

SECCION IV
INSRUMENTACIÓN DOPPLER

IVA. Efecto Doppler

IVB. Instrumentación Doppler

Capítulo IV A

EFEECTO DOPPLER

Ramón Vila i Coll
Ciudad Sanitaria Universitaria de Bellvitge. Barcelona

A. Efecto Doppler

- A. El *efecto doppler* es un fenómeno en el cual se observa un aparente cambio de la frecuencia cuando hay un movimiento relativo entre la fuente de emisión y el receptor.
- B. Este fenómeno, que se produce con cualquier tipo de onda, se puede ilustrar usando una analogía entre las ondas y las olas que golpean un barco. Supongamos que el viento sopla con una velocidad constante y en una única dirección, en ese caso la distancia entre las crestas de las olas será uniforme. Si el barco está parado, la frecuencia de las olas que lo golpeen será constante. Pero si el barco se dirige hacia el viento encontrará un mayor número de olas por fracción de tiempo, es decir que un sujeto situado en la cubierta del barco apreciaría un aumento relativo de la frecuencia. Por el contrario si el barco invierte su dirección y se aleja del viento, el número de olas que le alcanzarán por fracción de tiempo disminuirá y por lo tanto apreciará una disminución relativa de la frecuencia. Cuanto más rápido se mueva el barco en una u otra dirección mayor será la diferencia entre la frecuencia real y la observada.

II. Cambio de frecuencia doppler:

- A. La diferencia entre la *frecuencia emitida* y la *frecuencia observada*, cuando existe un movimiento relativo entre emisor y receptor, es lo que se denomina cambio de frecuencia doppler o simplemente *frecuencia doppler*. Este cambio depende de la velocidad con que se muevan la fuente de emisión, el receptor o ambos, es decir que un incremento en la velocidad relativa entre fuente y receptor causará un mayor cambio en la frecuencia observada. El cambio de frecuencia doppler depende también de la velocidad de propagación del sonido en el medio y de la frecuencia emitida.

- B. En el caso de un *emisor de ultrasonidos*, el haz de ultrasonidos al chocar contra un reflector en movimiento, como por ejemplo los hematíes, será reflejado con un cambio en su frecuencia que dependerá de la velocidad del reflector, la frecuencia emitida y la velocidad de propagación en el tejido

III. Ecuación doppler:

- A. La *frecuencia doppler* (f_D) que se produce al explorar un cuerpo en movimiento en el tejido se calcula según la siguiente formula:

$$f_D = \frac{2v f}{c}$$

donde c es la *velocidad del sonido* en el tejido, v la *velocidad del cuerpo* en movimiento y f la *frecuencia del transductor*.

- B. Esta ecuación es en realidad una aproximación simplificada del cambio de frecuencia doppler, que se basa en el hecho de que las velocidades fisiológicas de la sangre, incluso en casos extremos, son relativamente pequeñas si las comparamos con la *velocidad de propagación del sonido* (1540 m/s).
- C. Recordemos que la frecuencia de la onda se mantiene constante (es una función del medio que estamos explorando). El cambio de frecuencia observado es debido al movimiento existente entre emisor y reflector. La ecuación doppler determina que un aumento de velocidad del reflector producirá un mayor cambio de frecuencia doppler, por lo tanto si podemos medir este cambio podremos conocer la *velocidad del reflector* (es decir de los hematíes).

I. Angulo doppler

- A. Tal como se ha expresado, la ecuación doppler es valida solamente cuando el reflector se mueve en la misma dirección del haz. Cuando el ángulo existente entre el haz y la dirección del reflector (dirección del flujo) es distinto de 0 deberemos modificar la formula incluyendo el coseno de este ángulo. Este ángulo es lo que se conoce como *ángulo doppler*:

$$f_D = \frac{2v f \cos \phi}{c}$$

- B. Para ángulos superiores a 90° el coseno es negativo, produciendo frecuencias doppler negativas. Para un determinado flujo, cuanto mayor es el ángulo doppler, menor es la frecuencia doppler.
- C. Mediante la ecuación doppler, si conocemos la frecuencia de emisión, el cambio de frecuencia doppler y el ángulo doppler podremos conocer la *velocidad del reflector* :

