

Κεφάλαιο 15

ΥΠΕΡΗΧΟΙ

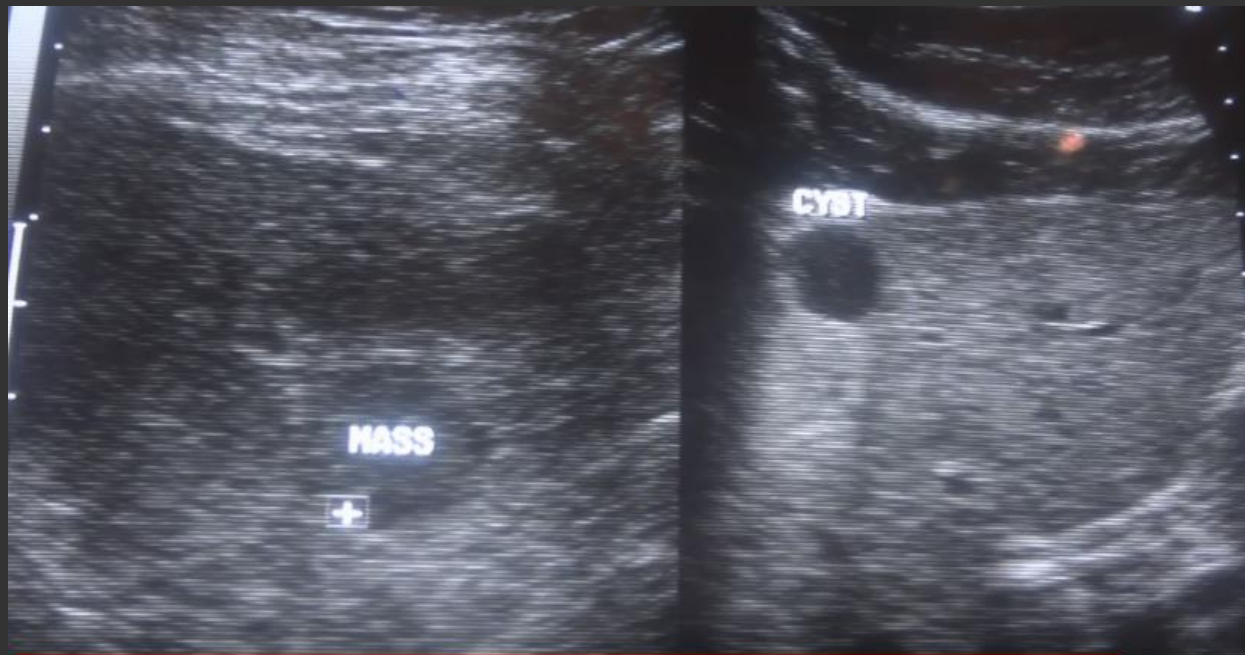
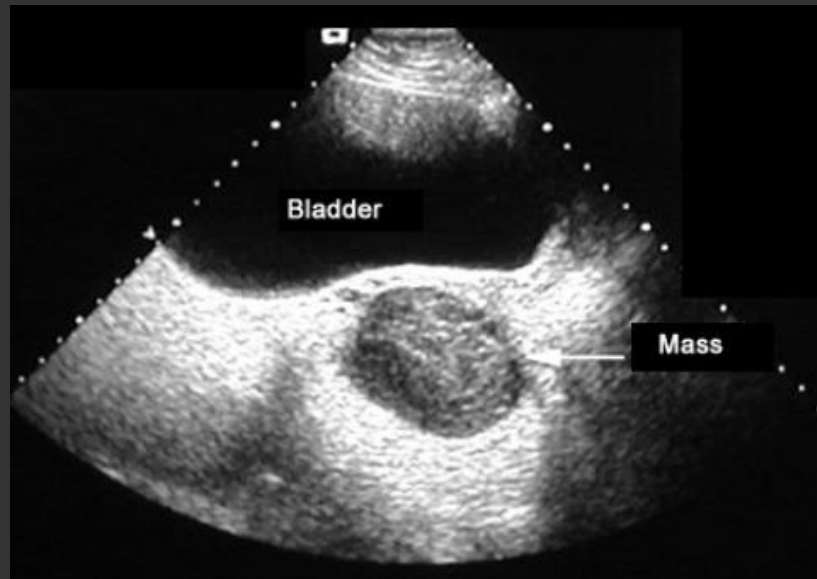
Παντελής Καραΐσκος
Καθ. Ιατρικής Φυσικής
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής
Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

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.
 - Ο ανιχνευτής καταγράφει 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.





Μηχανικό κύμα

- Αν προκληθεί μια διαταραχή σε ένα υλικό που ηρεμεί (ισορροπεί), τα μόριά του, στην περιοχή όπου προκλήθηκε η διαταραχή, μετατοπίζονται από τις θέσεις ισορροπίας τους. Επειδή όμως τα μόρια αυτά αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους δέχονται δυνάμεις που τείνουν να τα επαναφέρουν στις αρχικές τους θέσεις ενώ στα διπλανά τους ασκούνται δυνάμεις που τείνουν να τα εκτρέψουν από τη θέση ισορροπίας. Έτσι, η διαταραχή διαδίδεται από τη μια περιοχή του υλικού στην άλλη και όλα τα σημεία του υλικού εκτελούν διαδοχικά την ίδια κίνηση. Η διάδοση αυτής της διαταραχής στο χώρο ονομάζεται **κύμα**.
- Για τη δημιουργία ενός κύματος χρειάζονται η **πηγή της διαταραχής** ή **πηγή του κύματος**, δηλαδή η αιτία που θα προκαλέσει τη διαταραχή και ένα υλικό (**μέσο**) στο οποίο κάθε μόριο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του (ελαστικό μέσο).

Μηχανικό κύμα

- Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο ονομάζονται **μηχανικά κύματα**. Ο κυματισμός στην επιφάνεια της θάλασσας, η διάδοση των δονήσεων κατά μήκος ενός στερεού και ο ήχος είναι μερικά παραδείγματα μηχανικών κυμάτων.
- Κατά τη διάδοση ενός κύματος δεν έχουμε μεταφορά ύλης από μια περιοχή του ελαστικού μέσου σε άλλη. Τα μόρια του ελαστικού μέσου κινούνται γύρω από τη θέση ισορροπίας τους

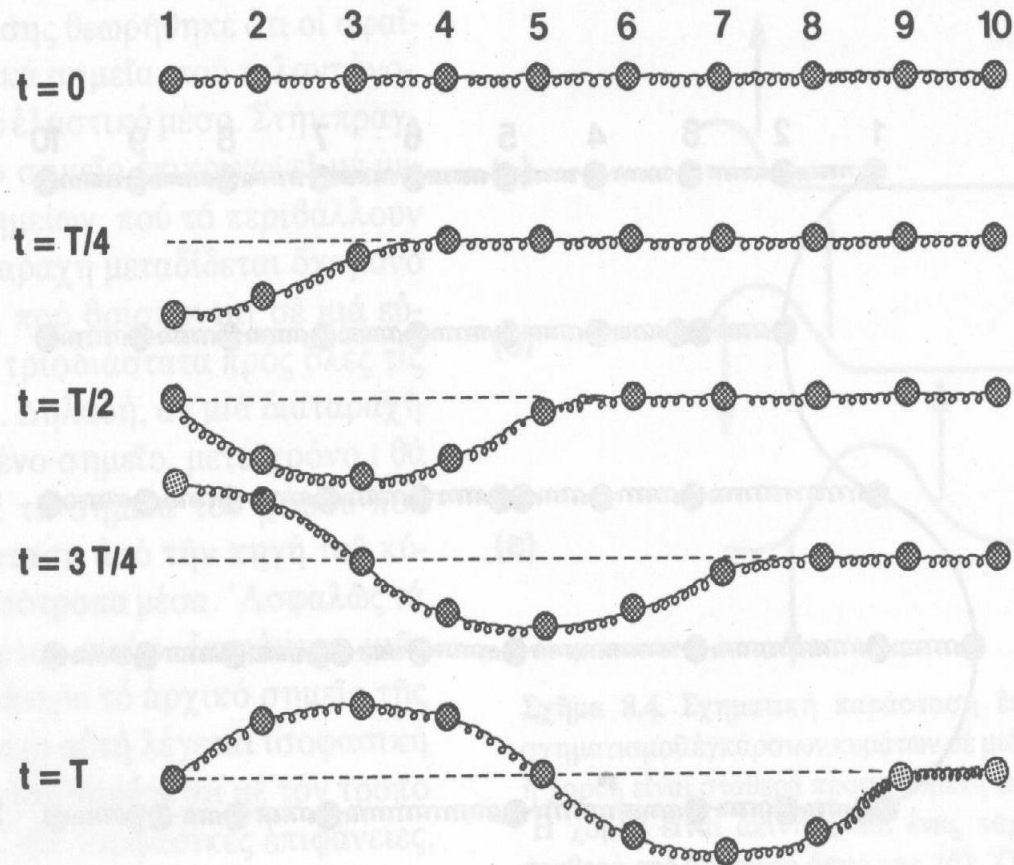
Το ηχητικό κύμα

- 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.

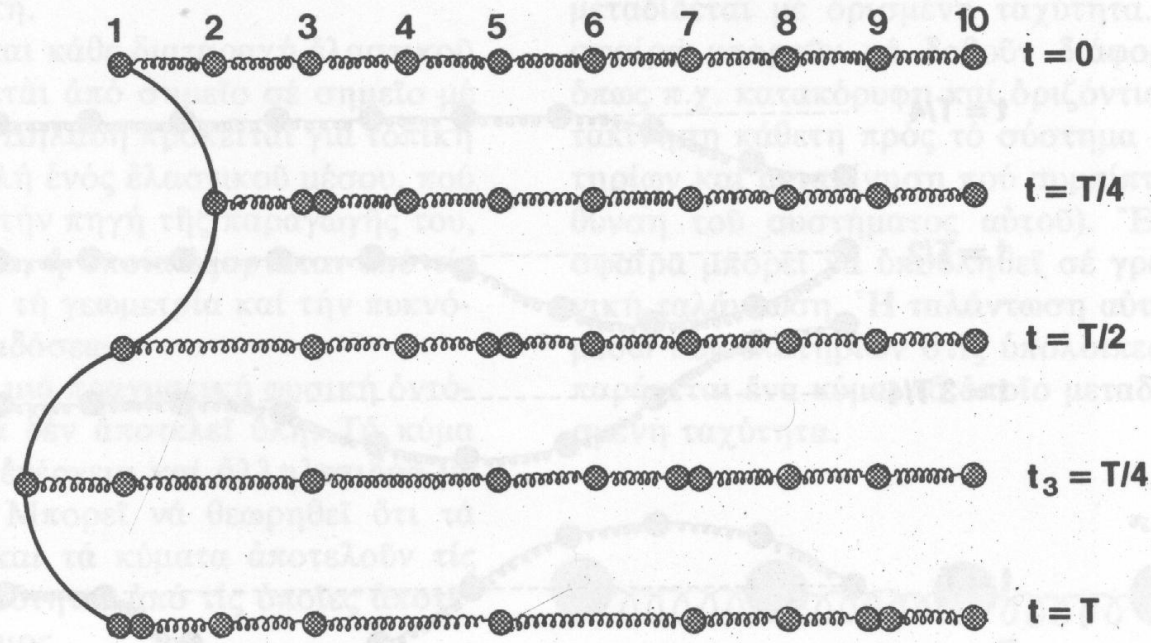
- Μία άλλη διάκριση μεταξύ των κυμάτων είναι τα διαμήκη και τα εγκάρσια.
- Διαμήκη ονομάζονται τα κύματα, στα οποία οι διαταραχές γίνονται στην ίδια κατεύθυνση με την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- Εγκάρσια ονομάζονται τα κύματα, στα οποία οι διαταραχές λαμβάνουν χώρα κάθετα προς την κατεύθυνση διάδοσης τους.

