

Κεφάλαιο 15

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

Παντελής Καραΐσκος
Καθ. Ιατρικής Φυσικής
e-mail: pkaraisk@med.uoa.gr

Υπέρηχοι

- Οι υπέρηχοι είναι διαμήκη ελαστικά κύματα με συχνότητα μεγαλύτερη από 20 kHz που είναι το ανώτατο όριο της ανθρώπινης ακοής.
- Στη διαγνωστική ιατρική χρησιμοποιούνται υπέρηχοι συχνότητας 1-50 MHz
- Οι απεικονιστικές εφαρμογές των υπέρηχων βασίζονται στο φαινόμενο της ανάκλασης τους στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών δομών του ανθρώπινου σώματος:
 - Αρχικά εκπέμπεται ένας ηχητικός παλμός ο οποίος διαδίδεται μέσα στο σώμα. Κατά τη διάδοσή του συναντά διάφορες επιφάνειες και ιστούς.
 - Οι με τη βοήθεια ειδικού ανιχνευτή καταγράφονται τόσο η ένταση της ανάκλασης όσο και ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει στον ανιχνευτή.
 - Από τον χρόνο της καταγραφής καθορίζεται η περιοχή (η απόσταση) στην οποία έγινε η ανάκλαση ενώ η ένταση της ανάκλασης δίνει πληροφορίες για την δομή από την οποία προήλθε.

➤ Οι υπέρηχοι έχουν σημαντική προσφορά στην διαγνωστική ιατρική με ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών:

- Στην Μαιευτική χρησιμοποιούνται για την διαπίστωση εγκυμοσύνης, προσδιορισμό ηλικίας εμβρύου, διαπίστωση συγγενών ανωμαλιών, εύρεση τόπου αμνιοκέντησης.

- Στην Παθολογία για την απεικόνιση οργάνων, λήψη πληροφοριών για την μορφή και την θέση τους, για την σύσταση των ιστών (χαρακτηρισμός ιστών) και την ομοιογένειά τους ως προς την σύνθεση, για την διαφορική διάγνωση μεταξύ κύστεων και νεοπλασμάτων.

- Στην Καρδιολογία χρησιμοποιούνται για μελέτες του καρδιαγγειακού συστήματος καθώς και για την απεικόνιση κινουμένων επιφανειών της καρδιάς.

➤ Η χρήση των υπερήχων δεν ενέχει γνωστούς κινδύνους για τους εξεταζόμενους και για το προσωπικό. Ιδιαίτερα δεν υπάρχει ο κίνδυνος των γενετικών επιδράσεων.

Το ηχητικό κύμα

- Με τον όρο κύμα εννοούμε κάθε διαταραχή που μεταφέρει ενέργεια και ορμή με ορισμένη ταχύτητα.
 - Τα κύματα διακρίνονται σε μηχανικά και σε ηλεκτρομαγνητικά.
 - Τα μηχανικά κύματα προκαλούνται από κινήσεις σωμάτων σε ελαστικό μέσο και μεταφέρουν μηχανική ενέργεια. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα ηχητικά κύματα.
 - Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου, καθέτων μεταξύ τους οι εντάσεις των οποίων μεταβάλλονται περιοδικά. Τέτοιο παράδειγμα είναι οι ακτίνες γ .
- Μία βασική διαφορά των μηχανικών κυμάτων με τα ηλεκτρομαγνητικά είναι ότι τα πρώτα διαδίδονται μόνο μέσω της ύλης, απαιτούν δηλαδή ένα μέσο διάδοσης ενώ τα δεύτερα διαδίδονται και στο κενό. Έτσι για παράδειγμα τα ηχητικά κύματα δεν διαδίδονται στο κενό.

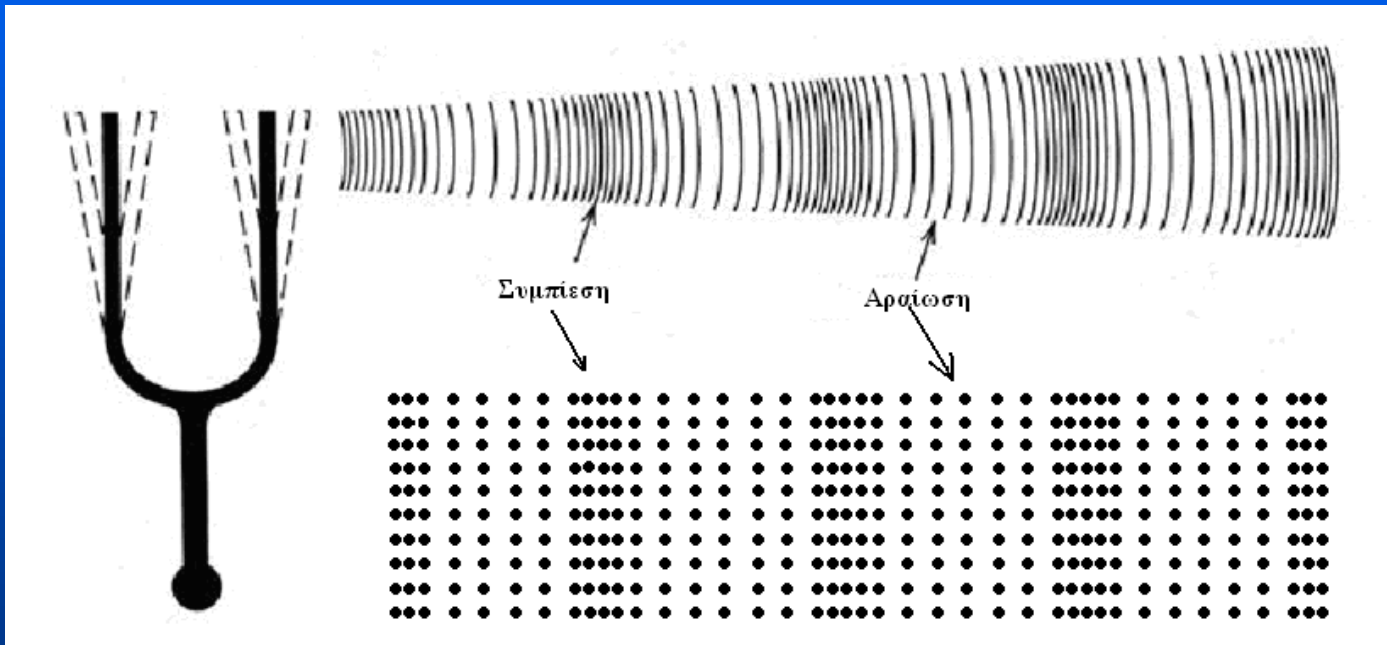
➤ Μία άλλη διάκριση μεταξύ των κυμάτων είναι τα διαμήκη και τα εγκάρσια.

- Διαμήκη ονομάζονται τα κύματα, στα οποία οι διαταραχές γίνονται στην ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

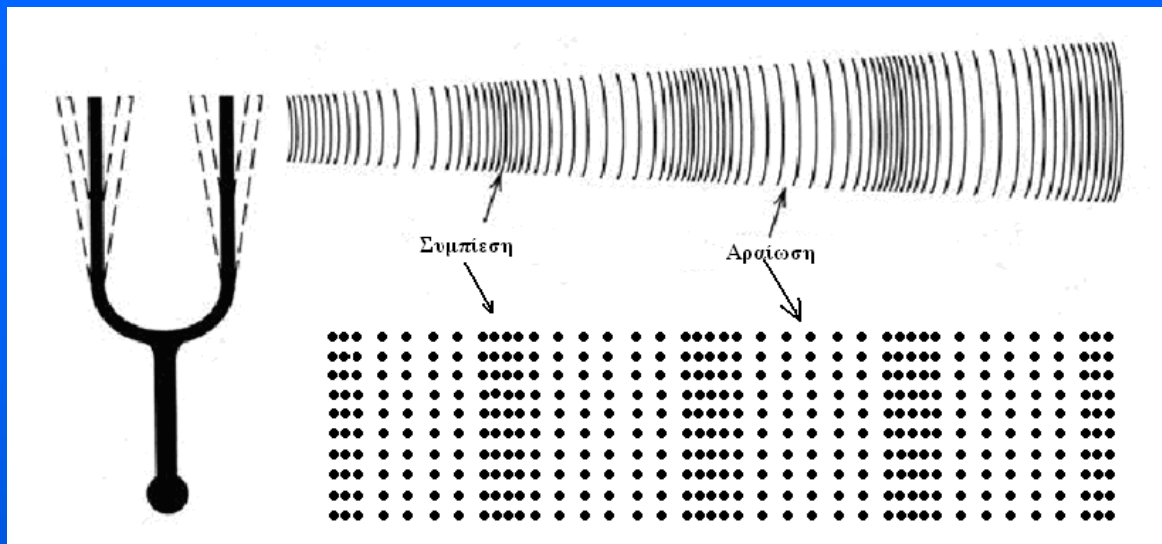
- Εγκάρσια ονομάζονται τα κύματα, στα οποία οι διαταραχές λαμβάνουν χώρα κάθετα προς την κατεύθυνση διάδοσης τους

➤ Τα ηχητικά κύματα, τα οποία χρησιμοποιούνται στις ιατρικές εφαρμογές με υπέρηχους, είναι διαμήκη μηχανικά κύματα.

