

1

Εισαγωγή στις αρχές της ηχωκαρδιογραφίας

Jose A. Madrazo και Suzanne V. Arnold

ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

- Το Doppler παλμικού κύματος είναι ειδικό ως προς το εναλλασσόμενο ΕΥΡΟΣ, αλλά περιορίζεται ως προς τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να μετρήσει.
- Το Doppler συνεχούς κύματος μπορεί να μετρήσει ΥΨΗΛΕΣ ταχύτητες, αλλά δεν μπορεί να εντοπίσει την προέλευση κατά μήκος της δέσμης του.
- Η M-mode ηχωκαρδιογραφία έχει υψηλή ΧΡΟΝΙΚΗ διακριτικότητα, αλλά περιορίζεται από την πλάγια απεικόνιση των δομών ενδιαφέροντος.

ΤΥΠΟΙ-ΚΛΕΙΔΙΑ

- *Τροποποιημένη εξίσωση Bernoulli:* $\Delta P(\text{mmHg}) = 4 \times V^2 (V=\text{m/sec})$
- Εμβαδόν LVOT = $\pi \times (\text{διάμετρος LVOT σε cm}/2)^2$
- Όγκος παλμού = (εμβαδόν LVOT) \times (TVI LVOT)
- QP/QS = (εμβαδόν RVOT) \times (TVI RVOT)/(εμβαδόν LVOT) \times (TVI LVOT)
- Η αρχή της συνέχειας για την επιφάνεια της αορτικής βαλβίδας = (εμβαδόν LVOT) \times (TVI LVOT)/(TVI AoV)
- Η ηχωκαρδιογραφία χρησιμοποιεί ηχητικά κύματα για να δημιουργεί εικόνες της καρδιάς και των άλλων δομών.
 - Τα ηχητικά κύματα είναι μηχανικές δονήσεις περιγραφόμενες σε περιόδους συχνότητας ή Hertz (Hz) = ο αριθμός των κύκλων ανά δευτερόλεπτο.
 - Η συχνότητα χρησιμοποιείται από τον ηχομετατροπέα υπερήχων επηρεάζοντας τη διακριτικότητα των εικόνων και την ιστική διείσδυση.
 - Υψηλή συχνότητα = υψηλή διακριτικότητα εικόνας, χαμηλή ιστική διείσδυση.
 - Χαμηλή συχνότητα = χαμηλή διακριτικότητα εικόνας, υψηλή ιστική διείσδυση.
 - Οι υπέρηχοι αφορούν ηχητικά κύματα συχνότητας 20 kHz ή μεγαλύτερης.
 - Η ηχωκαρδιογραφία ενηλίκων τυπικά χρησιμοποιεί συχνότητες μεταξύ 2 και 7 MHz.
- Η διαθραρακική ηχωκαρδιογραφία χρησιμοποιεί χαμηλής συχνότητας ηχομετατροπείς (2-4 MHz), οι οποίοι επιτρέπουν βαθύτερη διείσδυση μέσω του θωρακικού τοιχώματος, αλλά με κόστος τη μειωμένη διακριτικότητα.

- **Σημείο-Κλειδί:** Μερικές φορές είναι χρήσιμο να ελαττώνεται η συχνότητα του ηχομετατροπέα σε παχύσαρκους ασθενείς, με σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας.

- Η διοισοφάγεια ηχωκαρδιογραφία δεν απαιτεί βαθιά ιστική διείσδυση και μπορεί να χρησιμοποιεί υψηλότερης συχνότητας ηχομετατροπείς (3,5-7 MHz) για να παράγει υψηλότερης διακριτικότητας εικόνες.
- Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι κρύσταλλοι που μετατρέπουν την ηλεκτρική

ενέργεια σε μηχανικά ηχητικά κύματα και αντιστρόφως. Αυτοί οι κρύσταλλοι είναι ενσωματωμένοι στον ηχομετατροπέα και οι ιδιότητες, ο αριθμός και η κινητικότητά τους καθορίζουν τα χαρακτηριστικά των καταγραφώμενων εικόνων.