$$v = \frac{f_D c}{2 f \cos \phi}$$

- D. Es muy importante destacar que los *cálculos de velocidad* basados en la frecuencia doppler sólo pueden realizarse conociendo el ángulo doppler. Por lo tanto la fiabilidad con la que se determine este ángulo incidirá en la fiabilidad de la velocidad estimada. La medición se realiza normalmente orientando una línea en la imagen ecográfica de forma tal que se sitúe paralela a la supuesta dirección del flujo (normalmente paralela a la pared del vaso). Esta es una operación subjetiva realizada por el explorador. El error en la estimación de este ángulo es más importante para grandes ángulos que para pequeños. Por esta razón, y dado que los cambios de frecuencia doppler se hacen muy pequeños con grandes ángulos, las mediciones de velocidad con doppler no son fiables con ángulos doppler superiores a 60-70°. Por otra parte dado que la propagación del sonido no es igual en la sangre que en los tejidos adyacentes, se produce *refracción* del sonido al pasar del tejido a la sangre. Esta refracción, cuando el ángulo es inferior a 25°, puede provocar que el sonido no penetre en la sangre y sea totalmente reflejado.

II. Procesado de la señal

- A. Las unidades doppler están diseñadas para obtener el cambio de frecuencia doppler de la señal recibida. Este cambio de frecuencia se halla en el rango de *frecuencias audibles* (típicamente entre 200 y 15.000 Hz) lo cual permite la utilización de *amplificadores de audio* o altavoces como sistemas de presentación de la señal.

- B. Para cada reflector o hematíe que se mueve con una determinada velocidad, la ecuación doppler dará la relación entre la frecuencia doppler y esa velocidad en concreto. Sin embargo en un vaso sanguíneo y sobre todo en zonas de bifurcaciones, hay muchos reflectores con velocidades distintas lo cual producirá un determinado rango o **espectro de frecuencias doppler**. Este espectro se originará de hecho del análisis de las frecuencias doppler detectadas en un pequeño volumen de sangre que es lo que se conoce como **volumen de muestra**.
- C. La *representación gráfica* del espectro doppler puede simplemente analizar la velocidad o frecuencia doppler máxima y representarla en función del tiempo mediante un registrador de papel continuo. Sin embargo, para representar la señal doppler, desglosándola en sus componentes individuales, deberemos realizar lo que se conoce como **análisis espectral**. El oído humano es capaz de realizar este análisis, descomponiendo sonidos complejos en las distintas frecuencias que los integran y gracias a ello, de la misma manera como podemos diferenciar entre el sonido de un violín y el de una viola, podremos también discernir entre un sonido doppler normal y uno patológico.
- D. La representación gráfica del análisis espectral es bastante compleja y requiere la utilización de un sistema de descomposición matemática de la señal o el empleo de bancos de filtros paralelos. La forma mas habitual consiste en la utilización de un algoritmo matemático llamado **Transformación Rápida de Fourier** (Fast Fourier Transform, FFT) con el cual se consigue descomponer la señal en las frecuencias simples que la componen. La combinación algebraica de los componentes nos daría nuevamente la onda original. Mediante la transformación rápida de Fourier obtenemos una gráfica en la que la frecuencia doppler se muestra en el eje vertical y el tiempo en el horizontal y en la que la *amplitud o potencia* de cada componente del análisis se presenta en *escala de grises*. La potencia de la señal doppler es proporcional a la densidad de células sanguíneas. Así pues un punto brillante en un gráfico de análisis espectral significa que en ese instante se detecto un gran número de células con esa determinada velocidad o frecuencia doppler, mientras que una zona negra significa que no se detectaron elementos con esa velocidad.

Capítulo IV B

INSTRUMENTACIÓN DOPPLER

Ramón Vila i Coll
Ciudad Sanitaria Universitaria de Bellvitge. Barcelona

I. Doppler continuo

- A. Las unidades de *doppler continuo* utilizan dos cristales en el transductor: un para emitir continuamente la onda de ultrasonido con una frecuencia constante y el otro para recibir continuamente los ecos reflejados (Fig 1)

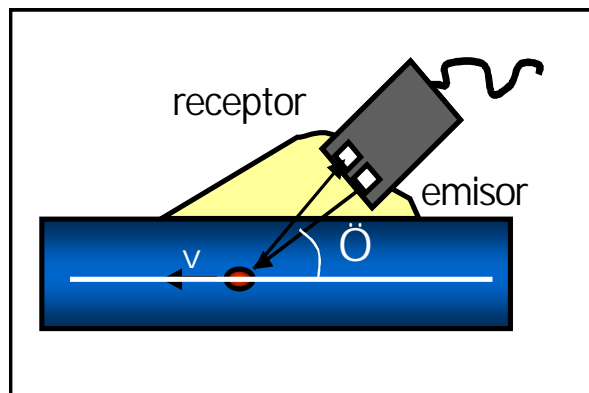


Fig 1. Unidad de Doppler continuo.