➤ Για να παραχθεί ένα ηχητικό κύμα απαιτείται μία πηγή η οποία να εκτελεί ταλαντώσεις προκαλώντας μια μηχανική διαταραχή σ' ένα υλικό που ηρεμεί (ισορροπεί). Τότε τα μόρια του υλικού μετατοπίζονται από τις θέσεις ισορροπίας τους, αλληλεπιδρώντας με τα γειτονικά τους, με αποτέλεσμα η διαταραχή να διαδίδεται από τη μια περιοχή του υλικού μέσου στη γειτονική ως κύμα.



Παράδειγμα παραγωγής και διάδοσης ηχητικού κύματος. Το ηχητικό κύμα διαδίδεται προκαλώντας πυκνώματα (συμπύεση) και αραιώματα (αραιώση) των μορίων του μέσου διάδοσης ως αποτέλεσμα των ταλαντώσεων γύρω από τη θέση ισορροπίας τους.



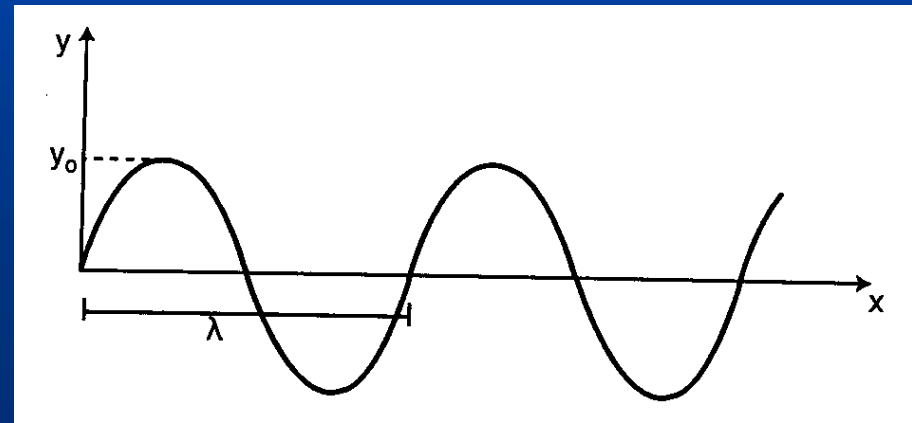
➤ Τα σωματίδια εκτελούν αρμονική ταλάντωση (περιοδική κίνηση) γύρω από την θέση ισορροπίας

➤ Η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζεται είναι η πίεση. Έτσι, τα ηχητικά κύματα μπορούν να περιγραφούν συναρτήσει των μεταβολών της πίεσης του μέσου διάδοσης η οποία εξαιτίας της ταλάντωσης των σωματιδίων υφίσταται τοπικές αυξήσεις (πυκνώματα) και μειώσεις (αραιώματα).

Παράμετροι περιοδικής κίνησης

- Περίοδος, T , είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος (μία επανάληψη). Είναι πάντοτε θετική και η μονάδα της στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) είναι το δευτερόλεπτο (s).
- Συχνότητα, f , ορίζουμε τον αριθμό των κύκλων στη μονάδα του χρόνου (στην περίπτωση των κυμάτων τον αριθμό των ταλαντώσεων που τα σωματίδια του μέσου κάνουν γύρω από τη θέση ισορροπίας τους σε ένα δευτερόλεπτο). Είναι πάντοτε θετική και η μονάδα της στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) είναι το hertz (Hz):

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ κύκλος/s} = 1 \text{ s}^{-1}$$



➤ Από τον ορισμό τους, η σχέση που συνδέει την περίοδο, T , με την συχνότητα, f , είναι:

$$f = \frac{1}{T}$$

➤ Το χωρικό ανάλογο της περιόδου είναι το μήκος κύματος, λ .

➤ Το μήκος κύματος είναι ίσο με την απόσταση που διανύει το κύμα σε μια περίοδο.

Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής

- Η ταχύτητα, v_s , του ηχητικού κύματος σε ένα συγκεκριμένο μέσο είναι σταθερή και καθορίζεται από τις ιδιότητες του μέσου.
- Επειδή η ταχύτητα του ήχου ουσιαστικά περιγράφει το πόσο μακριά θα φτάσει ένα πύκνωμα σε συγκεκριμένο χρόνο, η ταχύτητα καθορίζει τη σχέση ανάμεσα στη συχνότητα και το μήκος κύματος.
- Το γινόμενο της συχνότητας με το μήκος κύματος δίνουν την απόσταση που διανύει το κύμα κάθε δευτερόλεπτο, δηλαδή την ταχύτητά του:

$$v_s = f\lambda$$

Ταχύτητα ηχητικού κύματος

➤ Η ταχύτητα του ήχου είναι σταθερή για ένα συγκεκριμένο υλικό, δηλαδή δεν εξαρτάται ούτε από τη συχνότητα, f , ούτε από το μήκος κύματος, λ . Αυτό σημαίνει ότι αν γνωρίζουμε τη συχνότητα, μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος και αντίστροφα.

Συχνότητα (Hz)	Μήκος κύματος
100	15 m
1000	1.5 m
10,000	15 cm
100,000	1.5 cm
1,000,000 = 1 MHz	1.5 mm
10,000,000 = 10 MHz	0.15 mm

(θεωρώντας ότι η ταχύτητα του ήχου είναι 1500 m/s)

Προσεγγιστικές τιμές της ταχύτητας του ήχου σε διάφορα μέσα

Υλικό	Ταχύτητα του ήχου, v_s (m/s)	Ακουστική εμπέδηση Z ($10^{-6} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
Αέρας	344	0.0004
Λίπος	1440	1.3
Μαλακός ιστός	1540	1.63
Νερό	1500	1.5
Μυς	1570	1.65
Οστό	3500	7.8

Για διαφορετικά υλικά, διαφορές στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου έχουν ως αποτέλεσμα αντίστοιχες διαφορές στο μήκος κύματος, με τη συχνότητα να παραμένει σταθερή.

Ακουσική εμπέδηση μέσου

➤ Με τον όρο ακουστική εμπέδηση εννοούμε το γινόμενο της πυκνότητας του μέσου διάδοσης και της ακουστικής ταχύτητας, της ταχύτητας δηλαδή με την οποία ο ήχος διαδίδεται φυσιολογικά στο συγκεκριμένο μέσο:

$$Z = \rho \cdot v_s$$

Η ακουστική εμπέδηση μετράται σε Kg /m² · sec.

➤ Η τιμή της ακουστικής εμπέδησης είναι παρόμοια για τους μαλακούς ιστούς, όπως είναι το λίπος, το νερό και οι μύες και διαφέρει πολύ για τον αέρα και τα οστά.

