

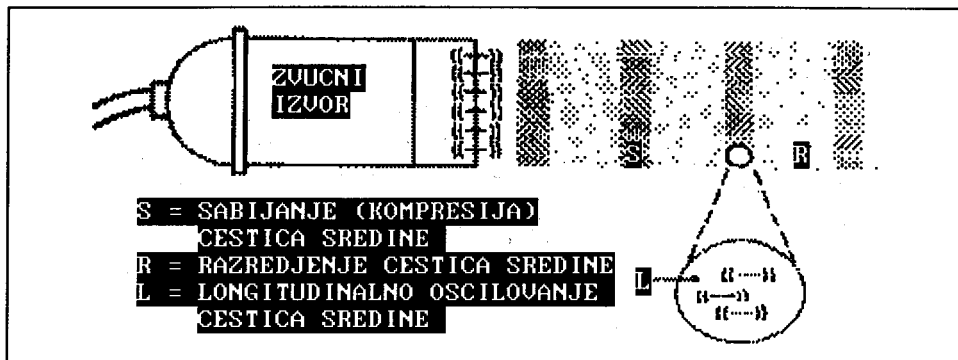
II

FIZIČKE OSOBINE ZVUKA

U glavnim crtama

- **Parametri oscilatornog kretanja**
- **Atenuacija zvuka**
- **Ehoskopi**
- **Akustički artefakti**

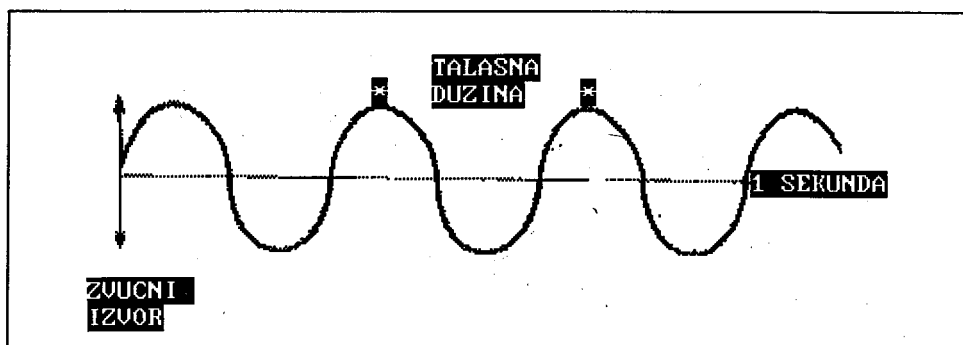
Zvuk predstavlja usmereno periodično oscilatorno kretanje čestica sredine kroz koju se prostire zvučni talas. Oscilovanje čestica sredine može da bude upravno (transverzalno) ili longitudinalno pravcu prostiranja zvučnog talasa (kroz meko tkivo moguće je samo *longitudinalno* prostiranje zvuka). Fizičke osobine zvučnog talasa određuju parametri oscilatornog kretanja: frekvencija, talasna dužina, brzina i jačina zvuka.



Slika 4. Longitudinalno prostiranje zvuka. Od zvučnog izvora zvuk se prenosi longitudinalnim periodičnim oscilovanjem (=treperenjem), tj. sabijanjem i razredjenjem čestica sredine.

Ad 1. Frekvencija zvuka (ν) označava broj oscilacija čestica sredine (=učestalost oscilacija zvučnog izvora) u jedinici vremena, izražava se u hercima (Hz) i označava simbolom " ν ". Zvuk frekvence niže od 16 Hz (donja granica čujnosti ljudskog uha) je infrazvuk, frekvencije više od 20 000 Hz (gornja granica čujnosti ljudskog uha) je ultrazvuk. Frekvencija oscilovanja ultrazvučnog izvora je od 2×10 do 10 Hz.

Ad 2. Talasna dužina zvuka (λ) predstavlja udaljenost dvaju čestica sredine koje se nalaze u istoj fazi oscilacije i jednako udaljenosti od ravnotežnog položaja. Talasna dužina zvuka izražava se u mm i označava se simbolom " λ ". U dijagnostičkom ultrazvuku koriste se zvučni talasi talasne dužine od 0,1-1,5 mm. Talasna dužina ultrazvučnog snopa određuje teoretsku granicu rezolucije ultrazvučnog uređaja.



Slika 5. Grafički prikaz parametara oscilatornog kretanja: frekvencija i talasna dužina zvučnog talasa.

