

2. ECHOKARDIOGRAFIA

R. Erbel

2.1. Podstawy echokardiografii

Pod pojęciem echokardiografii rozumie się badanie serca i naczyń odchodzących od serca za pomocą ultradźwięków. Ultradźwięki to fale mechaniczne, które, potrzebują odpowiedniego środowiska, aby się móc rozprzestrzeniać, i charakteryzują się naprzemienną kompresją i dekompresją. Słyszalny zakres ultradźwięków leży pomiędzy 8000 a 20 000 Hz (drgań na sekundę). W kardiologii stosuje się częstotliwości pomiędzy 2 a 7 MHz, maksymalnie aż do 40 MHz.

Aby wygenerować ultradźwięk, potrzebne są kryształy piezoelektryczne. Zmieniają one energię elektryczną w mechaniczną i na odwrót (ryc. 2.1).

Ultradźwięki ulegają odbiciu od powierzchni, na które natrafiają na swojej drodze, przy czym stopień odbicia zależy m.in. od charakterystyki danej powierzchni.

➡ Najważniejsze w skrócie

Im większa różnica gęstości powierzchni odbijających, tym silniejsze odbicie.

Ponieważ powietrze odbija do 99% ultradźwięków, konieczny jest ścisły kontakt głowicy z po-

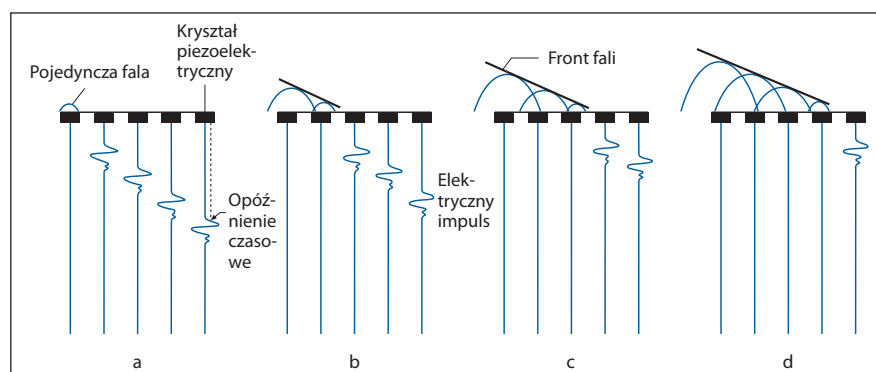
wierzchnią badaną. Dodatkowe czynniki, które wpływają na stopień odbicia ultradźwięków, to kąt padania, struktura powierzchni i głębokość, na jaką wnikają. Im głębiej położona badana struktura, tym większe jest konieczne wzmocnienie ultradźwięków.

➡ Najważniejsze w skrócie

Im wyższa częstotliwość ultradźwięków, tym mniejsza maksymalna głębokość ich wnikania.

Do badań osób dorosłych używa się głowic 2-4 MHz, a w przypadku dzieci głowic 5-7 MHz. Dostępne są również głowice pozwalające na zmianę częstotliwości od 2 do 7 MHz. Taka częstotliwość nie niesie żadnego istotnego zagrożenia dla zdrowia i życia.

Obecnie stosuje się prawie wyłącznie układy oparte na technice *phased array*, które umożliwiają emisję ultradźwięków o kącie rozwarcia wiązki do 90°, a co za tym idzie – kierowanie tą wiązką i jej ogniskowanie również w takim zakresie. Głowice ultradźwiękowe składają się z 64-256 kryształów piezoelektrycznych, które są sterowane elektrycznie niezależnie od siebie oraz umożliwiają generowanie i odbieranie ultradźwięków.



Ryc. 2.1. Echokardiografia dwuwymiarowa. Schemat powstawania obrazu na drodze zastosowania ultradźwięków za pomocą techniki *phased array*. Przesunięta czasowo w fazie generacja sygnału powoduje powstanie frontu fali.