Αλληλεπιδράσεις κύματος με την ύλη

- Η διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε ένα μέσο εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του μέσου αυτού. Εάν, για παράδειγμα, το μέσο διάδοσης είναι το ίδιο (π.χ. νερό), το κύμα θα διαδοθεί με σταθερή ταχύτητα και σταθερή κατεύθυνση χωρίς να αλλοιωθούν σημαντικά τα χαρακτηριστικά του.
- Κατά την διάδοσή του το κύμα συναντά υλικά με διάφορες διαστάσεις και σύνθεση που επιδρούν στο κύμα και μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά του.
- Τα φαινόμενα που περιγράφουν αυτές τις μεταβολές είναι η ανάκλαση, η διάθλαση, η σκέδαση, και το φαινόμενο Doppler
- Ταυτόχρονα, το ηχητικό κύμα κατά τη διάδοσή του στην ύλη υφίσταται εξασθένιση και απορρόφηση.

Ανάκλαση και διάθλαση

- Ανάκλαση (ή αλλιώς ηχώ) δημιουργείται όταν ένα κύμα αλλάζει μέσο διάδοσης, όταν δηλαδή συναντήσει μία διεπαφή.
- Με τον όρο διεπαφή ορίζεται το σύνολο των σημείων μεταξύ δύο μέσων με διαφορετικές ακουστικές εμπεδήσεις. Οι περισσότερες βιολογικές διεπαφές δημιουργούνται από ιστούς ή όργανα τα οποία έχουν διαφορετική ακουστική εμπέδηση από το άμεσο περιβάλλον τους
- Στην περίπτωση που το κύμα προσπίπτει κάθετα στη διεπαφή, τότε μέρος του ανακλάται σε ακριβώς αντίθετη κατεύθυνση και το υπόλοιπο προχωρά στο δεύτερο μέσο χωρίς αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης αλλά με μικρότερη ένταση (πλάτος).
- Η ανάκλαση είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην ακουστική εμπέδηση, Z , μεταξύ των δύο μέσων.

Ανάκλαση και διάθλαση

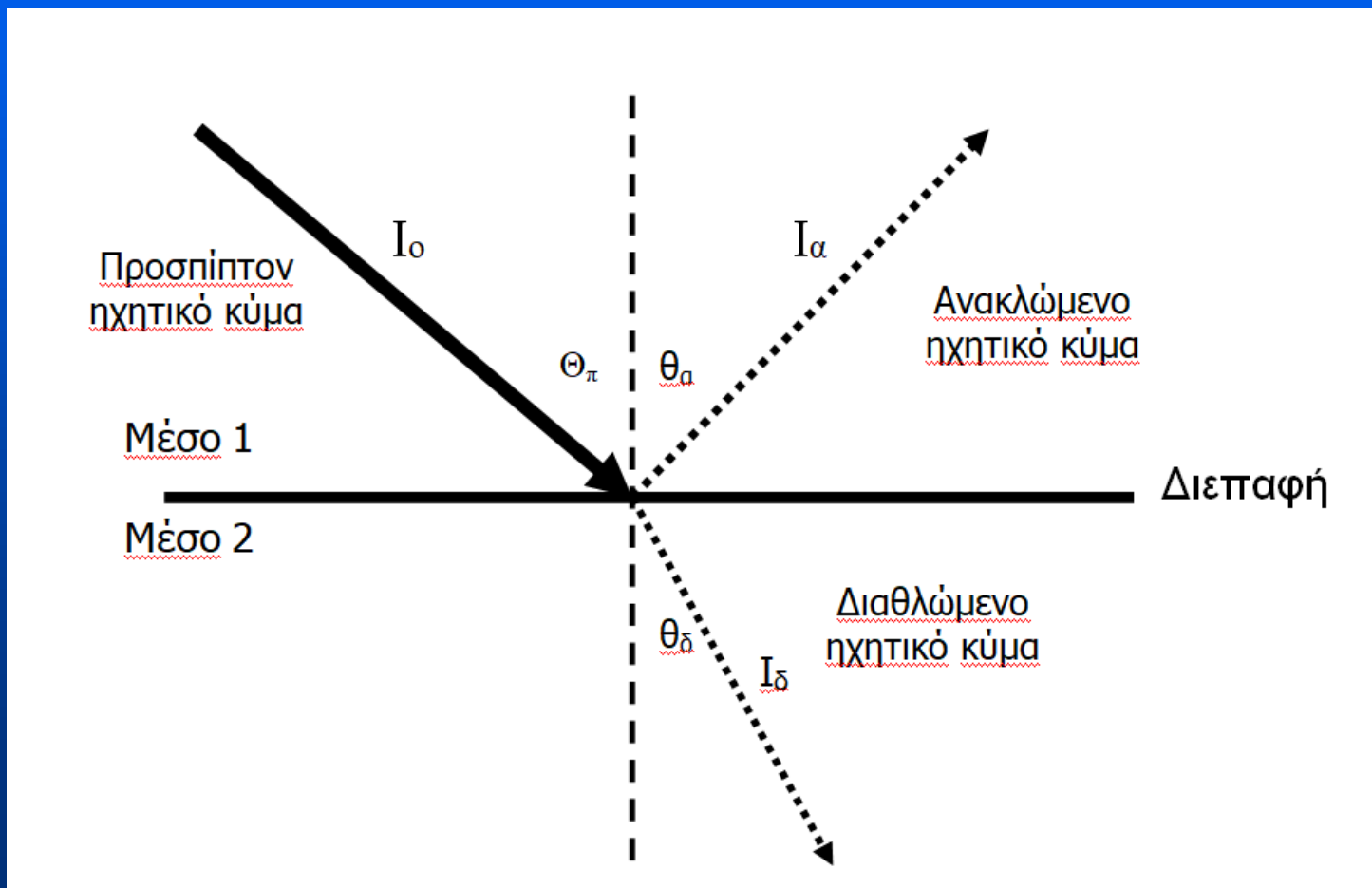
$$R_{\alpha} = \frac{I_{\alpha}}{I_o} = \frac{(z_1 - z_2)^2}{(z_1 + z_2)^2}$$

$$R_{\delta} = \frac{I_{\delta}}{I_o} = 100 - \frac{I_{\alpha}}{I_o}$$

I_o είναι η ένταση του ήχου που προσπίπτει στην επιφάνεια,
 I_{α} είναι η ένταση του ήχου που ανακλάται από την επιφάνεια
 I_{δ} είναι η ένταση του ήχου που διαδίδεται μέσα από αυτήν την επιφάνεια.

Ανάκλαση και διάθλαση

➤ Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει υπό γωνία σε μια διεπαφή, η γωνία ανάκλασης (θ_{α}) είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης, θ_{π} . Παράλληλα, το κύμα υφίσταται διάθλαση αλλάζοντας διεύθυνση όταν εισχωρεί στο δεύτερο μέσο



Σκέδαση

- Με τον όρο σκέδαση εννοούμε το σύνολο των πολλαπλών ανακλάσεων και διαθλάσεων του ηχητικού κύματος προς όλες τις κατευθύνσεις εξαιτίας μικρών ατελειών είτε του μέσου (ανομοιογένεια) είτε της διεπαφής (τραχύτητα επιφάνειας).
- Σκέδαση προκαλείται από ατέλειες, διαστάσεων παραπλήσιων με το μήκος κύματος του ήχου, αφού το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν ο ήχος προσπέσει σε εμπόδια διαστάσεων παραπλήσιων του μήκους κύματος.
- Αν ένα αντικείμενο είναι πολύ μικρότερο από ένα μήκος κύματος (μικρότερο από το $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος του ηχητικού κύματος), δεν θα προκαλέσει σκεδάσεις.

