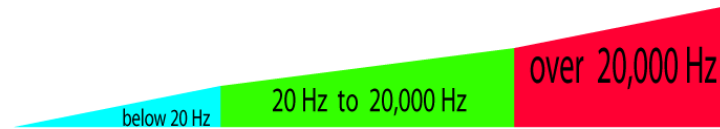


Υπερηχογραφικές τεχνικές απεικόνισης



INFRA SOUND

ULTRA SOUND



Γιατί να χρησιμοποιήσω υπερήχους;

- Ο υπέρηχος θεωρείται γενικά μια ασφαλής τεχνική απεικόνισης εφόσον δε μπορεί να ιονίσει άτομα και μόρια
- Τα συστήματα υπερήχων είναι λιγότερο ακριβά σε σχέση με άλλες τεχνικές παρόμοιων χαρακτηριστικών (π.χ. X-rays)
- Παράγει εικόνες σε πραγματικό χρόνο και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παρακολούθηση γρήγορων διαδικασιών
- Έχει χωρική ανάλυση της τάξης των χιλιοστών (mm) για το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται κλινικά, ωστόσο αυτή μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων
- Παρέχει πληροφορίες αναφορικά με τη ροή αίματος στα αγγεία εφαρμόζοντας τις αρχές του φαινομένου Doppler
- Τα συστήματα υπερήχων είναι φορητά και μπορούν να μετακινηθούν εύκολα στο επιθυμητό σημείο

Ναι μεν, αλλά...

- Δεν μπορούν να απεικονιστούν επαρκώς όργανα τα οποία περιέχουν οστικές δομές ή κάποια αέρια μάζα
- Περιορισμένη περιοχή απεικόνισης για ορισμένα όργανα όπως η καρδιά ή ο εγκέφαλος νεογνών
- Εξαρτάται πολύ από τις ικανότητες και την εμπειρία του χειριστή της συσκευής
- Ορισμένες φορές είναι αδύνατη η λήψη ικανοποιητικών εικόνων σε ορισμένους τύπους ασθενών (π.χ. υπέρβαρα άτομα)



Ο κλινικός υπέρηχος βρίσκει εφαρμογές σε διάφορα πεδία της ιατρικής όπως η καρδιολογία, η γυναικολογία, η ιατρική εμβρύου, η χειρουργική, η παιδιατρική, η νευρολογία κ.α.

Πως ξεκίνησαν όλα



John Julian Wild - 1953

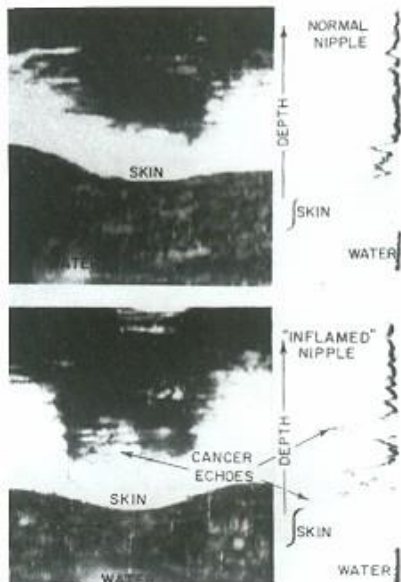
- 1949: Ο John Julian Wild ξεκινά τη μελέτη του πάνω σε διαταραχές των εντέρων στο Πανεπιστήμιο της Μινεσότα ως συνέχεια της προηγούμενης εμπειρίας που είχες στη θεραπεία τραυματισμένων στρατιωτών στο Β' Παγκόσμιο Πόλεμο
- Ο Wild σκέφτηκε να χρησιμοποιήσει υπερήχους για να μετρήσει τις αλλαγές του πάχους των εντερικών τοιχωμάτων σε παθολογικές καταστάσεις ώστε να επιλέξει την κατάλληλη θεραπεία
- Τα υπάρχοντα εμπορικά συστήματα υπερήχων για τον εντοπισμό ρωγμών σε στρατιωτικά οχήματα λειτουργούσαν σε πολύ χαμηλές συχνότητες, επομένως δεν ήταν κατάλληλα για ιατρική χρήση λόγω μη επαρκούς χωρικής ανάλυσης
- Ο Wild κατάφερε να αποκτήσει πρόσβαση σε ένα σύστημα υπερήχων το οποίο είχε αναπτύχθει κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο με σκοπό να εκπαιδεύει τους πιλότους να διαβάζουν ραντάρ χάρτες των περιοχών του εχθρού
- Τα πρώτα ex-vivo πειράματα έγιναν σε χειρουργικό δείγμα καρκίνου του στομάχου, όπου ο Wild κατάφερε να δείξει πως οι υπέρηχοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διάγνωση όγκων
- Η ιδέα της πιθανής εφαρμογής υπερήχων στην ιατρική για διαγνωστικούς σκοπούς έγινε δεκτή με μεγάλο σκεπτικισμό από την επιστημονική κοινότητα της εποχής



Πως ξεκίνησαν όλα



Reid και Wild – αρχές '50



Πρώτες υπερηχογραφικές
εικόνες -1953

- 1951: Ο Wild και ο John Reid, ένας νέος ηλεκτρολόγος μηχανικός αναπτύσσουν τον πρώτο φορητό «ηχογράφο» για νοσοκομειακή χρήση
- Έπειτα από εξέταση πολλών περιπτώσεων, αποδεικνύεται στατιστικά πως ο «ηχογράφος» μπορεί να διαχωρίσει νεοπλασματικό από φυσιολογικό ιστό στην περιοχή του μαστού μέσω της ανάκλασης της ακουστικής ενέργειας
- 1953: Καταγράφεται η πρώτη υπερηχογραφική εικόνα πραγματικού χρόνου ενός καρκινικού όγκου θηλής μεγέθους 7 mm, αποδεικνύοντας και οπτικά τη διαγνωστική αξία της τεχνικής
- 1956: Ο Wild και ο Reid έχουν ήδη εξετάσει 117 περιπτώσεις παθολογίας μαστού με πολύ υποσχόμενα αποτελέσματα, εφόσον μπορούν να διακρίνουν όγκους της τάξης του ενός χιλιοστού
- 1956: Ανάπτυξη υπερηχογραφικών συστημάτων για τη διάγνωση όγκων στο παχύ έντερο καθώς και για τη μελέτη της καρδιακής λειτουργίας

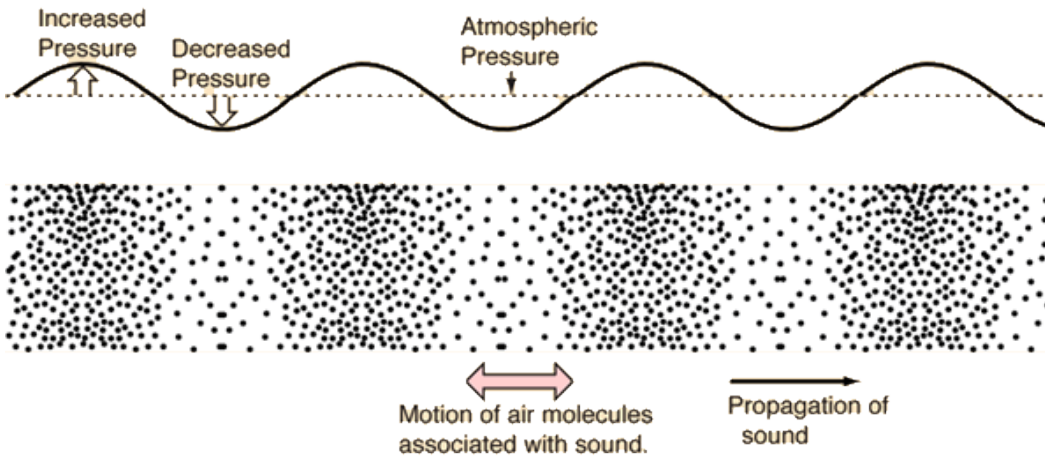


Wild και Reid – 1988

Εισαγωγή στην ακουστική διάδοση



Ακουστικό κύμα είναι η διάδοση μιας διαταραχής πίεσης εντός ενός υλικού μέσου (στερεό, υγρό, αέριο) μέσω διαδοχικών περιοχών πύκνωσης και αραίωσης