Niezależne sterowanie elektryczne umożliwia generowanie szerokiej fali ultradźwiękowej. Dzięki specjalnej technologii istnieje możliwość filtrowania w odpowiedni sposób ultradźwięków, które powracają do głowicy pod odpowiednim kątem lub z określonej głębokości. Ogniskowanie wiązki przejmują najpierw kryształy znajdujące się na obrzeżach głowicy, a następnie te, które są położone bliżej jej centrum. Dzięki postępom na polu mikrotechniki stało się możliwe obrazowanie w technice 3D, a za jednoczesne przetwarzanie danych odpowiada do 3000 elementów. Dzięki równoległemu przetwarzaniu danych możliwe stało się zwiększenie częstotliwości, z jakimi w technikach dwu- i trójwymiarowych generowany jest obraz.

Ultradźwięki odbijające się od granic dwóch ośrodków mogą wielokrotnie wędrować pomiędzy głowicą a powierzchnią, od której zostały odbite. W przypadku analizy nie 1., lecz 2. lub 3. odbitego sygnału możliwe staje się lepsze eliminowanie artefaktów powstających np. w pobliżu głowicy. Jest to szczególnie ważne przy obrazowaniu granicy wsierdzia, obojętnie czy z zastosowaniem, czy też bez zastosowania środków cieniujących.

Również fale, które ulegają rozproszeniu, dostarczają istotnych informacji. Zmiany w zakresie rozproszonych fal ultradźwiękowych w zależności od fazy cyklu serca używane bywają do rozgraniczenia pomiędzy żywną, niedokrwioną i martwą tkanką serca, a także do rozpoznawania reakcji odrzucenia przeszczepu i zapaleń mięśnia sercowego. Powtarzalność uzyskanych tą drogą wyników jest niestety niewielka. Technika ta, zwana *integrated backscatter*, wykorzystywana bywa przy automatycznym rozpoznawaniu granic miokardium i analizie ich przemieszczania w czasie trwania cyklu serca – akustyczna analiza ilościowa (*acoustic quantification, colour kinesis*).

2.2. Podstawy ustalania rozpoznania za pomocą echokardiografii

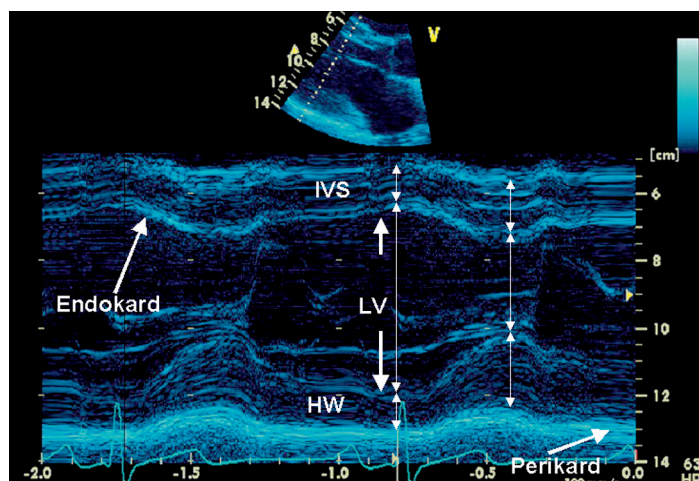
Znając prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych, która wynosi 1540 m/s, można dokonywać obliczeń odległości. Większość urządzeń emituje falę ultradźwiękową w ciągu 1 milisekundy, a przez następne 999 ms zajmuje się detekcją odbitych fal, z czego wynika częstotliwość ultradźwięków 1000 na sekundę. W przypadku wysyłania i odbierania ultradźwięków ze stałą częstotliwością i równomiernym rozłożeniem w czasie powstaje obraz jednowymiarowy (prezentacja M). Nie tylko dzięki wysyłaniu pojedynczych impulsów ultradźwiękowych, lecz także poprzez zastosowanie techniki *phased array* impulsów w całym sektorze obejmowanym przez głowicę, powstaje obraz w prezentacji B.