Σκέδαση

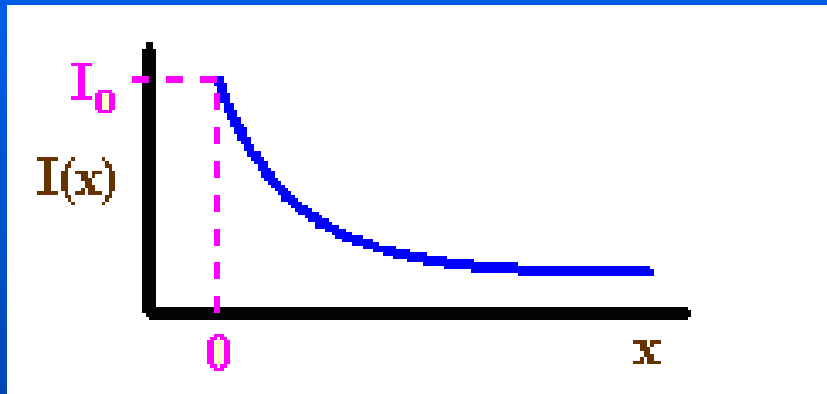
- Ήχοι χαμηλών συχνοτήτων (μεγάλα μήκη κύματος) επηρεάζονται μόνο από χονδροειδείς ατέλειες
- Ήχοι υψηλών συχνοτήτων (άρα με μικρά μήκη κύματος) υφίστανται μεγαλύτερη σκέδαση καθώς επηρεάζονται ακόμα και από μικροατέλειες.

Απορρόφηση και εξασθένιση

- Η ενέργεια που μεταφέρεται με μια υπερηχητική δέσμη απορροφάται σταδιακά από τους ιστούς του σώματος που συναντά κατά τη διάδοσή της με αποτέλεσμα να εξασθενεί.
- Άλλοι λόγοι που οδηγούν στην εξασθένιση της υπερηχητικής δέσμης είναι το γεγονός ότι κατά τη διάδοσή της, το εύρος (η διατομή της) αυξάνεται και η ενέργεια κατανέμεται σε μία ευρύτερη περιοχή με αποτέλεσμα τη μείωση της έντασης της δέσμης, καθώς και το γεγονός ότι λόγω σκέδασης της δέσμης από διάχυτους ανακλαστές από ανομοιογένειες, ένα ποσοστό της ενέργειας απομακρύνεται από τη διαδιδόμενη δέσμη
- Η εξασθένιση λόγω σκέδασης είναι ανάλογη της 4ης δύναμης της συχνότητας. Επομένως δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν υπέρηχοι μεγάλης συχνότητας λόγω του φαινομένου της σκέδασης.

Η εξασθένιση είναι εκθετική και εξαρτάται από το συντελεστή εξασθένισης, μ :

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$



Ο συντελεστής εξασθένισης, μ , εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης και από τη συχνότητα της δέσμης. Σε γενικές γραμμές, η απορρόφηση των υπερήχων από τους μαλακούς ιστούς, και άρα η εξασθένισή τους, είναι μικρή στις αποστάσεις που ενδιαφέρουν.

Βάθος υποδιπλασιασμού (βάθος όπου έχει απορροφηθεί η μισή αρχική ένταση) των υπερήχων σε μαλακό ιστό σε διάφορες συχνότητες

Συχνότητα (MHz)	Μήκος κύματος (mm)	Βάθος υποδιπλασιασμού έντασης, $L_{1/2}$ (cm)
1.00	1.54	6.0
5.00	0.31	1.2
10.0	0.154	0.6

Παραγωγή και ανίχνευση υπέρηχων

- Η παραγωγή και η ανίχνευση του ηχητικού κύματος σχετίζεται με την ταλάντωση ενός αντικειμένου.
- Στην περίπτωση των υπερήχων το αντικείμενο αυτό καλείται ηχοβολέας ή μεταλλάκτης.
- Ο μεταλλάκτης είναι μια συσκευή που μετατρέπει μια μορφή ενέργειας σε άλλη και σε αυτήν την περίπτωση, την ηλεκτρική ενέργεια σε ηχητική και αντίστροφα.

Παραγωγή και ανίχνευση υπέρηχων

- Η παραγωγή και ανίχνευση των υπερήχων βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο, ύστερα από συμπίεση ή εφελκυσμό, εμφανίζονται ετερόνυμα φορτία στα άκρα ενός υλικού και αντίστροφα η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός τέτοιου υλικού έχει σαν αποτέλεσμα την συμπίεση ή τον εφελκυσμό του.
- Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα αυτή ονομάζονται πιεζοηλεκτρικά και περιλαμβάνουν ουσίες όπως είναι οι κρύσταλλοι του χαλαζία καθώς και διάφορα κεραμικά υλικά, όπως το κράμα μολύβδου-ζιρκονίου-τιτανίου.

Παραγωγή και ανίχνευση υπέρηχων

- Για την παραγωγή των υπερήχων εφαρμόζεται κατάλληλο εναλλασσόμενο δυναμικό στα άκρα του υλικού. Το δυναμικό αυτό προκαλεί περιοδική μετακίνηση της επιφάνειας του υλικού και στη συνέχεια ταλάντωση των γειτονικών μορίων του αέρα και την παραγωγή των υπερήχων.
- Για την ανίχνευση των υπερήχων χρησιμοποιείται ο ίδιος μεταλλάκτης. Το κύμα των υπερήχων προσπίπτει στον μεταλλάκτη, θέτει σε παλμική κίνηση την επιφάνειά του, με αποτέλεσμα την δημιουργία διαφοράς δυναμικού στα άκρα του, η οποία και καταγράφεται.

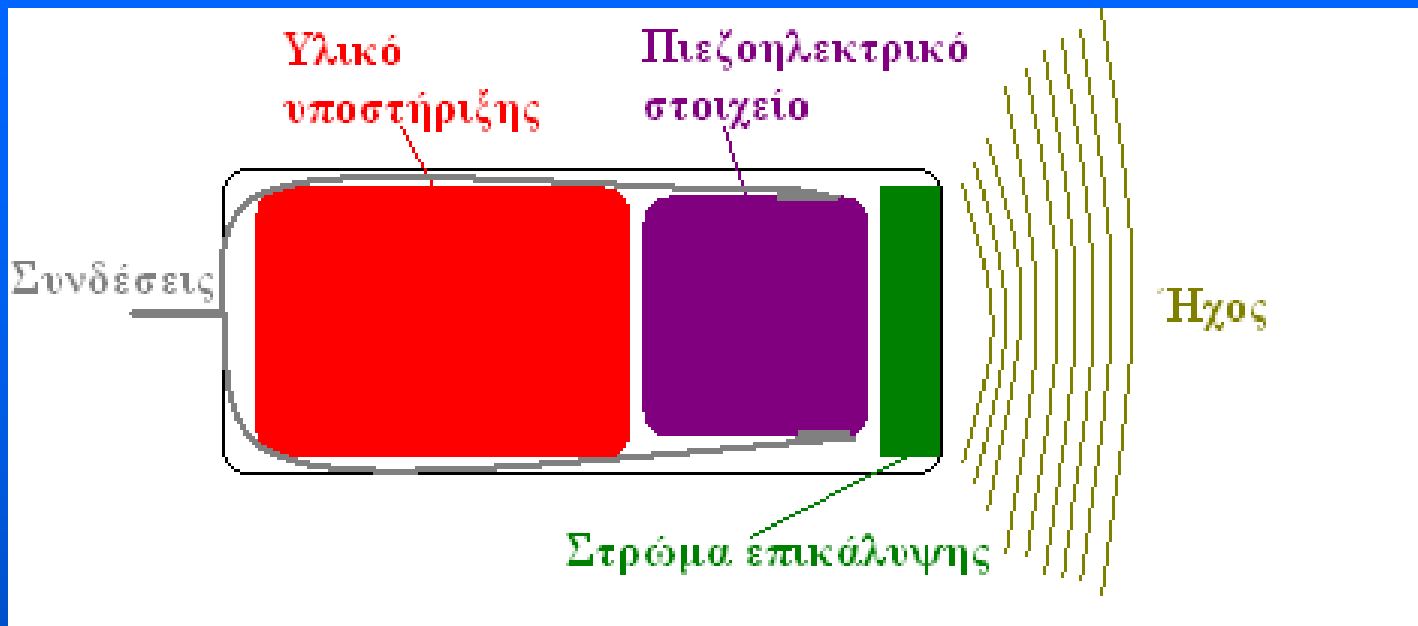
Παραγωγή και ανίχνευση υπέρηχων

- Οι πιεζοηλεκτρικοί κρύσταλλοι που χρησιμοποιούνται στους μεταλλάκτες υπερήχων έχουν τη μορφή κυκλικών δίσκων (δισκοειδείς κρύσταλλοι).
- Κάθε κρύσταλλος έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού, συχνότητα δηλαδή στην οποία δονείται όταν εφαρμοστεί μια εξωτερική τάση και επομένως παράγει ηχητικά κύματα συγκεκριμένης συχνότητας.

