

ỨNG DỤNG HIỆU ỨNG DOPPLER TRONG CHẨN ĐOÁN HÌNH ẢNH

NGUYỄN TUẤN VINH¹, VŨ BÁ DŨNG^{1*},
 TRƯƠNG THỊ MAI HƯƠNG¹, NGUYỄN THANH DŨNG¹

Tóm tắt

Hiệu ứng Doppler (hoặc dịch chuyển Doppler) là sự thay đổi tần số của sóng (sóng cơ học, sóng điện từ, ánh sáng) khi nguồn phát sóng và máy thu sóng chuyển động tương đối với nhau. Tần số thu được cao hơn khi nguồn phát và máy thu lại gần nhau, và thấp hơn khi nguồn phát và máy thu rời xa nhau. Ứng dụng hiệu ứng Doppler trong siêu âm lần đầu tiên được giới thiệu vào những năm 1980 và kể từ đó kỹ thuật này ngày càng được mở rộng và phát triển. Bài viết này giới thiệu nguyên lý vật lý trong ứng dụng của hiệu ứng Doppler để đo dòng chuyển động của hồng cầu trong mạch máu và trong tim nhằm đánh giá chính xác về lưu lượng máu, hướng dòng máu, vận tốc dòng máu tại bất kỳ điểm nào, từ đó xác định các bệnh lý, tổn thương tim mạch.

Từ khóa: Hiệu ứng doppler; Siêu âm Doppler; đầu dò Doppler, dòng máu.

Abstract

The Doppler effect (also Doppler shift) is the change in the frequency of a wave (mechanical waves, electromagnetic waves and light) in relation to an observer who is moving relative to the source of the wave. Compared to the emitted frequency, the received frequency is higher during the approach, identical at the instant of passing by, and lower during the recession. The application of Doppler effect in ultrasound was first introduced in the 1980s and since then this technique has expanded and developed. This paper provides the introduction to the physical principles and application of Doppler ultrasound to medical image diagnosis. The Doppler effect in diagnostic imaging can be used to study blood flow, that provides the informations: presence or absence of flow, direction and velocity of blood flow.

Keywords: Doppler effect; Doppler ultrasound; Doppler transducer; Blood flow.

1. Mở đầu

Hiệu ứng Doppler là một hiện tượng thú vị và phổ biến trong tự nhiên. Nó xảy ra đối với cả sóng cơ học lẫn sóng điện từ (sóng ánh sáng). Một ví dụ về hiệu ứng Doppler là: khi

một người đứng ở cạnh đường sắt chờ tàu thì sẽ nghe thấy tiếng còi tàu thay độ cao tăng lên khi tàu đến gần và nghe trầm đi khi tàu rời xa. Đây chính là một hiệu ứng Doppler đối với sóng âm. Nguyên nhân của hiện tượng này là do: khi nguồn di chuyển về phía người quan sát thì tần số của sóng âm sẽ tăng lên và khi nguồn di chuyển ra xa người quan sát tần số giảm. Ứng dụng hiệu ứng Doppler trong siêu âm lần đầu

¹Trường Đại học Cửu Long

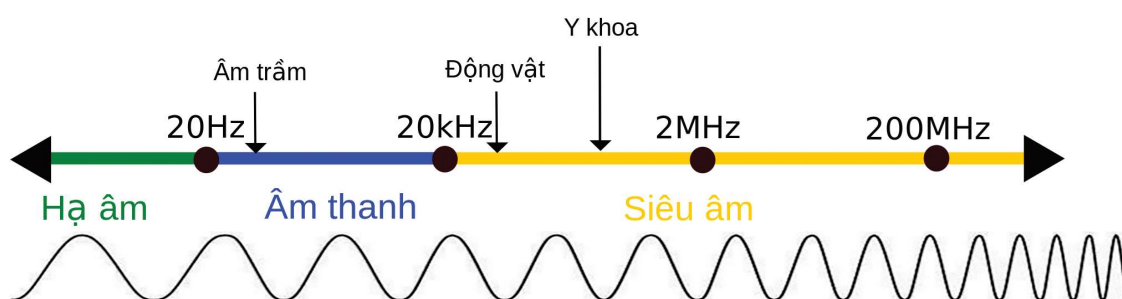
* Người chịu trách nhiệm về bài viết: Vũ Bá Dũng
 (Email: vubazung305@gmail.com)

tiên được giới thiệu vào những năm 1980 và kể từ đó kỹ thuật này ngày càng được mở rộng và phát triển. Bài viết này giới thiệu nguyên lý vật lý của ứng dụng hiệu ứng Doppler đối với sóng siêu âm để xác định chiều, vận tốc dòng hồng cầu trong động mạch, tĩnh mạch và tìm giúp chẩn đoán tắc hẹp động mạch, hẹp van tim, suy giãn tĩnh mạch và hở van tim.

2. Sóng âm và sóng siêu âm

Sóng cơ học là những dao động cơ học

lan truyền trong các môi trường đàn hồi. Trong đó các sóng cơ học có tần số f từ 16 Hz đến 20 kHz được gọi là sóng âm. Trong các môi trường có tính đàn hồi càng cao thì sóng âm lan truyền càng dễ dàng (tốc độ lan truyền càng nhanh). Siêu âm là một loại sóng âm có tần số lớn hơn 20 kHz (hình 1). Tai người bình thường không thể cảm nhận được siêu âm, nhưng một số loài động vật có khả năng phát ra và cảm nhận được siêu âm.