Εγκάρσιο κύμα



Τα σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

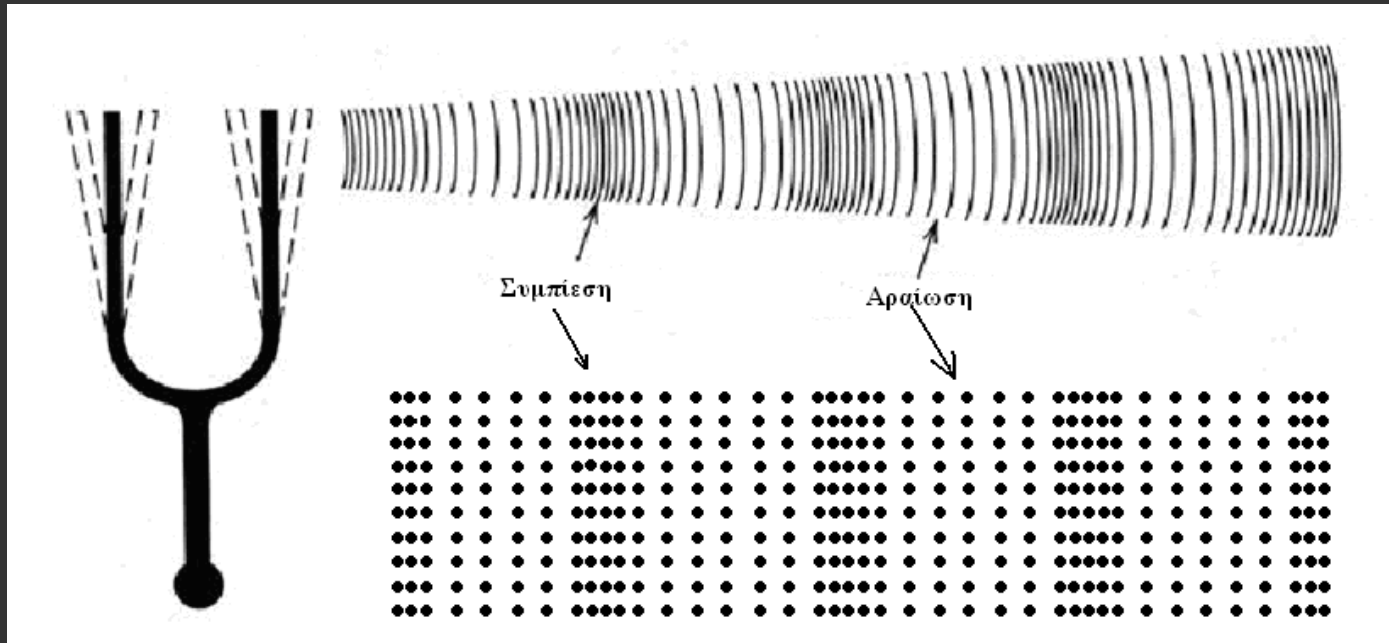
Διαμήκες κύμα



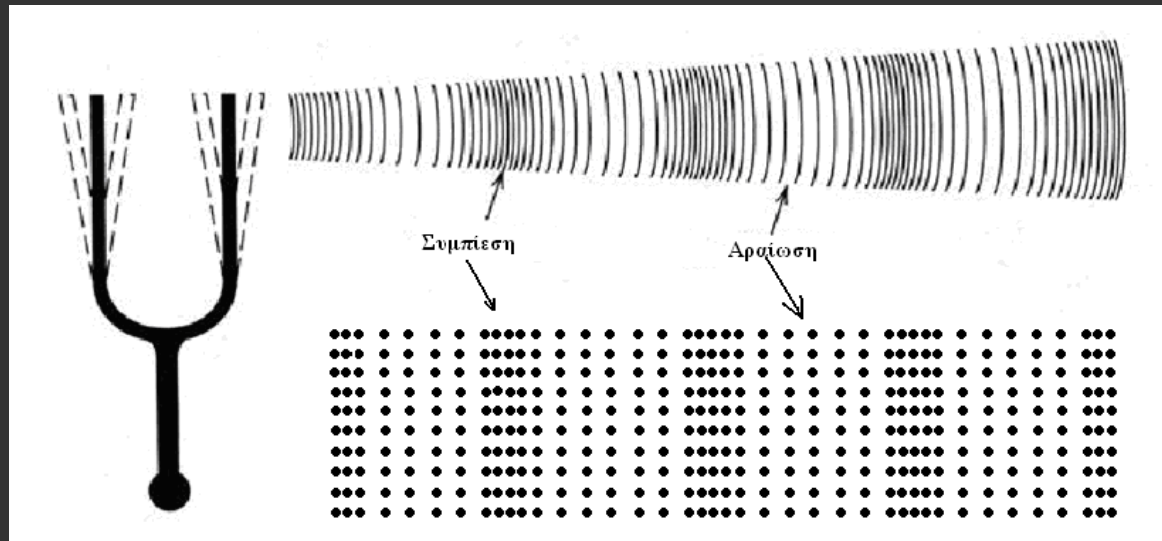
Τα μόρια του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

- 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.

- 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.

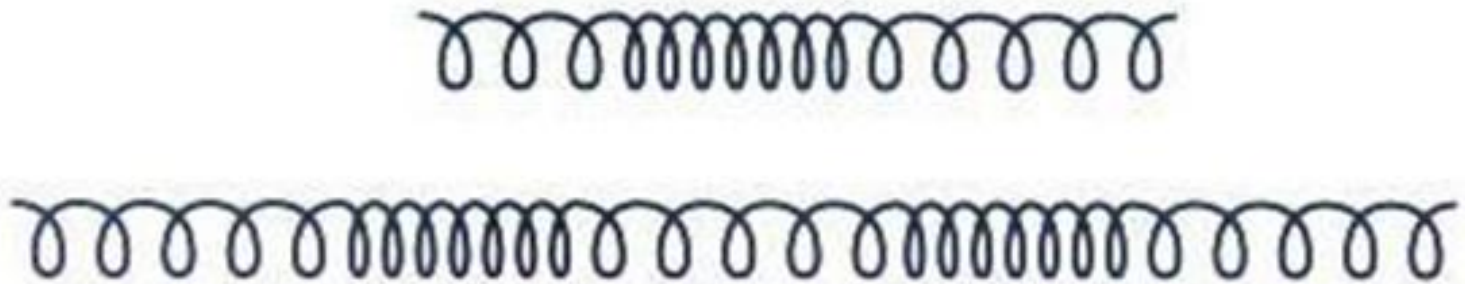


Παράδειγμα παραγωγής και διάδοσης ηχητικού κύματος. Το ηχητικό κύμα διαδίδεται προκαλώντας πυκνώματα (συμπύεση) και αραιώματα (αραίωση) των μορίων του μέσου διάδοσης ως αποτέλεσμα των ταλαντώσεων γύρω από τη θέση ισορροπίας τους.



- 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).

- Μια αναλογία είναι ένα παλλόμενο ελατήριο, όπου τα κύματα σχηματίζονται καθώς οι συσπειρωμένες ή επιμήκεις περιοχές μετακινούνται κατά μήκος του ελατηρίου.

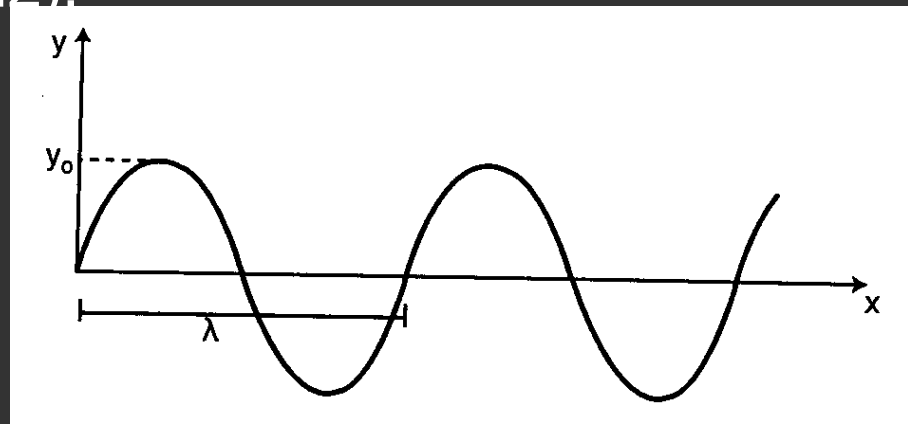


Διαμήκες κύμα σε ένα παλλόμενο ελατήριο, όπου φαίνονται τα πυκνώματα και τα αραιώματα.

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.

Ακουστική 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 διαστάσεις μεγαλύτερες από το μήκος κύματος και διαφορετική ακουστική εμπέδηση.
- 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
- Οι εντάσεις του ανακλώμενου και του διαθλώμενου κύματος δίνεται επίσης από τις προηγούμενες σχέσεις.
- Η γωνία πρόσπτωσης θ_{π} , η γωνία ανάκλασης θ_{α} και η γωνία διάθλασης θ_{δ} , συνδέονται με τις σχέσεις:

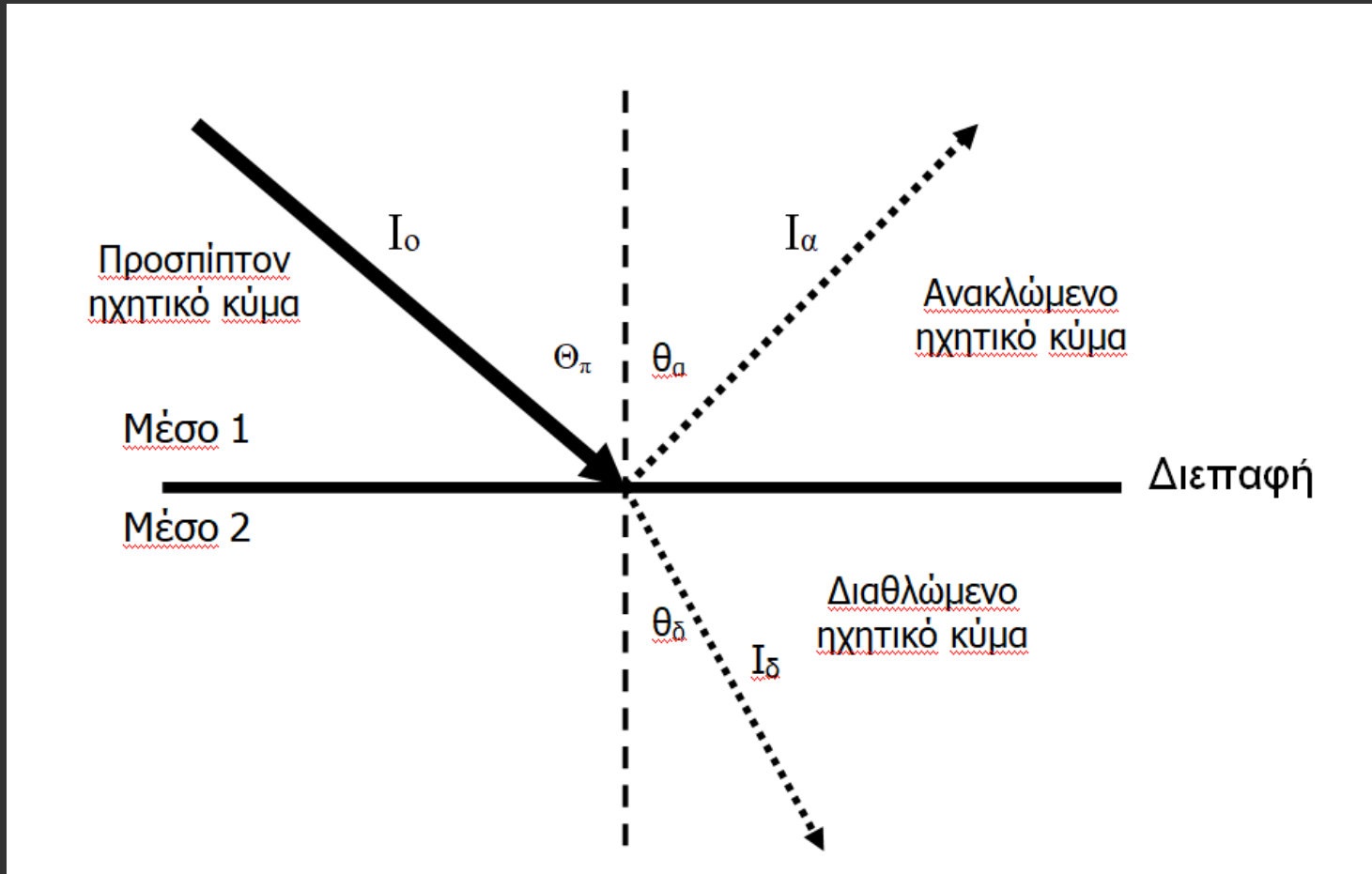
$$\theta_{\alpha} = \theta_{\pi}$$

$$\frac{\sin \theta_{\pi}}{\sin \theta_{\delta}} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$$

όπου V_1 και V_2 οι ταχύτητες διάδοσης του ήχου στα δύο μέσα (1 και 2) και n_{21} ο συντελεστής διάθλασης του μέσου 2 ως προς το μέσο 1.

Ανάκλαση και διάθλαση

➤ Όταν το ηχητικό κύμα προσπίπτει υπό γωνία σε μια διεπαφή, η γωνία ανάκλασης (θ_a) 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 ή και μικρότερων από το μήκος κύματος του ήχου.

Σκέδαση

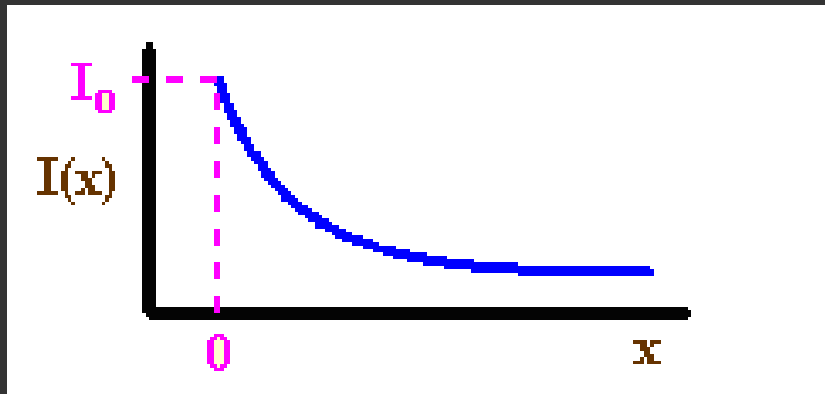
- Ήχοι χαμηλών συχνοτήτων (μεγάλα μήκη κύματος) επηρεάζονται μόνο από χονδροειδείς ατέλειες.
- Ήχοι υψηλών συχνοτήτων (άρα με μικρά μήκη κύματος) υφίστανται μεγαλύτερη σκέδαση καθώς επηρεάζονται ακόμα και από μικροατέλειες.