Ad 3. Brzina prostiranja zvuka (akustička brzina) (v) je brzina kojom se zvučni talas prenosi kroz određenu sredinu. Brzina zvuka zavisi od prirode materije kroz koju se zvuk prostire, izražava se u mm/sec, označava se simbolom "v" i definisana je relacijom: $v = \nu \cdot \lambda$. U ljudskom tkivu brzina prostiranja zvuka kreće se od 1490-1660 m/sec i približna je brzini zvuka pri kretanju kroz vodu (1500 m/sec). Ultrazvučni uređaji koji se koriste u ginekologiji i akušerstvu podešeni su za merenja pri brzini prostiranja zvuka od 1540 m/sec.

Tabela 1. Akustička brzina pojedinih tkiva

vazduh	331 m/sec.	voda	1495 m/sec.
meka tkiva	1540 m/sec.	bakar	6400 m/sec.
masno tkivo	1450 m/sec.	mokraća	1535 m/sec.
skelet	4080 m/sec.	meko tkivo	1540 m/sec.

Jačina zvuka (intenzitet zvuka) (W/cm) je energija kojom se zvuk prostire kroz određenu sredinu, izražava se vatima po $cm(W/cm)$. Prema jačini zvučnog talasa, dejstvo ultrazvučnog snopa je dijagnostičko i terapijsko. Intenzitet dijagnostičkog ultrazvuka je 1-50 mW/cm (0,001-0,05 W/cm). Terapijski ultrazvuk koristi jačinu ultrazvučnog snopa od 1-3 W/cm (u hirurgiji i do 10 W/cm). U deklaraciji svakog ultrazvučnog uređaja postoji podatak o jačini ultrazvučnog talasa koji aparat koristi. Intenzitet zvuka važan je činilac u razmatranju biološkog delovanja ultrazvuka na živa tkiva.

Atenuacija zvuka

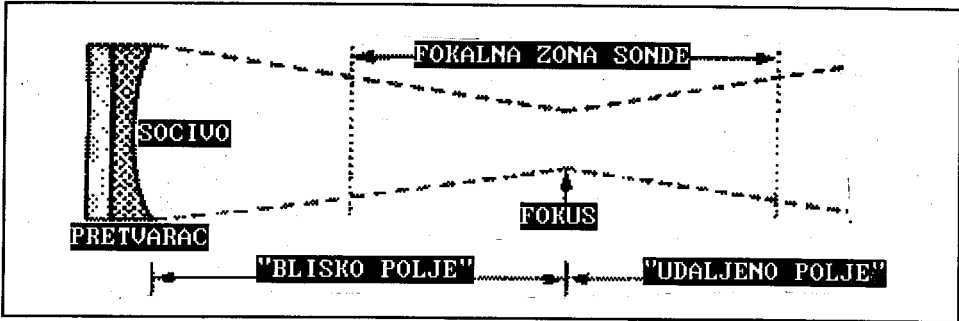
Prolaskom kroz tkivo (zbog otpora koje pruža tkivo ultrazvučnom snopu), zvuk se prigušuje, jačina zvuka se umanjuje, slabi. Nastaje *atenuacija zvučnog talasa*

fizička pojava slabljenja amplitude i jačine zvuka prolaskom zvučnog talasa kroz tkivo.

Atenuacija zvuka javlja se kao posledica divergencije, refleksije, refrakcije i absorpcije zvučne energije.

Ad 1. Divergencija zvučnog snopa. U prostoru bliskom ehoskopu ultrazvučni talasi paralelni su jedan drugom (bliska zona, proksimalna zona, near field, Fresnelovo polje). Udaljavanjem od sonde emitovani ultrazvučni snop se rasipa, divergira divergentna zona snopa (distalna zona, *far field*, Franhoferovo polje). Za dobijanje jasnog ultrazvučnog snimka potrebno je da postoji što veći "near field" ultrazvučne sonde. Tehnički, ovo se postiže *fokusiranjem ultrazvučnog snopa*.

Za fokusiranje ultrazvučnog snopa upotrebljava se optički sistem sastavljen od sabirnih sočiva koji se zove ultrazvučni pretvarač. Za razliku od fokusiranja svetlosnih zraka (kroz sabirno sočivo svetlosni zraci fokusiraju se u jednoj tački), fokusirani snop ultrazvučnih talasa koncentriše se u određenom prostoru (=zoni), koja se zove fokalna zona sonde.



Slika 6. Fokusiranje ultrazvučnog snopa.