- Οι υπέρηχοι που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική δεν είναι ένα και μόνο ηχητικό κύμα αλλά μια δέσμη κυμάτων.
- Η μορφή της δέσμης εξαρτάται από τις ιδιότητες του μεταλλάκτη και πιο συγκεκριμένα από τη διάμετρο και τη συχνότητα συντονισμού του καθώς επίσης και από το σχήμα του.



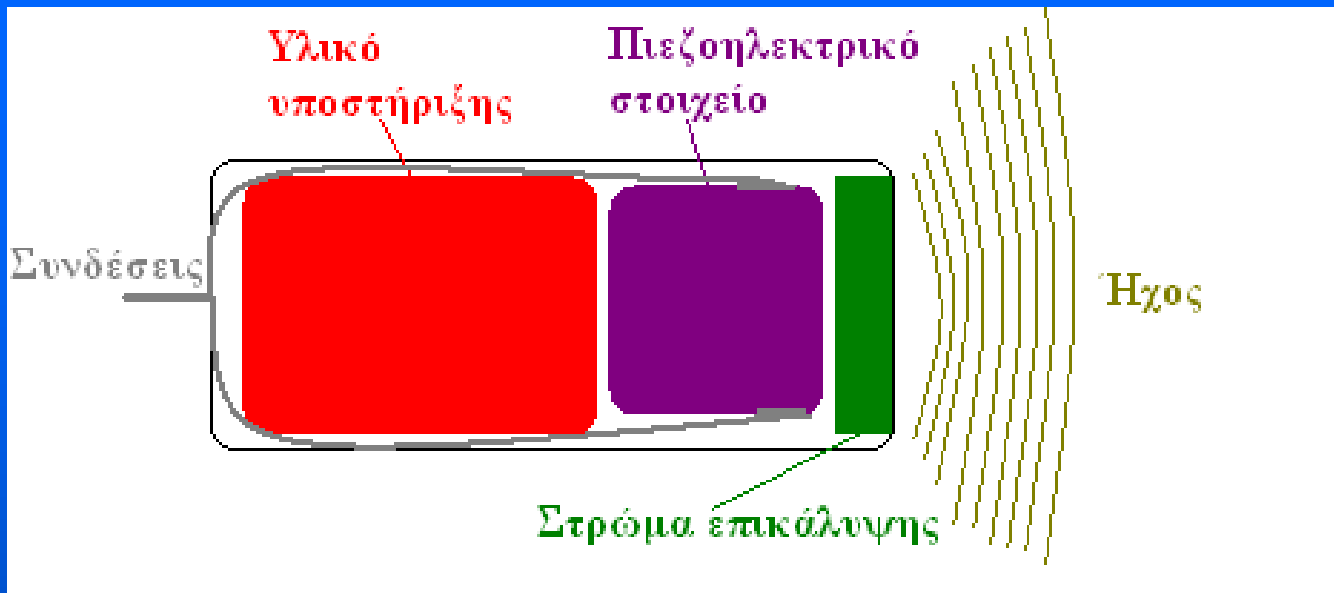
Τεχνικές εκπομπής υπερήχων κατά παλμούς (pulse-echo)



➤ Οι ταλαντώσεις του μεταλλάκτη μεταφέρονται στο ανθρώπινο σώμα μέσω μιας κεφαλής που καλύπτεται με ένα «στρώμα επικάλυψης» (gel), με πυκνότητα παρόμοια του βιολογικού ιστού, που τοποθετείται πάνω στο δέρμα.

➤ Η χρήση του «στρώματος επικάλυψης» οδηγεί στη σύζευξη των εμποδύσεων του μεταλλάκτη και του ιστού και τη μείωση της απώλειας ηχητικής ενέργειας, η οποία σε διαφορετική περίπτωση είναι μεγάλη καθώς η ακουστική εμπέδηση των ιστών διαφέρει κατά πολύ από αυτή του αέρα.

Τεχνικές εκπομπής υπερήχων κατά παλμούς (pulse-echo)



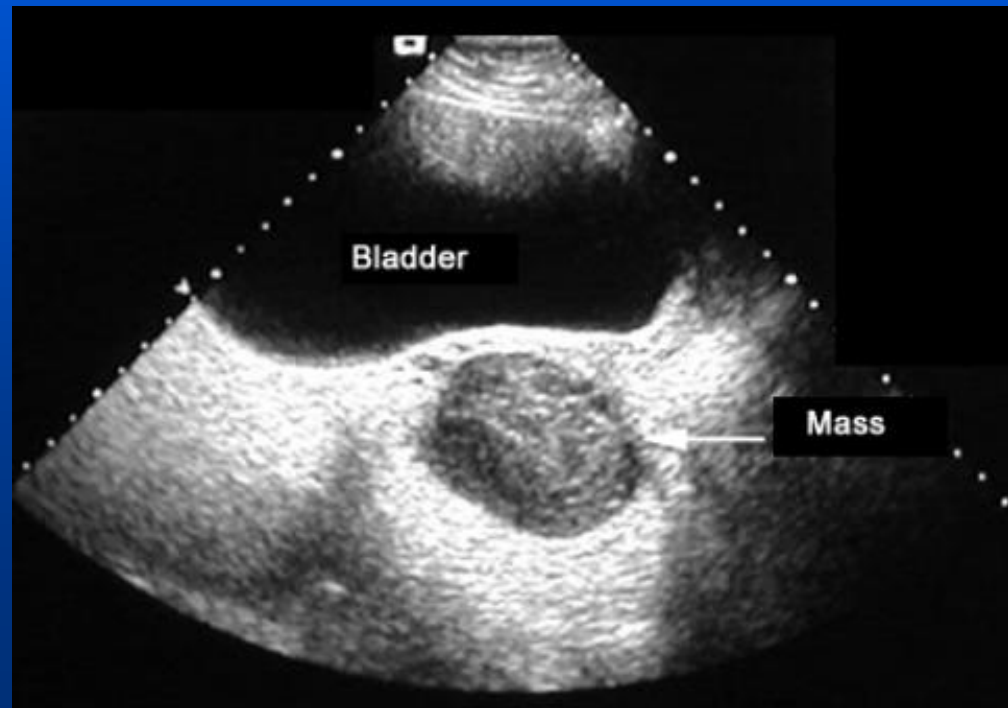
➤ Το υλικό υποστήριξης αποσβένει την δόνηση που παράγουν τα ηχητικά κύματα, τα οποία, αφού ανακλαστούν στο σώμα, προσπίπτουν στο μεταλλάκτη.

Με αυτόν τον τρόπο αυτό ο εισερχόμενος (προσπίπτον) ηχητικός παλμός μετατρέπεται σχετικά γρήγορα σε ηλεκτρικό παλμό.

➤ Η ίδια συσκευή-μεταλλάκτης μπορεί και να εκπέμψει το υπερηχητικό κύμα αλλά και να ανιχνεύσει τους ανακλώμενους ήχους, δρώντας με αυτόν τον τρόπο κι ως εκπομπός και ως δέκτης.

Απεικόνιση με υπέρηχους

- Οι απεικονιστικές εφαρμογές των υπέρηχων βασίζονται στο φαινόμενο της ανάκλασης τους στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών δομών του ανθρώπινου σώματος.
- Για παράδειγμα ένας όγκος διαχωρίζεται από μια κύστη γεμάτη υγρό με τη βοήθεια των υπέρηχων ως εξής:
Το υγρό της κύστης δεν θα δώσει ανακλάσεις λόγω της ομοιόμορφης δομής του (μόνο τα τοιχώματα της κύστης θα δώσουν ανακλάσεις), ενώ αντίθετα, ένας στερεός όγκος, που αποτελείται από σκληρούς ιστούς πολλών πυκνοτήτων (πχ λόγω των αποτιτανώσεων που μπορεί να περιέχει) θα δώσει πολλές ανακλάσεις.