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

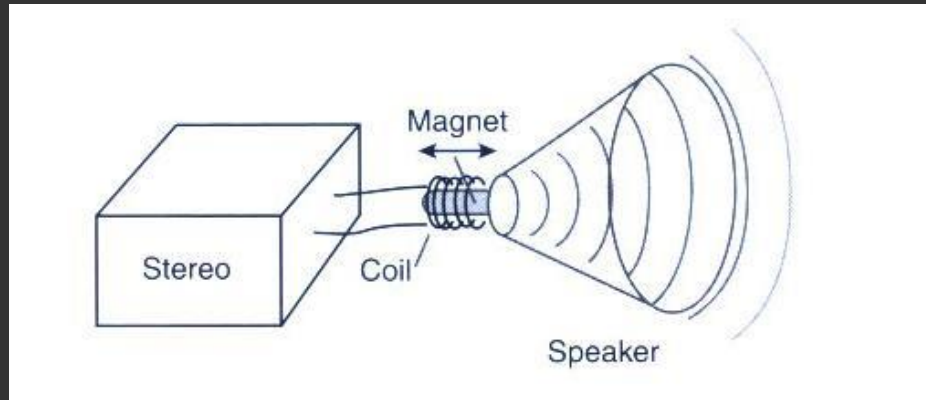
Συχνότητα (MHz)	Μήκος κύματος (mm)	Βάθος υποδιπλασιασμού έντασης, $L_{1/2}$ (cm)
1.00	1.54	6.0
5.00	0.31	1.2
10.0	0.154	0.6

- Οι χαμηλότερες συχνότητες απορροφώνται πιο αργά (διανύουν μεγαλύτερη απόσταση) σε σχέση με τις υψηλότερες.
- Γενικά, το βάθος υποδιπλασιασμού είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας.
- Αυτό σημαίνει ότι ένας υπέρηχος συχνότητας 1 MHz έχει βάθος υποδιπλασιασμού, $L_{1/2}$, ίσο με 6 cm, ενώ ένας υπέρηχος δεκαπλάσιας συχνότητας, δηλαδή 10 MHz έχει βάθος υποδιπλασιασμού, $L_{1/2}$, ίσο με 0.6 cm, δηλαδή το υποδεκαπλάσιο του υπέρηχου του 1 MHz.
- Επομένως ο υπερηχητικός παλμός των 10 MHz θα διαδοθεί στη υποδεκαπλάσια απόσταση από εκείνον των 1 MHz πριν υποστεί την ίδια ακριβώς απορρόφηση.

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.

- Ένας τέτοιος μεταλλάκτης είναι και το μεγάφωνο όπου ένα διάφραγμα κωνοειδούς σχήματος, ταλαντώνεται και παράγει ηχητικά κύματα.



Το διάφραγμα φέρει ένα πηνίο, με ένα μαγνήτη στο εσωτερικό του. Όταν το πηνίο διαρρέεται από χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα, στο μαγνήτη ασκείται μεταβαλλόμενη δύναμη. Η δύναμη αυτή προκαλεί την ταλάντωση του μαγνήτη και του διαφράγματος, το οποίο εκπέμπει ηχητικά κύματα στον περιβάλλοντα αέρα.

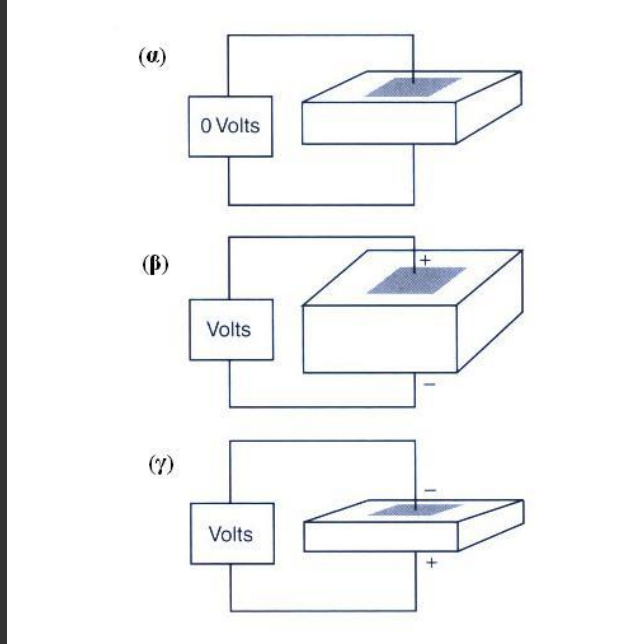
- Ο μεταλλάκτης υπερήχων λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με το megάφωνο όταν επιδράσει σε αυτόν μια χρονικά μεταβαλλόμενη τάση ή ένα μαγνητικό πεδίο. Δηλαδή ταλαντώνεται και παράγει ήχο.
- Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται και με την αντίστροφη διαδικασία ως ανιχνευτές ήχου.
- Κατά τη διαδικασία αυτή, το ηχητικό κύμα προκαλεί τη συστολή και διαστολή ενός υλικού, παράγεται τάση ή μαγνητικό πεδίο, τα οποία μπορούν να μετρηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή του εισερχόμενου ήχου.

Παραγωγή και ανίχνευση υπέρηχων

- Η παραγωγή και ανίχνευση των υπερήχων βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο, ύστερα από συμπίεση ή εφελκυσμό, εμφανίζονται ετερώνυμα 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.



- Με τη βοήθεια μεταλλικών ηλεκτροδίων, που τοποθετούνται στις δύο επιφάνειες, εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο ηλεκτρική τάση.
- Όταν εφαρμόζεται μηδενική τάση, ο κρύσταλλος, ο οποίος αρχικά έχει συγκεκριμένες διαστάσεις (α).
- Όταν στον κρύσταλλο εφαρμοστούν τάσεις αντίθετης πολικότητας, ο κρύσταλλος διαστέλλεται (β) ή συστέλλεται (γ).
- Τέλος, όταν στον κρύσταλλο εφαρμοστεί χρονικά μεταβαλλόμενη τάση με εναλλασσόμενη πολικότητα, τότε αυτός ταλαντώνεται.
- Η ταλάντωση των δύο επιφανειών του μεταδίδεται στο μέσο που τον περιβάλλει, παράγοντας ηχητικά κύματα.

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.
- Η συχνότητα συντονισμού είναι αντιστρόφως ανάλογη με του πάχους του κρυστάλλου.

- 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.





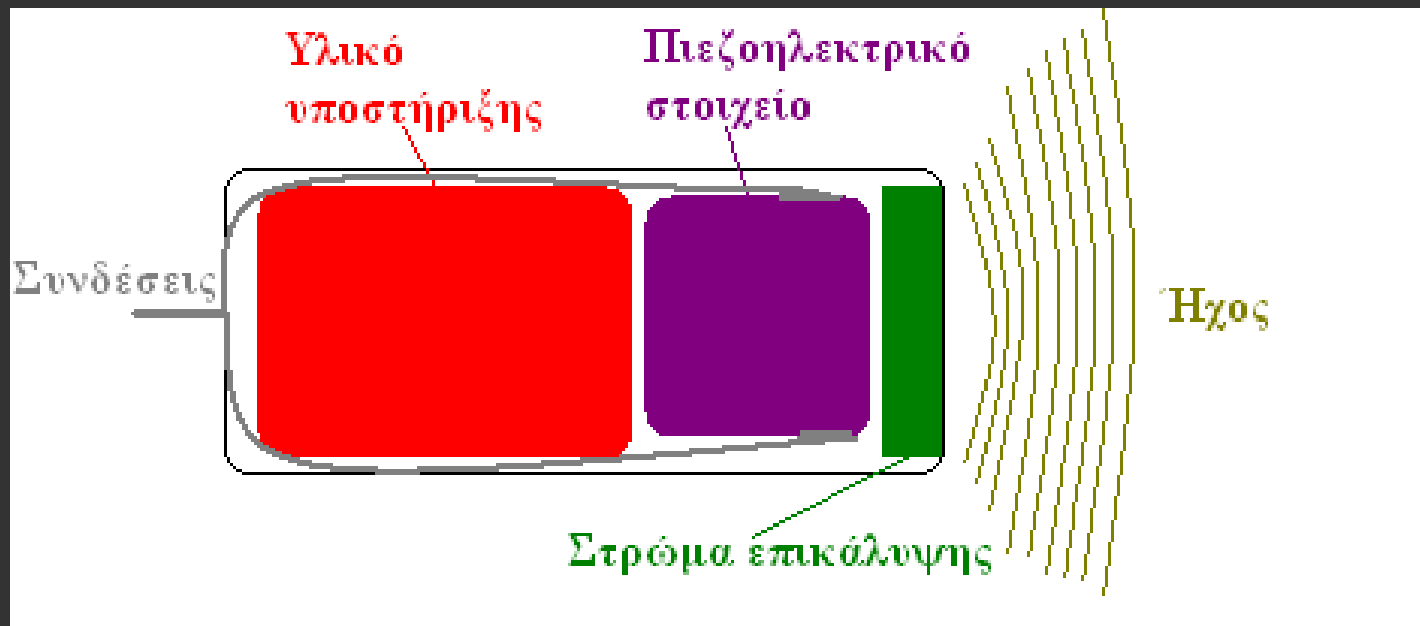
- Κοντινό πεδίο (ζώνη Fresnel): η δέσμη συγκλίνει
- Απομακρυσμένο πεδίο (ζώνη Fraunhofer), η δέσμη αποκλίνει.

Το μήκος του κοντινού πεδίου, $D_{Fresnel}$, καθώς και η γωνία απόκλισης, θ , του απομακρυσμένου πεδίου εξαρτώνται από την ακτίνα r του μεταροπέα και από το μήκος κύματος, λ , του ήχου:

$$\sin \theta = 0.6 \left(\frac{\lambda}{r} \right)$$

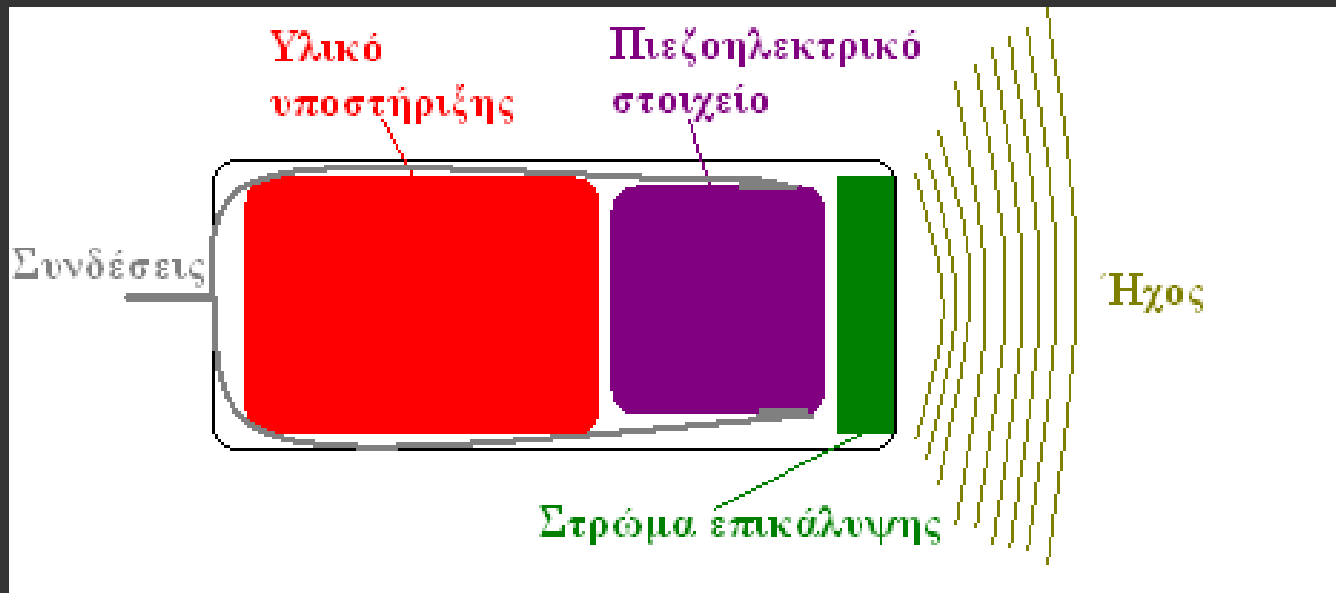
$$D_{Fresnel} = \frac{r^2}{\lambda}$$

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 εμποδίσσεων 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.