U zavisnosti od jačine sabirnog optičkog sistema, područje fokalne zone sonde je malo (1-4cm), srednje (4-8cm) i veliko (6-12cm). Veličina fokalne zone sonde određuje

rezoluciju ultrazvučnog uređaja

= sposobnost ultrazvučnog uređaja za *separatno prikazivanje (razlučivanje) dve susedne tačke koje se nalaze u ravni snimanja ultrazvučnog transdijusera; ili jednostavnije: najkraće rastojanje dve susedne tačke koje na monitoru ultrazvučnog uređaja još uvek mogu da se prikažu razdvojeno*. Rezolucijom ultrazvučnog uređaja praktično je definisan kvalitet ultrazvučne slike.

Dve vrste rezolucije:

- aksijalna (osna, linearna) i
- lateralna (azimutna).

Aksijalna (osna, linearna) rezolucija predstavlja sposobnost ultrazvučnog uređaja za *separatni prikaz dve susedne tačke koje se nalaze u ravni paralelnoj prostiranju ultrazvučnog snopa i izražava se u mm*. Osna rezolucija zavisi od frekvence ultrazvučnog snopa (aksijalna rezolucija = 2λ), upravo je proporcionalna frekvenci, (obrnuto proporcionalna talasnoj dužini) ultrazvučnog snopa. Talasna dužina ultrazvučnog snopa određuje teoretsku granicu aksijalne rezolucije ultrazvučnog uređaja, ili preciznije: aksijalna rezolucija ne može da bude veća od talasne dužine ultrazvučnog snopa. Kod najkvalitetnijih ultrazvučnih uređaja, u fokalnoj zoni sonde, donja granica aksijalne rezolucije je 0,5 mm.

Lateralna (azimutna) rezolucija predstavlja sposobnost *separatnog prikaza dve susedne tačke koje se nalaze u ravni upravnoj na ravan prostiranja ultrazvučnog snopa i izražava se u mm*. Lateralna rezolucija je upravo proporcionalna talasnoj dužini (obrnuto proporcionalna frekvenci) ultrazvučnog snopa, a zavisi od oblika i širine ultrazvučnog snopa: što je ultrazvučni snop širi, to je lateralna rezolucija slabija. Kod savremenih ultrazvučnih uređaja, u fokalnoj zoni sonde, donja granica lateralne rezolucije je 1-2 mm. Lateralna rezolucija bolja je od aksijalne za faktor 3-4.

Ad 2. Refleksija zvuka je sposobnost zvučnog talasa da se odbija od granicu površina dvaju sredina različitih gustina. Ugao refleksije i relacija propuštenih i odbijenih zvučnih talasa zavisi od brzine zvuka i otpora sredine kroz koju se prostire zvuk.

Ad 3. Refrakcija (prelamanje) zvučnog talasa je svojstvo zvuka da se prelama prolaskom kroz granicu dvaju sredina različitih gustina (pod uglom koji nije 90°).

Ad 4. Absorpcija zvuka (akustička impedanca). Jačina zvuka opada sa kvadratom udaljenosti emitovanog zvučnog talasa od zvučnog izvora. Prilikom prolaska ultrazvučnog snopa kroz tkivo, usled otpora tkiva ultrazvučnom snopu, deo kinetičke energije zvučnog talasa pretvara se u toplotnu energiju. Otpor sredine zvučnom talasu zove se akustička impedanca, različit je za sredine različitih gustina i karakterističan je za svako tkivo. Akustička impedanca određena je relacijom gustine tkiva i brzine ultrazvučnog snopa:

$$\text{akustička impedanca} = \text{gustina tkiva} \cdot v$$

Otpor tkiva ultrazvučnom snopu osnovni je razlog loše distalne vizuelizacije ultrazvučne slike i glavni je uzrok nastanka objektivnih artefakata u ultrazvučnom snimku.

Ehoskopi

(=ultrazvučni pretvarači=ultrazvučni transdjuseri
=ultrazvučne sonde)

