

Kako ultrazvučni dijagnostički uređaj mjeri udaljenosti u tkivu?

Selim Pašić¹, Antea Klobučar²

Uvod

Ultrazvučna dijagnostika je vrlo dragocjena moderna dijagnostička metoda oslikavanja tkiva u veterinarskoj [1] i humanoj medicini [2]. Uređaji su relativno jeftini, samo snimanje ne košta gotovo ništa, a ultrazvučni valovi ne ostavljaju nikakve posljedice po zdravlje pacijenta [3]. Na tržištu možemo sresti stacionarne ultrazvučne uređaje koji se koriste u humanoj medicini, i pokretne koji se često koriste u veterinarskoj medicini.

Ultrazvučni uređaji koriste ultrazvuk kao fizikalni fenomen. Ultrazvučni valovi su zvučni valovi frekvencije veće od 20 kHz (maksimalna frekvencija koju naše uši mogu čuti). Dijagnostički ultrazvučni uređaji imaju dvojaku funkciju. S njima vidimo tkiva, granice između njih i promjene u njima (lezije) koji se oslikavaju na monitoru uređaja. Ultrazvučnim uređajima se mjere i udaljenosti u tkivima. Npr. možemo izmjeriti promjer nekog organa te vidjeti je li njegova veličina u fiziološkim granicama. Ili izmjeriti dimenzije neke lezije. To je važna klinička informacija jer u slučaju malih dimenzija lezija se obično samo prati, a u slučaju većih dimenzija vjerojatno se rade dodatne pretrage.

Ultrazvučni uređaj

Dijagnostički ultrazvučni uređaj radi na specifičnim fizikalnim principima. Sastoji se od sonde, elektronike te monitora na kojem se prikazuje slika. Sonda je istovremeno i izvor i detektor ultrazvučnog vala, dakle, dva uređaja u jednom. Takvo svojstvo joj omogućava poseban materijal koji se zove piezoelektrik. Ukoliko promjenjivo električno polje oscilira, ono deformira piezoelektrični kristal. Deformacije kristala prate oscilacije električnoga polja, te proizvode ultrazvučni val jednak frekvenciji osciliranja električnog polja. Ali ako ultrazvučni val pogodi piezoelektrični kristal on će vibrirati frekvencijom ultrazvučnog vala i te mehaničke deformacije će proizvesti promjenjivo električno polje koje registrira elektronika i obrađeni signal šalje na monitor ultrazvučnog uređaja.

Ultrazvučni uređaj radi na način da sonda emitira puls ultrazvučnog vala (slika 1) te se prebací u režim osluškivanja, tj. u detektorski režim rada, gdje provodi najviše vremena. Kako ultrazvučni val putuje tkivom nailazi na promjene u tkivu, ili granice dvaju tkiva. Na tim mjestima se ultrazvučni val djelomično reflektira (vraća se unazad) i djelomično transmitira (nastavlja dalje) (slika 2). Reflektirani val se vraća u ultrazvučnu sondu koja ga registrira. Iz tog razloga se ultrazvučna dijagnostika zove još i ehosonografija (echo = odjek ili reflektirani zvučni val, sono = zvuk, grafija = oslikavanje).



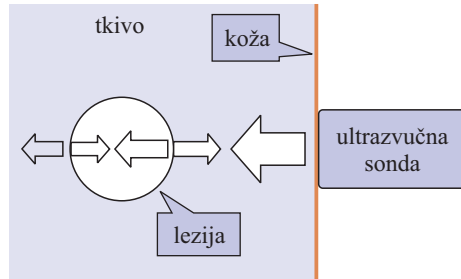
Slika 1. Puls ultrazvučnog vala

¹ Dr. sc. Selim Pašić, docent na Zavodu za fiziku, Veterinarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu; e-pošta: selimpasic@gmail.com

² Antea Klobučar, univ. mag. i dr. med. vet., Ministarstvo obrane Republike Hrvatske, Oružane snage Republike Hrvatske, Hrvatska ratna mornarica.

Mjerenje udaljenosti

Princip mjerenja udaljenosti ultrazvučnog dijagnostičkog uređaja je jednostavan. Uređaj mjeri vrijeme između emisije ultrazvučnoga vala i detekcije reflektiranog vala. Dakle vrijeme pretvara u udaljenost. Da bi do kraja shvatili taj princip, pogledajmo situaciju na slici 2.



