



ΜΑΡΙΑ ΛΥΡΑ ΓΕΩΡΓΟΣΟΠΟΥΛΟΥ
ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΦΥΣΙΚΟΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ
Α' ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΚΤΙΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΕΓΧΡΩΜΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ DOPPLER

Μαρία Λύρα Γεωργοσοπούλου
Αν. Καθηγήτρια Παν/μίου Αθηνών

Εισαγωγή

Η διαγνωστική εφαρμογή των υπερήχων στηρίζεται στην απεικόνιση, των μορφολογικών αλλαγών των οργάνων στο εσωτερικό του σώματος, με τη χρήση δυσδιάστατης εικόνας πραγματικού χρόνου (real-time).

Αν και η απεικόνιση πραγματικού χρόνου δίνει πολλές πληροφορίες γύρω από τη μορφολογία, προσφέρει λίγες ή καθόλου πληροφορίες για τη ροή αίματος, τις αγγειακές ανωμαλίες ή τη δυναμική της ροής.

Με τους υπερήχους Doppler, μπορεί να εκτιμηθεί η αιματική ροή και είναι δυνατός ο άμεσος προσδιορισμός της παρουσίας και της δ/σης της ροής. Επιπλέον, δίδονται πληροφορίες για την ταχύτητα ροής και την αιμάτωση ενός οργάνου.

Η πληροφορία που σχετίζεται με τον εφοδιασμό οργάνου σε αίμα και την αιμάτωση του οργάνου και δίδεται με τη βοήθεια των συστημάτων Υπερήχων, είναι πλέον απαραίτητη, για την αξιολόγηση οργάνων ή ανατομικών περιοχών στο υπερηχογράφημα και μεγαλώνει το ρόλο και το εύρος εφαρμογής των Υπερήχων.

Αιματική ροή

Το κυκλοφορικό σύστημα είναι υπερβολικά σύνθετο και σε σύσταση και σε λειτουργία και η ροή του αίματος επηρεάζεται από πολυάριθμους παράγοντες όπως η καρδιακή λειτουργία, η ελαστικότητα των τοιχωμάτων του αγγείου, η τάση των μυών με ελαφρά αγγείωση και τα διάφορα σχέδια, διαστάσεις και συνδέσεις χιλιάδων διακλαδούμενων αγγείων.

Η θεώρηση αυτών των παραμέτρων που επηρεάζουν την αιματική ροή είναι χρήσιμη για την κατανόηση της φυσιολογίας της κυκλοφορίας του αίματος και των ανωμαλιών που δημιουργούνται με την παρουσία αγγειακής απόφραξης.

Αν και οι υπέρηχοι Doppler μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη διαφόρων τύπων κίνησης στο σώμα η κυρίαρχη χρήση τους παραμένει η ανίχνευση και ο ποσοτικός προσδιορισμός της ροής στην καρδιά, αρτηρίες και φλέβες. Τα σήματα Doppler από αυτές τις “πηγές” περιέχουν πλήθος πληροφορίες για τη ροή.

Αλλά, η αιματική ροή στις αρτηρίες είναι σύνθετη. Η ροή είναι παλμική, το αίμα είναι ανομοιογενές, μη Νευτώνειο υγρό και οι αρτηρίες διχάζονται, καμπυλώνουν και διακλαδίζονται. Η αιματική ροή και η κατανομή της ταχύτητας του αίματος δίδουν στο σήμα Doppler τα χαρακτηριστικά τους στοιχεία. Η ροή και η πίεση, όμως, είναι άρρηκτα δεμένες και επομένως η πίεση δεν μπορεί ν’ αγνοηθεί. Πράγματι, η ανίχνευση ή η μέτρηση της ταχύτητας του αίματος επιτρέπει την εξαγωγή πληροφοριών σχετικών με την πίεση.

Στρωματική ροή

Στα περισσότερα αγγεία, το αίμα κινείται σε ισοκεντρικά στρώματα. Κάθε στρώμα ρέει με διαφορετική ταχύτητα. Ένα μικρό στρώμα κοντά στο τοίχωμα έχει ταχύτητα μηδέν λόγω των δυνάμεων συνάφειας αίματος και εσωτερικού τοιχώματος του αγγείου. Το στρώμα στο μέσον ρέει με τη μέγιστη ταχύτητα και η μέση ταχύτητα στο αγγείο είναι το ήμισυ της μέγιστης.

Απόκλιση από τη στρωματική ροή μπορεί να οφείλεται σε φυσιολογικούς παράγοντες ή σε παθολογικές καταστάσεις π.χ. η ταχύτητα ροής αλλάζει στον καρδιακό κύκλο σαν αποτέλεσμα της επιτάχυνσης στη συστολή και επιβράδυνσης στη διαστολή.

Κατά πόσο μια αιμοδυναμική ανωμαλία οφείλεται σε στένωση και πόσο σοβαρή είναι, εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες.