Hình 1. Sơ đồ thang tần số sóng âm.

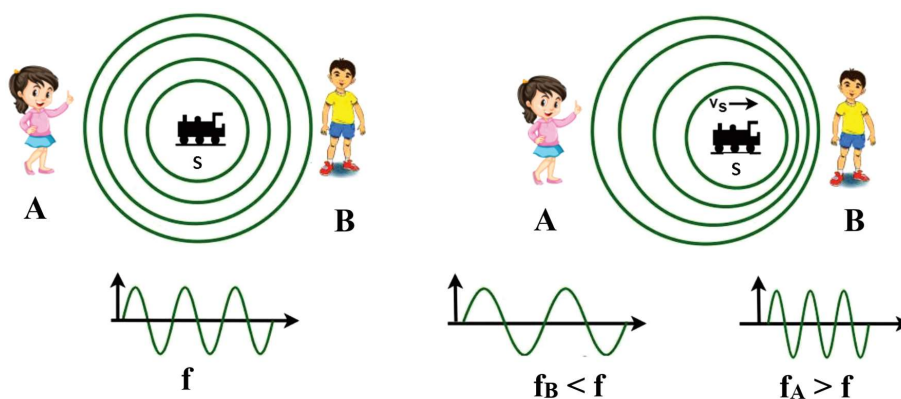
Sóng siêu âm có nhiều ứng dụng quan trọng trong khoa học, kỹ thuật, trong công nghiệp, nông nghiệp, giao thông vận tải Nhưng ứng dụng quan trọng nhất của siêu âm là chẩn đoán và điều trị trong y học.

3. Hiệu ứng Doppler đối với sóng âm

Hiệu ứng Doppler là một hiện tượng vật lý, đặt theo tên của nhà bác học Áo C. Doppler.

Hiệu ứng Doppler (hình 2) là hiện tượng: nếu nguồn S phát sóng âm tần số f thì máy thu (người A và người B) sẽ thu được âm có tần số:

- Không thay đổi ($f_A = f_B = f$) khi nguồn S đứng yên;
- Giảm ($f_A < f$) khi nguồn S rời xa máy thu A ;
- Tăng ($f_B > f$) khi nguồn S lại gần máy thu B ;



Hình 2. Hiệu ứng Doppler đối với sóng âm.

Trường hợp tổng quát cả nguồn phát và máy thu đều chuyển động thì tần số f_T máy thu nhận được xác định bởi công thức:

$$f_T = \frac{v \pm v_T}{v \pm v_N} f \quad (1)$$

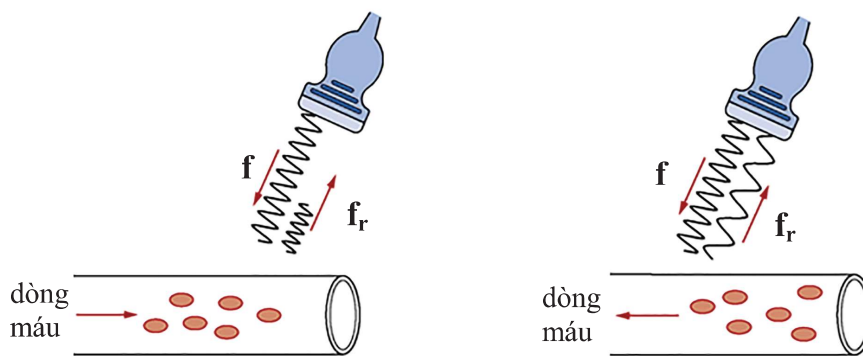
ở đây: v_N là vận tốc phát nguồn phát, v_T là vận tốc máy thu, v là vận tốc sóng âm, f là tần số âm do nguồn phát ra. Dấu (+) hoặc (-) được xác định theo nguyên tắc: ra xa f_T giảm, lại gần f_T tăng. Phương trình (1) cho thấy nếu xác định được vận tốc của sóng âm v , vận tốc của máy thu v_T , tần số âm máy thu nhận được f_T và tần số do nguồn phát ra f thì có thể xác định được vận tốc v_N của nguồn phát sóng.

Hiệu ứng Doppler với phương trình định lượng (phương trình 1) đã được ứng dụng để xác định chuyển động của hồng cầu trong mạch máu và tìm bằng kỹ thuật *siêu âm Doppler* (kỹ thuật vượt trội hơn phương pháp siêu âm

thông thường), dựa trên nguyên lý vật lý được trình bày sau đây.

4. Cơ sở vật lý của kỹ thuật siêu âm Doppler khảo sát dòng chảy của hồng cầu

Kỹ thuật siêu âm Doppler là một xét nghiệm không xâm lấn, có thể được sử dụng để khảo sát chuyển động của máu và đánh giá lưu lượng máu trong động mạch và tĩnh mạch. Bộ phận chính của kỹ thuật siêu âm Doppler là một đầu dò (hình 3). Đầu dò phát sóng siêu âm tần số f . Sóng siêu âm truyền đến gặp các tế bào hồng cầu trong mạch thì bị xạ ngược trở lại với tần số f_r sẽ được đầu dò thu lại (hình 3). Độ dịch chuyển tần số $\Delta f = f_r - f$ (được gọi là độ dịch chuyển Doppler) được xác định nhờ bộ xử lý của máy vi tính.



Hình 3. Nguyên lý làm việc của siêu âm Doppler khảo sát chuyển động của hồng cầu trong mạch máu.