- **Απεικόνιση μέσω αρμονικών:** Οι ιστοί και οι φυσαλίδες αντίθεσης όχι μόνο ανακλούν τους υπέρχοντες στη μεταδιδόμενη συχνότητα, αλλά επίσης αντηχούν σε πολλαπλάσιες αυτής συχνότητες (αρμονικές συχνότητες). Η απεικόνιση μέσω αρμονικών αναφέρεται στον ηχομετατροπέα που λαμβάνει συχνότητες πολλαπλάσιες της εκπεμπόμενης συχνότητας (π.χ. μετάδοση στα 3 MHz και λήψη στα 6 MHz, η δεύτερη αρμονική). Η απεικόνιση μέσω αρμονικών βελτιώνει την αναλογία σήματος/θορύβου και το περίγραμμα των ορίων του ενδοκαρδίου.
- **Μηχανικός δείκτης (MI):** Μία μέτρηση της μηχανικής πιέσεως που εφαρμόζεται στους ιστούς από το υπερηχητικά κύματα. Είναι σημαντική η μείωση του MI κατά τη διάρκεια της ηχωκαρδιογραφίας αντίθεσης, έτσι ώστε να μη διασπώνται γρήγορα οι φυσαλίδες αντίθεσης.
- **Ρυθμός εικόνων (Frame rate):** Ο αριθμός των ακίνητων εικόνων που εμφανίζονται διαδοχικά ανά μονάδα χρόνου. Πολλαπλές ακίνητες εικόνες που εμφανίζονται διαδοχικά οδηγούν στην κατανόηση της κίνησης, έτσι ώστε υψηλότερος ρυθμός εικόνων να οδηγεί σε καλύτερη χρονική διακριτικότητα. Αυτό όμως μπορεί να θυσάξει την ποιότητα της εικόνας και αντιστρόφως.

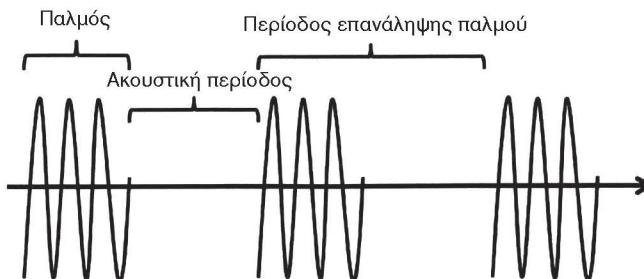
- **Σημείο-Κλειδί:** Ρηχότερη απεικόνιση και στενότερος τομέας απεικόνισης μπορεί να ρυθμίζεται εύκολα ώστε να επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς εικόνων και καλύτερη χρονική διακριτικότητα.

- **Περίοδος επανάληψης παλμού:** Ένας παλμός υπέρχον μιας δοθείσας συχνότητας στέλνεται από τον ηχομετατροπέα ακολουθούμενος από μια προεπιλεγμένη «ακουστική περίοδο» πριν ο ηχομετατροπέας αισθανθεί κύματα από την ίδια συχνότητα και παράγει μια εικόνα. Η διάρκεια του παλμού και ο χρόνος που δαπανάται για την «ακουστική περίοδο» αναφέρεται ως περίοδος επανάληψης παλμού. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η περίοδος, τόσο μεγαλύτερους βάθους είναι οι ανακτώμενες εικόνες (Εικ. 1-1).

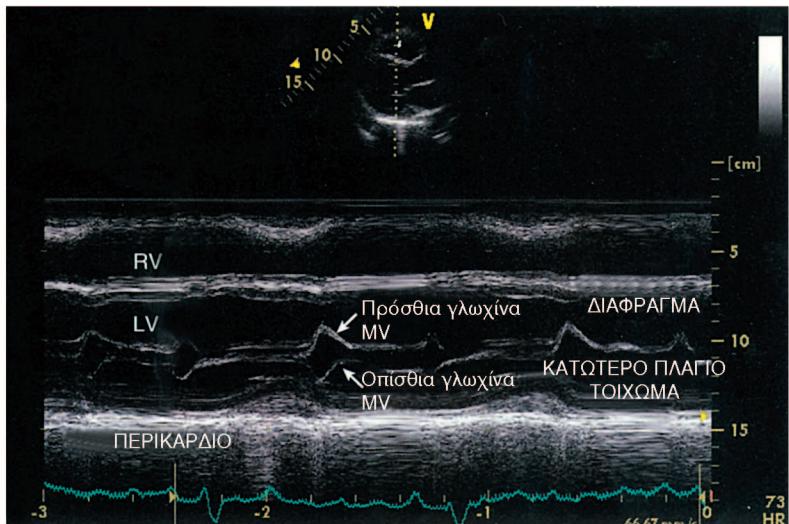
Βασικοί τρόποι απεικόνισης:

• M-mode ηχωκαρδιογραφία:

- Η M-mode ηχωκαρδιογραφία απεικονίζει τις δομές κατά την κατεύθυνση μιας μονής γραμμής της υπερηχογραφικής δέσμης. Η ακίνητη εικόνα αυτών των δομών διαρκώς ανανεώνεται στη διάρκεια του χρόνου στον άξονα των «χ». Έτσι, οι δομές κατά μήκος της γραμμής της υπερηχογραφικής δέσμης απεικονίζονται καθώς μεταβάλλονται με το χρόνο (Εικ. 1-2).



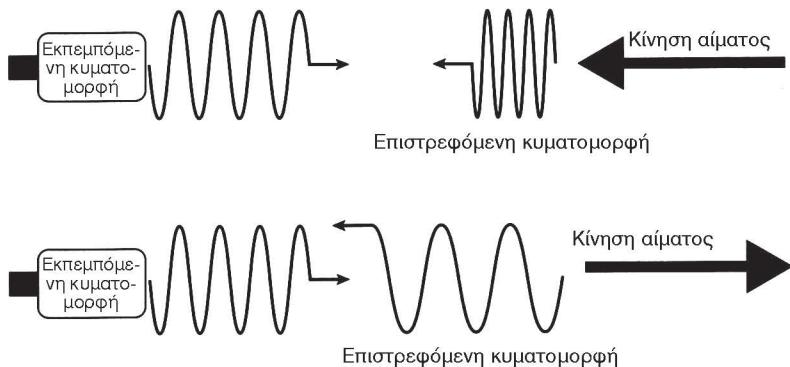
Εικόνα 1-1. Περιγραφή των υπερηχητικών κυμάτων με τη χρήση προτυποποιημένης ονοματολογίας.



Εικόνα 1-2. Η M-mode ηχωκαρδιογραφία παρέχει μια εικόνα «κορυφής παγώβουνου» των μεταβολών στις καρδιακές δομές που φαίνονται στην παραστερινική τομή κατά τον επιμήκη άξονα κατά τη διάρκεια του χρόνου. RV: δεξιά κοιλία, LV: αριστερή κοιλία, MV: μιτροειδής βαλβίδα.

- **Σημείο-Κλειδί:** Μπορεί να είναι χρήσιμο να φανταστούμε τον M-mode ηχομετατροπέα ουσιαστικά σαν έναν παγοθράντη με τις δομές κατά μήκος της πορείας του να απεικονίζονται στην οθόνη και να ανανεώνονται οριζόντιως στη διάρκεια του χρόνου.
- Εξαιτίας της υψηλής δειγματοληπτικής συχνότητας (πάνω από 1000 παλμούς το δευτερόλεπτο), η M-mode ηχωκαρδιογραφία έχει εξαιρετική αξονική διακριτική ικανότητα και είναι χρήσιμη στην αναγνώριση της σχετικής τοποθεσίας των δομών και τη μέτρηση τους εύρους της κίνησης.
- **Η M-mode ηχωκαρδιογραφία έχει επίσης καλύτερη χρονική διακριτικότητα από τη δύο διαστάσεων (2D) απεικόνιση και έτοις λεπτές ανωμαλίες στην κίνηση και στο συγχρονισμό μπορεί να είναι καλύτερα αναγνωρίσιμες με την M-mode ηχωκαρδιογραφία. Για παράδειγμα η συστολική πρόσθια κίνηση της μιτροειδούς βαλβίδας στην υπερτροφική μυοκαρδιοπάθεια και στη δεξιά κοιλιακή διαστολική κάμψη στον καρδιακό επιπομπατισμό μπορεί να είναι καλύτερα αναγνωρίσιμη με την M-mode ηχωκαρδιογραφία.**
- **Δύο διαστάσεων ηχωκαρδιογραφία:**
 - Οι καρδιακές δομές σε επίπεδη επιφάνεια καθοριζόμενη από τη θέση του ηχομετατροπέα απεικονίζονται σε δύο διαστάσεις στην οθόνη, και η εικόνα ανανεώνεται συνεχώς (βλέπε ρυθμό εικόνων παραπάνω), και έτοις πάραγεται μια «κίνηση».
 - Στην ηχωκαρδιογραφία των ενηλίκων, οι δομές που βρίσκονται πλησιέστερα στον ηχομετατροπέα εμφανίζονται στην κορυφή της οθόνης και η πλευρά του υπερχοργαφικού επιπέδου που αντιστοιχεί στη θέση του ηχομετατροπέα βρίσκεται στη δεξιά πλευρά της οθόνης.