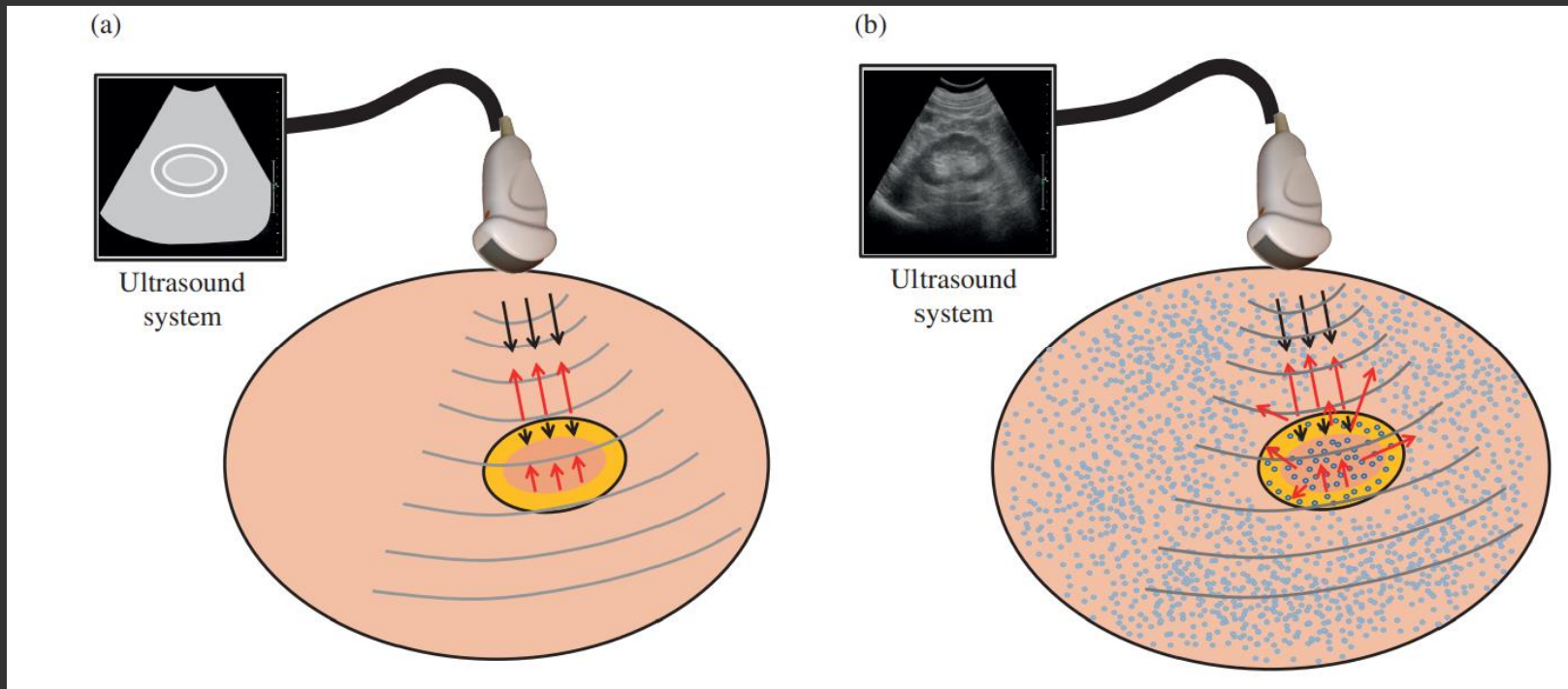
Τεχνικές εκπομπής υπερήχων κατά παλμούς (pulse-echo)



- 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.

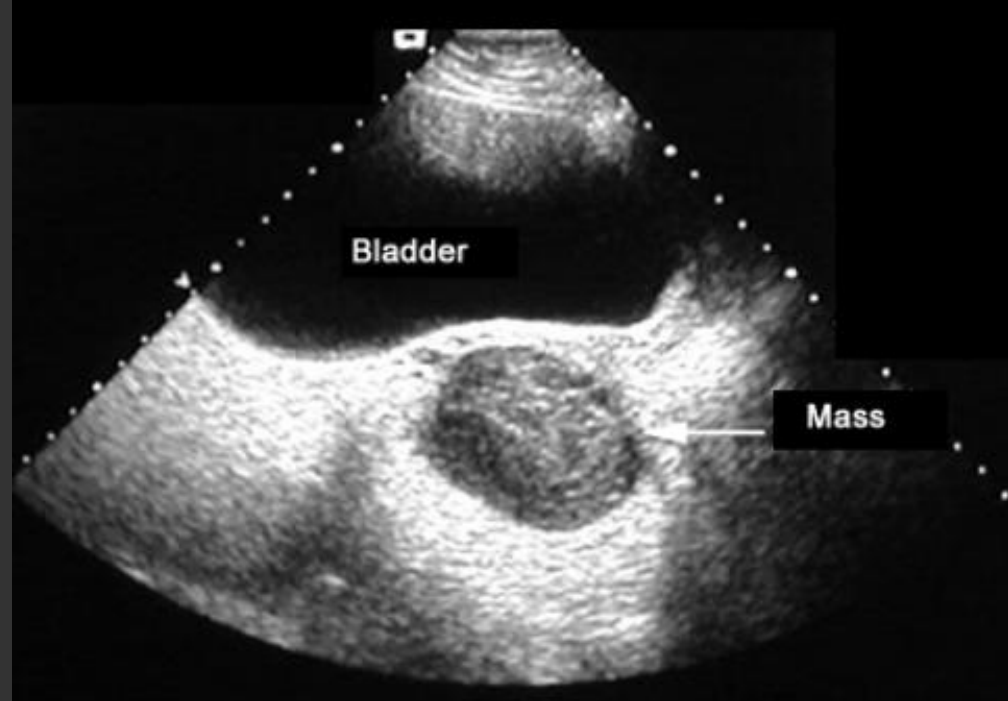
Απεικόνιση με υπερήχους

- Οι απεικονιστικές εφαρμογές των υπέρηχων βασίζονται στο φαινόμενο της ανάκλασης τους στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών δομών/οργάνων του ανθρώπινου σώματος (a).
- Σκεδάσεις από δομές μικρών διαστάσεων (συγκρίσιμες με το μήκος κύματος) μέσα στο όργανο, δίνουν πληροφορίες για την εσωτερική δομή του οργάνου (b)



Απεικόνιση με υπερήχους

- Για παράδειγμα ένας όγκος διαχωρίζεται από μια κύστη γεμάτη υγρό με τη βοήθεια των υπέρηχων ως εξής:
Το υγρό της κύστης δεν θα δώσει σκεδάσεις 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 σκεδάσεις.



Απεικόνιση με υπερήχους

- Το μέγεθος ενός αντικειμένου που είναι ικανό να ανακλάσει/σκεδάσει 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/σκεδάσει τον ήχο. Αντίθετα τα μεγαλύτερα αντικείμενα είναι πολύ καλύτεροι ανακλαστές/σκεδαστές.
- Επομένως η χωρική διακριτική ικανότητα της απεικόνισης με υπέρηχους εξαρτάται άμεσα από το μήκος κύματος του κύματος.

Απεικόνιση με υπερήχους

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

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

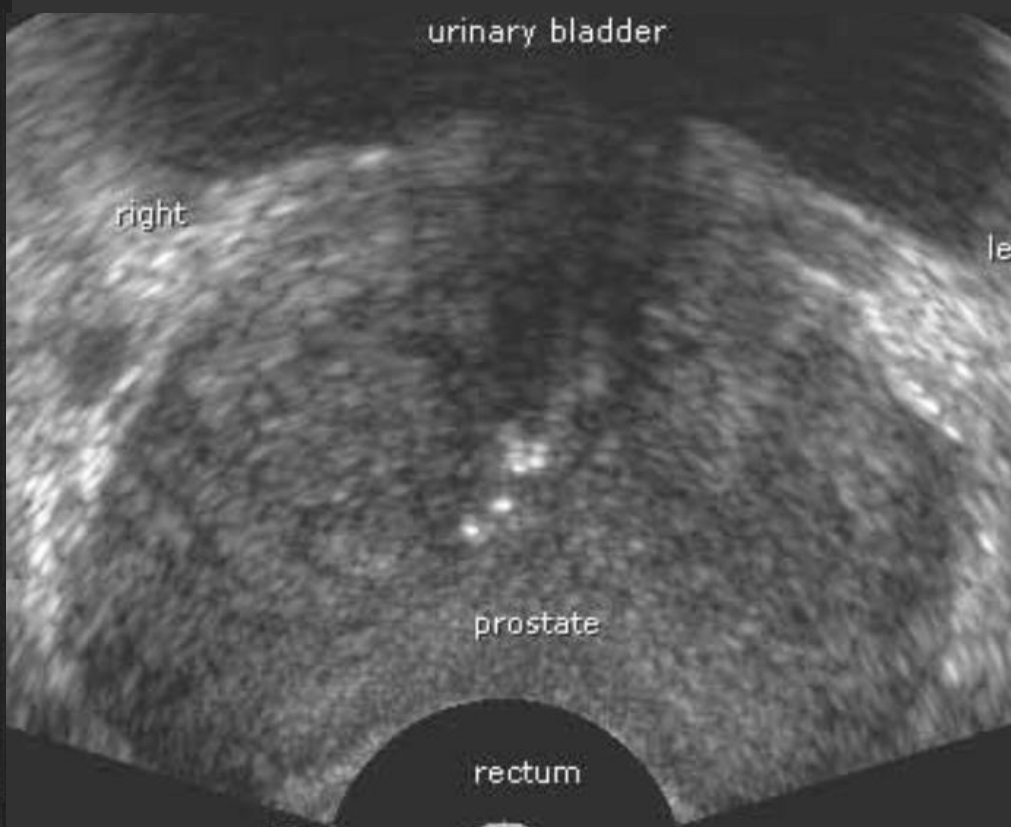
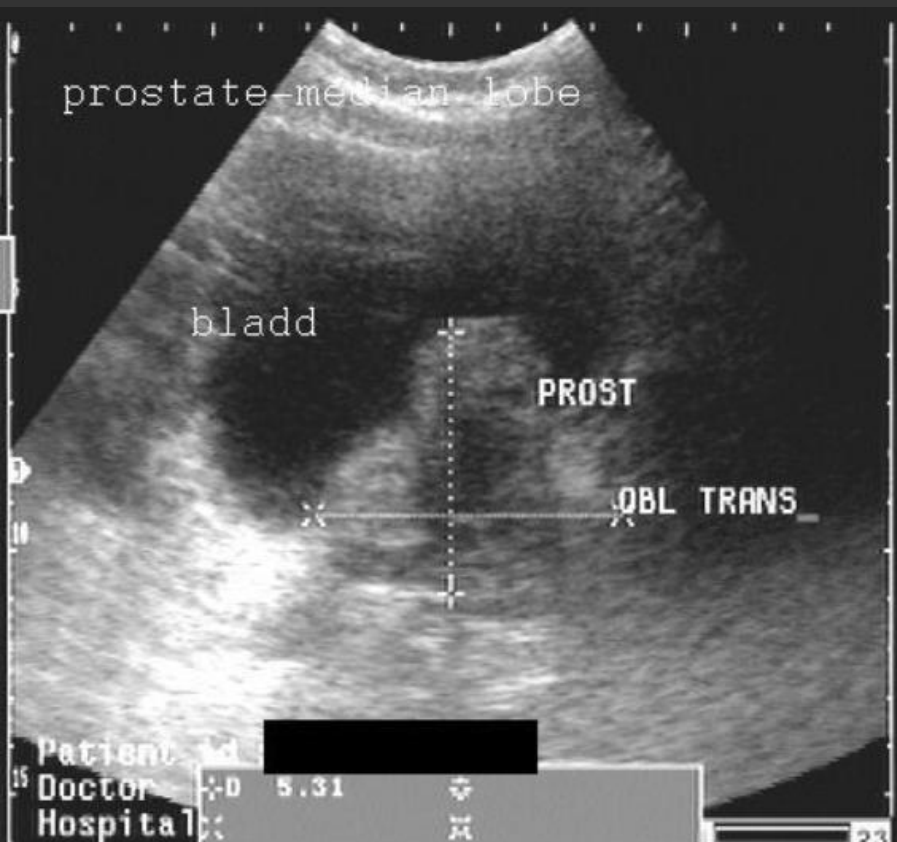
(θεωρώντας ότι η ταχύτητα του ήχου είναι 1500 m/s)

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 δεισδύσουν 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.