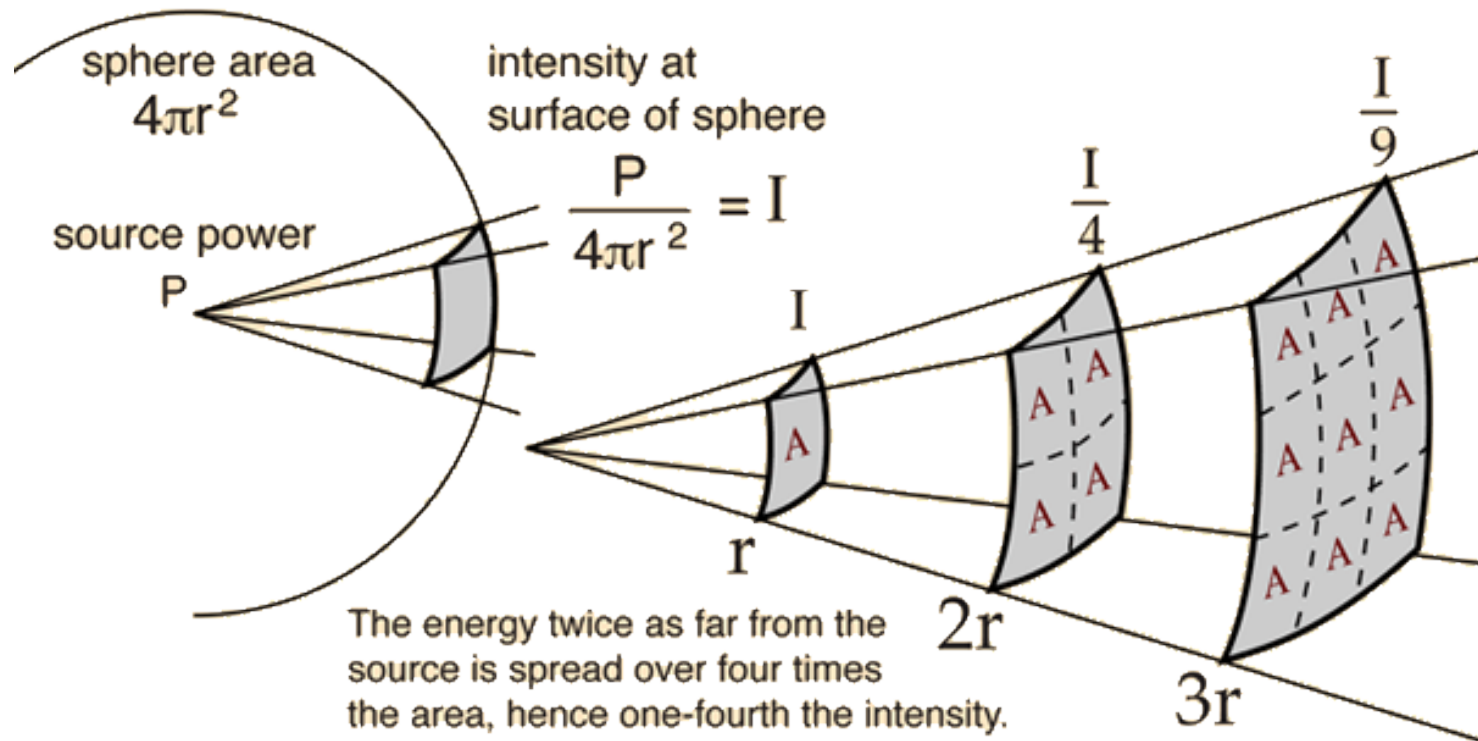
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/tralon.html>



Τα ηχητικά κύματα είναι **διαμήκη (longitudinal)** εφόσον η διεύθυνση διάδοσης συμπίπτει με τη διεύθυνση ταλάντωσης των μορίων

- **Πλάτος μετατόπισης κύματος (s_0):** Η μέγιστη μετατόπιση μορίων από την ισορροπία
- **Πλάτος πίεσης κύματος (p_0):** Η μέγιστη πίεση σε σχέση με την πίεση ισορροπίας
- **Μήκος κύματος (λ):** Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων
- **Φασική ταχύτητα ήχου (c):** Ο ρυθμός διάδοσης της ενέργειας στο μέσο
- **Συχνότητα (f):** Ο αριθμός των κύκλων ανά μονάδα χρόνου
- **Ισχύς (P):** Ο ρυθμός εκπομπής ή λήψης ακουστικής ενέργειας ανά μονάδα χρόνου

Νόμος αντιστρόφου τετραγώνου

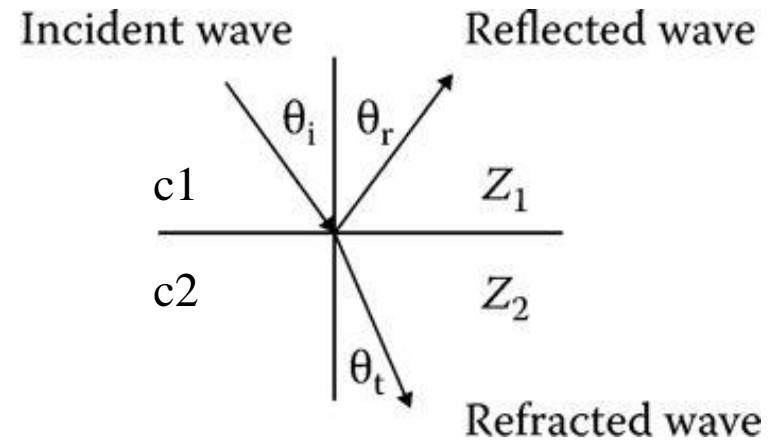


Ανάκλαση και διάθλαση



Η χαρακτηριστική ακουστική εμπέδηση Z ενός μέσου διάδοσης δίνεται από το γινόμενο της πυκνότητας ρ με την ταχύτητα του ήχου c , δηλαδή $Z = \rho c$. Τυπική μονάδα είναι το 1 MRayl = $10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{sec}$

Material	Speed, at 20–25°C (m/s)	Acoustic Impedance (MRayl)
Air	343	0.0004
Water	1480	1.48
Fat	1450	1.38
Myocardium (perpendicular to fibers)	1550	1.62
Blood	1550	1.61
Liver	1570	1.65
Skull bone	3360	6.00
Aluminum	6420	17.00



Νόμοι ανάκλασης και διάθλασης για ένα επίπεδο ακουστικό κύμα

- Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης ($\theta_i = \theta_r$)
- Ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης είναι ίσος με το λόγο των ταχυτήτων των δύο μέσων ($\sin\theta_i / \sin\theta_t = c_1 / c_2$)

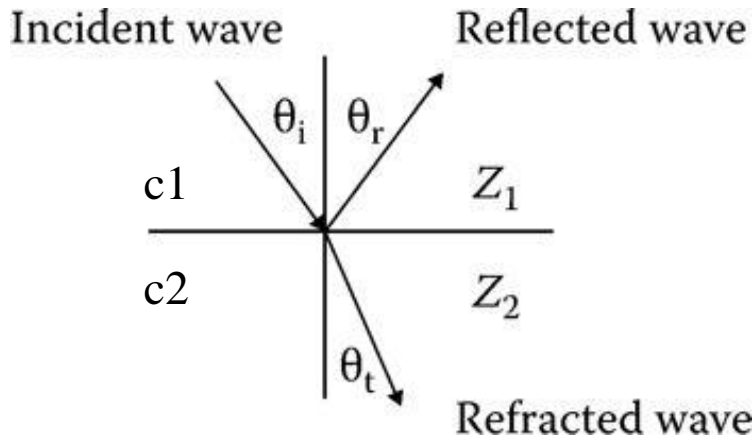


- Αν $\theta_t = 90^\circ$ τότε $\sin\theta_{\text{οριακή}} = c_1 / c_2$
- Αν $\theta_i > \theta_{\text{οριακή}}$ και $c_2 > c_1$, τότε δεν υπάρχει διάδοση με αποτέλεσμα να προκύπτει ολική ανάκλαση του κύματος

Ανάκλαση και διάθλαση



Τί ποσοστό του πλάτους του κύματος έχει ανακλαστεί ή διαδοθεί εντός του μέσου; Τι έχει συμβεί με την αντίστοιχη ακουστική ενέργεια;