Gdy ultradźwięki wysłane przez głowicę powracają do niej po odbiciu od różnych struktur, mogą powstać 3 typy obrazu:

- **Prezentacja A:** ukazuje jedynie gradację jasności i amplitudy odbitych fal ultradźwiękowych.
- **Prezentacja B:** ukazuje odbite w prezentacji A wiązki ultradźwięków za pomocą punktów o różnej jasności (*bright-mode*), które odzwierciedlają intensywność i natężenie powracających ultradźwięków.
- **Prezentacja M:** ukazuje sygnały prezentacji B w czasie (*motion*).

■ Echokardiografia w prezentacji M

Prezentacja M pozwala z dużą rozdzielczością czasową na śledzenie refleksów pochodzących z odbicia od granic badanych powierzchni. Na powstającym w wyniku tego dwuwymiarowym obrazie (ryc. 2.2) obserwujemy efekt działania jednej lub – jak w przypadku niektórych urządzeń – dwóch wiązek ultradźwięków. Na ekranie znajdują się zarówno skala głębokości (co 1 cm), jak i skala czasowa (co 0,5 s), co ma na celu ułatwienie pomiarów głębokości. Równoległe z rejestracją obrazu w prezentacji



Ryc. 2.2. Rejestracja dwuwymiarowa w prezentacji M. Objaśnienia: Endokard – granica wsierdzia; IVS – przegroda międzykomorowa; LV – lewa komora; HW – ściana tylna; Perikard – osierdzie.

M rejestrowany jest sygnał EKG, a w razie potrzeby również sygnał fonokardiograficzny. Równoległe rejestrowanie krzywej oddechowej ułatwia rozpoznanie tamponady osierdza lub kardiomiopatii restrykcyjnej. W specjalnych przypadkach, głównie dla celów naukowych, rejestrowana jest równoległe krzywa ciśnienia. Za pomocą standardowo przeprowadzanego przemieszczenia wiązki ultradźwięków od zastawki aortalnej poprzez zastawkę mitralną aż do koniuszka lewej komory (*sweep*) dokonuje się pomiarów w prezentacji M.

■ Echokardiografia dwuwymiarowa

Za pomocą echokardiografii dwuwymiarowej powstaje w czasie rzeczywistym obraz obejmujący sektor ok. 90°. Typowa prędkość odświeżania obrazu wynosi 25/s. Równoległa analiza danych pozwala na podwyższenie tej wartości do 100/s, a przy zwężeniu sektora obrazu – do jeszcze większej. Echokardiografia jest więc metodą obrazowania o najwyższej rozdzielczości czasowej.

■ Akustyczna analiza ilościowa (*acoustic quantification, colour kinesis*)

Metoda ta wykorzystuje detekcję powierzchni granicznych pomiędzy poszczególnymi środowiskami w czasie rzeczywistym – w przypadku echokardiografii chodzi o detekcję granicy pomiędzy wsierdziem i jamą serca – a następnie analizę regionalnej i globalnej funkcji mięśnia sercowego. Ruchy ściany serca mogą być dzięki temu analizowane z uderze-