Hình 2 là sơ đồ xác định độ dịch chuyển tần số cho hai trường hợp: a) dòng máu di chuyển ngược hướng đầu dò tạo ra độ dịch chuyển Doppler âm ($\Delta f < 0$); b) dòng máu di chuyển cùng hướng đầu dò tạo ra độ dịch chuyển Doppler dương ($\Delta f > 0$). Độ dịch chuyển Doppler Δf được đầu dò và máy tính xác định chính xác. Dấu của dịch chuyển Doppler cho biết:

i) Độ dịch chuyển Doppler âm ($\Delta f < 0$), thì dòng hồng cầu di chuyển ngược hướng đầu dò;

ii) Độ dịch chuyển Doppler dương ($\Delta f > 0$), thì dòng hồng cầu di chuyển cùng hướng đầu dò;

iii) Độ dịch chuyển Doppler bằng không ($\Delta f = 0$), thì hồng cầu đứng yên.

Vận tốc của dòng hồng cầu trong mạch máu được xác định từ phương trình Doppler:

$$\Delta f = \frac{2v_M \cos \theta}{v} f_i \quad (2)$$

ở đây v là vận tốc sóng siêu âm trong mô mềm (1540 m/s), v_M là vận tốc dòng máu, và θ = góc giữa chùm sóng siêu âm Doppler và

hướng dòng máu (góc siêu âm). Phương trình (2) cho thấy: độ dịch chuyển Doppler Δf tỷ lệ thuận với tốc độ dòng máu v_M . Có nghĩa là vận tốc dòng máu lớn sẽ tạo ra tín độ dịch chuyển Doppler lớn và ngược lại vận tốc dòng máu thấp tạo ra độ dịch chuyển Doppler nhỏ. Từ phương trình Doppler, vận tốc v_M của dòng máu được xác định bởi phương trình sau:

$$v_M = \frac{v}{2f_i \cos \theta} \Delta f \quad (3)$$

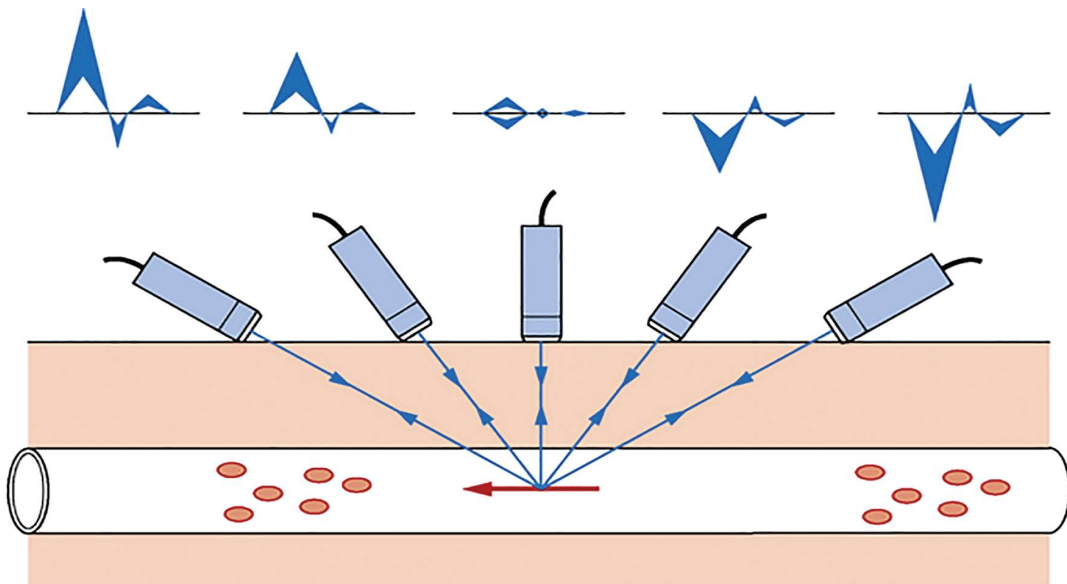
Phương trình (3) chỉ ra rằng: hiệu ứng Doppler đối với sóng siêu âm có thể được ứng dụng khảo sát dòng chuyển động của hồng cầu

để thể xác định:

- Dòng máu có chảy hay không.
- Dòng máu chảy nhanh hay chậm;
- Vận tốc của dòng máu.

3. Vai trò của góc siêu âm θ

Máy siêu âm có thể tính toán độ dịch chuyển Doppler trên một phạm vi góc rộng. Nhưng tín hiệu siêu âm phụ thuộc vào góc siêu âm θ , là góc hợp bởi giữa chùm tia Doppler và hướng dòng máu trong mạch.



Hình 4. Sơ đồ minh họa độ lớn của độ dịch chuyển Doppler thay đổi theo góc siêu âm.