Συντελεστής ανάκλασης πλάτους **R**

$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}$$

Συντελεστής διάδοσης πλάτους **T**

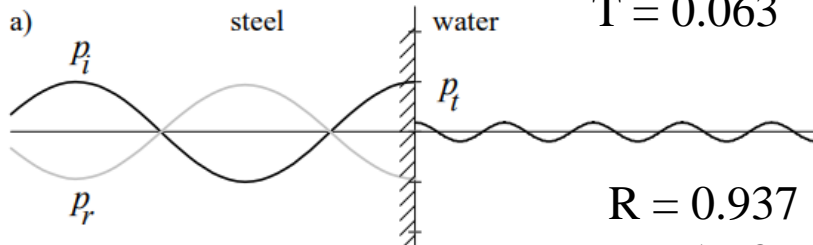
$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t}$$

$$Z_{\text{steel}} = 45.45$$

$$Z_{\text{water}} = 1.48$$

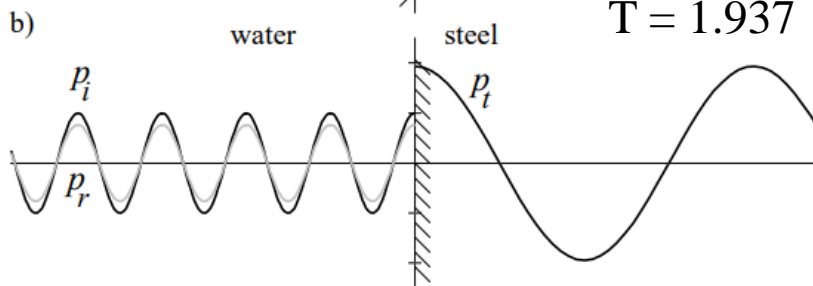
$$R = -0.937$$

$$T = 0.063$$



$$R = 0.937$$

$$T = 1.937$$



Για κάθετη πρόσπτωση $\theta_i = \theta_t = 0$

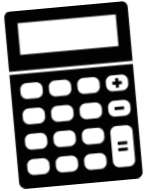
$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

Σχέση μεταξύ συντελεστών

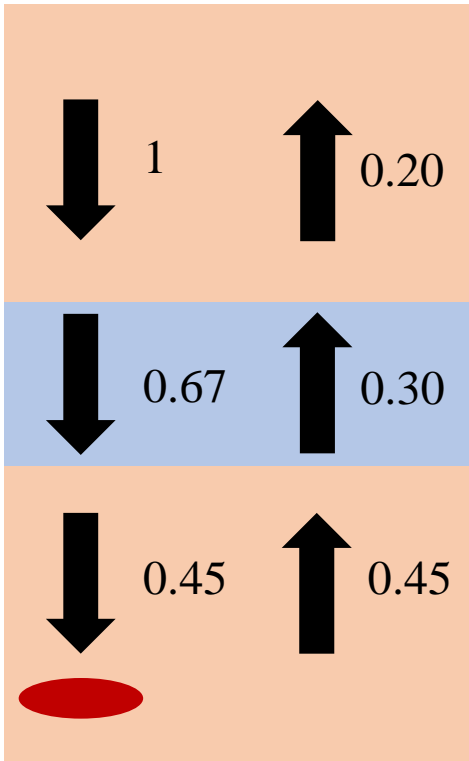
$$\mathbf{T = 1 + R}$$

Ανάκλαση και διάθλαση



Ποσοστό ανακλώμενης ενέργειας = $[(Z2-Z1)/(Z2+Z1)]^2$

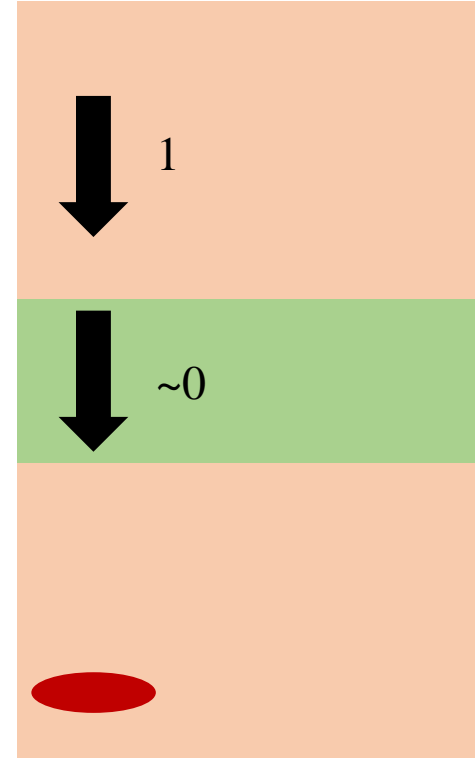
Ποσοστό ενέργειας που διαδίδεται = $1 - [(Z2-Z1)/(Z2+Z1)]^2$



Μαλακός ιστός
Z1=1.6

Οστό
Z2=6

Μαλακός ιστός
Z1=1.6



Μαλακός ιστός
Z1=1.6

Αέρας
Z2=0.0004

Μαλακός ιστός
Z1=1.6



Η υπερηχογραφία αποτυγχάνει να δώσει χρήσιμη πληροφορία σε όργανα που περιέχουν αέρα (π.χ. πνεύμονες) ή περιβάλλονται από οστά (π.χ. εγκέφαλος)

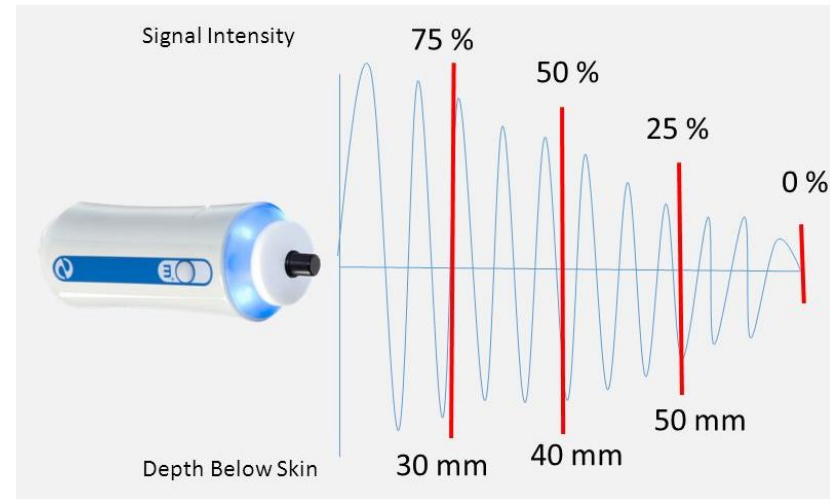
Εξασθένηση ακουστικών κυμάτων



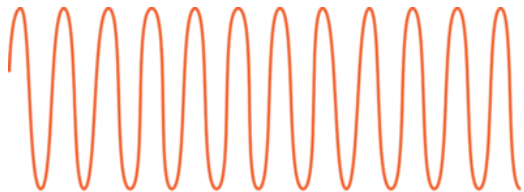
Η πίεση ενός επίπεδου ακουστικού κύματος $p(z)$ που διαδίδεται στον άξονα z μειώνεται εκθετικά με την απόσταση:

$$p(z) = p_0 \exp(-\alpha \cdot z)$$

όπου p_0 η αρχική πίεση σε $z=0$ και α ο συντελεστής εξασθένησης πίεσης



Ποιες συχνότητες περιμένουμε να εξασθενήσουν περισσότερο;



Υψηλή
συχνότητα



Χαμηλή
συχνότητα

Δύο φυσικοί μηχανισμοί εξασθένησης:

α) Διάχυση θερμικής ενέργειας από τις περιοχές υψηλής πίεσης (πυκνώματα) στις περιοχές χαμηλής πίεσης (αραιώματα)

β) Μεταφορά ορμής κατά την κρούση των ταλαντούμενων μορίων με γειτονικά μόρια διαφορετικής κίνησης (εσωτερική τριβή)

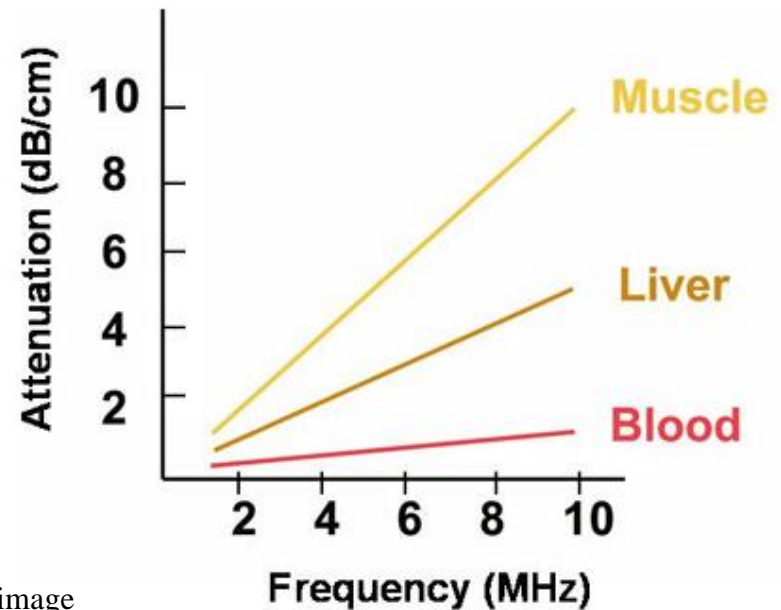


Για ιστούς, ο συντελεστής εξασθένησης α είναι ανάλογος της συχνότητας του υπερήχου