Π.χ. :

1. Το μήκος και τη διάμετρο του στενού τμήματος
2. Τις ανωμαλίες του ενδοθηλίου εκεί
3. Τον λόγο της διατομής στη στένωση προς το φυσιολογικό αγγείο, επίσης
4. Το ρυθμό ροής κ.ά.

Η στρωματική ροή γίνεται ασταθής σε υψηλές ταχύτητες και αλλάζει σε τυρβώδη ροή. Αυτό συμβαίνει σε περιοχές του αγγείου που παρουσιάζουν στένωση.

Φαινόμενο Doppler

Μετατόπιση Doppler

Το φαινόμενο Doppler είναι η αλλαγή στην παρατηρούμενη συχνότητα ενός κύματος λόγω κίνησης της πηγής ή του στόχου.

Όταν υψηλής συχνότητας κύματα προσπίπτουν σε σταθερή επιφάνεια, η ανακλώμενη δέσμη κυμάτων (υπερήχων) έχει ουσιαστικά την ίδια συχνότητα ή μήκος κύματος με τα προσπίπτοντα κύματα.

Αν, εντούτοις, η ανακλώσα επιφάνεια κινείται, όπως π.χ. είναι τα αιμοσφαίρια στην περίπτωση εφαρμογής των υπερήχων στη διαγνωστική των αγγείων, η συχνότητα του ήχου που οπισθοσκεδάζεται, αλλάζει. Η αλλαγή στη συχνότητα είναι ανάλογη της ταχύτητας της ανακλώσας επιφάνειας και ονομάζεται

Μετατόπιση Doppler.

$$\Delta f = f_r - f_o = \frac{2f U \cdot \cos\theta}{c}$$

Οι συχνότητες της Doppler Μετατόπισης βρίσκονται στην περιοχή των ακουστών ήχων. Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα τόσο μεγαλύτερη η αλλαγή συχνότητας (ή μετατόπιση)

δηλαδή : $\Delta f \sim u$

Το ποσόν, όμως, μετατόπισης συχνότητας Doppler εξαρτάται και από τη θέση που προέρχονται τα κύματα,

δηλαδή: $\Delta f \sim u \cdot \cos\theta$, από τη γωνία πρόσπτωσης.

Αλλά τα κύματα διαδίδονται με ταχύτητα c και το αποτέλεσμα είναι μια αντίστροφη σχέση μεταξύ ταχύτητας του κύματος c και Μετατόπισης Doppler

$\Delta f \sim (u \cdot \cos\theta / c)$.

Το ποσόν μετατόπισης Doppler του εκπνεόμενου ήχου εξαρτάται και από το πόσο κοντά βρίσκονται τα κύματα ή άλλως από τη συχνότητα. Έτσι, η μετατόπιση Doppler αυξάνει με την αύξηση της συχνότητας του κύματος δηλαδή:

$$\Delta f \sim (f_0 \cdot u \cdot \cos\Theta / c)$$

και για την ισότητα

$$\Delta f = 2f \cdot u \cdot \cos\Theta / c$$

Μέγιστη μετατόπιση Doppler παρατηρείται σε γωνία πρόσπτωσης 0° ή 180° ενώ σε γωνία 90° η μετατόπιση Doppler είναι 0.

Η αληθής συχνότητα του κύματος που επιστρέφει από κινούμενη επιφάνεια είναι:

$$f_n = f + D f$$

Αφού f_0 , c και Θ είναι σταθερά μεγέθη για μια συγκεκριμένη εικόνα, η ταχύτητα του κινούμενου οργάνου συσχετίζεται άμεσα με τη μετρούμενη μετατόπιση Doppler. Επομένως οι πληροφορίες από τη μετατόπιση Doppler μετατρέπονται σε πληροφορίες ταχύτητας, και δίδεται η ευκαιρία ποσοτικού προσδιορισμού της ροής σ' ένα αγγείο, ή επιτυγχάνεται ο ακριβής χαρακτηρισμός της ροής.

Φάσμα συχνοτήτων "μετατόπισης Doppler"

Στις κλινικές εφαρμογές, το φαινόμενο Doppler είναι το πλέον χρήσιμο για την εκτίμηση της αιματικής ροής.

Όταν η υπερηχητική δέσμη περνά διαμέσου ενός αγγείου :

Σ' αυτή τη διαδικασία, μικρές ποσότητες υπερηχητικής ενέργειας συναντούν τα ερυθρά αιμοσφαίρια και σκεδάζονται προς όλες τις διευθύνσεις. Αν τα ερυθρά αιμοσφαίρια κινούνται ως προς τον ανιχνευτή, το φαινόμενο Doppler προκαλεί τη μεταβολή της συχνότητας της οπισθοσκεδαζόμενης ενέργειας.