Trong quá trình siêu âm Doppler mạch máu, độ nhạy của máy phụ thuộc vào cường độ của chùm siêu âm phản xạ. Khi cường độ của chùm sóng siêu âm phản xạ nhỏ đến một giá trị nào đó thì đầu dò không thu được tín hiệu và máy siêu âm không còn xác định được bất kỳ thông tin gì về dòng máu. Hình 4 là sơ đồ minh họa độ dịch chuyển Doppler thay đổi khi góc siêu âm thay đổi: Góc siêu âm càng nhỏ thì tín hiệu dịch chuyển Doppler càng lớn. Các tín hiệu rất nhỏ được tạo ra khi góc siêu âm tiến tới góc 90° . Đối với tốc độ dòng máu không đổi v_M , giá trị cực đại của $\cos \theta$ sẽ cho

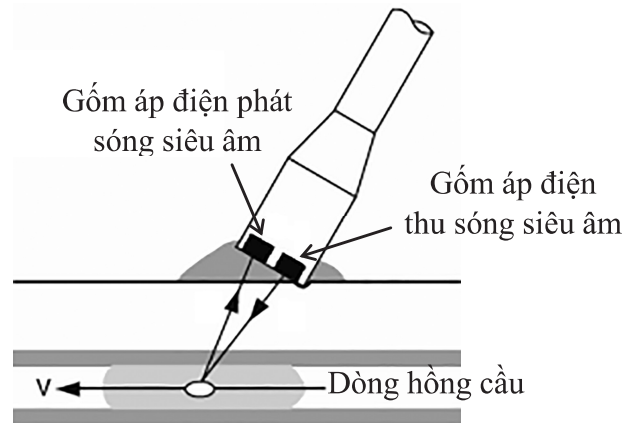
tín hiệu dịch chuyển Doppler lớn nhất ứng với góc $\theta = 0^\circ$ (ứng với chùm sóng siêu song song với dòng máu). Điều này không khả thi trong thực tế. Khi $\theta = 90^\circ$ (dòng máu vuông góc với chùm tia sóng siêu âm) thì không có tín hiệu dịch chuyển Doppler. Trong thực tế, khi thực hiện đo lưu lượng máu, góc siêu âm θ trong khoảng từ 30° đến 60° là phù hợp để đảm bảo tín hiệu dịch chuyển Doppler đáng tin cậy. Tránh sử dụng các góc lớn hơn 60° và lưu ý không có tín hiệu dịch chuyển Doppler ở góc $\theta = 90^\circ$.

4. Các loại siêu âm Doppler

4.1. Siêu âm Doppler liên tục

Trong siêu âm Doppler liên tục (CW Doppler), sóng siêu âm được phát ra liên tục

từ đầu dò và sự phản xạ của các sóng này được phân tích liên tục. Đầu dò siêu âm Doppler liên tục gồm 2 tinh thể (hoặc gôm) áp điện: một bên phát ra sóng siêu âm, một bên thu sóng phản xạ (hình 5).



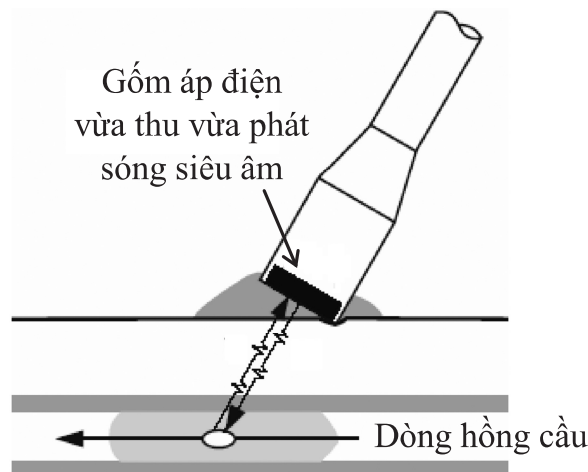
Hình 5. Sơ đồ cấu tạo và hoạt động của đầu dò siêu âm Doppler liên tục.

Vì phát, sóng thu sóng và phân tích tính toán độ dịch chuyển Doppler liên tục nên siêu âm Doppler liên tục có thể đo được vận tốc dòng máu rất lớn, phù hợp nhất với siêu âm tim. Nhược điểm là không ghi được tốc độ hồng cầu tại một vị trí xác định.

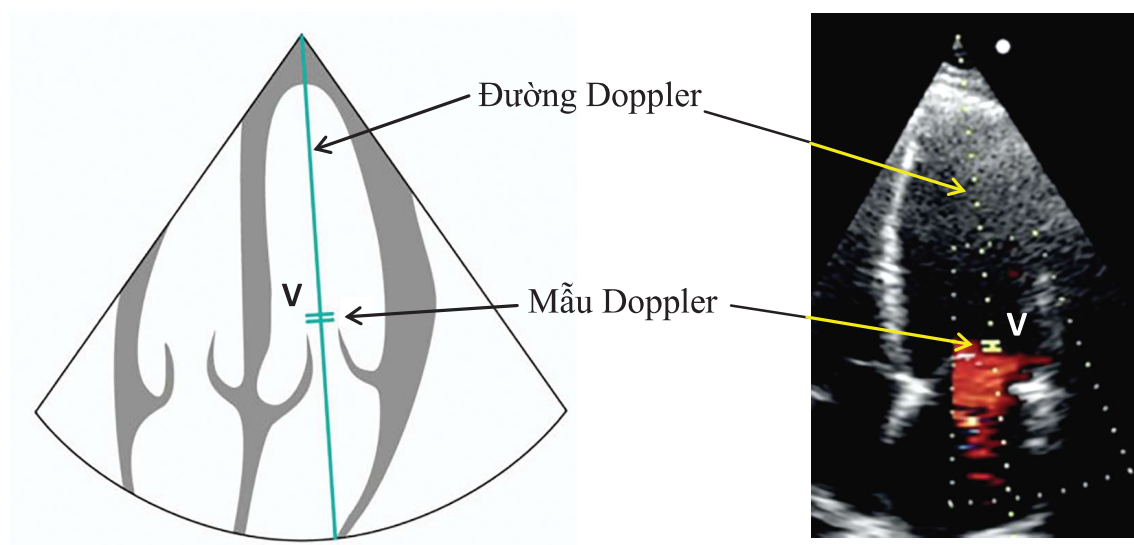
4.2. Siêu âm Doppler xung (PW)