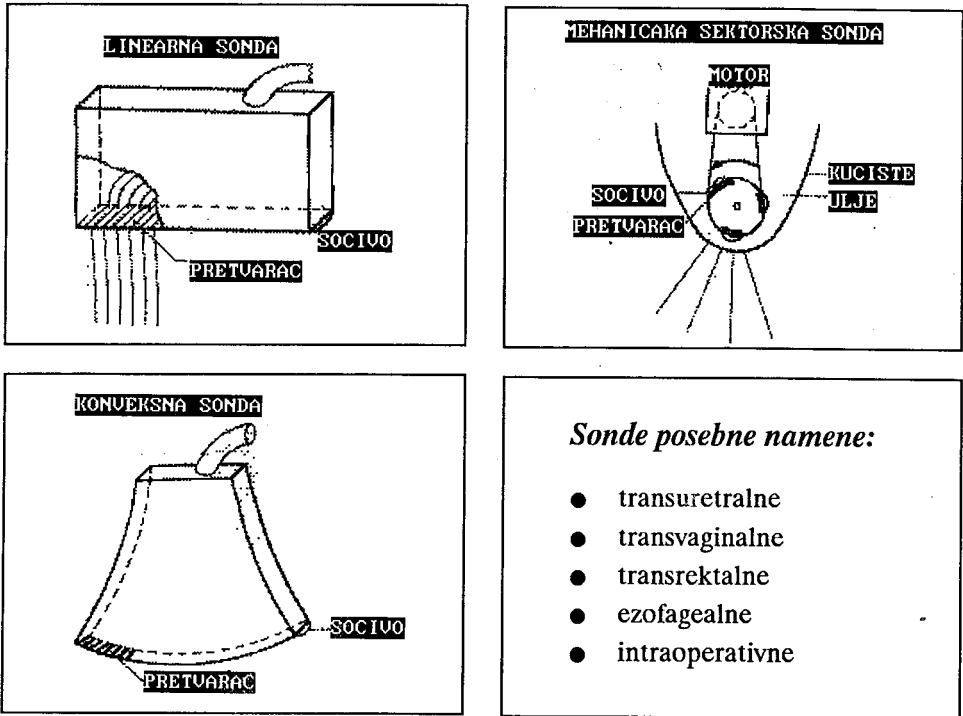
Ehoskopi su uređaji koji ultrazvučne talase istovremeno generišu i emituju, a odbijene prikupljaju i transformišu u elektromagnetni impuls. Osnovni element ehoskopa je ultrazvučni pretvarač -pizeoelektrični kristal (kvarc, turmalin). Skup više ultrazvučnih pretvarača sačinjava ehoskopsku sondu (ultrazvučni transdjuser). Prema konstrukcionim osobinama ultrazvučne sonde su linearne, sektorske, konveksne i sonde posebne namene.

Linearne sonde. Kristali sonde nalaze se u linearnom nizu. Slika je pravougaonai pogodna je za ginekologiju, pregled dojki, štitne žlezde i dečjih kukova.

Sektorske sonde. Slika nastaje rotacijom ultrazvučnog pretvarača u kućištu. Zvučni talas je u obliku lepeze (sektora), slika ima trouglast oblik. Koristi se za gornji abdomen, ginekologiju i kardiologiju.

Konveksne sonde. Ultrazvučni pretvarači su smešteni u luku na zakrivljenoj površini. Slika je oblika odsečka kruga lepezasta, kao kod sektorske sonde, pogodna je za sve organe, sem za srce.

Sonde posebne namene svojim oblikom prilagodjene su za ultrazvučni pregled uvodjenjem sonde kroz šuplje organe (intrakavitarnne sonde). U ovu grupu ultrazvučnih sondi uvrštavaju se *transuretralna*, *transvaginarna*, *transrektalna* i *ezofagealna sonda*. Vid sondi posebne namene su i *intraoperativne sonde*, pregled organa vrši se u toku operativnog zahvata, neposrednim prislanjanjem sonde direktno na površinu organa.



Slika 7. Osnovni tipovi ultrazvučnih pretvarača.

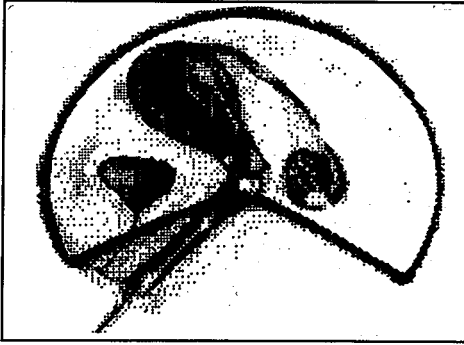
Transvaginalna ultrazvučna sonda

Transvaginalna ultrazvučna sonda nalazi se u grupi mehaničkih sektorskih sonda, po funkciji uvrštava se u grupu sonda posebne namene, oblika prilagodjenog za transvaginalnu primenu. Blizina vrha sonde šupljini male karlice omogućava

- dobru vizuelnu eksploraciju ženske karlice,
- jasan prikaz detalja unutrašnjih ženskih genitalnih organa i
- primenu TV ultrazvučno vodjenih operativnih, invazivnih (punkcionih) postupaka, sa praktičnim diferencijalno-dijagnostičkim i terapijskim značajem.

