovir za prehod zvočnega valovanja.

V primeru, da obratovanje z resonančno frekvenco ni možno, moramo poskrbeti za primerno prilagoditev valovnih impedanc, kar storimo s tako imenovano sklopno plastjo, ki jo vgradimo med piezokeramiko in npr. zrakom. Na ta način dosežemo faktor transmisije blizu 2,5 %. Debelina sklopne plasti mora biti enaka $\lambda/4$, s čimer zagotovimo amplitudno ojačenje (zaradi mehanske resonance) zvočnega vala na površini oddajnika.



Slika 12: Presek piezoelektričnega oddajnika in pripadajoča sevalna karakteristika

Lastnosti: velik zvočni tlak, ozka smerna karakteristika, srednje veliki časi iznihanja, ozkopasovno delovanje, dosegljive so visoke frekvence.

Sevalna karakteristika

Ultrazvočni senzorji namenjeni merjenju razdalj morajo imeti ozko sevalno karakteristiko. Nanjo vplivajo najbolj izrazito geometrija sevalne površine, še posebej njena velikost, frekvenca ter fazna porazdelitev valovanja sevajoče površine (v praksi ni moč pričakovati, da bodo vse točke sevalne površine nihale sofazno).

Pri krožnem preseku valjčnega sevala s premerom D se pretežni del energije izseva v stožec s kotom

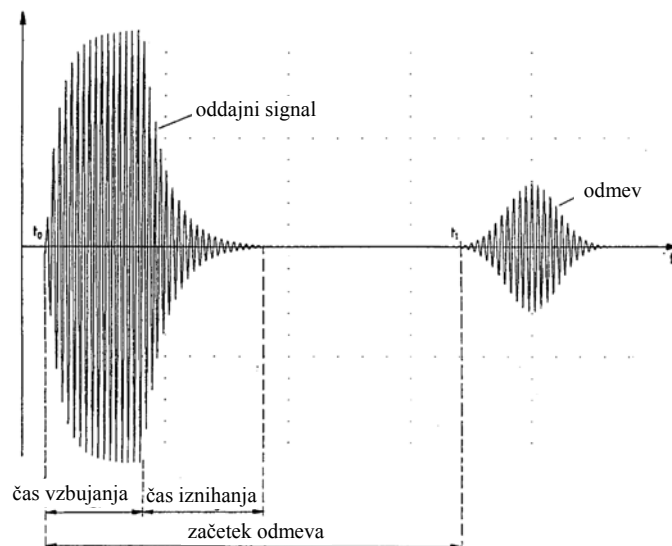
$$\vartheta = \arcsin(1,22 \cdot \lambda / D).$$

Če želimo teorej doseči ozko sevalno karakteristiko tudi pri večjih valovnih dolžinah, moramo ustrezno povečati premer sevalne površine. V praksi prekomerno povečevanje premera ni upravičljivo, saj se z rastočim premerom sevalne površine piezokeramike njene lastna (resonančna) frekvenca zmanjšuje.

Pogoj $D \gg \lambda$ lažje zadostimo, če na piezokeramiko manjšega premera pritrdimo sklopno plast. Zaradi fazne premaknitve posameznih točk sevalne površine pa se tudi takšna rešitev v praksi hitro sooči z omejitvami.

Merjenje razdalje na osnovi ultrazvočnega odmeva

Merilno osnovo takšnega sistema tvorita oddajnik in sprejemnik ultrazvočnega valovanja, ki se pogosto nahajata na istem mestu. Če želimo zato pravilno ovrednotiti časovni interval od trenutka, ko ultrazvočni oddajnik vklopimo (slika 13), pa do trenutka ko se odbiti ultrazvočni val vrne k sprejemniku, mora oddajnik delovati v impulznem načinu. Oddajnik odda torej v trenutku t_0 kratek paket ultrazvočnega valovanja, nakar prenehamo z oddajanjem, s ciljem da zaznamo odmev, ki ga sprejemnik zazna v trenutku t_1 .