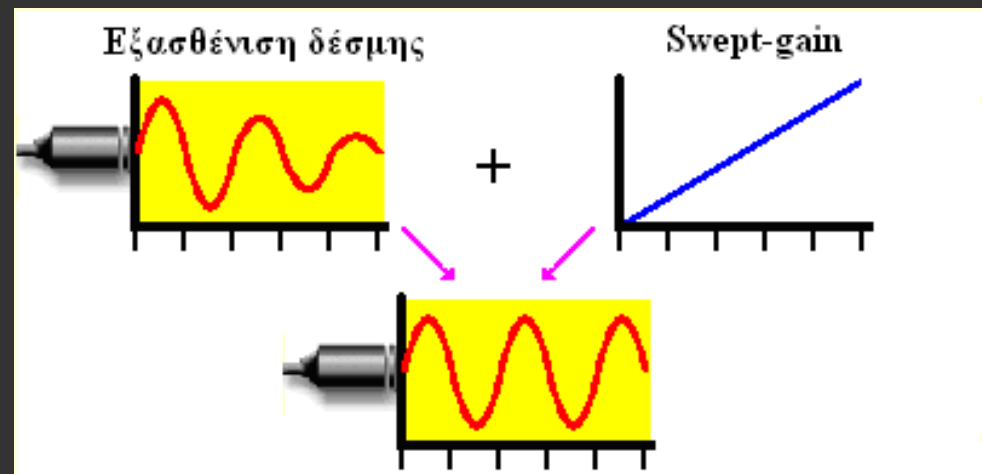
Τεχνικές παλμικής μετάδοσης

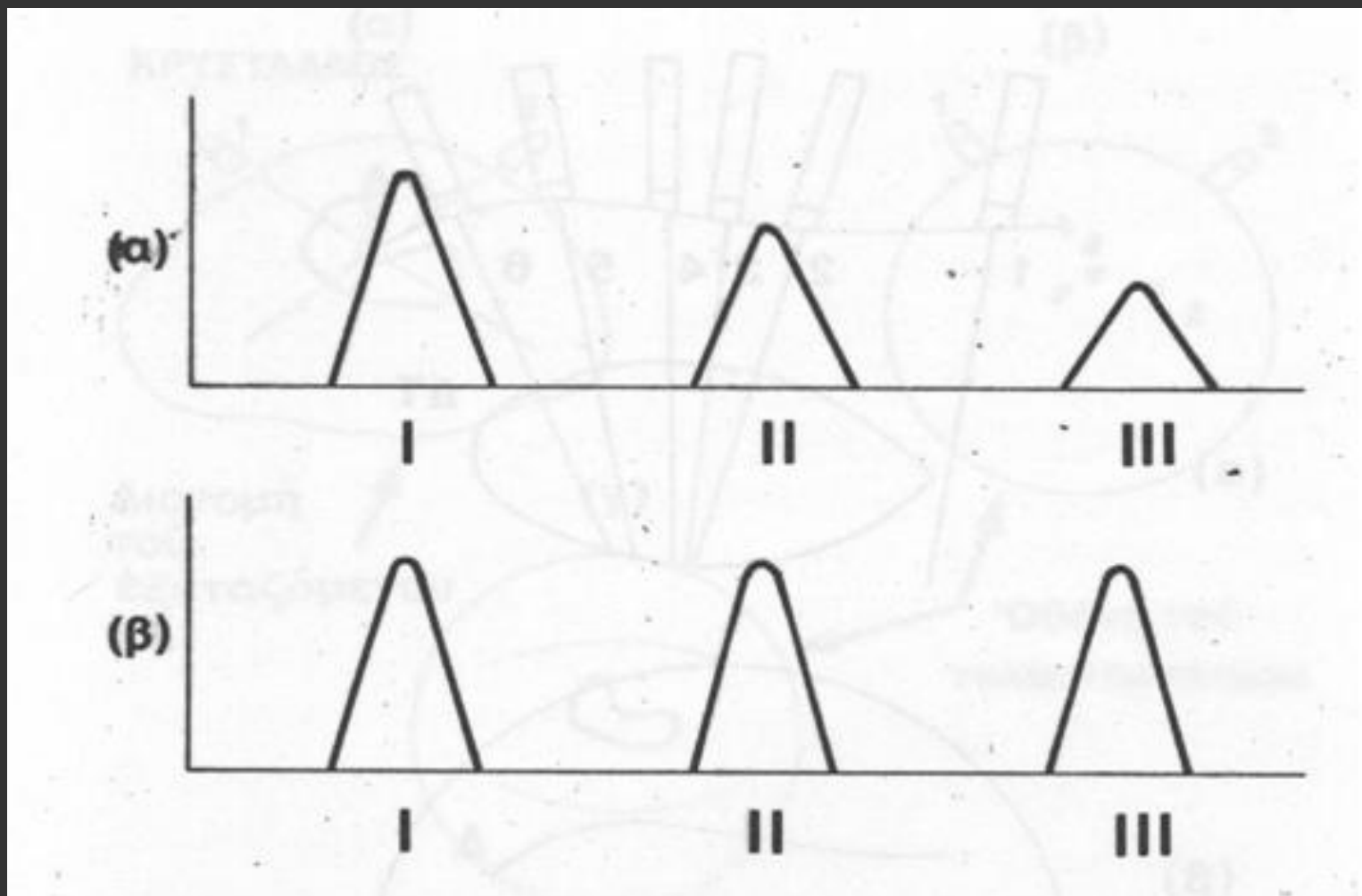
- Ο μεταλλάκτης παράγει ένα σύντομο παλμό που διαδίδεται από το δέρμα του ασθενή μέσα στο ανθρώπινο σώμα του.
- Μεσολαβεί ένας νεκρός χρόμος (παύση) και στη συνέχεια η παραγωγή επαναλαμβάνεται. Κάθε φορά που ο παλμός συναντά τη διαχωριστική επιφάνεια δύο ιστών με διαφορετικές τιμές ακουστικών εμπεδησεων (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

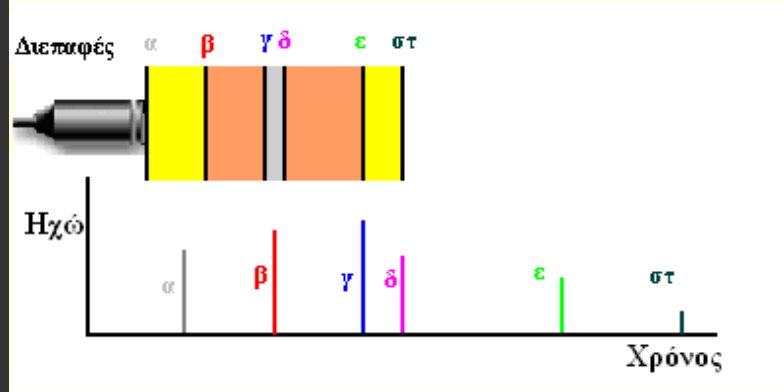
- Η ένταση του ανακλώμενου υπέρηχου-παλμού (ηχώ) εξαρτάται:
 - από τη διαφορά των τιμών των ακουστικών εμπεδήσεων που συναντά το ηχητικό κύμα σε μια διεπαφή:
Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά στην ακουστική εμπίεση των δύο ιστών τόσο μεγαλύτερο ποσοστό του ηχητικού παλμού θα ανακλαστεί και επομένως τόσο 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).



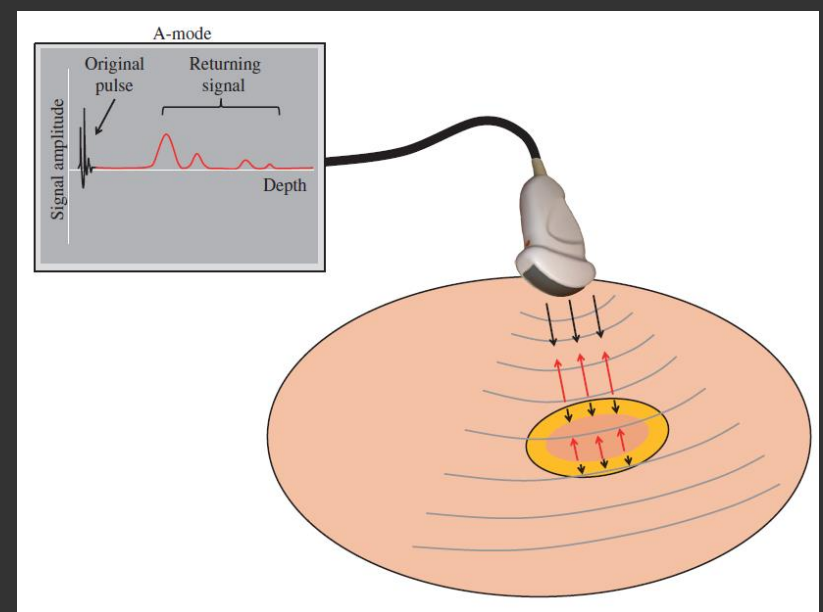


- α) Ανακλώμενοι υπέρηχοι από την ίδια διεπιφάνεια από διαφορετικά βάθη χωρίς ενίσχυση
- β) Ανακλώμενοι υπέρηχοι από την ίδια διεπιφάνεια από διαφορετικά βάθη με ενίσχυση



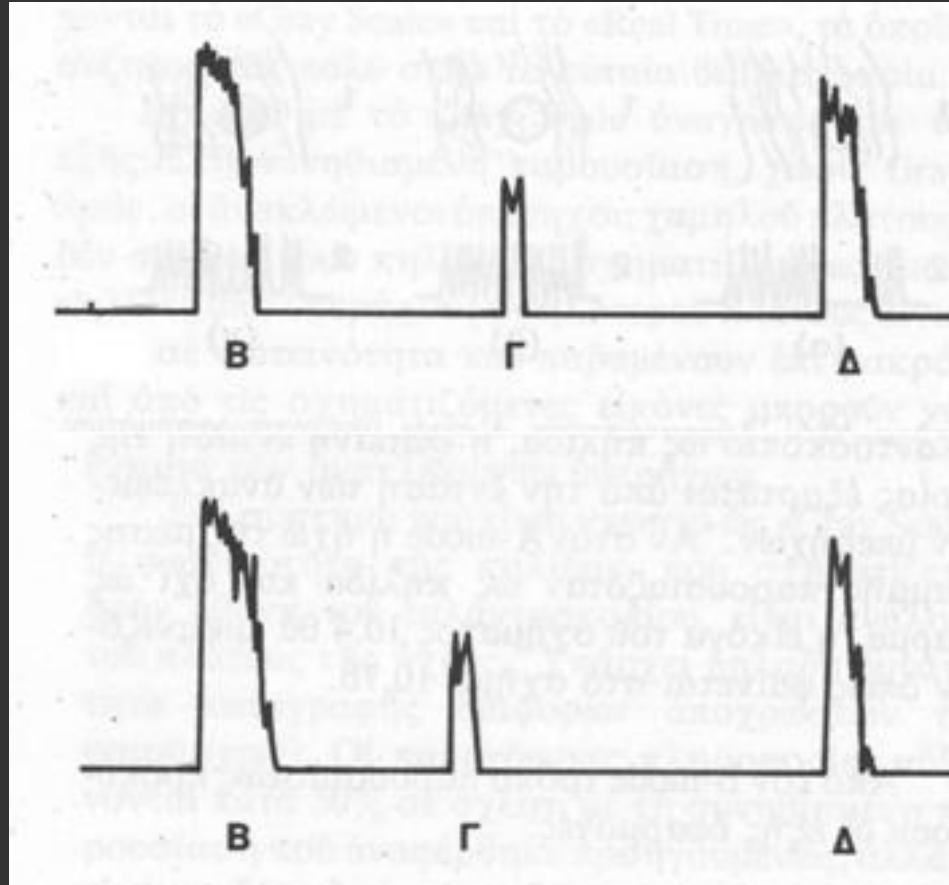
- Έστω λοιπόν μία δέσμη υπέρηχων η οποία συναντά διάφορες διεπαφές
- Οι διεπαφές αυτές θα δημιουργήσουν μια σειρά ανακλώμενων παλμών
- Θεωρώντας την ταχύτητα της υπερηχητικής δέσμης v_s σταθερή (1540 m/sec), από το χρόνο, t , που μεσολαβεί μεταξύ της εκπομπής του παλμού και της καταγραφής της ηχούς μπορεί 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.

A (amplitude) mode



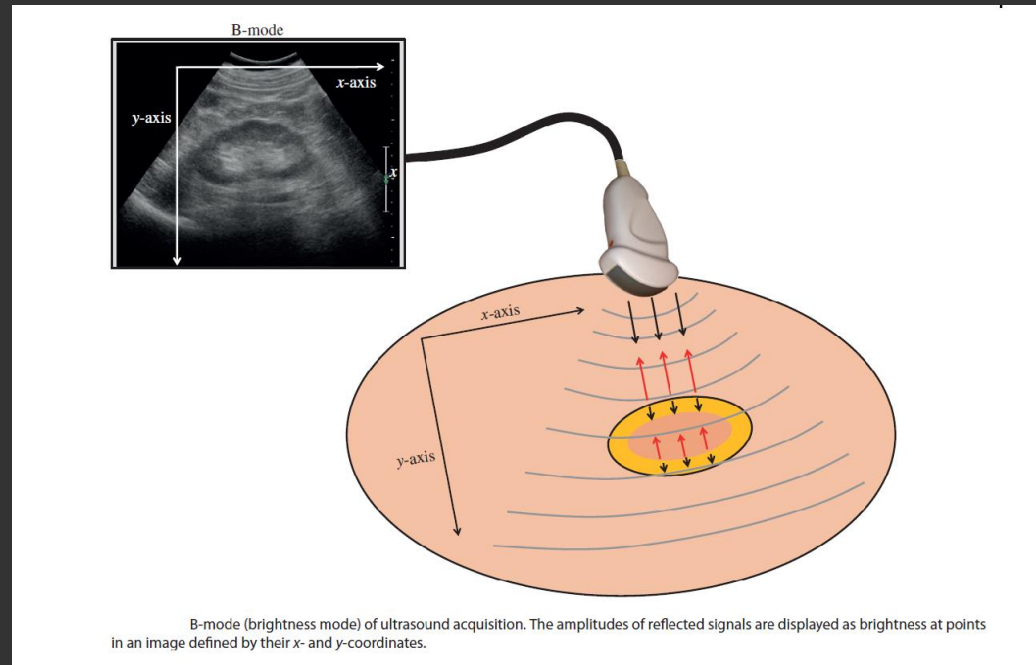
- Γραφική παράσταση της έντασης των ανακλώμενων παλμών, ως επάρματα σε ταλαντοσκόπιο, σε συνάρτηση με την απόσταση του ανιχνευτή από την επιφάνεια ανάκλασης, όταν ένας υπερηχητικός παλμός διαδίδεται σε μια ορισμένη διεύθυνση.
- Απεικονίζει τις θέσεις των επιφανειών όπου ανακλώνται οι υπέρηχοι, σε μια μόνο διεύθυνση και δεν παρέχει εικόνα των δομών του σώματος στο χώρο.
- Με τη μέθοδο αυτή παίρνουμε πληροφορίες για τη θέση που βρίσκονται αυτές οι ανακλαστικές επιφάνειες, κατά μήκος του άξονα διαδόσεως των υπερήχων, καθώς και για τη σχετική ανακλαστική τους ικανότητα.