Tehničke karakteristike TV ultrazvučne sonde uređaja Kretz Kombison 320:

- dužina kućišta sonde 255 mm,
- prečnik glave sonde 10,5 mm.
- sonda funkcioniše na principu pulsnog talasa, emituje 10-70 pulsa u sekundi,
- ugao snimanja sonde je 240° ,
- radna frekvencija TV sonde: 5 MHz, 6,5 MHz i 7 MHz.
- karakteristike fokalne zone sonde: udaljenost fokalne zone 40 mm, širina fokalne zone 20-70 mm,
- rezolucija slike u fokalnoj zoni sonde: aksijalna rezolucija: 0,5mm, lateralna rezolucija: 1,3mm (aksijalna i lateralna rezolucija poboljšane su za 40-50% u poredjenju sa rezolutivnim mogućnostima sonda koje se koriste u konvencionalnoj TAS.



Slika 8. Šematski prikaz TV ultrazvučne sonde.

Pogreške u tumačenju ultrazvučne slike (akustički artefakti)

U ultrazvučnoj dijagnostici moguće je da nastanu pogreške u interpretaciji ultrazvučne slike. Ove greške su zbog objektivnih ili subjektivnih razloga.

Ad 1. Objektivne pogreške u tumačenju ultrazvučne slike (akustički artefakti), nastanu delovanjem objektivnih činilaca na izgled ultrazvučnog snimka (prolazak ultrazvučnog talasa kroz tečan sadržaj (urin) ili čvrstu supstancu (metal). Mada poreklo grešaka može da bude veoma različito, (tehnička greška ultrazvučnog uređaja, prisustvo vazduha na vrhu TV sonde), ovakvi artefakti najčešće su posledica međudelovanja ultrazvučnog snopa i posmatranog tkiva.

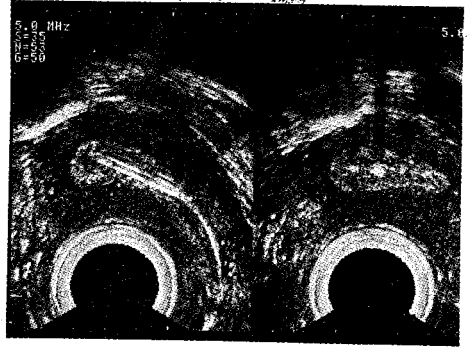
Tri grupe objektivnih pogrešaka:

- pojačani odjek dubokih tkiva
- akustička senka
- reverberacija

Pojačani odjek dubokih tkiva (posterior enhancement). Jačina ultrazvučnog snopa opada sa rastojanjem koje prelazi ultrazvučni talas. Pošto zvučni snop prolaskom kroz tečnu sredinu gubi manje energije nego kroz solidan medijum, odbijeni ehoi distalne granice tečne sredine prikazuju se više umnoženi nego što je to u stvarnosti. Ovo je razlog da se iza pune mokraćne bešike (ili cistične tvorevine) uvek vidi pojačan eho, nalik na solidno tkivo. S obzirom da je u TV ultrazvučnoj tehnici pregleda mokraćna bešika sasvim ispražnjena, ovaj vid objektivne pogreške u interpretaciji ultrazvučne slike praktično se nikada ne javlja.

Akustička senka. Određena tkiva (skeleton), supstance (metal) ili sredina (gas) stvaraju akustičku senku. Ovo je razlog da u ultrazvučnom snimku, u prostoru koji se nalazi iza ovih medijuma, nastane transparentno područje bez eha, "akustička senka", koja se na ekranu prikazuje kao potpuno tamno anehogeno polje.

Slika 9. "Akustička senka" bakarnog držača Iud-a.



Reverberacija označava pojavu registrovanja umnoženog eha jednog istog ultrazvučnog talasa. Nastaje zapisom povratnog eha ultrazvučnog snopa odbijenog od površine sonde. U posmatranom tkivu odbijeni ultrazvučni talas prikazuje se kao "mrlja", "fleka", koja u realnosti ne postoji.

Slika 10. Reverberacija. Ultrazvučni snimak folikularne ciste jajnika. "Mrlja" u distalnim partijama cistične šupljine (izgledom podseća na solidan sadržaj) u realnosti ne postoji.



Ad 2. Subjektivne greške u tumačenju ultrazvučne slike nastanu zbog pogrešne interpretacije ultrazvučnog snimka (ako se jedna anatomski ili morfološka struktura zameni drugom). Greške koje nastanu na ovaj način zovu se anatomske greške. Mada su subjektivne pogreške najčešće posledica žurbe i/ili preopterećenosti ispitivača, te loših rezolutivnih karakteristika ultrazvučnog uređaja, generalno je mišljenje svih koji se bave ultrazvukom: objektivnost u rasudjivanju i ispravnost u tumačenju ultrazvučne slike direktno su proporcionalni iskustvu ispitivača.