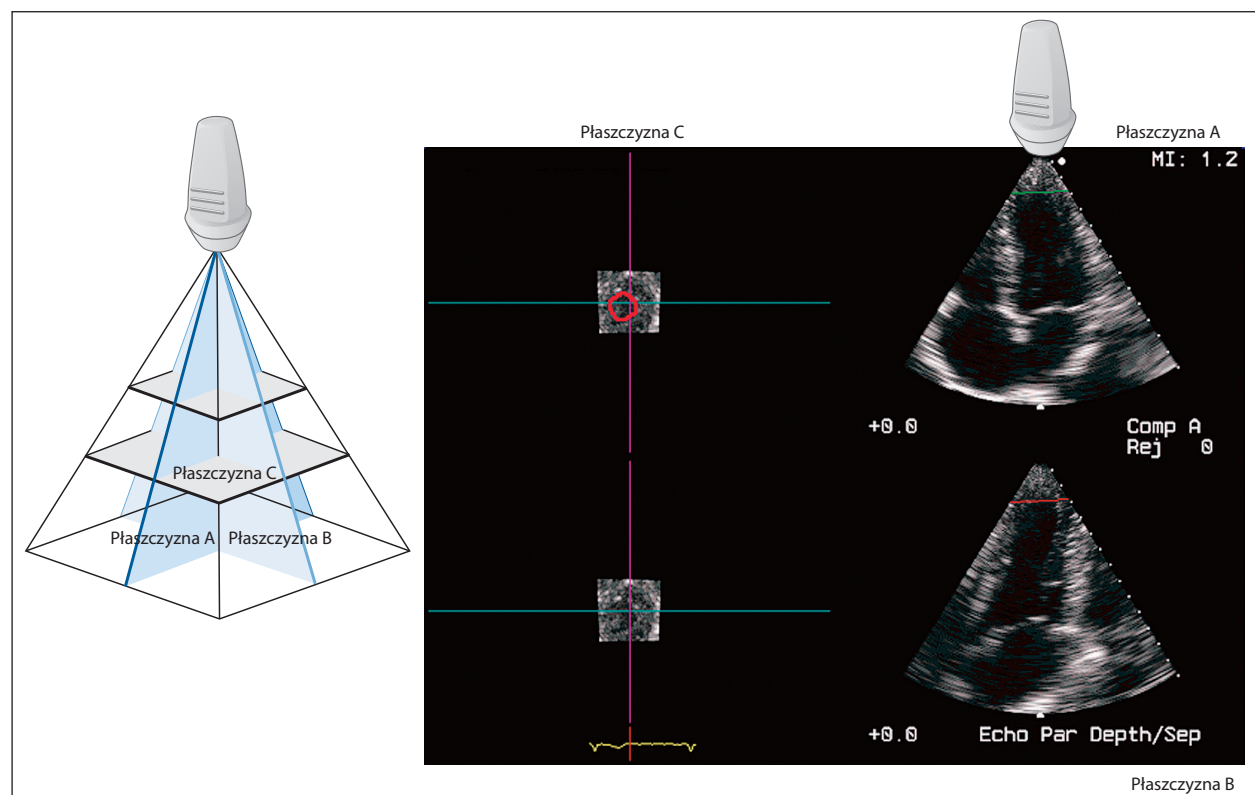
nia na uderzenie serca (*beat to beat*). Dodatkowe zaznaczenie danych obszarów miokardium za pomocą kolorów pozwala na analizę prędkości poruszania się poszczególnych segmentów. Kodowanie za pomocą kolorów pozwala na uwidocznienie kierunku i prędkości przemieszczania się. Prędkość odświeżania obrazu wynosi 25/s. Metoda ta jest szczególnie przydatna w badaniach wysiłkowych z zastosowaniem echokardiografii.

■ Echokardiografia trójwymiarowa

W ciągu ostatnich 15 lat dokonał się znaczny postęp w echokardiografii trójwymiarowej, m.in. jest ona obecnie dostępna jako badanie w czasie rzeczywistym, a nie w oparciu o analizę *off line*. Stało się to możliwe dzięki polepszeniu geometrii głowicy i wprowadzeniu technologii równoczesnego opracowywania danych (*matrix-array*).

W echokardiografii trójwymiarowej wyróżniamy następujące metody:

- rekonstrukcja *off line*:
 - zewnętrzne systemy referencyjne, takie jak: mechaniczne ramię, lokalizator akustyczny, sensor elektromagnetyczny;
- wewnętrzne systemy referencyjne:
 - liniowe konstrukcja obrazu,
 - ruch wahadłowy głowicy,
 - ruch rotacyjny głowicy;
- rekonstrukcja trójwymiarowa w czasie rzeczywistym.



Ryc. 2.3. Echokardiografia trójwymiarowa w czasie rzeczywistym. Schemat głowicy trójwymiarowej w technologii *matrix-phased-array* oraz obraz w trzech płaszczyznach (A-C). Płaszczyzny A i B są uzyskane podłużnie, a płaszczyzna C – poprzecznie.