Απεικόνιση με υπέρηχους

- Το μέγεθος ενός αντικειμένου που είναι ικανό να ανακλά τον ήχο εξαρτάται από το μήκος κύματος, δηλαδή τη συχνότητα του ηχητικού κύματος.
- Αν ένα αντικείμενο είναι πολύ μικρότερο από ένα μήκος κύματος (μικρότερο από το $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος του ηχητικού κύματος), δεν θα ανακλάσει τον ήχο. Αντίθετα τα μεγαλύτερα αντικείμενα είναι πολύ καλύτεροι ανακλαστές
- Επομένως η χωρική διακριτική ικανότητα της απεικόνισης με υπέρηχους εξαρτάται άμεσα από το μήκος κύματος του κύματος

Απεικόνιση με υπέρηχους

➤ Οι συχνότητες υπερήχων που χρησιμοποιούνται στην Ιατρική (1-50 MHz), αντιστοιχούν σε μήκη κύματος της τάξης του mm και επομένως μπορούν να ανακλαστούν από δομές αντίστοιχων διαστάσεων, με αποτέλεσμα και η χωρική διακριτική ικανότητα της τεχνικής να είναι αντίστοιχη (της τάξης του mm).

<i>Συχνότητα (Hz)</i>	<i>Μήκος κύματος</i>
100	15 m
1000	1.5 m
10,000	15 cm
100,000	1.5 cm
1,000,000 = 1 MHz	1.5 mm
10,000,000 = 10 MHz	0.15 mm

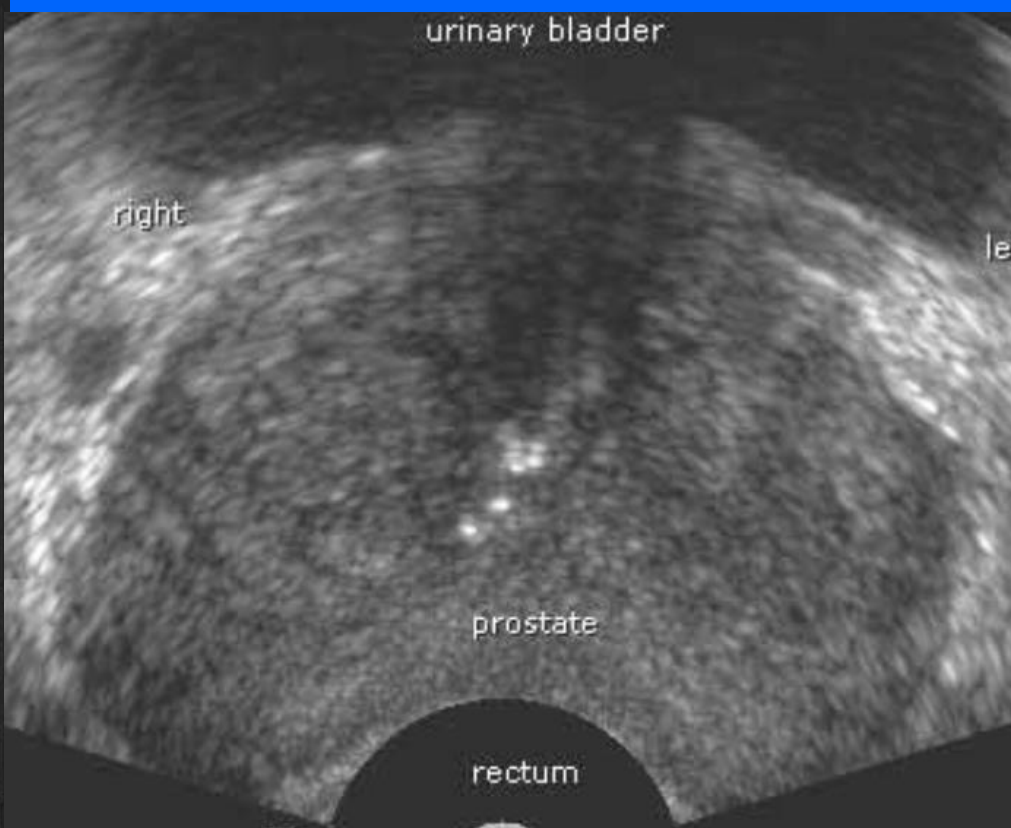
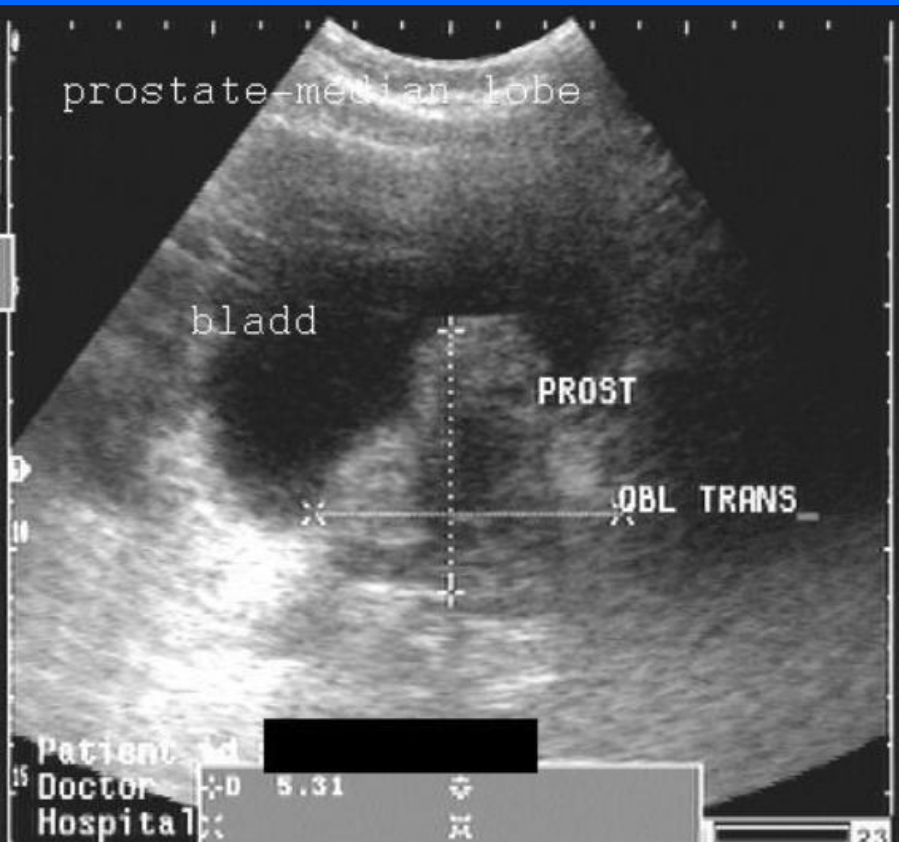
(θεωρώντας ότι η ταχύτητα του ήχου είναι 1500 m/s)

Απεικόνιση με υπέρηχους

- Οι μικρότερες δομές είναι πιο ευδιάκριτες όταν χρησιμοποιούνται μικρότερα μήκη κύματος και άρα υψηλότερες συχνότητες.
- Αυτό δεν σημαίνει ότι είναι σωστή η αυθαίρετη χρήση υπερήχων μικρού μήκους κύματος για να επιτευχθεί η απεικόνιση λεπτομερειών, γιατί οι υπέρηχοι μικρού μήκους κύματος έχουν μεγάλες συχνότητες και επομένως θα απορροφηθούν πριν φτάσουν στην περιοχή ενδιαφέροντος.
- Το βάθος που μπορεί να διεισδύσουν οι υπέρηχοι και να πραγματοποιηθεί η απεικόνιση μειώνεται σημαντικά στις υψηλότερες συχνότητες.