Το μέγεθος και η διεύθυνση αυτής της μετατόπισης είναι ανάλογα της ταχύτητας και της διεύθυνσης της κίνησης των ερυθρών αιμοσφαιρίων σε σχέση με τον ανιχνευτή. Αφού ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων είναι πάντα παρόν, από μηδέν στα τοιχώματα του αγγείου

έως τη μέγιστη τιμή κοντά στο κέντρο της κοιλότητας του αγγείου, αντίστοιχα ένα **φάσμα συχνοτήτων “μετατόπισης Doppler”** είναι πάντα παρόν. Τα δεδομένα της μετατόπισης Doppler καταγράφονται σαν γραφική παράσταση της κατανομής των συχνοτήτων Doppler στο χρόνο. Δηλαδή απεικονίζεται η μεταβολή στο χρόνο, των συχνοτήτων Doppler που ανιχνεύονται στον όγκο-αναφοράς.

Το φάσμα συχνοτήτων παράγεται από την εφαρμογή του μαθηματικού μετασχηματισμού Fourier στις κυματομορφές των ανακλάσεων. Το φάσμα Doppler μπορεί να γίνει πολύ σύνθετο λόγω της παλμικής ροής αίματος και της κίνησης των τοιχωμάτων του αγγείου.

Κατά παλμούς Doppler - Γενικά

Τα υπερηχητικά κύματα είναι, όπως και οι ακουστοί ήχοι, μηχανικά κύματα που διαδίδονται μέσω της ύλης. Η πηγή παραγωγής και ανίχνευσης τους είναι ένα συνθετικό πιεζοηλεκτρικό κεραμικό.

Στις τεχνικές Doppler οι συχνότητες που εφαρμόζονται είναι 1-15MHz. Τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν σ' αυτές τις συχνότητες, για τον μαλακό ιστό, είναι κατά μέσο όρο 0.7-0.07mm (περίπου 1 χιλ. έως 1/10 χιλ.). Τα συστήματα Doppler δυνατόν να παράγουν συνεχές ή παλμικό κύμα υπερήχων. Οι παλμοί ποικίλουν σε μήκος από 2 έως 10 κύκλους και αυτό εξαρτάται από το σύστημα Υπερήχων. Τυπικά οι εντάσεις που γεννώνται με συνεχείς και παλμικούς Doppler υπερήχους είναι 100 και 400 mW / cm² αντίστοιχα.

Ενας αριθμός μεθόδων απεικόνισης με Doppler έχει χρησιμοποιηθεί για να δωθούν πληροφορίες για την ανατομία του αγγείου σε συνδυασμό με τη ροή αίματος. Η απλούστερη απ' αυτές τις τεχνικές υπήρξε η χρήση συνεχούς κύματος Υπερήχων Doppler. Αν και η διεύθυνση της ροής καθορίζεται με τους συνεχείς υπερήχους, αυτοί δεν επιτρέπουν διευκρίνιση της κίνησης από όργανα σε βάθος, ιδιαίτερα την καρδιά ή όργανα αγγειοβριθή όπως ο εγκέφαλος. Ακόμη και σήματα από επιφανειακά αγγεία είναι μερικές φορές δύσκολο να διευκρινισθούν. Επομένως υστερούν σημαντικά σε Διακριτική

Ικανότητα σε βάθος. Ο πλέον πρακτικός τρόπος να αυξηθεί η Διακριτική Ικανότητα βάθους σε σύστημα Doppler είναι, η πηγή να παράγει παλμούς και ο δέκτης να λειτουργεί με ηλεκτρονική πύλη.

Ανομοιομορφίες των τοιχωμάτων των αγγείων, αθηρωματικές πλάκες, στενώσεις ή μερικώς αποφραγμένα αγγεία προκαλούν μεταβολή της ταχύτητας που ανιχνεύεται άμεσα από τις διαφορές στο φάσμα συχνοτήτων Doppler.

Ετσι, τα σχετικά χαρακτηριστικά της ροής πιστοποιούνται στα διάφορα τμήματα της κυματομορφής.

Όταν το αίμα σε αγγείο κινείται με την ίδια ταχύτητα σ' όλα τα σημεία, λεπτή κατανομή Doppler πιστοποιεί στρωτή ροή ενώ όταν οι ταχύτητες στο αγγείο είναι μεγαλύτερες στο κέντρο και μικρότερες στην περιφέρεια η στρωματική ροή δημιουργεί κυματομορφή με πλήθος συχνοτήτων.

Οι κατά παλμούς Doppler συσκευές, εκπέμπουν παλμούς υπερήχων σε κανονικό ρυθμό επανάληψης δηλαδή, με συγκεκριμένη συχνότητα επανάληψης παλμού. Οι παλμοί απέχουν μεταξύ τους τόσο ώστε νέος παλμός δεν διαδίδεται μέχρι οι ανακλάσεις του προηγούμενου παλμού έχουν επιστρέψει.