Εξασθένηση ακουστικών κυμάτων (υπέρηχοι)

Body Tissue	Attenuation Coefficient (dB/cm at 1MHz)
Water	0.002
Blood	0.18
Fat	0.63
Liver	0.5 - 0.94
Kidney	1.0
Muscle	1.3 - 3.3
Bone	5.0

Εξάρτηση συντελεστή εξασθένησης από τη συχνότητα του υπερήχου



<http://www.usra.ca/regional-anesthesia/introduction/basic.php#ultrasoundimage>

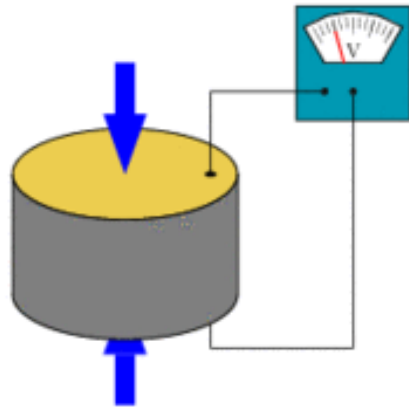
Κάτι κερδίζεις, κάτι χάνεις...



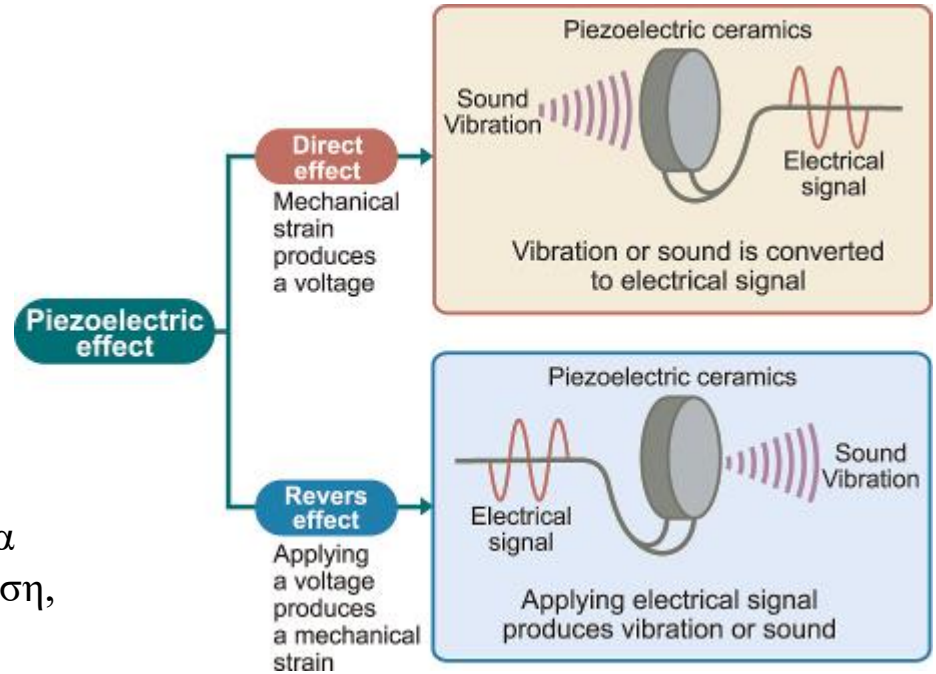
- Οι μικρές συχνότητες **~1 MHz** δίνουν μεγάλο βάθος απεικόνισης λόγω μικρής εξασθένησης, αλλά όχι τόσο καλή χωρική ανάλυση
- Οι μεγάλες συχνότητες **~5 MHz** δίνουν μικρό βάθος απεικόνισης λόγω μεγάλης εξασθένησης, αλλά με καλή χωρική ανάλυση

Παραγωγή υπερήχων

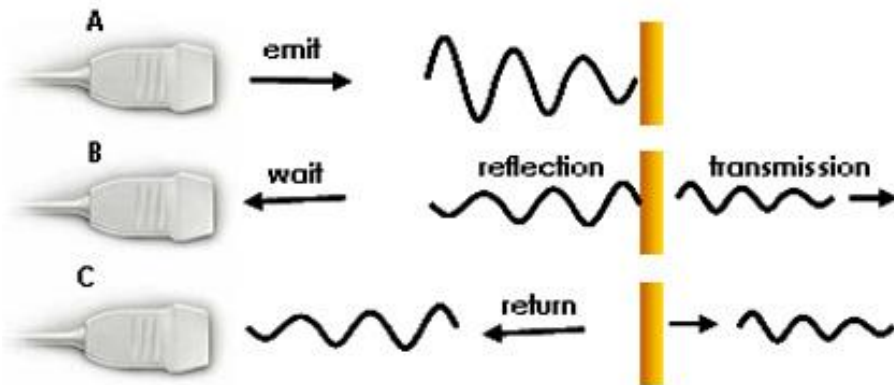
Ευθύ και αντίστροφο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο



Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η παραγωγή ηλεκτρικής τάσης σε κάποια υλικά όταν αυτά δέχονται μηχανική τάση, πίεση ή ταλάντωση



Ανίχνευση σε pulse-echo λειτουργία



https://www.honda-el.co.jp/en/ceramics/e_Piezoceramics.html

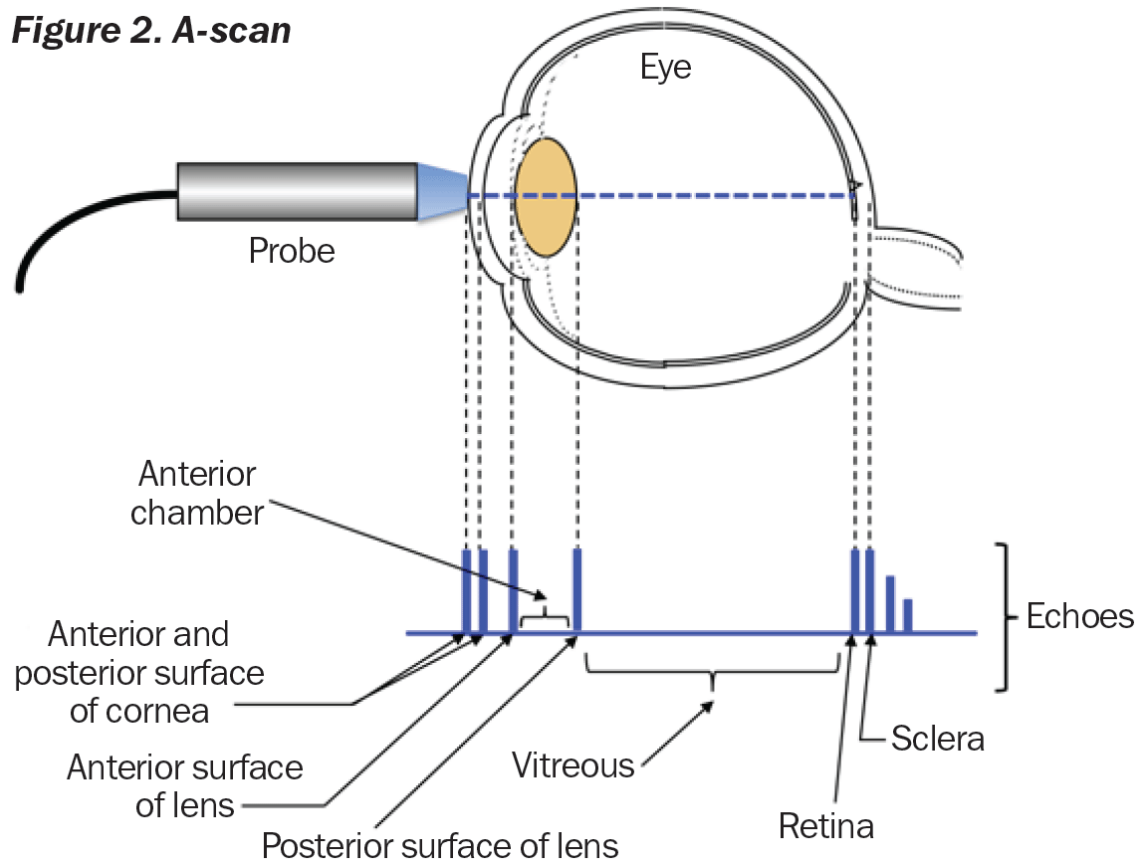
A. Παραγωγή υπερήχου μέσω αντίστροφου πιεζοηλεκτρικού φαινομένου (pulse)