Đầu dò siêu âm Doppler xung chỉ có một tinh thể (hoặc gôm) áp điện phát ra sóng âm ngắt quãng, dừng một lúc nhận sóng phản hồi rồi lại tiếp tục phát (hình 6). Doppler xung có thể phân tích sóng âm phản xạ từ một vị trí cụ

thể. Cho nên nó có khả năng xác định vận tốc hồng cầu tại từng vị trí (dọc theo một đường Doppler) (hình 7). Vì siêu âm Doppler xung gửi và phân tích sóng âm một cách đứt quãng, tuần tự. Máy siêu âm được lập trình để bỏ qua tất cả các tín hiệu, ngoại trừ những tín hiệu phản xạ từ một thể tích mẫu (V) ở độ sâu nhất định (hình 7). Độ sâu có thể được xác định vì tốc độ siêu âm không đổi trong cơ thể. Người vận hành chỉ định nơi cần thực hiện phép đo bằng cách di chuyển thể tích mẫu (V) dọc theo đường Doppler (hình 7).



Hình 6. Sơ đồ cấu tạo và hoạt động của đầu dò siêu âm Doppler xung.



Hình 7. Sơ đồ hoạt động của siêu âm Doppler xung.

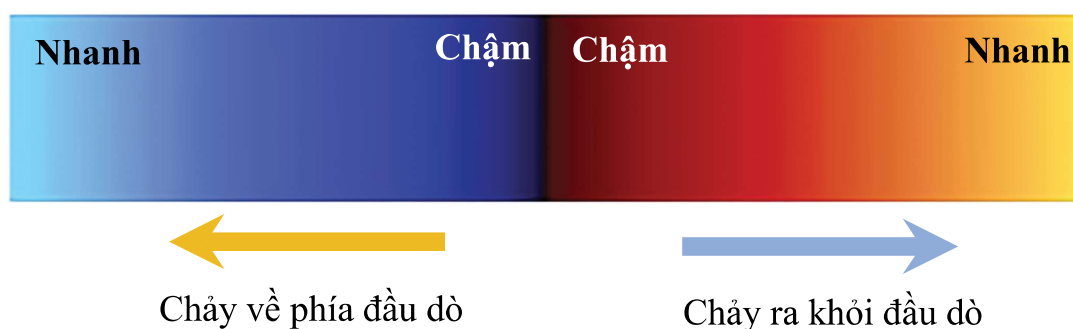
Tuy nhiên, Doppler dạng xung cần có thời gian để phân tích sóng âm phản xạ. Điều này làm giảm vận tốc tối đa có thể đo được bằng siêu âm Doppler. Nói chung, siêu âm Doppler xung không thể đo chính xác vận tốc dòng hồng lên trên 1,5 m/s.

4.3. Siêu âm Doppler màu (CDI)

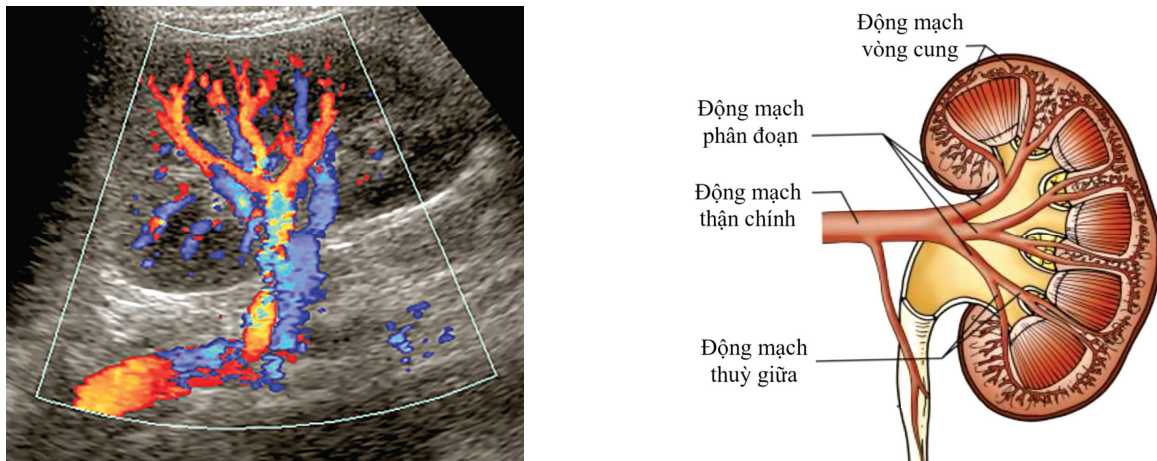
Siêu âm Doppler màu thực chất là siêu âm Doppler xung nhưng lấy thông tin từ nhiều điểm (nhiều cổng) khác nhau, gồm có nhiều đường tạo ảnh, trên mỗi đường có nhiều điểm tạo ảnh. Doppler màu lấy mẫu đồng thời nhiều vị trí dọc theo đường quét và xác định vận tốc của từng vị trí. Những vận tốc này sau đó được “mã hóa màu” bằng cách sử dụng bản đồ màu trong đó các màu cụ thể được sử dụng để thể

hiện các vận tốc cụ thể (hình 8). Theo quy ước, dòng chảy di chuyển ra xa đầu dò có màu xanh, lại gần đầu dò có màu đỏ (hình 9 và hình 10).