Οι κατά παλμούς Doppler συσκευές χρησιμοποιούν ηλεκτρονική πύλη χώρου, για συλλογή ανακλάσεων από επιλεγμένο βάθος, για ανάλυση και απεικόνιση. Ο προεκλεγμένος χώρος απ' όπου συλλέγονται δεδομένα ροής μπορεί να ελέγχεται ως προς το μήκος του, το βάθος και τη θέση. Το μήκος του παλμού και η διάρκεια που ο ανιχνευτής λειτουργεί σαν δέκτης δηλαδή, η περίοδος επανάληψης λήψης ανακλάσεων, καθορίζουν το μήκος του όγκου-αναφοράς. Ενώ το πλάτος του όγκου αναφοράς εξαρτάται από το πλάτος της δέσμης στο επιλεγμένο βάθος και φυσικά καθορίζεται από την εστία του ανιχνευτή. Υπάρχει αναλογία μεταξύ της διάρκειας του παλμού σε κύκλους, της οδηγού συχνότητας παραγωγής υπερήχων και της συχνότητας επανάληψης του παλμού.

Μείωση της συχνότητας επανάληψης παλμού, PRF, δίδει τη δυνατότητα αύξησης του ελεγχόμενου βάθους. Με αύξηση της PRF περιορίζουμε το πεδίο ελέγχου σε επιφανειακούς ιστούς.

Καθορισμός όγκου αναφοράς (Sample Volume)

Ο στόχος της χρήσης ενός κατά παλμούς συστήματος υπερήχων είναι η συλλογή των πληροφοριών Doppler μόνο από μια περιορισμένη περιοχή. Αυτή η περιοχή είναι ο **όγκος αναφοράς** ή **δείγμα όγκου** (sample volume). Χρόνος και βάθος, στο σύστημα, έχουν την ίδια σημασία αφού η μέση ταχύτητα του ήχου είναι σταθερή. Στον ιστό, το μήκος του όγκου αναφοράς καθορίζεται άμεσα από το μήκος του παλμού. Η διάρκεια του παλμού επιλέγεται έτσι ώστε και η μικρότερη μετατόπιση συχνότητας (που αντιπροσωπεύει τη μικρότερη ταχύτητα σε δεδομένη γωνία λήψης) ν' απεικονίζεται στο σύστημα.

Για παράδειγμα, η νυχτερίδα χρησιμοποιεί χαμηλές συχνότητες και οι ταχύτητες των στόχων της είναι πολύ μικρές (έντομα). Σαν αποτέλεσμα, οι νυχτερίδες χρησιμοποιούν μακράς διάρκειας παλμούς μιας συχνότητας, που οδηγούν σε μεγάλους χρόνους αναφοράς, για τον καλύτερο καθορισμό μικρών ταχυτήτων και τη μέγιστη ακρίβεια Doppler.

Η πλάγια διάσταση του όγκου-αναφοράς καθορίζεται από το εύρος της δέσμης. Σαν αποτέλεσμα, ο όγκος αναφοράς αλλάζει διαστάσεις με την αλλαγή του εύρους της δέσμης και της διάρκειας του παλμού.

Συνοπτικά, το μήκος του όγκου αναφοράς εξαρτάται από το μήκος του παλμού και από το μήκος του εύρους της ηλεκτρονικής πύλης και δεν είναι μια σταθερή ποσότητα αλλά εξαρτάται από τις ρυθμίσεις του συστήματος.

Πολύ σημαντικό είναι ότι η φασματική ανάλυση απεικονίζει φαινόμενα ροής μόνο μέσα στον όγκο αναφοράς. Εάν ο όγκος αναφοράς δεν έχει επιλεγεί ορθά στο χώρο (αγγείο), χαρακτηριστικά αγγειακών βλαβών μπορεί να διαφύγουν.

Ανάλυση φάσματος

Συνήθως, σε μεγάλο αγγείο η ταχύτητα του αίματος δεν είναι η ίδια σε όλα τα σημεία αλλά ακολουθεί μια κατανομή, όπως η παραβολική (στη στρωματική ροή). Σαν αποτέλεσμα, το Doppler σήμα είναι σύνθετο.

Η ανάλυση φάσματος διαχωρίζει ένα σύνθετο σήμα στις συνιστώσες-συχνότητες έτσι ώστε να καθορισθεί η σχετική συνεισφορά τους στο αρχικό σήμα. Έτσι το φάσμα των σημάτων Doppler εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ροής στο αγγείο. Αν, π.χ. η κατανομή της ροής είναι παραβολική, οι ταχύτητες κυμαίνονται από μηδέν, κοντά στα τοιχώματα του αγγείου, έως τη μέγιστη στο μέσον. Η εμφάνιση του φάσματος Doppler εξαρτάται και από το μέγεθος του όγκου-αναφοράς. Ένα σχέδιο ροής που παρουσιάζει ενδιαφέρον σε αιματικές μελέτες είναι αυτό που δίδει η τυρβώδης ροή. Πλάτυνση του φάσματος Doppler δίδει ενδείξεις της τυρβώδους ροής. Η μορφή αυτής της κατανομής των μεγίστων συχνοτήτων φαίνεται να εξαρτάται από την κατάσταση των αγγείων π.χ. από την παρουσία αποφρακτικής πάθησης του αγγείου. Έχουν καθορισθεί απλοί δείκτες παλμικότητας και αντίστασης που υπολογίζονται από την κατανομή των μεγίστων συχνοτήτων στο χρόνο.