- **Σημείο-Κλειδί:** Μπορεί να είναι αρχικά χρήσιμο να φανταστούμε τον ηχομετατροπέα στην ουσία σαν μια λεπίδα με το επίπεδό της στον ίδιο προσανατολισμό με τη θέση του ηχομετατροπέα. Η θέση, η περιστροφή και η κλίση αυτής της «λεπίδας» μπορεί να οριοθετήσουν το σημείο τομής της καρδιάς και τελικά την ανακτώμενη εικόνα.

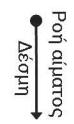


Εικόνα 1-3. Διάγραμμα, που απεικονίζει πώς η κατεύθυνση και η ταχύτητα της κίνησης ενός αντικειμένου μεταβάλλει τη συχνότητα του ανακλώμενου ηχητικού κύματος (μεταβολή Doppler).

- Η απεικόνιση της καρδιάς σε πολλαπλά επίπεδα δύο διαστάσεων (2D) επιτρέπει την ανασύνθεση και την οπτική απεικόνιση όλων των τμημάτων μιας τριών διαστάσεων (3D) δομής.
- **Τριών διαστάσεων ηχωκαρδιογραφία:**
- Πολλαπλά 2D επίπεδα μπορούν να συνδυαστούν με σκοπό την ανασύνθεση μιας 3D δομής. Σύγχρονοι 3D υπερηχογραφικοί ηχομετατροπείς την ολοκληρώνουν με την απεικόνιση κατέ μήκος μιας πυραμοειδούς υπερηχογραφικής δέσμης (αντί για ένα μαχαίρι, η δέσμη είναι ένας ανεστραμμένος κώνος με την κορυφή προς το μέρος του ηχομετατροπέα).

Άρχες υπερηχογραφήματος Doppler και εφαρμογές:

- **Φαινόμενο Doppler:**
- Προτάθηκε το 1842 από τον Αυστριακό φυσικό Christian Doppler ότι είναι μια μεταβολή στη συχνότητα ενός κύματος που λαμβάνεται από έναν παρατηρητή (ανακλώμενη συχνότητα) σε σχέση με την πηγή του κύματος (συχνότητα εκπομπής).
- Όταν ο ήχος που εκπέμπεται από την πηγή με μια συγκεκριμένη συχνότητα ανακλάται από μια στατική πηγή, το κύμα επιστρέφει με την ίδια συχνότητα με την οποία εκπέμφθηκε.
- Εντούτοις, όταν ο ήχος ανακλάται από μια κινούμενη πηγή, η συχνότητα με την οποία λαμβάνεται μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα της πηγής.
- Αν το αντικείμενο κινείται προς τον ηχομετατροπέα, η επακόλουθη συχνότητα είναι υψηλότερη από την αρχική και υπάρχει «θετική μεταβολή του Doppler».
- Αν το αντικείμενο κινείται μακριά από τον ηχομετατροπέα, η επακόλουθη συχνότητα είναι χαμηλότερη από την αρχική και υπάρχει «αρνητική μεταβολή του Doppler».
- Η γωνία υπό την οποία το αντικείμενο μετακινείται ως προς τον παρατηρητή επηρεάζει το μέγεθος της μεταβολής του Doppler - αυτό γιατί η μετρούμενη ταχύτητα του αίματος είναι ανάλογη της αληθούς ταχύτητας του αίματος και της γωνίας υπό την οποία αυτή μετράται.
- Από μαθηματικής πλευράς, η μεταβολή του Doppler είναι ανάλογη του συνημίτονού της γωνίας μεταξύ του εκπειπόμενου ήχου και του κινούμενου αντικειμένου: $\text{ταχύτητα}_{\text{μετρούμενη}} = \text{συνημίτονο της γωνίας} (\Theta) \times \text{ταχύτητα}_{\text{αληθής}}$ (Εικ. 1-4).