A-mode: έλεγχος της μέσης ανακλαστικής επιφάνειας του εγκεφάλου



- α) Ηχώ της μέσης γραμμής του εγκεφάλου (Γ) (φυσιολογικά)
- β) Παρεκτόπιση της μέσης γραμμής του εγκεφάλου (η καμπύλη Γ δεν βρίσκεται κοντά στο μέσο της απόστασης BΔ)

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 δύο διαστάσεων ή 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



Νεότερα συστήματα παρουσίασης Real-time:

- Το σύστημα παρουσιάσεως realtime (σε πραγματικό χρόνο) δεν είναι τίποτα άλλο από σχηματισμό και παρουσίαση μιας τομής σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, έτσι ώστε με την συνεχή λήψη τέτοιων τομών να είναι δυνατό να παρακολουθηθεί η κίνηση της επιφάνειας.
- Η απαιτούμενη ταχύτητα σαρώσεως (ή ο χρόνος σχηματισμού μιας τομής) καθορίζεται από την ταχύτητα κινήσεως της επιφάνειας. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να μελετήσουμε την κίνηση της καρδιάς πρέπει να έχουμε τουλάχιστον 40 εικόνες ανά sec.
- Η ταχύτερη σάρωση γίνεται συνήθως με τη χρήση σειράς μεταλλακτών.

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

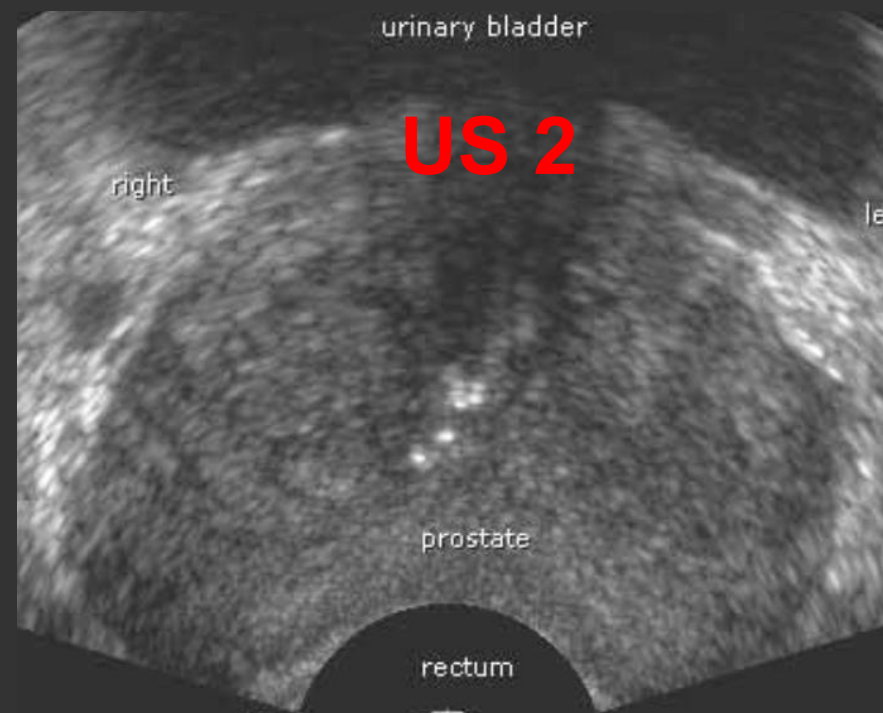
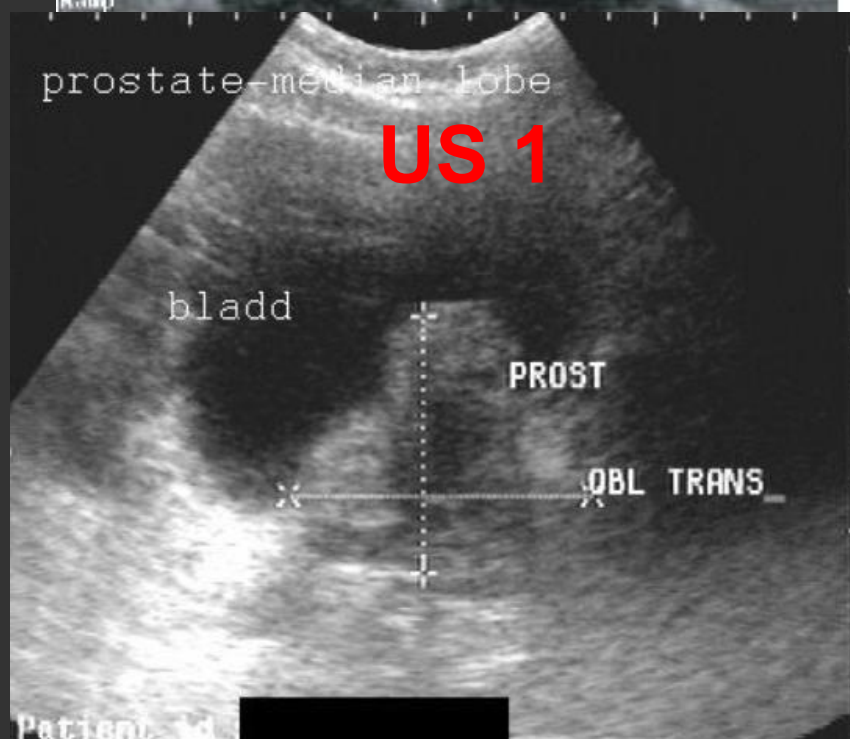
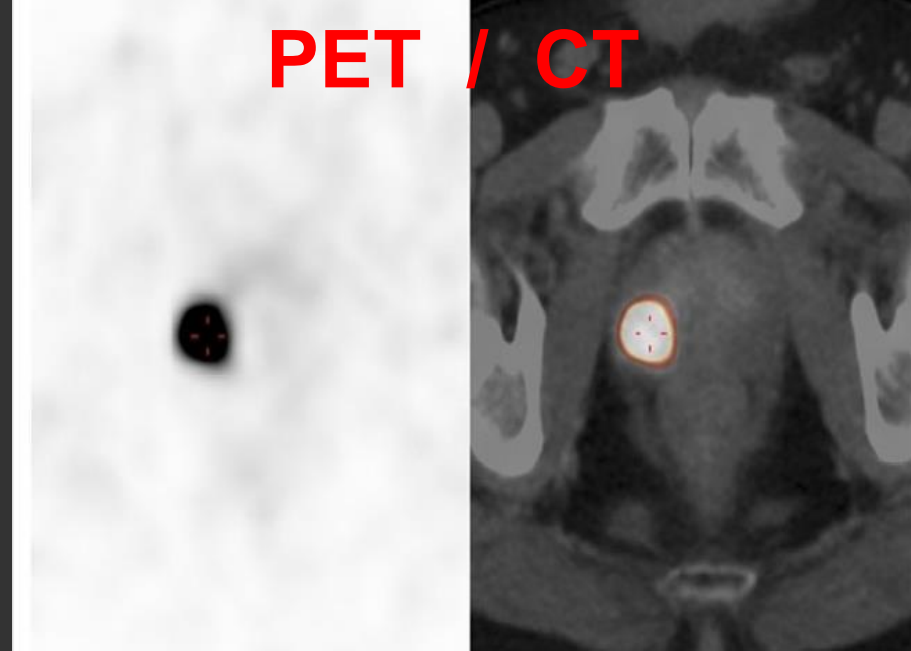
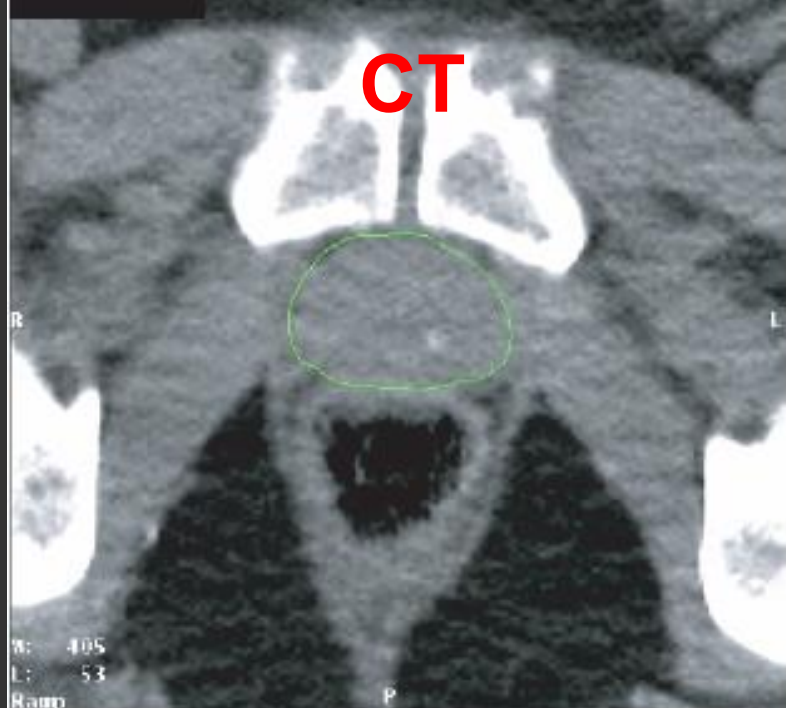
Διακριτική ικανότητα υπερηχοτομογραφημάτων

- Αξονική διακριτική ικανότητα (διακριτική ικανότητα κατά μήκος της δέσμης των υπερήχων):

Διαχωριστικές επιφάνειες που απέχουν μεταξύ τους λιγότερο από το $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος των υπερήχων ($\lambda/2$) που προσπίπτουν πάνω τους, δεν διακρίνονται.

- Πλευρική διακριτική ικανότητα (διακριτική ικανότητα κάθετα στη δέσμη των υπερήχων):

Εξαρτάται από το πλάτος της δέσμης των υπερήχων, η τιμή του οποίου εξαρτάται από τις διαστάσεις του κρυστάλλου, καθώς επίσης και από το μήκος κύματος και την απόσταση κρυστάλλου-ανακλαστικής επιφάνειας.

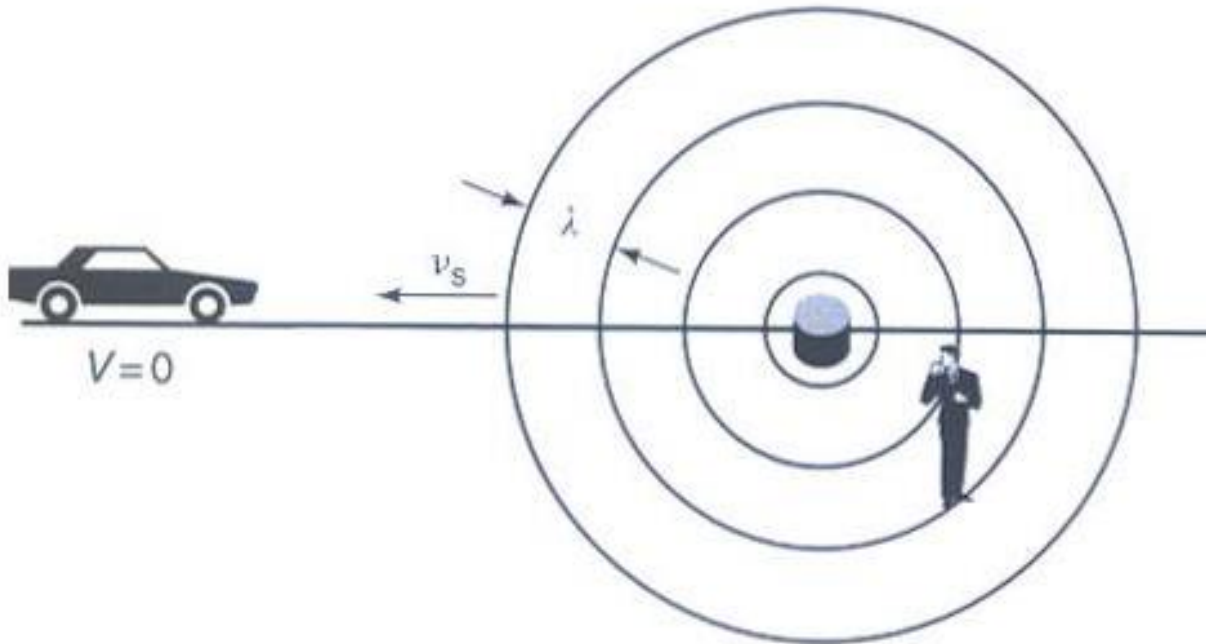






Φαινόμενο Doppler

- Όταν μια πηγή παραγωγής ήχου ή ο παρατηρητής κινείται, τότε ο δέκτης-παρατηρητής αντιλαμβάνεται τον ήχο με διαφορετική συχνότητα από αυτήν που παράγει η πηγή.
- Όταν η πηγή πλησιάζει το δέκτη, η συχνότητα αυξάνεται, ενώ όταν αυτή απομακρύνεται τότε η συχνότητα μειώνεται.