Μειονεκτήματα των κατά παλμούς Doppler φαίνονται στην αποτύπωση μιας ταχείας ροής. Καθώς το κατά παλμούς σύστημα είναι σύστημα δειγμάτων (προσδιορίζει τη μετατόπιση Doppler περιοδικά) ο ρυθμός επανάληψης του παλμού είναι μεταβλητός. Η μαθηματική θεωρία χρήσης δειγμάτων πυλών ορίζει ότι:

Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΑΜΦΙΣΒΗΤΗΤΗ μετατόπιση συχνότητας Doppler που ανιχνεύεται είναι ίση με το ήμισυ της συχνότητας επανάληψης, PRF (συχνότητα δειγματοληψίας).

Αν η ταχύτητα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να παράγει και μετατόπιση Doppler μεγαλύτερη από το $\frac{1}{2}$ PRF τότε δημιουργείται το φαινόμενο "Aliasing" ή "ψευδής μετατόπιση". Αυτό "διπλώνει" ή μετατοπίζει την

τελική ανάλυση φάσματος Doppler. Δηλαδή απεικονίζονται ως μικρότερης μετατόπισης Doppler απ' ότι είναι πραγματικά. Αν η **συχνότητας επανάληψης PRF** αυξηθεί σε τιμή τουλάχιστον διπλάσια της μέγιστης μετατόπισης το φαινόμενο εξαφανίζεται. (Όταν το αγγείο που ελέγχουμε είναι σε βάθος, μπορεί να μην είναι εφικτή η αύξηση της **συχνότητας επανάληψης PRF**).

Το πρόβλημα “ψευδούς μετατόπισης” (aliasing) ελαχιστοποιείται επίσης αλλάζοντας γωνία πρόσπτωσης της δέσμης στο αγγείο. (Η μετατόπιση Doppler καθορίζεται εν μέρει -είναι ανάλογη του συνημίτονου Θ - από τη γωνία Θ μεταξύ του αγγείου και της δέσμης και θεωρητικά είναι μηδέν σε γωνία 90°).

Η **συχνότητας επανάληψης PRF** επομένως καθορίζει τη μέγιστη μετατόπιση Doppler που παράγεται από κίνηση στόχου (**όριο Nyquist**: Μετατοπίσεις Doppler που πραγματικά είναι μεγαλύτερες από αυτή τη μέγιστη τιμή απεικονίζονται “ψευδώς” σαν πολύ μικρές μετατοπίσεις).

Η χρήση μικρότερης συχνότητας επανάληψης παλμού, PRF για να φθάσουμε αγγεία σε βάθος, μπορεί να δώσει ανακλάσεις από αυτά μετατοπισμένες “ψευδώς” εάν είναι παρούσες ταχύτητες ιδιαίτερα υψηλές.

Στην πράξη “ψευδής μετατόπιση” (aliasing) αναγνωρίζεται συνήθως εύκολα.

Η αύξηση της **συχνότητας επανάληψης PRF** με στόχο την εκτίμηση ταχείας ροής

- α) περιορίζει το πεδίο σε πολύ επιφανειακά όργανα και
- β) αυξάνει την πιθανότητα για σφάλματα ασάφειας χώρου.

2D Doppler Υπέρηχοι

Σημαντικός περιορισμός των δύο διαστάσεων Doppler Υπερήχων είναι ότι η πληροφορία για τη ροή λαμβάνεται μόνο από ένα πολύ μικρό όγκο αναφοράς και όχι απ' ολόκληρη την εικόνα. Τα συστήματα Duplex δημιουργήθηκαν για να συμπληρωθούν οι πληροφορίες των κατά παλμούς Doppler συστημάτων με δισδιάστατη εικόνα.

Συνήθως τα συστήματα Duplex επιτρέπουν τον καθορισμό της δ/νσης της αιματικής ροής σε σχέση με αυτή της δέσμης των Υπερήχων. Για την εκτίμηση της ταχύτητας ροής από τη μετατόπιση Doppler πρέπει να είναι γνωστή η γωνία μεταξύ της δ/νσης ροής και της δ/νσης της υπερηχητικής δέσμης.

Επιλογή συχνότητας Doppler

Η ένταση των υπερηχητικών κυμάτων που σκεδάζονται από μικρούς σκεδαστές όπως τα ερυθρά αιμοσφαίρια είναι ανάλογη της 4^{ης} δύναμης της συχνότητας των κυμάτων. Εντούτοις με την αύξηση της συχνότητας αυξάνει ο ρυθμός εξασθένησης της δέσμης.