Απεικόνιση με υπέρηχους

- Η επιλογή της συχνότητας των υπερήχων γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τόσο το βάθος που βρίσκεται το προς απεικόνιση αντικείμενο όσο και την απαιτούμενη χωρική διακριτική ικανότητα της εικόνας.
- Οι μικρότερες συχνότητες (μεγαλύτερα μήκη κύματος) χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουμε δομές που βρίσκονται βαθιά στην κοιλιά, ενώ οι μεγαλύτερες συχνότητες (μικρότερα μήκη κύματος) χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουμε, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, τις δομές που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια:
 - Στην απεικόνιση του μαστού, όπου οι δομές είναι σε μικρότερο βάθος χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες συχνότητες (π.χ. 7.5 έως 10 MHz), από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται στην απεικόνιση δομών της κοιλιάς (π.χ. περίπου 3 MHz) οι οποίες βρίσκονται σε βάθος της τάξης των 10 cm.
 - Από την άλλη μεριά βέβαια η χωρική διακριτική ικανότητα στην απεικόνιση του μαστού είναι υψηλότερη και η εικόνα λεπτομερέστερη.



Τεχνικές παλμικής μετάδοσης

- Ο μεταλλάκτης παράγει ένα σύντομο παλμό που διαδίδεται από το δέρμα του ασθενή μέσα στο ανθρώπινο σώμα του.
- Μεσολαβεί ένας νεκρός χρόμος (παύση) και στη συνέχεια η παραγωγή επαναλαμβάνεται. Κάθε φορά που ο παλμός συναντά τη διαχωριστική επιφάνεια δύο ιστών με διαφορετικές τιμές ακουστικών εμποδισμών (διεπαφή), ο ήχος ανακλάται πίσω στο μεταλλάκτη, στον ίδιο που παρήγαγε τον παλμό.
- Η ανίχνευση και καταγραφή του ανακλώμενου παλμού πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια της παύσης εκπομπής παλμών, σε συγκεκριμένο χρόνο από την εκπομπή του, από τον οποίο υπολογίζεται η απόσταση της επιφάνειας, από την οποία προέρχεται ο ανακλώμενος ήχος, από το μεταλλάκτη (θεωρώντας την ταχύτητα του υπερηχητικού κύματος σταθερή).

Τεχνικές παλμικής μετάδοσης

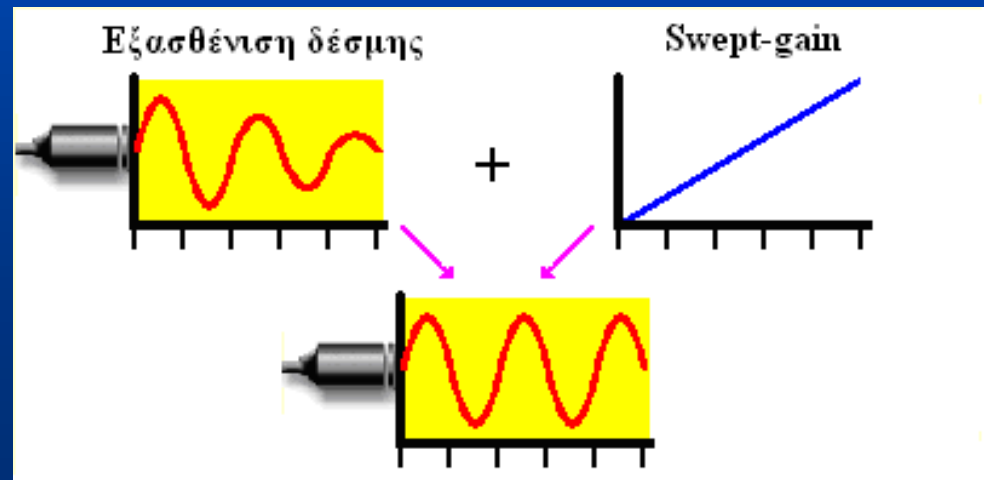
➤ Η ένταση του ανακλώμενου υπέρηχου-παλμού (ηχώ) εξαρτάται:

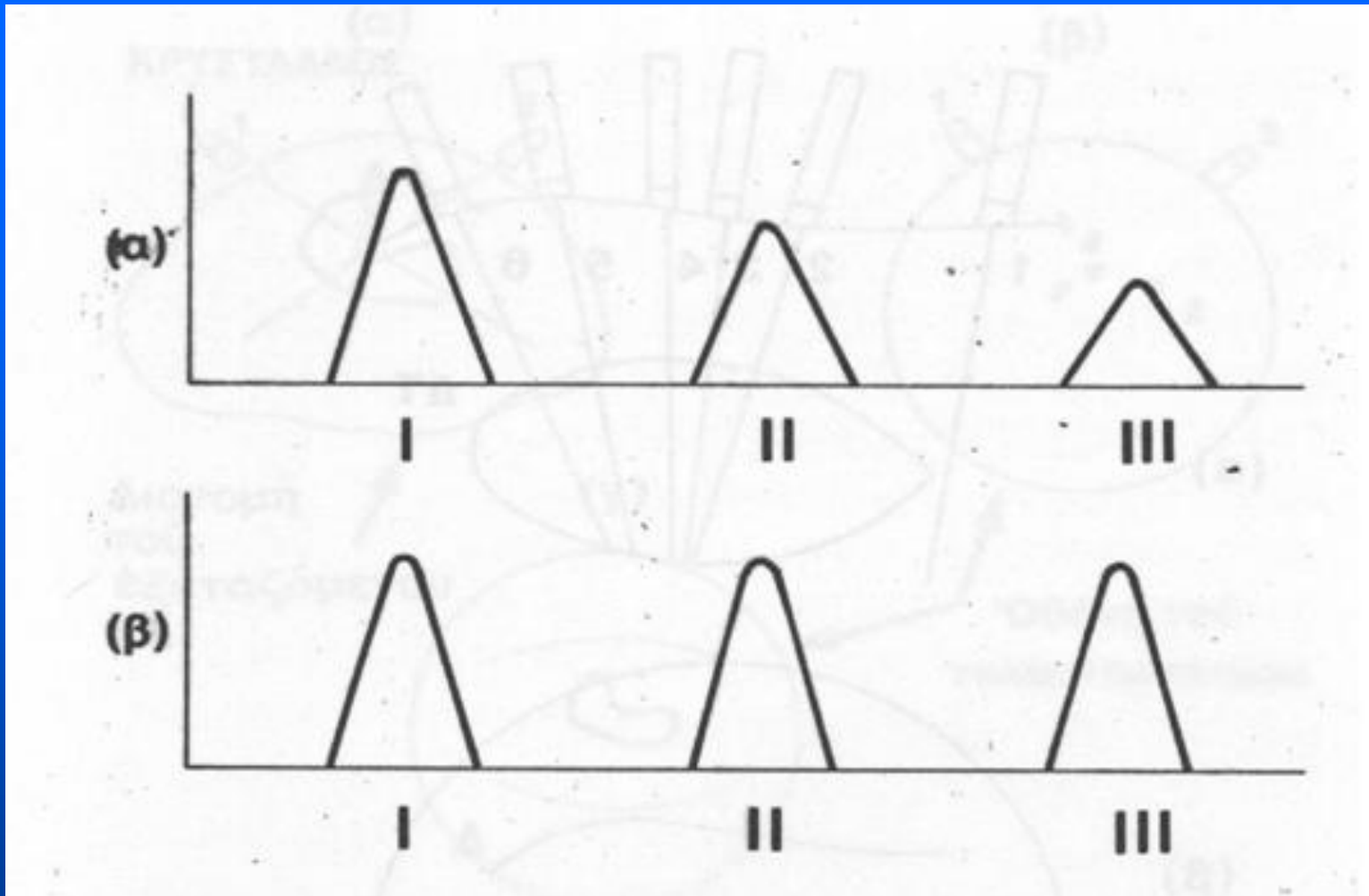
- από τη διαφορά των τιμών των ακουστικών εμπεδήσεων που συναντά το ηχητικό κύμα σε μια διεπαφή:

Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην ακουστική εμπέδηση των δύο ιστών τόσο μεγαλύτερο ποσοστό του ηχητικού παλμού θα ανακλαστεί και επομένως τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η ένταση της ηχούς. Με αυτόν τον τρόπο αποκτούνται αναλογίες μεταξύ των ακουστικών εμπεδήσεων των διάφορων ιστών που βρίσκονται στην πορεία διάδοσης ενός παλμού.