B. Αναμονή μέχρι την ανάκλαση (echo)

C. Επιστροφή της ανάκλασης και καταγραφή (ευθύ πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο)

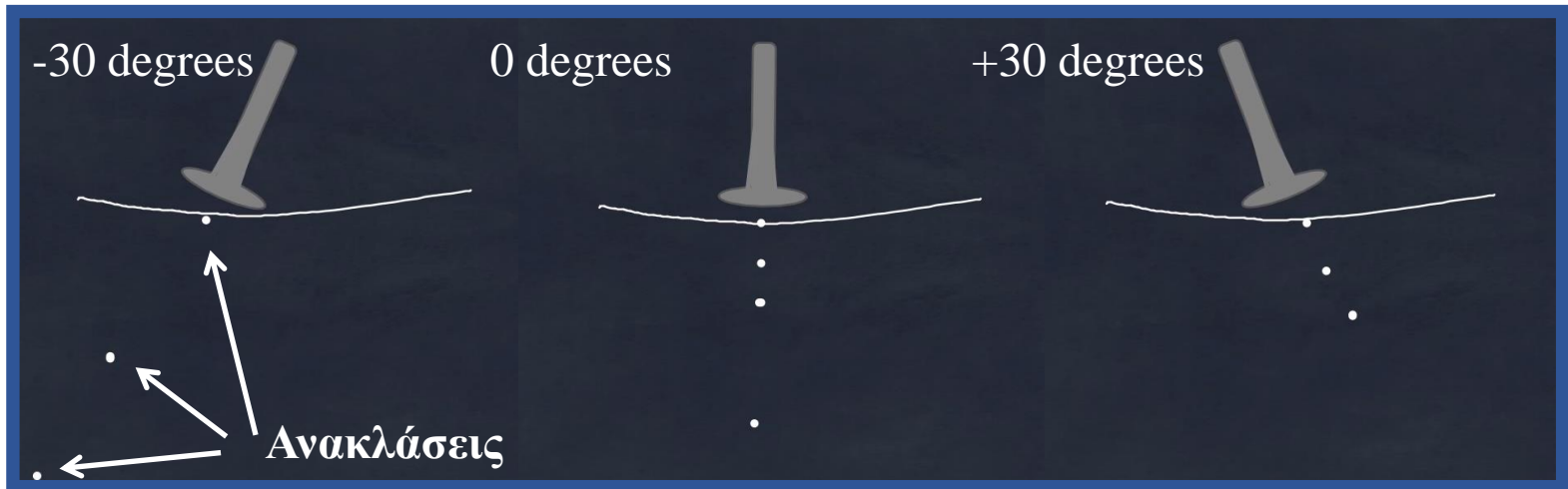
A-scan στον οφθαλμό

Figure 2. A-scan

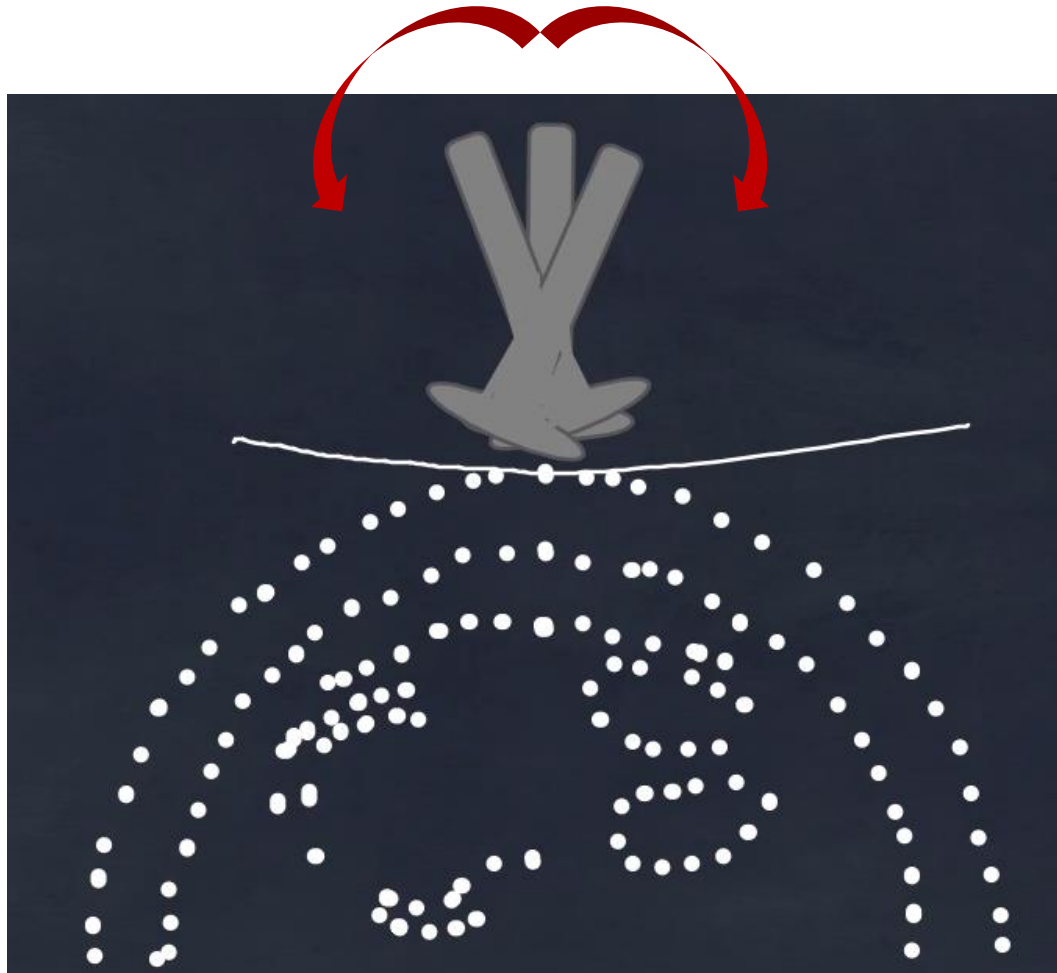


- Μέτρηση βασικών ανατομικών χαρακτηριστικών κατά μήκος μιας «ακτίνας»
- 1D καταγραφή πλατών ανάκλασης συναρτησει του βάθους εντός του ιστού
- Μετατροπή χρονικής καθυστέρησης Δt σε απόσταση d σύμφωνα με τη σχέση $d = (1/2) * c * \Delta t$ όπου $c \approx 1540$ m/sec