Στην επιλογή της βέλτιστης συχνότητας για μελέτη αιματικής ροής αυτοί οι ανταγωνιστικοί παράγοντες λαμβάνονται υπόψη και η επιλογή συχνά καθορίζεται από το βάθος του ελεγχόμενου αγγείου.

Ανιχνευτές Έγχρωμων Doppler

Γραμμικοί, Φασικοί (phased), δακτυλίου, κυρτοί

Η έγχρωμη πληροφορία ροής μπορεί να καλύπτει ολόκληρο το πεδίο ή να περιορίζεται σε ένα επίπεδο τμήμα μέσα στο γκρίζο πεδίο με σχήμα περίπου ορθογώνιο, ή παραλληλόγραμμο ή σχήμα τομέα. Σε φασικούς ανιχνευτές αναγκαίο είναι πολλές φορές να τοποθετείται “ακουστικό delay” μεταξύ ανιχνευτού και δέρματος για να αποφευχθεί γωνία Doppler 90° .

Λειτουργία συστήματος Doppler

Η γεννήτρια παλμών παράγει ηλεκτρικούς παλμούς που οδηγούν τον ανιχνευτή. Επίσης παράγει παλμούς συγχρονισμού που στέλνουν στον δέκτη και τη μνήμη για την έναρξη του ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής (σαν πηγή) παράγει υπερηχητικό παλμό. Για κάθε ανάκλαση παράγεται ηλεκτρικό σήμα. Τα ηλεκτρικά σήματα μέσω του δέκτη αποθηκεύονται στη μνήμη. Οι μετατοπίσεις Doppler των ανακλάσεων οδηγούνται στη μνήμη μέσω της έγχρωμης οδού.

Αρχές έγχρωμης τεχνικής

Κάθε χρώμα έχει τρεις βασικές συνιστώσες

Χροιά	πληρότητα χρώματος	λαμπρότητα
—	—	—
χρώμα (κόκκινο, μπλε, κ.ά) ↓	συγκέντρωση σε χρώμα (απαλό, βαθύ, κ.ά) ↓	ποσότητα φωτός (σκοτεινό, φωτεινό κ.ά) ↓
φορά /διεύθυνση	όγκος ροής	ταχύτητα/ τύπος ροής

Ροή προς τον ανιχνευτή **κόκκινο** που τείνει στο κίτρινο σε ταχύτερη ροή. Ροή από τον ανιχνευτή **μπλε** που τείνει σε ανοικτό μπλε σε ταχύτερη ροή.

Στα έγχρωμα συστήματα Doppler:

- η παρουσία** ροής καταγράφεται σαν έγχρωμο σήμα,
- η δ/ση και φορά** από το χρώμα του σήματος και
- η ταχύτητα** της ροής από την απόχρωση (λαμπρότητα).

Σημαντικό είναι ότι η έγχρωμη Doppler καταγραφή αντιπροσωπεύει μόνο τη μέση μετατόπιση Doppler σε κάθε pixel. Για αντικειμενικές μετρήσεις ταχύτητας ή μετατόπισης, είναι απαραίτητο και το φάσμα Doppler.

Μια καλή προσέγγιση της μελέτης ροής είναι η τεχνική που επιτρέπει εκτίμηση των χαρακτηριστικών ροής σε ολόκληρη την εικόνα σε συνδυασμό με υψηλής Διακριτικής Ικανότητας αποτύπωση των

τοιχωμάτων των αγγείων και των στοιχείων και διαχωρισμός αυτών από τους περιβάλλοντες ιστούς. Αυτή εφαρμόζεται στην έγχρωμη υπερηχοτομογραφία. Στην έγχρωμη Doppler απεικόνιση χρησιμοποιείται επίσης η τεχνική παλμών-ανακλάσεων, με τη χρήση του φαινομένου Doppler. Αυτό απαιτεί παλμούς μακρύτερους από τους πολύ βραχείς παλμούς της κλασσικής υπερηχοτομογραφίας.

Ανακλάσεις που δεν υπέστησαν μετατόπιση Doppler απεικονίζονται στην κλίμακα του γκρίζου. Στις ανακλάσεις με μετατόπιση Doppler, υπολογίζεται η μετατόπιση Doppler, Δf , και απεικονίζονται με χρώμα.

Το χρώμα, πρωταρχικά, σημειώνει την **ποιοτική δ/ση της ροής** αλλά και την **ταχύτητα και τον χαρακτήρα της ροής**.

Ανόμοια, με την κλασσική, σε κλίμακα του γκρίζου, υπερηχοτομογραφία, στην έγχρωμη Real Time Doppler υπερηχογραφία απαιτούνται αρκετοί παλμοί για τον καθορισμό μιας έγχρωμης γραμμικής σάρωσης.