- B. El posicionado de la *zona de muestreo* que exploramos con este transductor se realiza mediante el diseño geométrico de los cristales. Los dos elementos, *emisor* y *receptor* se sitúan ligeramente angulados para permitir el solapado de las respectivas líneas de emisión y recepción. Para poder detectar un reflector en movimiento deberá situarse en el trayecto del haz emitido y el reflejo producido por este deberá impactar contra el cristal receptor. Dependiendo de la exploración que queramos realizar, seleccionaremos un transductor con una frecuencia y profundidad de foco adecuadas.

- C. Para frecuencias por debajo de 7 MHz, el transductor consiste en dos elementos con forma de D obtenidos al cortar un disco piezoeléctrico por la mitad. Los elementos se sitúan lo más próximos posibles uno del otro pero aislados eléctrica y mecánicamente. En algunos casos se angulan ligeramente para maximizar la zona de solapado del haz emitido y reflejado.
- D. El eco recibido de un *reflector en movimiento* habrá cambiado su frecuencia por encima o por debajo del valor de emisión, dependiendo de la dirección del reflector. El proceso de *detección* comentado hasta ahora es capaz de identificar que se ha producido un cambio de frecuencia, pero no si este es positivo o negativo.
- E. Existen varios métodos de procesado de la señal que permitirán distinguir los movimientos que se acercan de los que se alejan del transductor. Aquellos aparatos que dispongan de sistema de análisis de la dirección los denominaremos **bidireccionales** y los que no sean capaces de identificar si la frecuencia doppler es positiva o negativa serán **unidireccionales**.
- F. **Limitaciones:** La señal doppler obtenida con un aparato de emisión continua puede ser extremadamente compleja, debido a que en ella se sumarán las frecuencias doppler todo lo que se mueva en el trayecto del haz. Si el volumen focal incluye múltiples vasos, la superposición de todas las frecuencias doppler resulta indescifrable. Además el doppler continuo no ofrece información de profundidad y por lo tanto no puede aplicarse un sistema de compensación por profundidad y ello conduce a que los reflectores superficiales produzcan señales mas fuertes que los profundos.

II. Doppler pulsado

- A. Las unidades de *doppler pulsado* utilizan el principio de recorrido del eco para ofrecer *información cuantitativa* de la *profundidad* a la que se produce el cambio de frecuencia doppler. Si conocemos el tiempo que transcurre entre la *emisión* de un sonido y la *recepción* del eco podremos, conociendo la velocidad de propagación del sonido en el medio, conocer la distancia o profundidad a la que se halla el reflector. Así pues un transductor de doppler pulsado es estimulado eléctricamente para producir un breve emisión (*pulso*) de ultrasonidos y después queda silente a la escucha del eco antes de realizar una nueva emisión.
- B. La determinación de la *frecuencia del pulso* requiere que estos sean más largos que los utilizados en ecografía (mínimo de cuatro ciclos). Las señales recibidas son filtradas electrónicamente ("*gated*") de forma que solamente los ecos detectados en un estrecho intervalo de tiempo después del pulso y que corresponden a una determinada profundidad, contribuyan a la señal doppler.