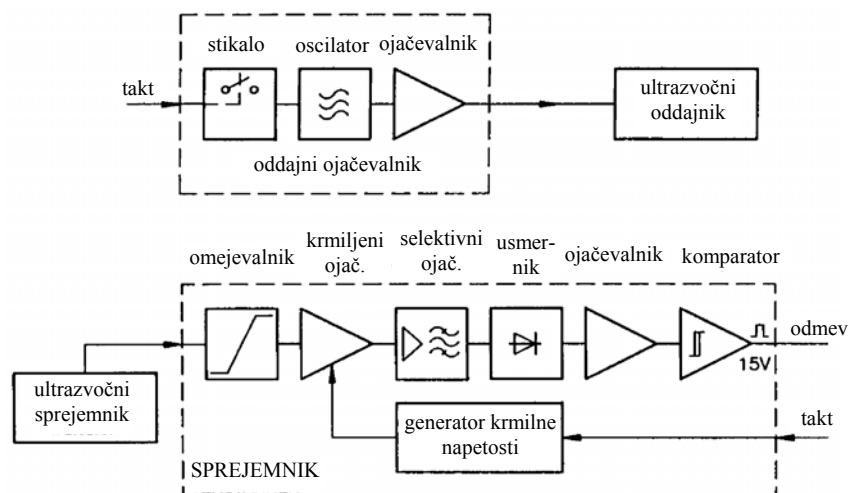


Slika 13: Časovni potek napetosti ultrazvočnega pretvornika

Zaradi impulznega načina obratovanja lahko uporabimo kot oddajnik in sprejemnik isti piezoelektrični pretvornik. Vendar ima takšna rešitev slabost, saj lahko odmev detektiramo šele po določenem času, ki ga pretvornik potrebuje, da se po prekinjenem električnem vzbujanju izniha. Mrtvi čas se odraža v neki minimalni razdalji, pod katero ni mogoče zaznati odmeva in s tem pravilno izmeriti razdaljo.

Omenjena razdalja znaša 0,2 m oziroma 0,8 m za sisteme za merjenje razdalje do 1 m oziroma do 6 m. Pripadajoči čas iznihanja (mrtvi čas) znaša tako cca. 1 ms pri 1 m sistemu oziroma 5 ms pri 6 m sistemu.

Principielno zgradbo merilnega sistema, ki dela v pulznem obratovanju, kaže slika 14.

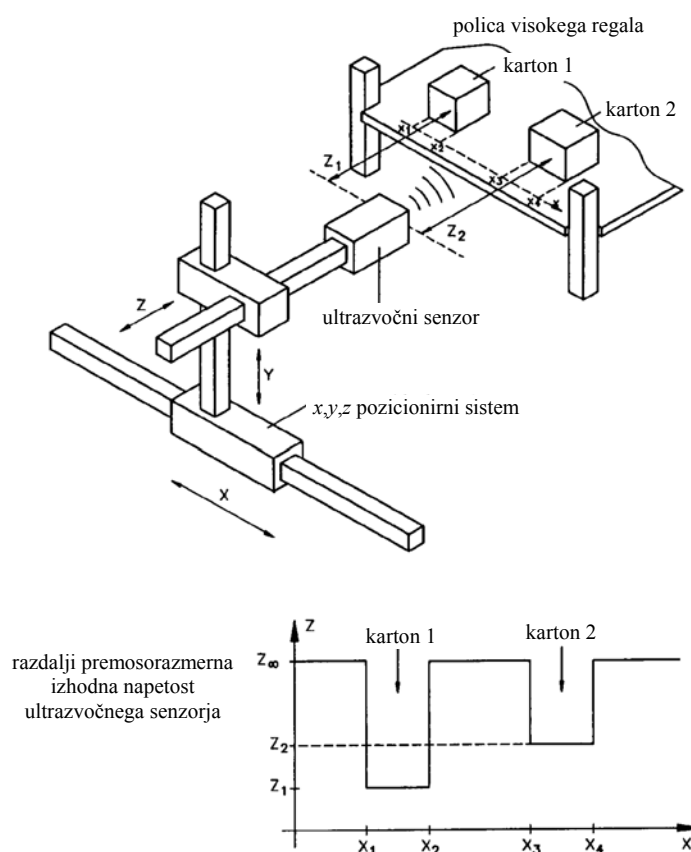


Slika 14: Principielna zgradba oddajnega in sprejemnega dela

Delovanje oddajnika krmilimo prek krmilnega pulza, s katerim vklapljam in izklapljam izhodno ojačevalno stopnjo, ki napaja piezoelektrični pretvornik z izmenično napetostjo (cca. 250 V_{pp}). Odbiti ultrazvočni signal zaznamo s sprejemnim piezoelektričnim pretvornikom, ki izmenično napetost s senzorja najprej ojači, usmeri in s pomočjo napetostnega komparatorja pretvori v pravokotni impulz. Časovni interval od začetka vzburjanja pa do detektiranja odmeva pomerimo z digitalnim vezjem, ki na sliki ni prikazan (krmilni pulz sproži »štoparico«, ki se zaustavi, ko se zazna odmev-pozitivna strmina pravokotnega pulza).

Primer uporabe: **identifikacija lege**

Identifikacijo lege opišimo na primeru visoko regalnega sistema, ki ga oskrbuje računalniško krmiljena manipulativna roka, na kateri je pritrjen piezoelektrični merilnik razdalje. Merilnik razdalje skupaj s poznanimi parametri pozicioniranja roke po x in y osi omogoča prostorsko zaznavanje napolnjenosti regalov, kar je razvidno tudi na slika 15.



Slika 15: Shematična ponazoritev pozicioniranja v visoko regalnem sistemu