Αναπαράσταση B-scan



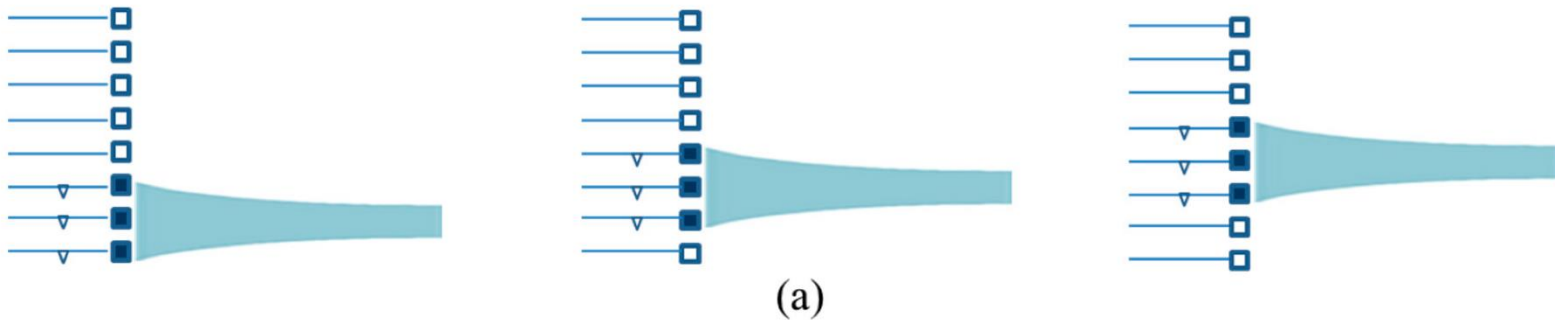
Αναπαράσταση B-scan



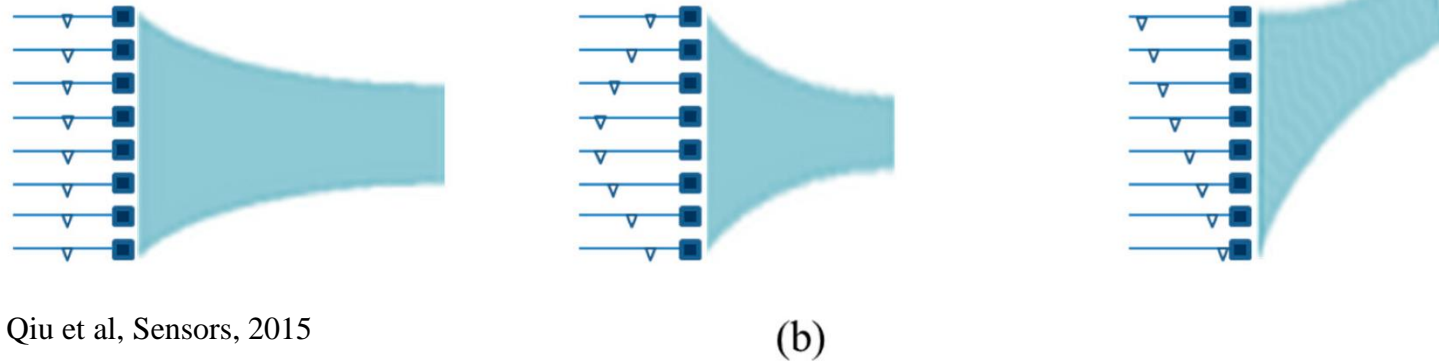
Πώς θα μπορούσαμε να πετύχουμε τη
σάρωση της περιοχής με ακρίβεια και
ταχύτητα;

Τρόποι σάρωσης στο B-scan

Ηλεκτρονική σάρωση σε γραμμική συστοιχία ανιχνευτών



Δυναμική σάρωση μέσω συστοιχίας διαφοράς φάσης




Qiu et al, Sensors, 2015

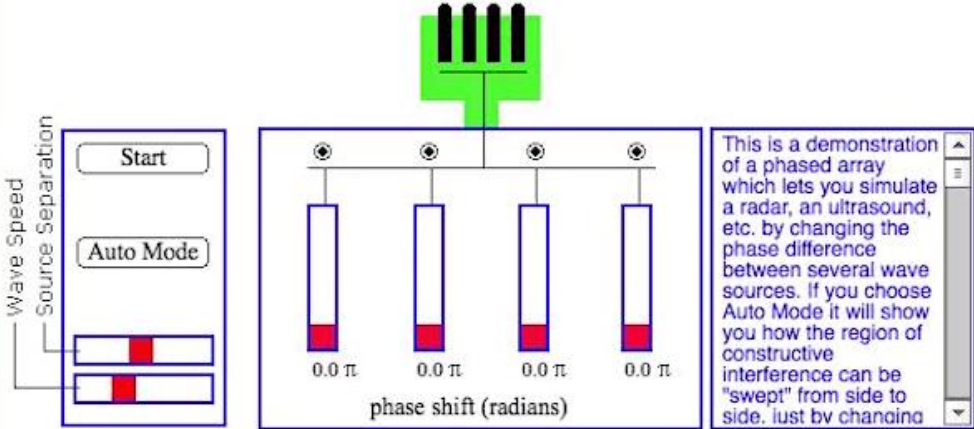


Ταχύτητα της τάξης των 30 fps που επιτρέπει real time απεικόνιση

Αναπαράσταση B-scan – συστοιχία διαφοράς φάσης

 **The Physics of Medicine: Ultrasound**

intro [array](#) reflect image links



Wave Speed
Source Separation

Start
Auto Mode

0.0 π 0.0 π 0.0 π 0.0 π

phase shift (radians)

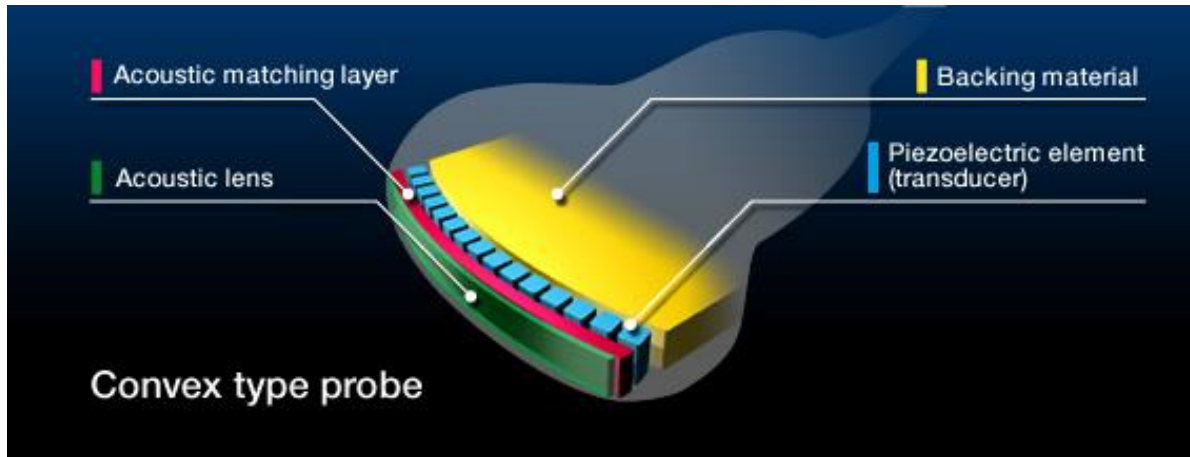
This is a demonstration of a phased array which lets you simulate a radar, an ultrasound, etc. by changing the phase difference between several wave sources. If you choose Auto Mode it will show you how the region of constructive interference can be "swept" from side to side, just by changing

This was created by Raman Pfaff.
If you would like more information, please contact me at pfaff@explorescience.com

Κεφαλή υπερηχογράφου B-Scan

Στρώμα
σύζευξης

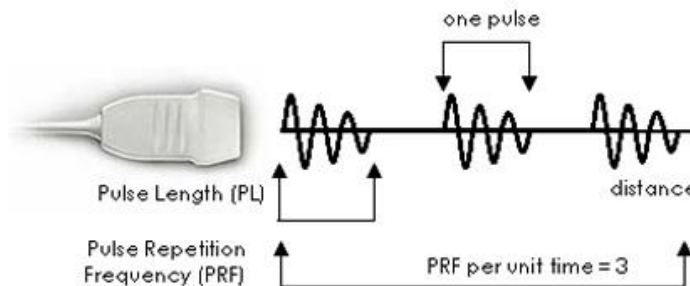
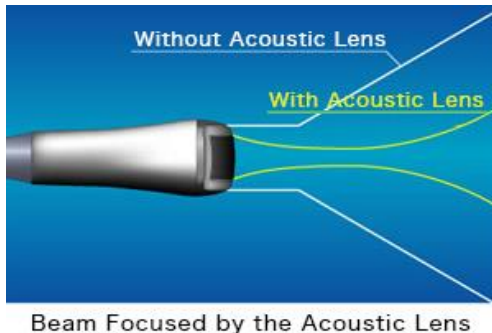
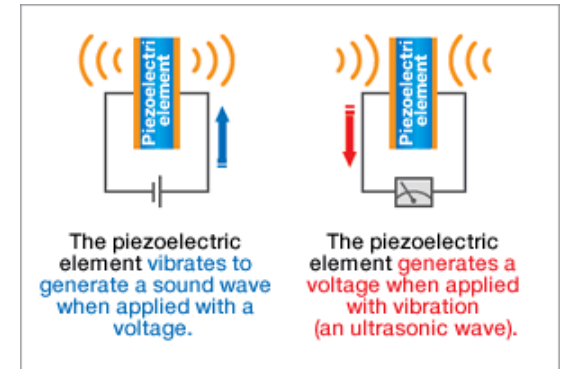
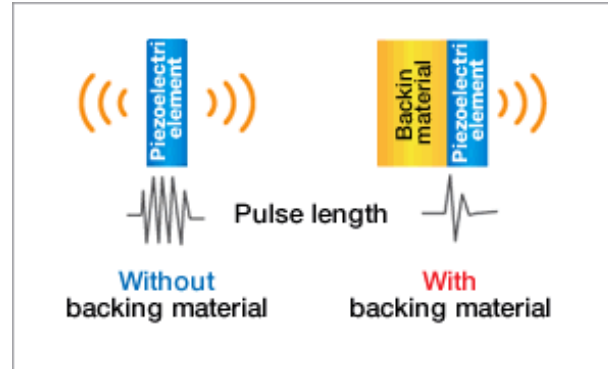
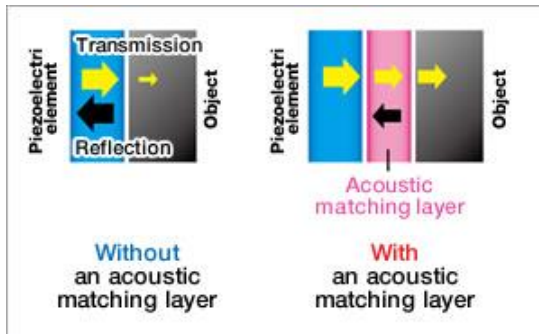
Ακουστικός
φακός