Σε κάθε σημείο απεικόνισης παρουσιάζεται πληροφορία είτε σε γκρίζο ή έγχρωμης ροής, αλλά όχι και δύο μαζί. Κόκκινο ή μπλε δείχνει θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις Doppler αντίστοιχα.

Παράμετροι που επηρεάζουν το έγχρωμο Doppler υπερηχογράφημα

Όριο (Threshold) (Διαχωρισμός ανακλάσεων κινούμενων στόχων από αυτές σταθερών στόχων). Ανακλάσεις από τοιχώματα ή βαλβίδες αγγείων και καρδιάς είναι ισχυρότερες από τις ανακλάσεις του ρεόντος αίματος και έτσι γίνεται διαχωρισμός, θέτοντας όριο επιλογής ανακλάσεων που είναι έγχρωμες.

Ενίσχυση χρώματος. Σχετίζεται με την ευαισθησία και είναι διαφορετική από την ολική ενίσχυση. Υψηλή ενίσχυση χρώματος δημιουργεί κόκκινο και μπλε θόρυβο. Μείωση της, βελτιώνει την εικόνα.

Συχνότητα επανάληψης παλμού (PRF).

Καθορίζει το εύρος ταχυτήτων ροής που μπορούν να μετρηθούν και το βάθος που μπορούμε να δούμε. Μείωση της PRF βοηθά στην ανίχνευση ροής μικρής ταχύτητας και σε βάθος.

Μετατόπιση μηδενός.

Σχετίζεται με ψευδή μετατόπιση. Ρύθμιση του μηδενός διορθώνει το μετρητικό εύρος.

Φίλτρο χρώματος. Διαχωρίζει τα σήματα ροής αίματος από άλλα.

Χαμηλής συχνότητας φίλτρο \otimes διαχωρίζει από σήματα κίνησης των τοιχωμάτων ή άλλων οργάνων

Υψηλής συχνότητας φίλτρο \otimes περιορίζει υψηλής συχνότητας θόρυβο

Εξελίξεις

Η έγχρωμη Doppler απεικόνιση αποτελεί σημαντική εξέλιξη της υπερηχοτομογραφίας που συνδυάζει υψηλής διακριτικής ικανότητας απεικόνιση του ιστού με ταυτόχρονη αποτύπωση πληροφοριών ροής καθώς και κλασσική φασματοσκοπική ανάλυση Doppler. Η έγχρωμη υπερηχοτομογραφία δίδει τη δυνατότητα για λεπτομερή, μη επεμβατική αποτύπωση τόσο της μορφολογίας όσο και της λειτουργίας που αντανακλάται στην αιμάτωση των οργάνων.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας του έγχρωμου Doppler έγινε από την κλινική ανάγκη του προσδιορισμού της μορφολογικής κατάστασης των τοιχωμάτων του αγγείου, την παρουσία και τη διεύθυνση της ροής του αίματος και την αξιολόγηση της αιμάτωσης των οργάνων.

Στην κλασσική υπερηχοτομογραφία έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα ο κλάδος χαρακτηρισμού ιστών με ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των δεδομένων της υπερηχοτομογραφικής εικόνας που οδηγεί σε αξιόπιστα ποσοτικά αποτελέσματα και βελτίωση της διαγνωστικής αξίας της μεθόδου.

Λίγα βήματα έχουν γίνει προς αυτήν την κατεύθυνση όσο αφορά τη Doppler τεχνική, ειδικότερα για τον χαρακτηρισμό ροής τόσο με

ποιοτικό όσο και ποσοτικό τρόπο. Η ποσοτική ανάλυση είναι εξίσου σημαντική με την ποιοτική αφού διευκολύνει τη διάγνωση και προσφέρει έναν αντικειμενικό τρόπο σύγκρισης αποτελεσμάτων. Οι κλινικές παρατηρήσεις έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα της διαφορετικής αιμάτωσης των κακοηθειών σε σύγκριση με το φυσιολογικό ιστό. Η έγχρωμη Doppler τεχνική παρουσιάζει προβλήματα στη μέτρηση και τη διαφοροποίηση φυσιολογικού και κακοήθους ιστού κυρίως λόγω του πολύ ασθενούς σήματος που ανακλούν τα αγγεία στο εσωτερικό κακοηθειών. Ένα βήμα για τη λύση του προβλήματος είναι η χρήση της τεχνικής **ισχύος Doppler** την οποία χαρακτηρίζει πολύ μεγαλύτερη ευαισθησία.

Η ευαισθησία του έγχρωμου Doppler περιορίζεται σε ένα βαθμό από την αναγκαιότητα να διευκρινισθεί το αληθές σήμα από το θόρυβο αφού τα σήματα από τις μετατοπίσεις Doppler είναι χαμηλής έντασης.

Η τεχνική ισχύος Doppler αντιπαρέρχεται αυτούς τους περιορισμούς μετρώντας την ολοκληρωμένη ισχύ του σήματος Doppler αντί τις μέσες μετατοπίσεις συχνότητας.