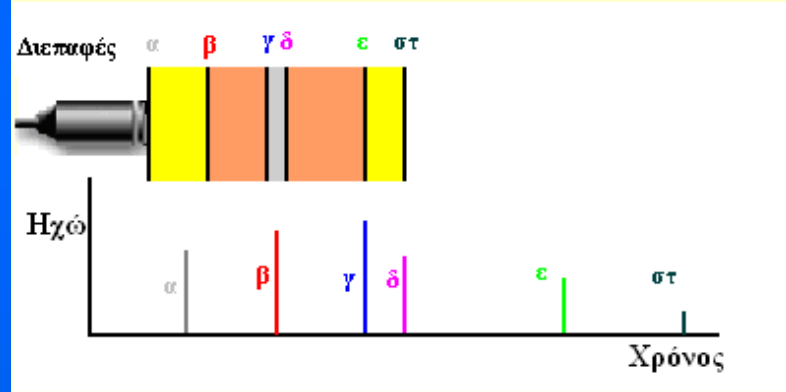
- από την εξασθένιση που υφίσταται η δέσμη υπερήχων κατά τη δίοδό της μέσα στο σώμα

- Η εξασθένιση της δέσμης σε ένα μέσο, είναι εκθετική και εξαρτάται από το συντελεστή εξασθένισης του μέσου διάδοσης και από το μήκος της διαδρομής που διανύει η δέσμη στο μέσο και είναι εκθετική.
- Με σκοπό την καταγραφή ηχών (ανακλάσεων) με ένταση ανεξάρτητη από την εξασθένιση, οι εντάσεις των ανακλώμενων ήχων που καταγράφονται ενισχύονται εκθετικά με τέτοιο τρόπο ώστε δύο ίδιες ανακλαστικές επιφάνειες να παράγουν τελικά το ίδιο σήμα ανεξάρτητα από το βάθος/απόσταση που βρίσκονται.
- Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως χρονική ενίσχυση (time-gain control)





- α) Ανακλώμενοι υπέρηχοι από την ίδια διεπιφάνεια από διαφορετικά βάθη χωρίς ενίσχυση
- β) Ανακλώμενοι υπέρηχοι από την ίδια διεπιφάνεια από διαφορετικά βάθη με ενίσχυση



- Έστω λοιπόν μία δέσμη υπερήχων η οποία συνατά διάφορες διεπαφές
- Οι διεπαφές αυτές θα δημιουργήσουν μια σειρά ανακλώμενων παλμών
- Θεωρώντας την ταχύτητα της υπερηχητικής δέσμης v_s σταθερή (1540 m/sec), από το χρόνο, t , που μεσολαβεί μεταξύ της εκπομπής του παλμού και της καταγραφής της ηχούς μπορεί να υπολογιστεί η απόσταση, d , της διεπαφής που έδωσε την ηχώ χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$2d = v_s t \Rightarrow d = \frac{1}{2} v_s t$$

- Από την άλλη μεριά, η ένταση της ηχούς, αφού πρώτα έχει ενισχυθεί για την απεξάρτησή της από την εκθετική εξασθένιση, δίνει πληροφορίες για τη διαφορά στην εμπέδηση μεταξύ των δύο ιστών εκατέρωθεν της διεπαφής

B (brightness) mode

- Οι εντάσεις των ανακλώμενων παλμών παρουσιάζονται ως σημεία φωτεινότητας ή απόχρωσης του γκρι ανάλογης με την ένταση του ανακλώμενου παλμού και σε θέση που εξαρτάται από τη θέση από την οποία προήλθε η ανάκλαση του παλμού.
- Με τον τρόπο αυτό γίνεται δυνατή η απεικόνιση των δομών στο χώρο με την απόκτηση δισδιάστατων εικόνων που αντιστοιχούν σε εγκάρσιες τομές στο σώμα.

B-scan του διαστήσεων Υπερηχοτομογραφία

- Ο μεταλλάκτης κινείται κατά μήκος μιας γραμμής στην επιφάνεια του σώματος.
- Στην οθόνη παρουσιάζονται τα σήματα που προέρχονται από ανακλαστικές επιφάνειες που συναντούν οι υπέρηχοι στις διαδοχικές ευθείες διαδόσεως με φωτεινότητα ανάλογη με την ένταση του ανακλώμενου παλμού.
- Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται η εικόνα μιας τομής του σώματος όπως ορίζεται από την ευθεία κινήσεως του μεταλλάκτη και την διεύθυνση διαδόσεως των κυμάτων.
- Κάθε τομή διαιρείται σε πολλές κυψελίδες (pixels) σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί ένα επίπεδο φωτεινότητας ανάλογο της έντασης του ανακλώμενου σε αυτή παλμού



Τρισδιάστατη απεικόνιση

- Κάνοντας λήψη πολλών παρακείμενων τομών με σαρωτή και ανακατασκευάζοντας αυτές τις τομές με τη βοήθεια γρήγορων υπολογιστών και των γραφικών του υπολογιστή μπορεί να δημιουργηθεί μία συνολικά τρισδιάστατη εικόνα.
- Για παράδειγμα, στην περίπτωση μιας μαιευτικής εφαρμογής μπορεί να πραγματοποιηθεί η τρισδιάστατη απεικόνιση του εμβρύου



Ανακατασκευασμένη τρισδιάστατη εικόνα εμβρύου 28 εβδομάδων

Βιολογικές επιδράσεις υπερήχων

- Οι πιθανές βιολογικές επιδράσεις τους σχετίζονται με το ποσό της ενέργειας που απορροφάται από τον ανθρώπινο οργανισμό και από το αν αυτή η απορρόφηση μπορεί να προκαλέσει βλάβες.
- Το ποσό της απορροφούμενης ενέργειας είναι και το μέγεθος που θέτει περιορισμούς στην ασφάλεια της χρήσης τους.
- Παρόλο που οι βιολογικές επιδράσεις των υπερήχων στον ανθρώπινο οργανισμό δεν μας είναι απόλυτα γνωστές, είναι σίγουρο ότι οι υπέρηχοι είναι μία σχετικά ασφαλής απεικονιστική μέθοδος και σίγουρα ασφαλέστερη από άλλες απεικονιστικές τεχνικές, όπως αυτές που στηρίζονται στις ακτίνες -Χ.

Βιολογικές επιδράσεις υπέρηχων

- Η ασφάλεια των υπέρηχων έχει αποδειχθεί τόσο με βάση εργαστηριακά πειράματα σε απομονωμένα κύτταρα, σε φυτά και ζώα που εκτέθηκαν σε υπέρηχους, όσο και από μελέτες πληθυσμών που πραγματοποίησαν εξετάσεις με υπέρηχους.
- Τα εργαστηριακά πειράματα έδειξαν ότι μόνο υπέρηχοι εξαιρετικά υψηλής έντασης μπορούν να προκαλέσουν βλάβες σε μεμονωμένα κύτταρα, όπως για παράδειγμα αλλαγές στη δομή και στο γενετικό τους υλικό.
- Στην περιοχή των MHz δεν έχουν παρατηρηθεί βιολογικά αποτελέσματα σε ιστούς θηλαστικών που εκτέθηκαν σε ακτινοβολία εντάσεως μικρότερης από 100 mW/cm^2 , που χρησιμοποιούνται στις ιατρικές εφαρμογές

Βιολογικές επιδράσεις υπερήχων

- Είναι κοινά αποδεκτό ότι η χρήση των υπέρηχων στην Ιατρική θεωρείται γενικά ασφαλής και πιθανά βιολογικά αποτελέσματα, όπως κυτταρικός θάνατος, μπορούν να εμφανιστούν μόνο σε πολύ υψηλές εντάσεις που κατά κανόνα δεν συναντώνται στην κλινική πράξη.
- Παρ' όλα αυτά ισχύει και στους υπέρηχους, όπως και στις ακτίνες -Χ, ο κανόνας ότι πρέπει να χρησιμοποιείται η χαμηλότερη δυνατή ακουστική έκθεση για να πάρουμε τις απαραίτητες διαγνωστικές πληροφορίες.