Rekonstrukcja trójwymiarowa w trybie *off line* ma szczególne znaczenie dla kardiochirurgów w planowaniu zabiegu rekonstrukcji zastawek. Zaletą metody jest uwidocznienie serca w ruchu, co nie jest możliwe w trakcie trwania tego typu zabiegu kardiochirurgicznego.

W nowych głowicach o matrycy typu *matrix* (ryc. 2.3) znajduje się 3000 pojedynczych elementów, które zarówno wysyłają, jak i odbierają sygnały, co pozwala na rekonstrukcję obrazu serca w ruchu. Przewaga informacji uzyskanych w ten sposób nad obrazami dwuwymiarowymi polega na tym, że poszczególne płaszczyzny można dowolnie obracać i oceniać ze wszystkich stron. Tak jak za pomocą MRI i TK, dzięki tej metodzie można oznaczać ilościowo objętość i masę mięśnia sercowego oraz inne parametry. System pozwala również na trójwymiarowe obrazowanie sygnałów doplerowskich.

Echokardiografia trójwymiarowa jest szczególnie przydatna w ocenie aparatu zastawkowego, a także innych struktur serca oraz w ocenie reakcji niedokrwiennej mięśnia sercowego podczas badań wysiłkowych. Wadą echokardiografii trójwymiarowej jest wciąż ograniczona rozdzielczość przestrzenna i czasowa otrzymywanych obrazów, jednak dzięki stale ulepszanemu oprogramowaniu również na tym polu dokonuje się postęp. W oparciu o echokardiografię trójwymiarową możliwe stanie się w przyszłości planowanie i wykonywanie zabiegów na sercu. Technika ta służy również dobrze celom edukacyjnym, ponieważ ułatwia ona orientację we wnętrzu serca (www.sonocard.de).

■ Stetoskop ultradźwiękowy

Miniaturyzacja i technologia cyfrowa doprowadziły do zmniejszenia echokardiografów i stworzenia przenośnych, zasilanych bateriami systemów, które mogą być stosowane przy łóżku pacjenta (ryc. 2.4). Tego typu urządzenia można określić mianem ste-

toskopów ultradźwiękowych, ponieważ umożliwiają one wykonanie badania serca bezpośrednio przy łóżku pacjenta.

Technika rozwinęła się do tego stopnia, że możliwe stało się także wykonywanie przyłóżkowych badań przezprzełykowych. Obecnie uważa się tego typu urządzenia za wiarygodne w ocenie obecności płynu w worku osierdziowym, przerostu mięśnia sercowego, zmian w zakresie aparatu zastawkowego, a w szczególności zwężenia zastawek aortalnej i mitralnej oraz obniżenia frakcji wyrzutowej lewej komory. Przenośne echokardiografy są również przydatne w ocenie okołoperacyjnej, pozwalają bowiem na szybką ocenę przeciążenia prawej komory, hiperkinetycznego stanu układu krążenia lub powikłań w przebiegu zawału mięśnia sercowego. W przypadku wątpliwości wykonuje się w drugim etapie pełne badanie przezklatkowe lub przezprzełykowe za pomocą klasycznego urządzenia.

2.3. Specyficzne zastosowania

2.3.1. Echokardiografia kontrastowa

W przypadku kontaktu ultradźwięków z powietrzem dochodzi do ich prawie całkowitego odbicia. Z tego powodu pojawiają się na obrazie nawet najmniejsze pęcherzyki powietrza znajdujące się w krążeniu. Powoduje to wzmocnienie sygnału ultradźwiękowego, co wykorzystywane jest przede wszystkim we wzmacnianiu słabych sygnałów.

Każde wstrzyknięcie soli fizjologicznej, leków czy innych płynów prowadzi do powstania mikro-pęcherzyków w krążeniu, które można uchwycić za pomocą ultradźwięków. Obecnie stosuje się różne metody wykorzystujące to zjawisko.



Ryc. 2.4. Przenośne aparaty echokardiograficzne służące do badań przyłóżkowych lub ambulatoryjnych (Optigo, Philips, Sonoline, Vivid GE).