Slika 2. Na slici je prikazana ultrazvučna sonda, tkivo, lezija u njemu, te ultrazvučni valovi. Upadni ultrazvučni val se djelomično reflektira, a djelomično transmitira na ulaznoj granici lezije i tkiva. Zatim se transmitirani val ponovno djelomično reflektira, a djelomično transmitira na izlaznoj granici lezije.

Imamo leziju u tkivu i želimo izmjeriti njenu veličinu (promjer) u smjeru emitiranja ultrazvuka. Ultrazvučna sonda emitira puls ultrazvučnog vala koji se na ulaznom zidu lezije djelomično reflektira i djelomično transmitira. Reflektirani val putuje natrag u sondu koja ga registrira. Neka je Δt_1 vrijeme proteklo od emisije ultrazvučnog vala iz sonde do detekcije reflektiranog vala, a v brzina ultrazvuka u tkivu. Tada je L_1 udaljenost ulaznoga zida lezije od sonde dana s

$$L_1 = \frac{v\Delta t_1}{2}.$$

Transmitirani val se dalje nastavlja širiti unutar lezije do njenog izlaznog zida, gdje se ponovo događa djelomična refleksija i transmisija. Reflektirani val se vraća u sondu koja ga registrira nakon vremena Δt_2 od emisije ultrazvučnog vala iz sonde. Udaljenost izlaznog zida lezije je

$$L_2 = \frac{v\Delta t_2}{2}.$$

Tada je promjer lezije

$$d = L_2 - L_1.$$

Razlučivanje

Razlučivanje je sposobnost instrumenta da razlikuje vrlo bliske detalje. Definirana je mjerom razlučivosti d_{\min} . To je najmanja udaljenost između dviju točaka koje se još vide kao dvije točke. Na manjoj udaljenosti od d_{\min} uređaj ne vidi odvojeno dvije točke, već kao jednu. Ovdje nas zanima razlučivanje u smjeru širenja vala. Ono se zove aksijalno razlučivanje. Postoje i razlučivanja u druga dva okomita smjera.

Aksijalno razlučivanje ovisi o duljini l ultrazvučnog pulsa (slika 1), kojeg emitira sonda, a definirana je kao $l = n\lambda$, gdje je n broj valova u pulsu, a λ valna duljina ultrazvučnog vala. Iz toga slijedi da je mjera za razlučivanje

$$d_{\min} = \frac{l}{2}.$$

Ultrazvučni uređaj razlikuje porast od pada amplitude pulsa, pa mu je dovoljna polovina duljine pulsa da bi ga mogao razlučiti od narednog.

Moderni ultrazvučni uređaji rade u frekvencijskom rasponu od 2 do 15 MHz [4]. Ultrazvučni uređaji tipično emitiraju tri vala u pulsu ($n = 3$). Uzmimo da je brzina ultrazvuka u tkivu $c = 1500$ m/s. Tada je mjera za razlučivanje na frekvenciji f dana s

$$d_{\min} = \frac{1}{2}n\lambda = \frac{1}{2}n\frac{c}{f}.$$

Pogledajmo koliko je razlučivanje za 4 i 10 MHz. Iz gornje relacije slijedi da je na frekvenciji $f = 4$ MHz, $d_{\min} = 0.6$ mm, a na frekvenciji $f = 10$ MHz, $d_{\min} = 0.15$ mm. Dakle, što je veća frekvencija ultrazvučnog vala to je bolje aksijalno razlučivanje.

U ovom trenutku netko bi se mogao pitati, a zašto se ne koriste uvijek visoke frekvencije ultrazvuka koje daju slike visoke razlučivosti? Odgovor je da s porastom frekvencije raste apsorpcija ultrazvuka. Naime ultrazvuk se eksponencijalno apsorpira u tkivu s povećanjem dubine tkiva. Ali apsorpcija se povećava i s povećanjem frekvencije. Stoga, se visokofrekventni valovi skoro u potpunosti apsorpiraju prije nego što dosegnu duboke dijelove tkiva. Tada sonda ne dobiva više nikakve reflektirane valove (informacije). Dakle, izbor frekvencije ultrazvučnog vala je stvar kompromisa između dobrog razlučivanja i male apsorpcije. Stoga, tkiva na manjoj dubini možemo snimati s višim frekvencijama i dobiti bolje razlučivanje. Za duboka tkiva moramo uzeti niže frekvencije, da bi dobili informacije iz većih dubina, i pomiriti se sa slikom niže razlučivosti. U tablici su prikazani, po frekvencijama, izbor tkiva i područja tijela koja se oslikavaju i u kojima se mogu mjeriti udaljenosti [4].