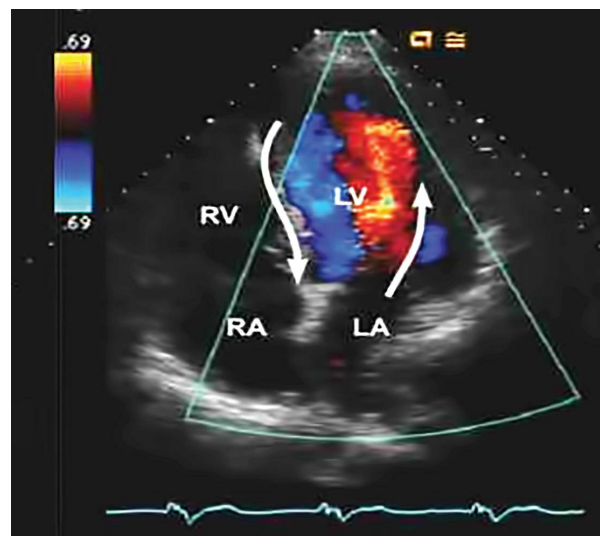
Dòng chảy của hồng cầu trong cơ thể có hai dạng khác nhau là dòng chảy lớp (tầng): khi các dòng chảy cùng hướng và vận tốc như nhau (hình 11a) và dòng chảy rối (cuộn xoáy) xảy ra khi dòng chảy bị xáo trộn tạo ra các xoáy, do hẹp mạch hoặc có trào ngược (hình 11a). Với dòng chảy rối, một số tế bào máu di chuyển rất nhanh và một số thì di chuyển rất chậm hoặc quay ngược trở lại (hình 11b). Hình 12 là sơ đồ về dòng chảy lớp ở những đoạn mạch, van tim bình thường và dòng chảy rối ở những đoạn mạch, van tim hẹp được phát hiện bằng siêu âm Doppler xung hay siêu âm Doppler màu.



Hình 8. Thang đo Doppler màu mô tả hướng dòng chảy và vận tốc tương đối.

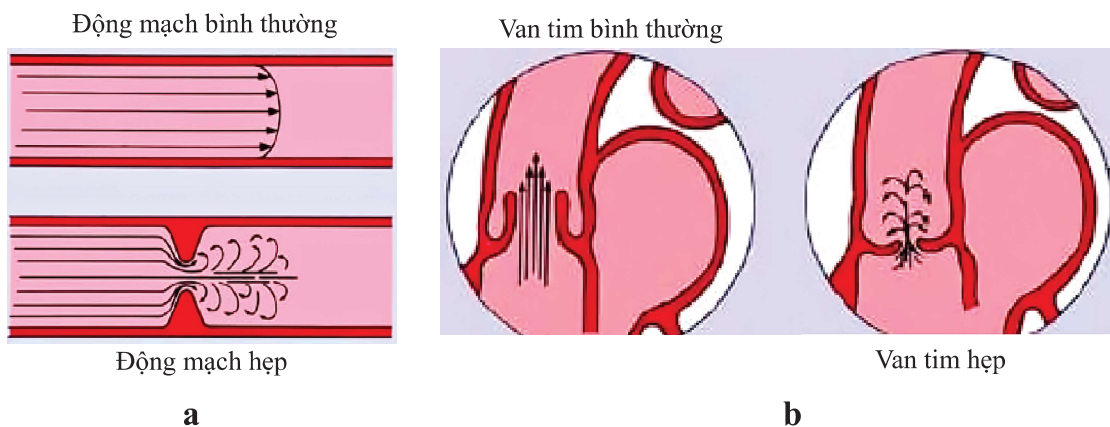


Hình 9. Hình ảnh động mạch và tĩnh mạch thận trái khi quét Doppler màu.

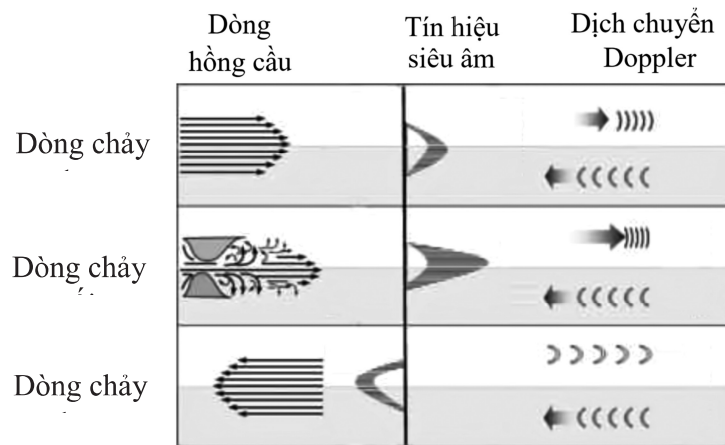


Hình 10. Siêu âm Doppler màu cho biết hướng dòng máu thời kỳ đầu tâm thu.