- C. El espacio de tiempo entre emisión y espacio de recepción o “puerta” determina la *localización axial* del *volumen de muestra* y la cantidad de tiempo que la “puerta” este activada determinará la *longitud axial* de este volumen. Estos parámetros son seleccionables por el explorador, mientras que las dimensiones laterales del mismo dependen de la anchura del haz, lo cual a su vez depende de la frecuencia y características de enfoque del transductor.
- D. Un sistema de doppler pulsado tiene algunas características peculiares que es preciso conocer. Así, denominamos **frecuencia de repetición del pulso (PRF)** al número de veces que un cristal es *estimulado electrónicamente* o “pulsado” en cada segundo. Dado que un cristal no puede emitir y recibir a la vez, existe un límite en cuanto a la frecuencia con que puede ser “pulsado”. La *frecuencia de repetición de pulso máxima* (PRF_m) esta limitada por la *profundidad máxima* a la que queramos explorar (R) y por la *velocidad del ultrasonido* en el medio (c), según la siguiente ecuación:

$$PRF_m = \frac{c}{2 R}$$

El factor 2 cuenta por el doble recorrido del haz, de la sonda al reflector y de vuelta hasta la sonda. Así pues la PRF máxima es inversamente proporcional a la profundidad que queramos explorar o lo que es lo mismo, cuanto mayor sea la PRF menor será la profundidad explorada.

- E. El tiempo (t) necesario para que la onda llegue a la profundidad R viene dado como :

$$R = c t$$

por lo tanto:

$$PRF_m = \frac{c}{2 c t} = \frac{1}{2 t}$$

- F. En el *tejido humano* son necesarios 13 μs (13 x 10⁻⁶ s) para detectar un reflector por cada centímetro de profundidad. Con lo cual, conociendo la profundidad máxima que queremos explorar podremos calcular la PRF máxima.
- G. La instrumentación requerida para identificar si un eco corresponde a un reflector en movimiento (y por lo tanto con un cambio de frecuencia doppler) o a uno estático, precisa comparar la fase del eco con una

señal de referencia. Se considera que dos ondas están en *fase* cuando sus puntos máximo, mínimo y cero se producen a la par. Un eco de un reflector estacionario tendrá la misma fase que la señal de referencia, mientras que un eco de un reflector en movimiento cambia de fase a causa del cambio de frecuencia doppler.

III. Límite Nyquist

- A. Como mínimo es preciso realizar dos “muestreos” o pulsos dentro de un mismo ciclo de la señal doppler para determinar sin ambigüedad la frecuencia doppler de un reflector. Es decir que se requiere un mínimo de dos muestras para determinar que la amplitud ha oscilado por encima o por debajo de 0 en el intervalo de tiempo de un periodo. Esta límite en la detección de la velocidad se conoce como **límite Nyquist** para el doppler pulsado y supone que la frecuencia doppler máxima, f_{Dmax} , que puede detectarse corresponde a la mitad de la PRF o, lo que es lo mismo, que la PRF debe de ajustarse para que sea al menos el doble de la frecuencia doppler máxima que queramos detectar.

$$\text{Límite Nyquist} = f_{Dmax} = \frac{\text{PRF}}{2}$$

- B. Para medir reflectores que se mueven a una velocidad elevada y que producen un gran cambio de frecuencia doppler, es preciso trabajar con PRF altos, sin embargo, un elevado PRF limita la profundidad que podemos explorar. Además el problema todavía es mas complejo ya que el cambio de frecuencia doppler depende de la frecuencia de emisión de la sonda. La siguiente formula relaciona la profundidad que nos interesa explorar (R) con la frecuencia del transductor (f), el ángulo doppler (ϕ) y la velocidad máxima del reflector (V_{max}):

$$V_{max} = \frac{C^2}{8 f R \cos \phi}$$

De esta fórmula se desprende, en primer lugar, que si aumenta la profundidad de exploración, la velocidad máxima que puede medirse disminuye, y en segundo lugar que una sonda de frecuencia baja permite detectar velocidades más altas.

- C. La siguiente tabla relaciona la velocidad máxima detectable en función de la profundidad y frecuencia de la sonda para un ángulo doppler de 0° . Si el ángulo no es 0. la velocidad se incrementa por el factor $1/\cos \phi$.