Υλικό
απόσβεσης

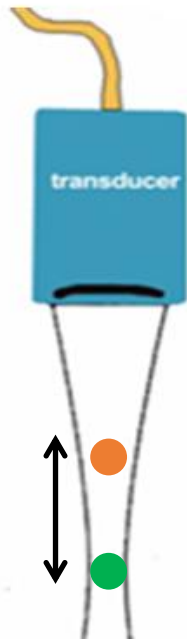
Πιεζοηλεκτρικό
στοιχείο

<http://www.ndk.com/en/sensor/ultrasonic/basic02.html>



Χωρική ανάλυση υπερηχογραφίας B-scan

Αξονική ανάλυση



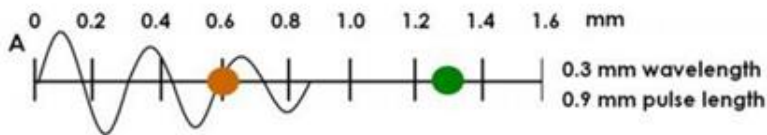
Εξαρτάται από το
 ύρος παλμού R
 ≈ 3 φορές το
 μήκος κύματος λ
 Αξ. ανάλυση $\sim R/2$

Πλευρική ανάλυση

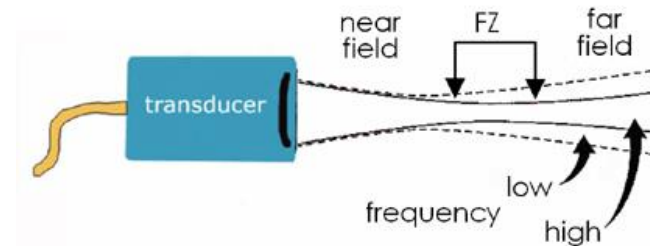
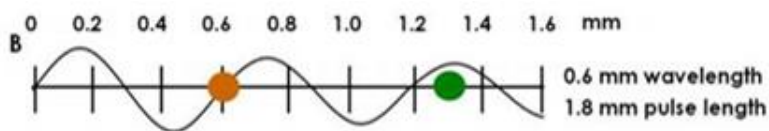


Καλύτερη εστίαση των
 υψηλών συχνοτήτων
 οδηγεί σε καλύτερη
 πλευρική ανάλυση

5 MHz → ανίχνευση δύο ανακλάσεων



2.5 MHz → ανίχνευση μιας ανάκλασης

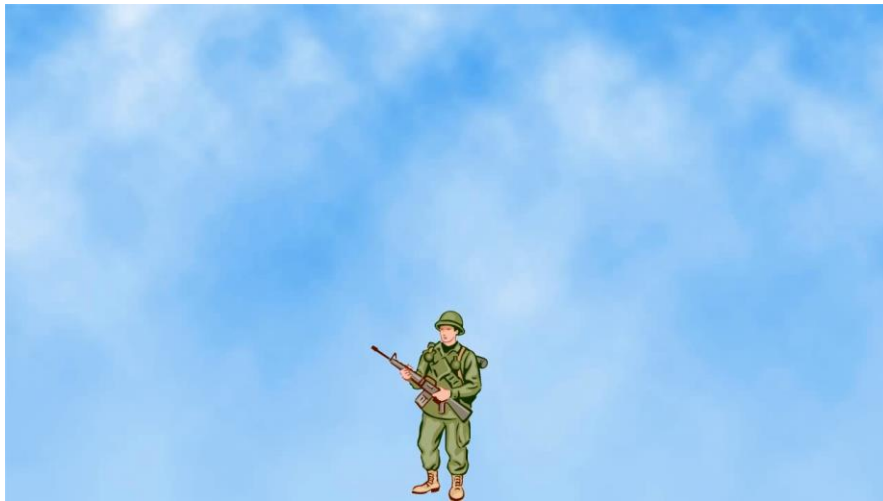


FZ: Focal Zone

Μετρήσεις αιματικής ροής μέσω Doppler



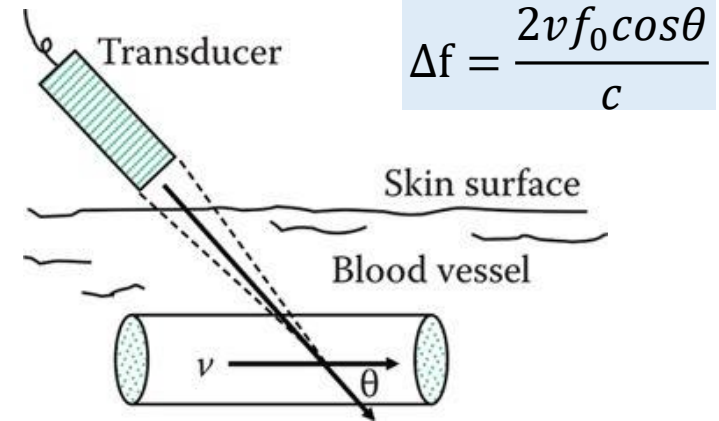
Το φαινόμενο Doppler είναι η παρατηρούμενη αλλαγή συχνότητας από παρατηρητή που βρίσκεται σε σχετική κίνηση με μια πηγή κυμάτων



https://www.youtube.com/watch?v=eo_owZ2UK7E

Αν f_0 η συχνότητα της πηγής, και f η συχνότητα που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής τότε:

- Όταν η πηγή πλησιάζει τον ακίνητο παρατηρητή $f > f_0 \rightarrow \Delta f = f - f_0 > 0$
- Όταν η πηγή απομακρύνεται από τον ακίνητο παρατηρητή $f < f_0 \rightarrow \Delta f = f - f_0 < 0$

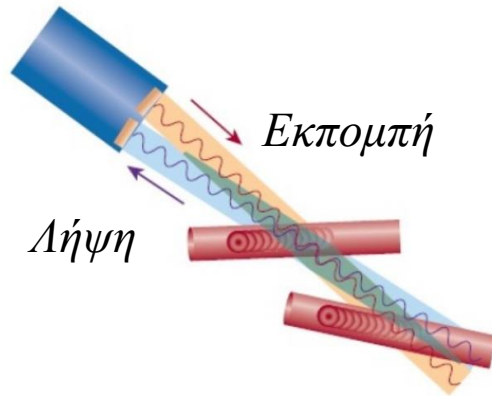


$$\Delta f = \frac{2vf_0 \cos\theta}{c}$$

- Η κεφαλή του υπερηχογράφου τοποθετείται υπό **γωνία θ** σε σχέση με την αιματική ροή του αγγείου που εξετάζεται
- Το ανακλώμενο από τα ερυθρά αιμοσφαίρια ακουστικό κύμα είναι μετατοπισμένο **στη συχνότητα κατά Δf** (μερικές εκατοντάδες Hz)
- Υπολογισμός της **ταχύτητας v** και της φοράς της ροής ανάλογα με το πρόσημο στο Δf από τη σχέση Doppler όπου $c \approx 1540 \text{ m/s}$
- Η αβεβαιότητα στην γνώση της γωνίας θ μειώνει την ακρίβεια στον υπολογισμό της ταχύτητας

Τρόποι μέτρησης ροών μέσω Doppler

Doppler συνεχούς κύματος (CW)



- Απλούστερη μορφή μέτρησης, φορητή και σχετικά φτηνή
- Χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς κρυστάλλους για συνεχή εκπομπή και λήψη υπερήχων συχνότητας f_0
- Μπορεί να ανιχνεύσει την ταχύτητα και την κατεύθυνση της ροής
- Δε μπορεί να διακρίνει ροές από διαφορετικά βάθη
- Χρησιμοποιείται κυρίως για μέτρηση ροών στην καρδιά