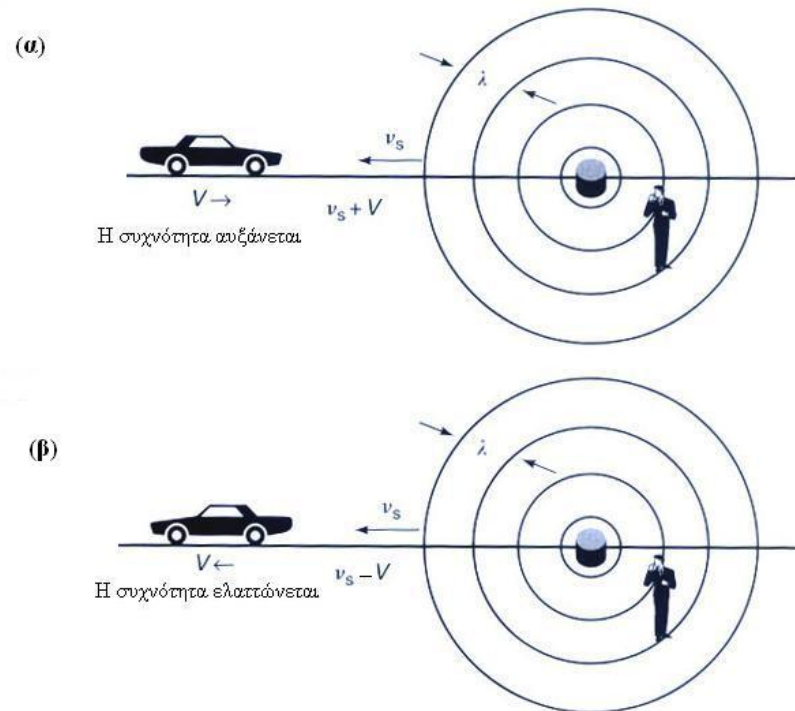


$$f_0 = \frac{v_s}{\lambda}$$

Κινούμενος παρατηρητής

- Ο παρατηρητής που βρίσκεται μέσα στο αυτοκίνητο (κινούμενος παρατηρητής) κινείται με ταχύτητα V και αντιλαμβάνεται τα ηχητικά κύματα με συχνότητα διαφορετική από f_0 , με την οποία εξακολουθεί να τα ακούει ο ακίνητος παρατηρητής.
- Αυτό συμβαίνει γιατί ο κινούμενος παρατηρητής κινείται προς τα κύματα, και άρα αντιλαμβάνεται ότι αυτά τον πλησιάζουν με ταχύτητα $v_s + V$.
- Αν το αυτοκίνητο απομακρύνεται από την πηγή, τότε αντιλαμβάνεται ότι αυτά τον πλησιάζουν με ταχύτητα $v_s - V$.

Και στις δύο περιπτώσεις το μήκος κύματος του ήχου σταθερό, δηλαδή οι κύκλοι που αντιπροσωπεύουν τις συμπίεσεις εξακολουθούν να έχουν την ίδια απόσταση μεταξύ τους (ίση με ένα μήκος κύματος), και αυτό που αλλάζει είναι η σχετική ταχύτητα του ήχου ως προς τον κινούμενο παρατηρητή.



- Η συχνότητα f' την οποία αντιλαμβάνεται ο κινούμενος παρατηρητής δίνεται από τη σχέση:

$$f' = \frac{v_s + V}{\lambda} = \frac{v_s}{\lambda} + \frac{V}{\lambda} = \frac{v_s}{\lambda} + \frac{v_s}{\lambda} \frac{V}{v_s} = \frac{v_s}{\lambda} \left(1 + \frac{V}{v_s} \right)$$

- Επομένως αφού:

$$f_0 = \frac{v_s}{\lambda}$$

$$f' = \begin{cases} f_0 + f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν πλησιάζει στην πηγή} \\ f_0 - f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν απομακρύνεται από την πηγή} \end{cases}$$

Μετατόπιση Doppler

$$\Delta f = f' - f_0 = \begin{cases} + f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν πλησιάζει στην πηγή} \\ - f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν απομακρύνεται από την πηγή} \end{cases}$$

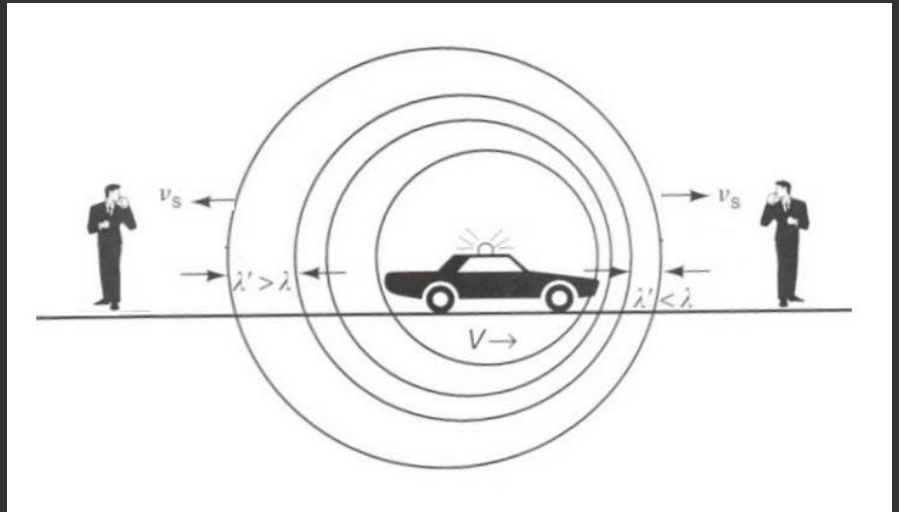
Μετατόπιση Doppler:

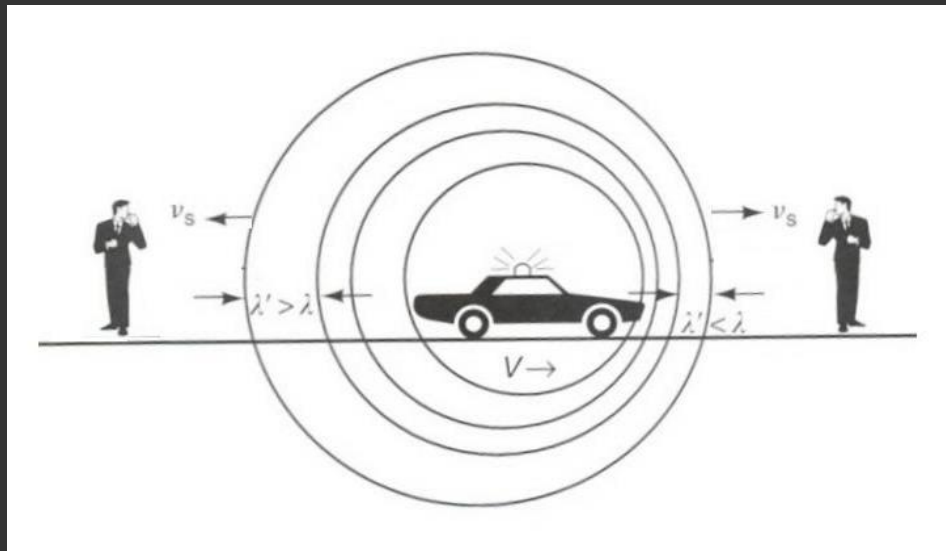
$$\Delta f = f' - f_0 = \begin{cases} + f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν πλησιάζει στην πηγή} \\ - f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν απομακρύνεται από την πηγή} \end{cases}$$

- Η μετατόπιση Doppler είναι ανάλογη της ταχύτητας του παρατηρητή V και εξαρτάται από την αρχική συχνότητα f_0 και την ταχύτητα του ήχου v_s .
- Η μετατόπιση Doppler έχει ως αποτέλεσμα ο ήχος να ακούγεται οξύτερος (με μεγαλύτερη συχνότητα) όταν ο παρατηρητής πλησιάζει την πηγή και βαρύτερος (με μικρότερη συχνότητα) όταν απομακρύνεται από αυτή.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του παρατηρητή, τόσο μεγαλύτερη είναι η μετατόπιση Doppler.

Κινούμενη πηγή

- Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση δύο παρατηρητών οι οποίοι δεν κινούνται αλλά κινείται η πηγή του ήχου με ταχύτητα V .
- Ο ήχος διαδίδεται και πάλι με ταχύτητα v_s αφού αυτή προσδιορίζεται από τις ιδιότητες του μέσου και δεν επηρεάζεται από την κίνηση της πηγής.
- Το μήκος κύματος δεν ισούται πλέον με v_s / f_0 .
- Τα κύματα συσσωρεύονται κατά την κατεύθυνση κίνησης της πηγής και διασκορπίζονται πίσω από αυτή, με αποτέλεσμα ο κάθε παρατηρητής να αντιλαμβάνεται μικρότερο (κατά την κατεύθυνση κίνησης) ή μεγαλύτερο (κατά την αντίθετη κατεύθυνση) μήκος κύματος λ' , ανάλογα με τη θέση του.





- Η απόσταση που διανύει, δεδομένου ότι κινείται με ταχύτητα V , σε χρόνο μιας περιόδου T θα ισούται με λ' .

Παρατηρητής που τον πλησιάζει η πηγή (μικρότερο μήκος κύματος):

$$\begin{aligned}\lambda' &= \lambda - VT = \lambda - V \frac{1}{f_0} = \lambda - V \frac{\lambda}{v_s} \\ &= \lambda \left(1 - \frac{V}{v_s}\right)\end{aligned}$$

Παρατηρητής από τον οποίο απομακρύνεται η πηγή (μεγαλύτερο μήκος κύματος):

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{V}{v_s}\right)$$

- Η αλλαγή στο μήκος κύματος λ' , έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει και η συχνότητα, f' , που ακούνε οι ακίνητοι παρατηρητές και η οποία στην περίπτωση του παρατηρητή που τον πλησιάζει η πηγή (μικρότερο μήκος κύματος) δίνεται από τη σχέση:

$$f' = \frac{v_s}{\lambda'} = \frac{v_s}{\lambda \left(1 - \frac{V}{v_s}\right)}$$
$$\cong \frac{v_s}{\lambda} \left(1 + \frac{V}{v_s}\right) = f_0 \left(1 + \frac{V}{v_s}\right) \quad \text{για } V \ll v_s$$

ενώ αντίστοιχα για τον παρατηρητή που βρίσκεται από την άλλη πλευρά:

$$f' = f_0 \left(1 - \frac{V}{v_s}\right) \quad \text{για } V \ll v_s$$

Η μετατόπιση Doppler ισούται, προσεγγιστικά στην περίπτωση που $V \ll v_s$:

$$\Delta f = f' - f_0 \cong \begin{cases} + f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν η πηγή πλησιάζει τον παρατηρητή} \\ - f_0 \frac{V}{v_s} & \text{όταν η πηγή απομακρύνεται από τον παρατηρητή} \end{cases}$$

Οι απλοποιημένες αυτές σχέσεις χρησιμοποιούνται και στις ιατρικές εφαρμογές του φαινομένου Doppler, στις οποίες η ταχύτητα ροής του αίματος V είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου, v_s .

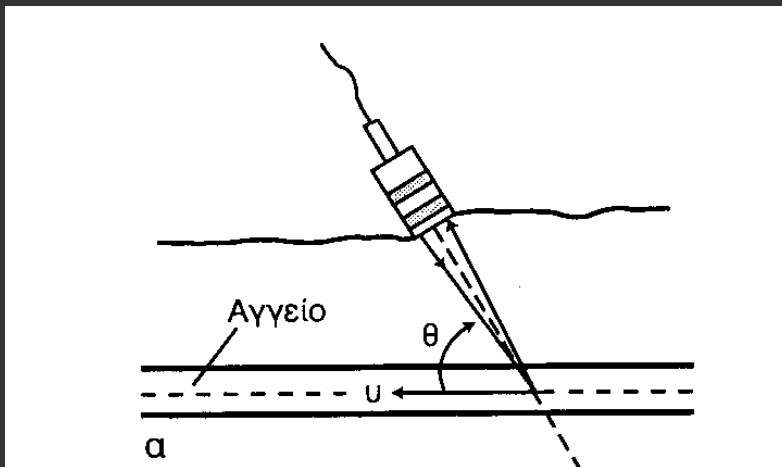
Εφαρμογές Doppler

- Στις εφαρμογές αυτές χρησιμοποιείται το φαινόμενο Doppler για την ανίχνευση, μελέτη και παρουσίαση κινουμένων επιφανειών.
- Πιθανές διαφορές στη συχνότητα του ανακλώμενου και του εκπεμπόμενου ηχητικού παλμού δίνουν πληροφορίες για την κίνηση της ανακλαστικής επιφάνειας.