	Límite máximo de velocidad (cm/s)		
Profundidad (cm)	2 MHz	5 MHz	10 MHz
1	1480	590	295
5	295	120	60
10	150	60	30
15	100	40	20
20	75	30	15

IV. Aliasing

- A. Al utilizar doppler pulsado en casos de frecuencias doppler muy elevadas (velocidades muy altas), si la frecuencia de muestreo no es adecuada, se produce un artefacto que mostrará en pantalla frecuencias doppler más bajas, ello se conoce como **aliasing**, y es debido que frecuencias doppler elevadas están siendo inadecuadamente muestreadas por el sistema de ultrasonidos. Como consecuencia, estas señales están siendo ambiguamente detectadas como señales de baja frecuencia y por lo tanto mostradas así en el análisis espectral.
- B. El problema del aliasing puede rectificarse incrementando la escala de velocidad del espectro lo cual aumenta la PRF. Un ejemplo visual del fenómeno de aliasing lo tenemos en las películas del Oeste, en la que las ruedas de las carretas, llegada una determinada velocidad parece que empiecen a rodar en sentido contrario, ello es debido a que el cine es de hecho un muestreo de imágenes fijas obtenidas con un intervalo determinado. Si el movimiento es muy rápido, el muestreo no puede presentarlo correctamente. Como se ha comentado anteriormente, en ultrasonidos el límite para la correcta interpretación de la velocidad de un reflector viene dado por el límite Nyquist, el cual depende de la PRF.

V. Ecodoppler

- A. Las unidades de ecodoppler combinan ecografía en tiempo real con doppler pulsado o continuo. La imagen en tiempo real muestra los reflectores estacionarios, mientras que el modo doppler ofrece información de flujo en la zona seleccionada. La visión de estructuras anatómicas permite posicionar el doppler. Un aparato de ecodoppler debe aunar funciones de

imagen con funciones doppler y dado que las especificaciones óptimas para el diseño de estas dos funciones no son idénticas, se han desarrollado gran variedad de sondas, mecánicas, fásicas anulares, fásicas lineales y lineales que pueden operar con imagen en tiempo real y doppler. Los distintos tipos de sonda existentes han sido ya estudiados en el capítulo anterior.

VI. Doppler color

- A. El *doppler color* o imagen de flujo en color (Colour-flow imaging) es un sistema de exploración que, sobre la imagen en modo B en escala de gris, superpone una imagen en color de las zonas donde se detecta un cambio de frecuencia doppler. Esto permitirá mostrar el flujo en los vasos sanguíneos, y en cualquier lugar donde la sangre se este moviendo.
- B. La zona de la imagen en modo B donde se explora la existencia de flujo se denomina “**caja de color**”. Esta caja esta compuesta por una serie de píxel coloreados, cuya saturación de color es proporcional a la frecuencia doppler media de los ecos procedentes del volumen que equivale a ese píxel. La codificación de color muestra los reflectores que se mueven a velocidad alta con un color más brillante y los lentos más oscuros, además codifica con un color distinto, habitualmente rojo y azul los flujos que se dirigen hacia la sonda y los que se alejan, frecuencia doppler positiva y negativa respectivamente.
- C. Para obtener una adecuada estimación de la frecuencia doppler media, la sonda debe enviar un mínimo de ocho a diez pulsos por cada línea de color y ello tiene importantes repercusiones sobre el número de pantallas por segundo que se pueden mostrar (frame rate), que será más lento cuanto mayor sea la “caja”.
- D. El doppler color facilita la investigación hemodinámica ya que ofrece información sobre la presencia de flujo, la dirección del flujo, sus características y la existencia de diferencias focales de velocidad en el mismo vaso. Sin embargo no es apropiado para medir directamente la velocidad de flujo, ya que el color representa de hecho una media de velocidad y no la velocidad máxima. Tampoco es adecuado para medir el diámetro de un vaso, ya que el procesado de la señal y los filtros de pared utilizados pueden hacer confundir el límite real del vaso.
- E. La calidad de la imagen de doppler color viene condicionada principalmente por la capacidad del aparato en la discriminación del movimiento (capacidad de distinguir el movimiento de la sangre de otros movimientos, cardiaco, respiratorio, etc), resolución espacial y temporal y uniformidad (capacidad de mostrar de igual manera dos estructuras iguales aunque estén en zonas diferentes de la caja de color). Todos estos parámetros pueden optimizarse ajustando multitud de parámetros como ganancia del color, persistencia, prioridad, mapas de color, etc, adaptándolos a cada tipo de exploración y territorio de interés.