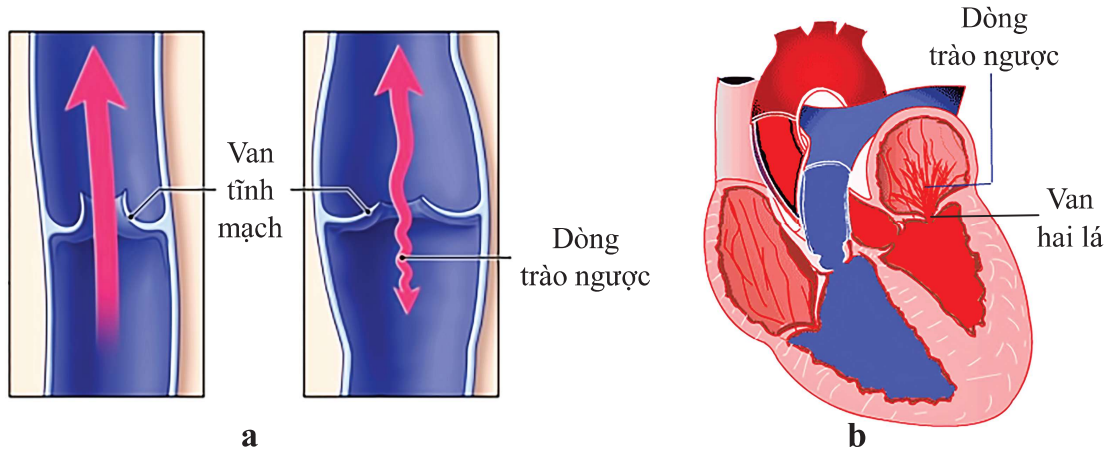
Phần lớn dòng chảy của hệ tim-mạch (bao gồm tim và các mạch máu lớn) là dòng chảy lớp có vận tốc vào khoảng 5cm/s đến 20cm/s và hiếm khi có vận tốc lớn hơn 1m/s.



Hình 11. Dòng chảy lớp tại những đoạn mạch, van tim bình thường và dòng chảy rối ở những đoạn mạch và van tim hẹp.



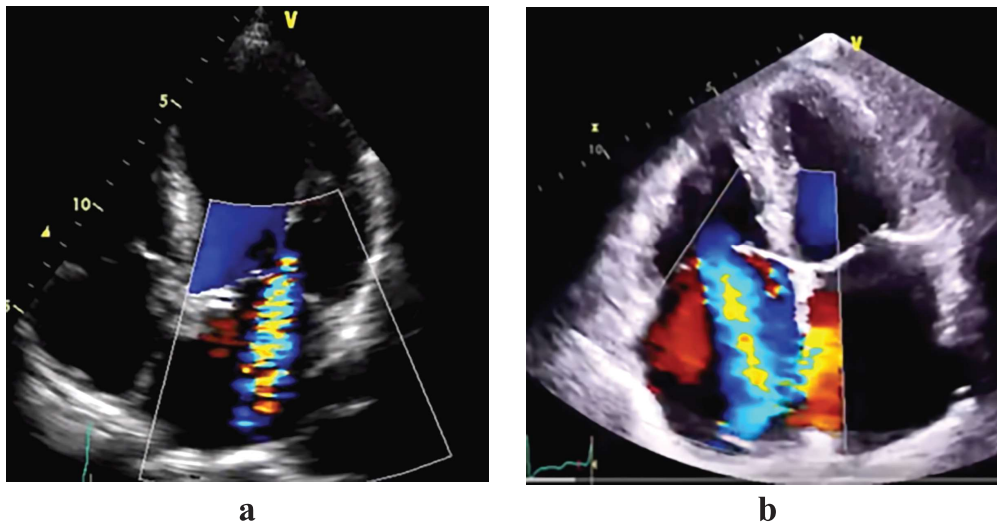
Hình 12. Phát hiện hẹp động mạch và hẹp van tim bằng siêu âm Doppler xung hay Doppler màu.



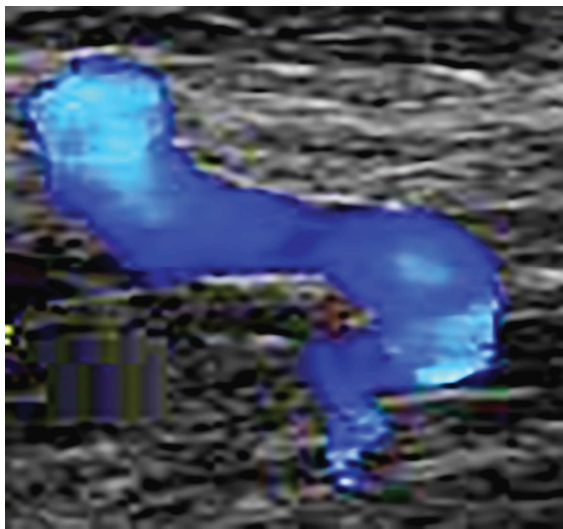
Hình 13. Hở van tĩnh mạch chi dưới (a) và hở van tim 2 lá (b) khi có dòng trào ngược.