frekvencija ultrazvuka [MHz]	tkiva i područja tijela
2.5	duboki abdomen, akušerstvo i ginekologija
3.5	općenito abdomen, akušerstvo i ginekologija
5.0	vaskularno tkivo, dojke, zdjelica
7.5	dojke, štitnjača
10.0	dojke, štitnjača, površinske vene, površinske mase, mišićno-koštani prikaz
15.0	dvovršinske strukture, mišićno-koštani prikaz na malim dubinama

Tablica 1. Tkiva i područja tijela koja se mogu oslikavati i u kojima se mogu mjeriti udaljenosti ovisno o frekvenciji ultrazvučnoga vala.

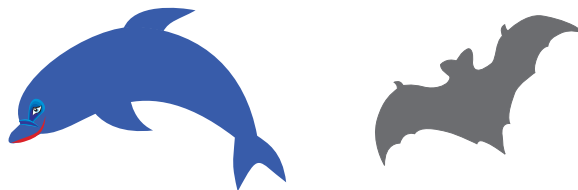
Diskusija i primjena

Preciznost mjerenja udaljenosti u tkivima ovisi o dobrom poznavanju brzine zvuka u tkivima. Ona je u rasponu od 1500 do 1700 m/s, osim u kostima, gdje je znatno veća. No najčešće je oko 1500 m/s. Ultrazvučni uređaj pretpostavlja brzinu u tkivu jer zapravo precizno ne zna kroz koju vrstu tkiva je prošao ultrazvuk.

Ukoliko želite vizualno doživjeti i eksperimentalno izučavati principe ultrazvučnog oslikavanja i mjerenja udaljenosti u tkivima, upućujemo vas na [5]. Tamo izloženi uređaj se sastoji od jedne dulje opruge, štoperice i plastičnog ravnala, te je stoga vrlo pristupačan za izvođenje u školama i fakultetima kao laboratorijska vježba, ali i kao demonstracija. Na Veterinarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu izvodi se kao laboratorijska vježba u okviru kolegija Fizika i biofizika.

Metoda mjerenja udaljenosti u ultrazvučnoj dijagnostici se također upotrebljava i u građevinarstvu. Na tom principu se ručnim ultrazvučnim uređajima mjere udaljenosti npr. dimenzije neke prostorije. U prirodi, delfini i šišmiši koriste isti princip za mjerenje udaljenosti prepreka, odnosno orijentacije u prostoru.

Šišmiši upotrebljavaju ultrazvuk u frekvencijskom rasponu od 20 do 80 kHz. Takve niže ultrazvučne frekvencije se relativno slabo apsorbiraju što daje relativno veliki domet tj. šišmiš može osjetiti prepreke na relativno velikoj udaljenosti.



Slika 3. Delfini i šišmiši koriste ultrazvuk za mjerenje udaljenosti i orijentaciju u prostoru na isti način kao što dijagnostički ultrazvučni uređaj mjeri udaljenost u tkivima.

Delfin za orijentaciju upotrebljava ultrazvuk u znatno većem frekvencijskom opsegu 20 – 100 kHz. On može upotrebljavati mnogo više frekvencije od šišmiša na većim udaljenostima, jer je apsorpcija zvuka u vodi vrlo mala. Veće frekvencije mu daju i bolju razlučivost. Također, brzina zvuka u vodi je 4.5 puta veća nego u zraku što omogućava delfinu brže reakcije. Dakle, voda je izvrstan medij za zvuk, znatno bolji od zraka, pa je ultrazvučni “vid” delfina bolji nego onaj kod šišmiša.

Literatura

- [1] R. V. COOTNEY, *Ultrasound Imaging: Principles and Applications in Rodent Research*, ILAR Journal 42, 233–247, 2001.
- [2] B. STARKOFF, *Ultrasound physical principles in today's technology*, Ultrasound Med. 17, 4–10, 2015.
- [3] C. PENG, Q. CAI, M. CHEN, X. JIANG, *Recent Advances in Tracking Devices for Biomedical Ultrasound Imaging Applications*, Micromachines 13, 1855, 2022.
- [4] M. NADRLJANSKI, A. MURPHY, M. MORGAN et al., *Ultrasound frequencies*, Reference article, Radiopaedia.org., 2022, <https://doi.org/10.53347/rID-8664>.
- [5] S. PAŠIĆ, N. POPARA, *A simple classroom exercise for teaching principles of ultrasound diagnostic using two springs*, Phys. Educ. 57, 065006, 2022.