VII. Doppler transcraneal

- A. La utilización de doppler pulsado de baja frecuencia (1-2 MHz.) y gran intensidad permite atravesar el cráneo en las áreas en las que el hueso es más delgado y obtener señal doppler de las arterias intracraneales. Estas áreas del cráneo son las llamadas “ventanas óseas”.
- B. La profundidad a la que se sitúan las arterias en la base del cráneo varía relativamente poco entre individuos. El doppler pulsado permite conocer a qué profundidad se halla la arteria que estamos insonando y además, cuál es la dirección del flujo que detectamos. Combinando profundidad, dirección y velocidad de flujo podremos identificar los distintos vasos.

VIII. Ecocontrastes

- A. Con el objeto de mejorar la capacidad de la sangre para reflejar los ultrasonidos, se han desarrollado una serie de sustancias que, en general, son diversas formas de conseguir microburbujas encapsuladas y estables que puedan administrarse por vía intravenosa. Estos ecocontrastes permiten mejorar la capacidad del ecógrafo en la detección de flujos bajos. Además, es posible incrementar todavía más esta capacidad utilizando técnicas de detección de armónicos. Las pequeñas microburbujas resonan y emiten ondas con frecuencias armónicas. Si se sintoniza el receptor con esa frecuencia armónica es posible aumentar el contraste entre luz del vaso y tejido circundante, ya que los artefactos producidos por ondas reflejadas en el tejido no tienen una frecuencia armónica y por lo tanto podemos identificarlos fácilmente y eliminarlos.

PREGUNTAS

1. Cual de las siguientes afirmaciones es cierta respecto al efecto doppler:
 - a) Se produce cuando hay un movimiento relativo entre emisor y receptor
 - b) Depende de la velocidad del receptor
 - c) Consiste en un cambio de la frecuencia emitida producido por receptor
 - d) A y B
 - e) Todas las anteriores

2. El ángulo doppler :
 - a) Es el ángulo existente entre el haz de ultrasonidos y la dirección del reflector
 - b) Cuanto mayor sea el ángulo, menor será la frecuencia doppler que detectemos
 - c) Para estimaciones de velocidad debe ser inferior a 60°
 - d) B y C
 - e) Todas las anteriores

3. Una unidad de doppler continuo:
 - a) Permite discriminar en profundidad
 - b) Puede producir aliasing
 - c) Utiliza dos cristales piezoelectricos
 - d) A y C
 - e) Todas las anteriores

4. La frecuencia máxima en el análisis espectral:
 - a) Viene determinada por el valor de frecuencia con más prevalencia
 - b) Representa una media de la velocidad de todos los reflectores
 - c) Se correlaciona con los reflectores que se mueven más rápido
 - d) Es independiente del tiempo
 - e) Todas las anteriores

5. El análisis espectral
 - a) Muestra la importancia relativa de cada una de las frecuencias que componen la señal doppler
 - b) Se obtiene habitualmente por transformación rápida de Fourier
 - c) Los puntos más brillantes simbolizan frecuencias más altas.
 - d) A y B
 - e) Todas las anteriores

6. Cual de las siguientes es cierta respecto al aliasing
 - a) Es debido a que frecuencias doppler altas son inadecuadamente muestreadas por el aparato.
 - b) Puede evitarse disminuyendo la PRF
 - c) Disminuye si aumentamos la profundidad de muestreo
 - d) A y B
 - e) Todas las anteriores

7. La frecuencia de repetición de pulso máxima

- a) Depende de la velocidad de propagación del ultrasonido en el medio
- b) Depende del límite Nyquist
- c) Es inversamente proporcional a la profundidad a explorar
- d) A y C
- e) Todas las anteriores

8. ¿Que información es típicamente codificada con la escala de color del doppler color?

- a) La velocidad máxima
- b) La velocidad media
- c) Todos los componentes de velocidad en cada píxel
- d) No codifica velocidades
- e) Ninguna de las anteriores

9. Que podemos hacer para aumentar el "frame rate" en el doppler color

- a) Disminuir el tamaño de la caja de color
- b) Explorar campos más profundos
- c) Cambiar la inclinación de la caja de color (steering)
- d) Cambiar el mapa de color
- e) B y C

10. El ecocontraste:

- a) Se consigue mediante la utilización de microburbujas encapsuladas
- b) Permite detectar flujos bajos
- c) Permite la utilización de técnicas de detección de armónicos
- d) A y B
- e) Todos los anteriores

Respuestas 1-D, 2-E, 3-C, 4-C, 5-D, 6-A, 7-D, 8-B, 9-A, 10-E