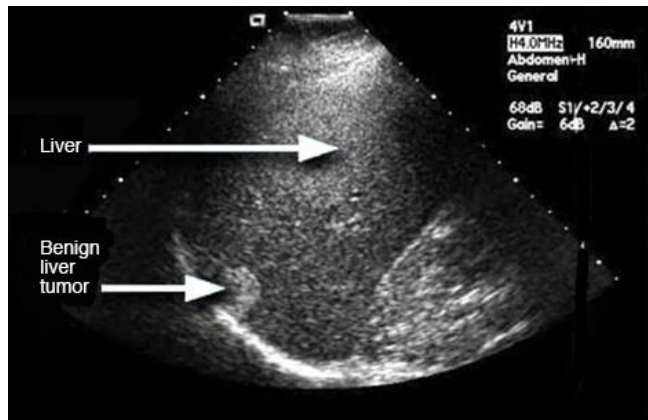
Παλμικό Doppler



- Χρησιμοποιεί pulse-echo προσέγγιση με εκπομπή και λήψη παλμού από τον ίδιο κρυστάλλο
- Μπορεί να ανιχνεύσει την ταχύτητα και την κατεύθυνση της ροής
- Μπορεί να διακρίνει διαφορετικά βάθη καταγράφοντας σήματα σε συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο
- Χρησιμοποιείται κυρίως για μέτρηση ροών στο υπόλοιπο αγγειακό σύστημα

Εφαρμογές υπερηχογραφίας

Καλοήθης όγκος στο συκώτι



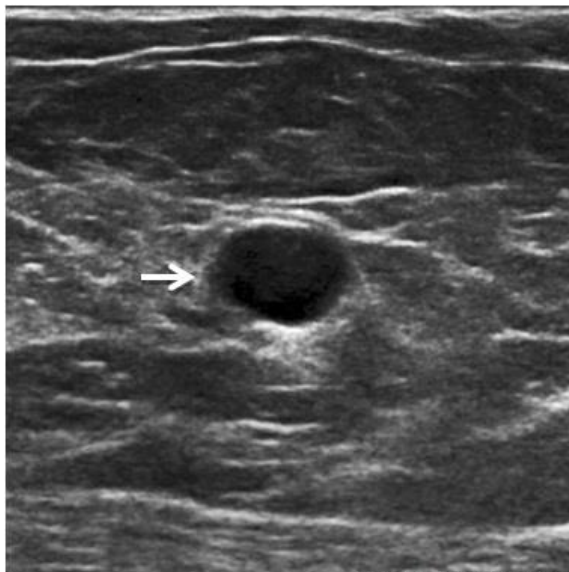
© MAYO FOUNDATION FOR MEDICAL EDUCATION AND RESEARCH. ALL RIGHTS RESERVED.

Καρκινικός όγκος στο θυροειδή αδέν



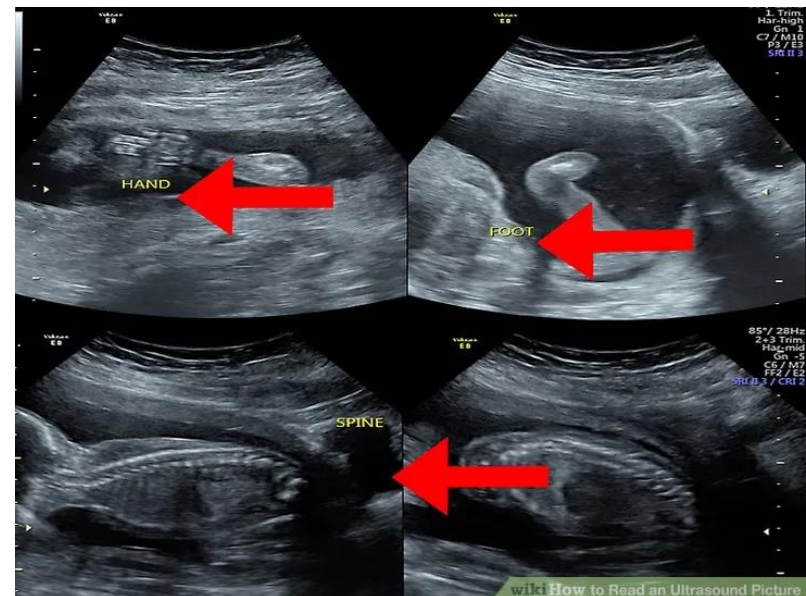
<https://blogs.biomedcentral.com/on-medicine/2017/07/07/indolent-thyroid-cancer-new-challenges-from-an-epidemic-of-diagnosis/>

Κύστη στην περιοχή του μαστού



Courtesy of Dr. Wendie Berg

Υπέρηχος ανθρώπινου εμβρύου



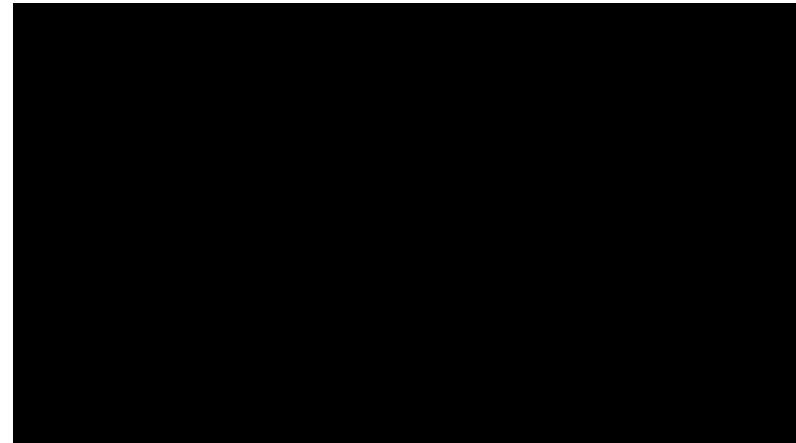
<https://www.wikihow.com/Read-an-Ultrasound-Picture>

Εφαρμογές υπερηχογραφίας

Προσδιορισμός φύλου ανθρώπινου εμβρύου

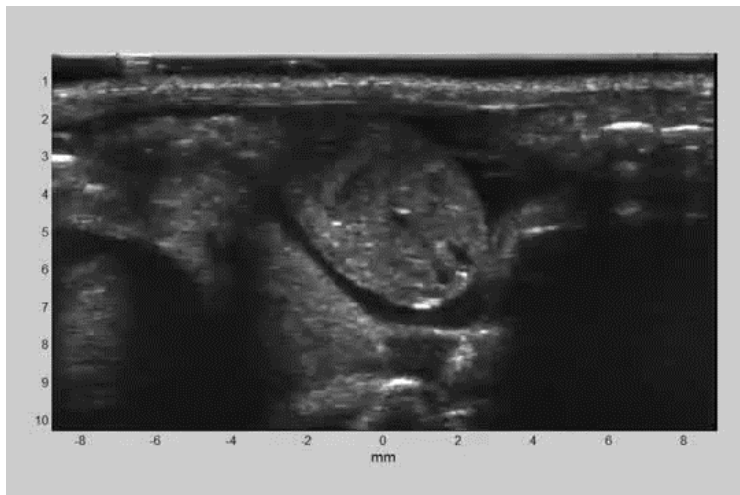


4D υπερηχογράφημα σε έμβρυο 20 εβδομάδων



<https://www.youtube.com/watch?v=vNkmBObgWb0>

Τομογραφική απεικόνιση σε έμβρυο ποντικού (30 MHz)



https://www.youtube.com/watch?v=2Fl6m_6z8WI

Υπερηχογράφημα σε έμβρυο 21 εβδομάδων



<https://www.youtube.com/watch?v=iBT9ZL8sX18>

Εφαρμογές υπερηχογραφίας

Υπερηχογράφημα καρδιάς / Έγχρωμη απεικόνιση Doppler



<https://www.youtube.com/watch?v=S1U3N9yeqvo>

Ποια ερωτήματα πρέπει να μπορούμε να απαντάμε;

Μικρός φορητός υπερηχογράφος (GE Healthcare)



- Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της υπερηχογραφίας;
- Ποιοι νόμοι διέπουν την ανάκλαση, διάθλαση και εξασθένηση των υπερήχων μέσα στους ιστούς;
- Τι γνωρίζετε για το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο και πώς αυτό σχετίζεται με την παραγωγή και ανίχνευση των υπερήχων;
- Ποιες είναι οι διαφορές της υπερηχογραφίας A-Scan από τη B-Scan;
- Με ποιους βασικούς τρόπους επιτυγχάνεται η σάρωση της δέσμης για την απόκτηση εικόνας στο B-Scan;
- Από τι εξαρτάται η χωρική ανάλυση και το μέγιστο βάθος απεικόνισης;
- Πώς μπορούμε να μετρήσουμε ταχύτητες ροής μέσω φαινομένου Doppler;
- Ποιες είναι οι βασικές εφαρμογές της υπερηχογραφίας;