Dòng chảy rối xuất hiện khi có sự tắc nghẽn mạch hoặc hẹp van tim ngăn chặn dòng chảy, làm cho hồng cầu chuyển động hỗn loạn, không cùng hướng, tạo nên vô số dòng xoáy và tăng vận tốc dòng chảy. Tắc nghẽn nặng,

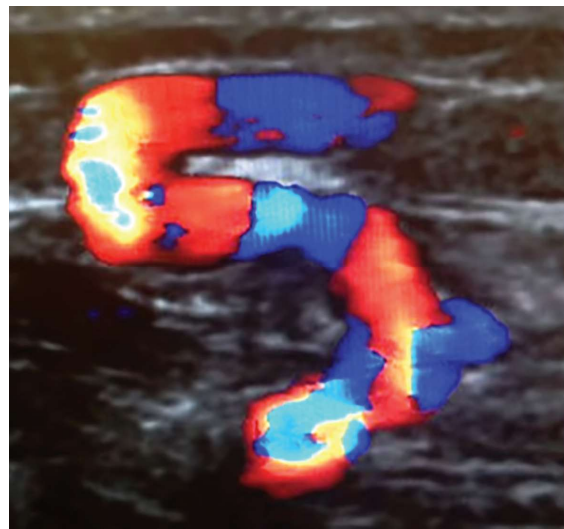
vận tốc dòng hồng cầu có thể lên tới 7m/s. Như vậy, nếu tín hiệu siêu âm cho thấy vận tốc dòng máu không có nhiều loạn và có độ lớn trong khoảng (5cm/s đến 20cm/s) thì chẩn đoán không có hẹp động mạch hay hẹp van tim.



Hình 14. Hình ảnh siêu âm Doppler màu cho thấy: a) Có trào ngược ở van 2 lá (có hở van 2 lá). b) Có trào ngược ở van 3 lá (có hở van 3 lá).



a



b

Hình 15. Hình ảnh siêu âm tĩnh mạch chi dưới: a) Không có trào ngược ở van tĩnh mạch (van tĩnh mạch không hở), chẩn đoán không có suy giãn tĩnh mạch; b) Có trào ngược ở van tĩnh mạch (bị hở van tĩnh mạch).

Khi vận tốc vượt quá giới hạn này thì khả năng có hẹp động mạch hoặc hẹp van tim. Hở van tim và suy giãn tĩnh mạch chi dưới có thể được phát hiện nhờ siêu âm Doppler màu. Bình thường, máu từ chân chảy về tim theo một chiều dưới sự hỗ trợ của các van trong tĩnh mạch (hình 13a). Khi các van tĩnh mạch suy giảm chức năng thì trong tĩnh mạch xuất hiện các dòng trào ngược (hình 13a). Tương tự, bệnh hở van tim cũng tạo ra các dòng trào ngược tại van 2 lá (hình 12b) hoặc van 3 lá. Khi âm Doppler màu dựa màu sắc có thể chẩn đoán được bệnh hở van tim và suy giãn tĩnh mạch. Hình 14a và 14b cho thấy có sự pha trộn màu trong hình ảnh siêu âm Doppler, chứng tỏ ở đây đã có 2 dòng hồng cầu chảy ngược chiều nhau, tức là đã có trào ngược. Nên chẩn đoán hở van 2 lá và hở van 3 lá. Hình ảnh siêu âm Doppler màu tĩnh mạch chi dưới (hình 15a) cho thấy chỉ có một màu xanh, chứng tỏ dòng hồng cầu chỉ chảy theo một chiều (không có trào ngược) tại van tĩnh mạch, nên chẩn đoán không có suy giãn tĩnh mạch. Hình 15b cho

thấy có lẫn màu xanh trộn vào cùng màu đỏ, tức là ngoài dòng hồng cầu chảy lại gần đầu đo (màu đỏ) còn có một dòng máu chảy ngược lại (màu xanh). Như vậy là có trào ngược tại van tĩnh mạch. Nên chẩn đoán có suy giãn tĩnh mạch.

5. Kết luận

Hiệu ứng Doppler cho phép xác định hướng và vận tốc của một đối tượng chuyển động. Dựa vào đặc điểm này của hiệu ứng Doppler đối với sóng siêu âm ở tần số trong khoảng (2 MHz đến 20 MHz), kỹ thuật siêu âm Doppler ra đời. Trong đó, có siêu âm Doppler xung và siêu âm Doppler màu có thể xác định được chiều, tốc độ dòng hồng cầu trong mạch máu và tim. Hai kỹ thuật siêu âm này cho phép xác định được chuyển động rối của dòng máu ở động mạch và tim, giúp chẩn đoán hẹp động mạch và van tim với độ chính xác cao. Siêu âm Doppler màu còn xác định được dòng máu trào ngược ở van tim và van tĩnh mạch chi dưới, từ đó chẩn đoán được bệnh hở van tim và suy giãn tĩnh mạch chi dưới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] B. Schwebe (2021), *The Doppler Effect: Now Widely Accepted and Easy to Use, Despite Its Initial Rejection*. <https://www.digikey.com/en/blog/the-doppler-effect-now-widely-accepted-and-easy-to-use>.
- [2] B. Khose (2022), Investigating the Doppler Effect when the Wave Source Moves in a Circular Path, *Journal of Student Research* 11(4).
- [3] A. D. Paik (2021), Doppler effect and its application, *Indian Association for the Cultivation of Science*.
- [4] Florian Ion T. Petrescu (2015), Improving Medical Imaging and Blood Flow Measurement by using a New Doppler Effect Relationship, *American Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- [5] P. Hoskins (2019), Principles of Doppler ultrasound, *Diagnostic Ultrasound*, 3rd Edition.
- [6] R. S. Moorthy (2011), Doppler ultrasound, *Med. J. Armed Forces India* 58(1), pp. 1 - 2.
- [7] G. A. Khalid (2012), The Effect of Doppler Phenomenon on the Speed of Blood Flow, *Al-Khwarizmi Engineering Journal* 8(4), pp. 26- 39

Ngày nhận bài: 07/10/2023

Ngày gửi phản biện: 10/10/2023

Ngày duyệt đăng: 20 /11/2023