- Οι κυριότεροι ανακλαστές της υπερηχητικής δέσμης στο αίμα είναι τα ερυθρά αιμοσφαίρια.
- Τα κινούμενα ερυθρά αιμοσφαίρια λειτουργούν σαν κινούμενοι παρατηρητές που, λόγω του φαινομένου Doppler, αντιλαμβάνονται μια συχνότητα f_1 , διαφορετική από την αρχική f_0 του εκπεμπόμενου ηχητικού κύματος.
- Από την άλλη μεριά, οι ανακλώμενοι υπέρηχοι, οι οποίοι έχουν συχνότητα f_1 καταγράφονται λόγω του φαινομένου Doppler με συχνότητα f_2 , η οποία είναι διαφορετική από την f_1 , αφού τα κινούμενα ερυθρά αιμοσφαίρια δρουν ως κινούμενη πηγή υπέρηχων.
- Το αποτέλεσμα των δύο αυτών αλλαγών στην αρχική συχνότητα f_0 , δίνει μια συνολική μεταβολή στη συχνότητα των ανακλάσεων που τελικά καταγράφονται στον ανιχνευτή ίση με :

$$\Delta f = f_2 - f_0 = 2f_0 \frac{V}{v_s}$$

- Η μετατόπιση Doppler αντιστοιχεί σε ηχητικό κύμα στην περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων (20 Hz έως 20 kHz) και επομένως μπορεί να καταγραφεί ως ακουστικό σήμα.
- Στην περίπτωση αυτή ο χρήστης δεν είναι δυνατόν να έχει ποσοτική πληροφορία, όσον αφορά την αιματική ροή, αλλά μπορεί να αποκτήσει ποιοτικές πληροφορίες και να εκτιμήσει αλλαγές στο ακουστικό σήμα από πιθανές αλλαγές στην αιματική ροή.



$$\Delta f = f_2 - f_0 = 2f_0 \frac{V}{v_s} \sigma \nu \theta$$

Μελέτη αιματικής ροής με την μέθοδο Doppler

- Στις εφαρμογές Doppler μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνεχείς υπέρηχοι ή και υπέρηχοι κατά παλμούς.
- Στα συστήματα συνεχών υπέρηχων χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί μετατροπείς ενέργειας, εκ των οποίων ο ένας δρα ως εκπομπός και ο έτερος ως δέκτης.
- Ο εκπομπός παράγει συνεχώς υπερηχητικά κύματα συχνότητας 2-15 MHz και ο δέκτης καταγράφει τη συχνότητα του κύματος το οποίο ανακλάται από την κινούμενη επιφάνεια, υπολογίζοντας τη μετατόπιση Doppler.
- Παρόλο που τα συστήματα συνεχών κυμάτων υπέρηχων δίνουν ακριβείς μετρήσεις της μετατόπισης Doppler και κατ' επέκταση της ταχύτητας ροής του αίματος, δεν παρέχουν καμιά αξονική διακριτική ικανότητα, δεν παρέχουν την πληροφορία του βάθους. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί στο χώρο η θέση των κινούμενων επιφανειών που έδωσαν τη συγκεκριμένη μετατόπιση Doppler και το σήμα μπορεί να προέρχεται από κινούμενες επιφάνειες σε διαφορετικά βάθη (π.χ. ερυθρά αιμοσφαίρια που κινούνται σε διαφορετικά αγγεία).

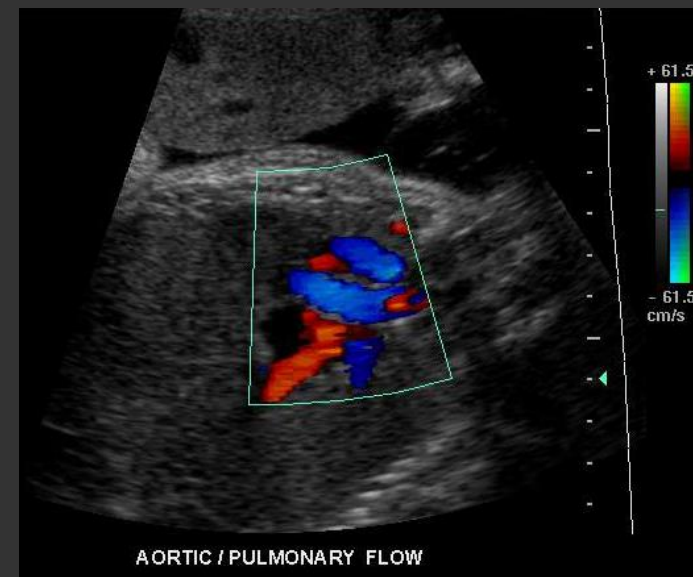
Συστήματα παλμικών υπέρηχων Doppler

- Τα συστήματα αυτά έχουν μόνο ένα μεταλλάκτη που δρα τόσο ως εκπομπός, όσο και ως ανιχνευτής και η μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι παρόμοια με την υπερηχοτομογραφία.
- Ο μεταλλάκτης παράγει παλμούς υπέρηχων μικρής διάρκειας.
- Μετά την παραγωγή του παλμού ο μεταλλάκτης δεν καταγράφει τα ανακλώμενα κύματα παρά μόνο όταν περάσει συγκεκριμένος χρόνος που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο βάθος (θεωρώντας όπως και στην υπερηχοτομογραφία την ταχύτητα του ήχου σταθερή), οπότε καταγράφει τη μετατόπιση Doppler που προέρχεται από το βάθος αυτό.
- Το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής παλμικών υπέρηχων Doppler είναι ο περιορισμός στη μέγιστη ταχύτητα αιματικής ροής (V_{max}) που μπορούν να επεξεργαστούν και ο περιορισμός στη μέγιστη απόσταση (R_{max}) από το μεταλλάκτη, για την οποία η θέση της κινούμενης επιφάνειας μπορεί να καθοριστεί με μεγάλη ακρίβεια.

Έγχρωμη απεικόνιση Doppler (Color Doppler)

- Στην τεχνική αυτή η ταχύτητα της αιματικής ροής μετريέται ταυτόχρονα με την απόσταση των περιοχών ανάκλασης.
- Η παρουσίαση γίνεται με τη χρήση χρωμάτων πάνω στην ασπρόμαυρη υπερηχοτομογραφική εικόνα.
- Οι ταχύτητες της ροής σε μία περιοχή προσδιορίζονται από το χρώμα της κάθε περιοχής αυτής στην εικόνα.

- φωτεινές αποχρώσεις του κόκκινου αντιπροσωπεύουν ροή μεγάλης ταχύτητας προς τον ανιχνευτή.
- σκούρες αποχρώσεις του κόκκινου αντιπροσωπεύουν ροή μικρής ταχύτητας προς τον ανιχνευτή.
- το μπλε χρώμα χρησιμοποιείται, συνήθως, για να προσδιορίσει την κίνηση της ροής σε κατεύθυνση αντίθετη από τον ανιχνευτή.
- το κίτρινο ή το πράσινο χρώμα χρησιμοποιούνται ως ένδειξη τυρβώδους ροής που δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και η οποία είναι αποτέλεσμα στένωσης.



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 βέβαιο ότι οι υπέρηχοι είναι μία σχετικά ασφαλής απεικονιστική μέθοδος και σίγουρα ασφαλέστερη από άλλες απεικονιστικές τεχνικές, όπως αυτές που στηρίζονται στις ακτίνες -Χ.

- 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 αποτελέσματα των πληθυσμιακών μελετών είναι σε γενικές γραμμές καθησυχαστικά.
- 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.

- Με βάση την υπάρχουσα γνώση, είναι κοινά αποδεκτό ότι χρήση των υπέρηχων στη διαγνωστική Ιατρική θεωρείται ασφαλής.
- 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.
- Επιπλέον για χρόνο έκθεσης σε υπερήχους από 1-500 sec, δεν έχουν παρατηρηθεί βιολογικά αποτελέσματα και για ακόμη μεγαλύτερες εντάσεις αρκεί το γινόμενο του χρόνου επί την ένταση να είναι μικρότερο από 50 J/cm^2 .

Συνοπτικά

- α) Βιολογικά αποτελέσματα όπως καταστροφή ερυθρών κυττάρων, αποσύνθεση DNA κλπ. παρατηρούνται σε υψηλές τιμές έντασης.
- β) Δεν αποδείχθηκε καμία σχέση με γενετικά αποτελέσματα ούτε με καρκινογένεση.

- Οι κύριοι μηχανισμοί δράσης των υπερήχων που μπορούν να προκαλέσουν βιολογικά αποτελέσματα είναι ο θερμικός μηχανισμός και η σπηλαιοποίηση:
- Κατά τον θερμικό μηχανισμό, η ενέργεια των υπερήχων που απορροφάται από τους ιστούς μετατρέπεται σε θερμότητα και εμφανίζεται σαν αύξηση της θερμοκρασίας.
 - Αν και η παροδική αύξηση της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια ενός παλμού είναι κλάσμα του ενός $^{\circ}\text{C}$, η τελική αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να φθάσει τους λίγους βαθμούς εξαιτίας του φαινομένου της συσσώρευσης.
 - Εάν τα διαστήματα ανάμεσα στους παλμούς είναι αρκετά μεγάλα ώστε να απαχθεί η θερμότητα, τότε η αύξηση της θερμοκρασίας είναι αμελητέα.

Σπηλαιοποίηση

- Η σπηλαιοποίηση είναι ένας μηχανισμός υπεύθυνος για τη μηχανική διάσπαση των κυττάρων και αναφέρεται στην παραγωγή φυσαλίδων στους ιστούς που εκτίθενται σε υπέρηχους και στην αύξηση του μεγέθους τους.
- Σε πολύ υψηλές εντάσεις δημιουργούνται ξαφνικά φυσαλίδες από μικρούς πυρήνες ως εξής: τα αραιώματα λόγω της ύπαρξης ενός ηχητικού κύματος μεγάλης έντασης, μπορούν να προκαλέσουν πιέσεις τόσο χαμηλές ώστε να σχηματιστούν φυσαλίδες υδρατμών ακόμη και στη θερμοκρασία του σώματος, οι οποίες στη συνέχεια διαλύονται.
- Οι φυσαλίδες που διαλύονται λειτουργούν ως μικρές εκρήξεις που μπορούν να διασπάσουν τις κυτταρικές μεμβράνες και τις εσωτερικές δομές του κυττάρου δημιουργώντας ένα ισχυρό κύμα πίεσεως και αναπτύσσοντας τοπικά υψηλές θερμοκρασίες που μπορεί να βλάψουν τους ιστούς.
- Επίσης είναι δυνατόν να δημιουργηθούν ελεύθερες ρίζες που είναι ιδιαίτερα δραστικές βιολογικά (παροδική σπηλαιοποίηση).

Βιολογικές επιδράσεις υπερήχων

- Είναι κοινά αποδεκτό ότι η χρήση των υπερήχων 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 υπερήχους, όπως και στις ακτίνες -Χ, ο κανόνας ότι πρέπει να χρησιμοποιείται η χαμηλότερη δυνατή ακουστική έκθεση για να πάρουμε τις απαραίτητες διαγνωστικές πληροφορίες.

Ερωτήσεις κατανόησης

1. Αν στο νερό το μήκος κύματος υπερηχητικού κύματος με συχνότητα 100 kHz είναι 1.5 cm, ποιο είναι το μήκος κύματος (σε mm) υπερηχητικού κύματος συχνότητας 15 MHz;
2. Από τι εξαρτάται η ταχύτητα διάδοσης ηχητικού κύματος και σε ποιο υλικό από τα: οστά, μύες, αέρα, είναι μεγαλύτερη και σε ποιο μικρότερη και γιατί;
3. Γιατί κατά τη γνώμη σας οι υπέρηχοι που χρησιμοποιούνται στη διάγνωση έχουν συχνότητες 1-50 MHz;
4. Ποιά είναι η βασική αρχή στην οποία στηρίζονται οι διαγνωστικές εφαρμογές των υπερήχων στην Ιατρική; Με ποιο τρόπο κατά τη γνώμη σας διαχωρίζεται κατά την απεικόνιση με υπερήχους μια κύστη γεμάτη υγρό από έναν όγκο που αποτελείται από σκληρούς ιστούς πολλών πυκνοτήτων;
5. Με βάση ποια κριτήρια γίνεται η επιλογή της συχνότητας σε μία απεικόνιση με δέσμη υπερήχων και γιατί;
6. Ορίστε το φαινόμενο της σκέδασης δέσμης υπερήχων και εξηγήστε πως επηρεάζεται από τη συχνότητα της δέσμης. Ποιά συχνότητα υπερήχων θα χρησιμοποιούσατε για να απεικονίσετε επιφανειακή δομή με την καλύτερη δυνατή διακριτική ικανότητα και γιατί; Έχετε να επιλέξετε μεταξύ 2 MHz και 10 MHz;
7. Ορίστε το φαινόμενο της εξασθένησης δέσμης υπερήχων και εξηγήστε και εξηγήστε πως επηρεάζεται από τη συχνότητα της δέσμης. Ποιά συχνότητα υπερήχων θα χρησιμοποιούσατε για να απεικονίσετε δομή σε βάθος 10 cm και γιατί; Έχετε να επιλέξετε μεταξύ 3 MHz και 15 MHz;
8. Γιατί κατά τη διάγνωση με υπερήχους οι ανακλώμενοι ήχοι “ενισχύονται” πριν καταγραφούν από το μεταλλάκτη;
9. Γιατί κατά την απεικόνιση με υπέρηχους χρησιμοποιείται κυρίως δέσμη εκπομπής κατά παλμούς (και όχι για παράδειγμα δέσμη που εκπέμπει συνεχείς υπέρηχους).
10. Εξηγήστε συνοπτικά πως λειτουργεί ο B-mode
11. Εξηγήστε συνοπτικά πως χρησιμοποιείται το φαινόμενο Doppler στη διάγνωση με υπέρηχους