Τα πλεονεκτήματα της **Doppler ισχύος** είναι:

1. **Η μεγαλύτερη ευαισθησία σε μικρές ταχύτητες ροής και μικρότερα αγγεία**
2. **Η ανεξαρτησία της από τη γωνία πρόσπτωσης**
3. **Η αποφυγή ψευδούς μετατόπισης (*aliasing*)**
4. **Η βελτιωμένη διευκρίνιση μεταξύ του ρέοντος αίματος και του τοιχώματος του αγγείου.**

Το κύριο μειονέκτημα της **Doppler ισχύος** είναι ότι, αντίθετα από τη μετατόπιση Doppler, δεν παρέχει πληροφορίες της φοράς και διεύθυνσης ή της ταχύτητας ροής. Με τη μέθοδο ισχύος όμως μπορεί να μετρηθεί ο όγκος του ρέοντος αίματος ακόμα και στην περίπτωση πολύ ασθενούς σήματος, Αυτό που απαιτείται είναι μια βελτιστοποίηση και ποσοτικοποίηση της μέτρησης ώστε σε

συνδυασμό με τη μέθοδο έγχρωμου Doppler να μπορεί να οδηγήσει στον κλινικό διαχωρισμό φυσιολογικού ιστού και κακοήθειας.

Η έρευνα για την καθιέρωση ενός τέτοιου μοντέλου απαιτεί πρωτίστως την εξασφάλιση σωστής λειτουργίας του συστήματος, την ελαχιστοποίηση των ψευδών πληροφοριών στην υπερηχοτομογραφική εικόνα και τον προσδιορισμό μιας ποσοτικής σχέσης διαφοροποίησης φυσιολογικού ιστού και βλάβης πρώτα σε ομοίωμα ώστε να αξιολογηθεί στη συνέχεια και σε ασθενείς.

Στη διαγνωστική υπερηχοτομογραφία οι ψευδείς πληροφορίες έχουν πολύ μεγαλύτερη σημασία σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη απεικονιστική μέθοδο. Ψευδείς πληροφορίες μπορούν να προέλθουν λόγω ακατάλληλης τεχνικής ή λανθασμένης ρύθμισης του μηχανήματος ή κίνησης του ασθενούς. Πολλά από τα προβλήματα που αφορούν την κλασσική υπερηχοτομογραφία υπεισέρχονται και στην έγχρωμη Doppler απεικόνιση. Επιπλέον η ανίχνευση και απεικόνιση συχνοτήτων από κινούμενους στόχους προκαλούν την εμφάνιση και άλλων ψευδών πληροφοριών που αφορούν μόνο την Doppler τεχνική. Η κατανόηση των ψευδών πληροφοριών και η εκτίμηση της επίδρασής τους στη διαγνωστική υπερηχοτομογραφία είναι υψίστης σημασίας.

Οι ψευδείς πληροφορίες στην έγχρωμη Doppler απεικόνιση περιλαμβάνουν ψευδή μετατόπιση (aliasing), σκίαση, παραγωγή κατοπτρικών εικόνων, εμφάνιση στο σήμα περιαγγειακής δόνησης ιστού που οφείλεται στην τυρβώδη ροή αίματος στο εσωτερικό του. Κάποιες από αυτές τις ψευδείς πληροφορίες μπορεί να ελαχιστοποιηθούν από τη χρήση της **τεχνικής ισχύος**.

Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος για την κατανόηση, εκτίμηση και ελαχιστοποίηση της επίδρασης τέτοιων ψευδών πληροφοριών στη διαγνωστική εικόνα είναι ο συνεχής ποιοτικός έλεγχος των υπερηχοτομογραφικών συστημάτων με εξειδικευμένα ομοιώματα. Στους κλασσικούς τομογράφους ένα τέτοιο πρωτόκολλο περιλαμβάνει τον έλεγχο και προσδιορισμό της διακριτικής ικανότητας (πλάγιας και αξονικής), του δυναμικού εύρους, της λειτουργικής κατάστασης του

ανιχνευτή. Μέσω ενός τέτοιου ελέγχου με τη χρήση ομοιωμάτων καθορίζονται και οι βέλτιστες ρυθμίσεις των παραμέτρων του μηχανήματος ανάλογα με το είδος της εξέτασης και το υπό εξέταση όργανο.

Σε Doppler συστήματα ο ποιοτικός έλεγχος επιπροσθέτως απαιτεί την ύπαρξη ομοιώματος με συγκεκριμένες τιμές χαρακτηριστικών ροής καθώς και πάχους τοιχωμάτων κατασκευασμένα ώστε να αντιπροσωπεύουν τόσο επιφανειακά όσο και αγγεία εν τω βάθει, αξιολόγηση κωδικοποίησης χρώματος, έλεγχος της συχνότητας επανάληψης παλμών.