				
Γωνία (Θ)	0	30	45	60
Συνημίτονο της Θ	1	0.87	0.7	0.5
Μετρούμενη ταχύτητα	5 m/s	4.35 m/s	3.5 m/s	2.5 m/s
				0 m/s

Εικόνα 1-4. Το αποτέλεσμα της γωνίας έκθεσης σε υπερηχητικά κύματα στη μέτρηση ενός πίδακα με αληθή ταχύτητα 5 m/s με την Doppler ηχωκαρδογραφία.

- Σημείο-Κλειδί:** Για να μην υποεκτιμήσουμε την ταχύτητα ενός πίδακα, είναι σημαντικό η υπερηχογραφική δέσμη να είναι όσο το δυνατόν παράλληλη ως προς την κατεύθυνση της ροής των αίματος (π.χ. το συνημίτονο των 0 μοιρών είναι 1, γεγονός που σημαίνει ότι η μετρούμενη ταχύτητα είναι ίση με την αληθή ταχύτητα). Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση πολλαπλών εικόνων από μη-απεικονιστικούς ηχομετατροπείς (π.χ. Pedoff) και με καθοδήγηση από έχγρωμο Doppler.

• Doppler παλμικού κύματος

- Στο Doppler παλμικού κύματος (PW), ο ηχομετατροπέας στέλνει υπερηχογραφικούς παλμούς με συγκεκριμένη συχνότητα και εξετάζει τη μεταβολή του Doppler σε μια ειδική περιοχή που καθορίζεται από μια 2D εικόνα (δείγμα όγκου).
- Η συχνότητα επανάληψης παλμού (PRF) αναφέρεται στον αριθμό των παλμών σε ένα δευτερόλεπτο, και επιπλέον είναι αντιστρόφως ανάλογη της περιόδου επανάληψης παλμού. Μια χαμηλή PRF χρησιμοποιείται για να απεικονίσει βαθύτερες δομές.
- Η PRF καθορίζει το βάθος στο οποίο η μεταβολή του Doppler μπορεί να υπολογιστεί.
 - Χαμηλότερη PRF επιτρέπει μεγαλύτερο «ακουστικό χρόνο» ανάμεσα στους παλμούς και επιπλέον εξετάζει σε ένα βαθύτερο επίπεδο και αντίστροφα.
- Όριο Nyquist:** Πήρε το όνομά του από τον Σουηδο-Αμερικανό μηχανικό Harry Nyquist, ο οποίος ανακάλυψε ότι ο αριθμός των παλμών στη μονάδα του χρόνου περιορίζεται στο διπλάσιο της κλίμακας του πλάτους του καναλιού. Με πρακτικούς όρους, το όριο Nyquist = 1,5 PRF.
 - Αν η ταχύτητα της ροής των αίματος ξεπεράσει το όριο Nyquist, η κατεύθυνση και η ταχύτητα εμφανίζονται ανακριβείς και παρουσιάζεται μεταβολή κατεύθυνσης, φαινόμενο που καλείται **αναστροφή του φάσματος ταχυτήτων** (aliasing).
- Το PW Doppler περιορίζεται από τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να μετρηθεί, καθώς ο επόμενος παλμός δεν μπορεί να σταλεί πριν επιστρέψει το σήμα. Η υψηλότερη ταχύτητα που μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια είναι το όριο Nyquist. Ταχύτητες μεγαλύτερες από το όριο Nyquist εμφανίζονται από την αντίθετη πλευρά της κλίμακας ως aliasing (Εικ. 1-5).

- Σημείο-Κλειδί:** Το PW Doppler υπολογίζει την ταχύτητα ροής σε μια συγκεκριμένη περιοχή (δείγμα όγκου), αλλά περιορίζεται στη μέτρηση μόνο χαμηλότερων ταχυτήτων εξαιτίας του aliasing.