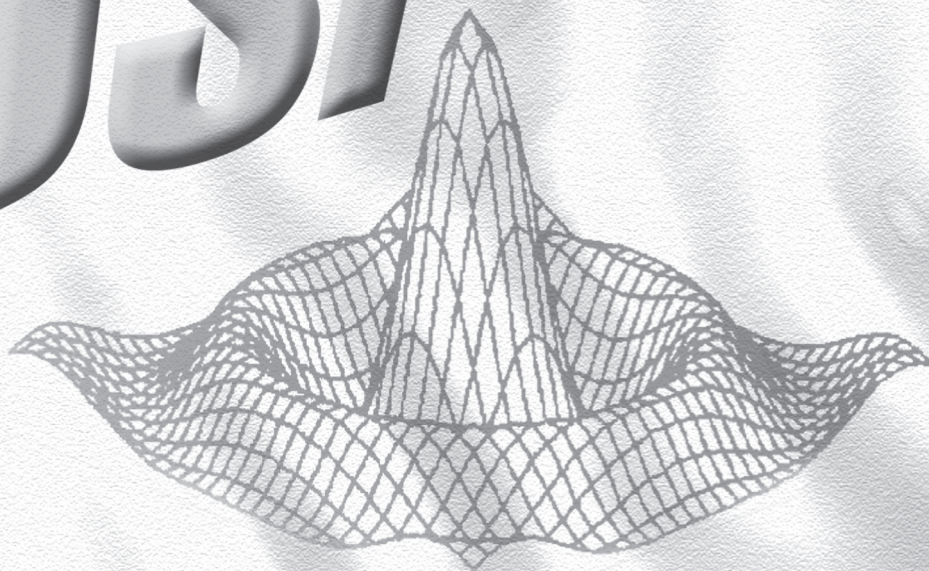


1

**Rozległość
zastosowań i głębia
problematyki DSP**

DSP



Cyfrowe przetwarzanie sygnałów (DSP) jest jedną z najważniejszych technik, które będą kształtować naukę i technikę w XXI wieku. Rewolucyjne przemiany zaszły już w *rozległym* obszarze zastosowań: w telekomunikacji, obrazowaniu w medycynie, radarach i sonarach, odtwarzaniu muzyki z bardzo dobrą wiernością, a także w wykrywaniu ropy naftowej, jeśli wymienić tylko kilka. W każdej z tych dziedzin nastąpił *głęboki* rozwój problematyki DSP, z własnymi algorytmami, matematyką i wyspecjalizowanymi metodami. To połączenie rozległości zastosowań z głębią problematyki powoduje, że nikt nie jest w stanie zapanować nad całą dotychczas opracowaną techniką DSP. Edukacja DSP obejmuje dwa zadania: poznanie koncepcji ogólnych dotyczących tej dziedziny jako całości i nauczenie się metod specjalistycznych związanych z konkretnym obszarem naszego zainteresowania. W tym rozdziale rozpoczynamy naszą podróż w świat cyfrowego przetwarzania sygnałów od omówienia silnego wpływu, jaki wywarło DSP na kilka bardzo różnorodnych dziedzin. Rewolucja się zaczęła.

Korzenie DSP

Cyfrowe przetwarzanie sygnałów wyróżnia się spośród innych dziedzin techniki komputerowej unikatowym rodzajem używanych danych: *sygnałami*. W większości przypadków te sygnały, jako dane z czujników, pochodzą ze świata rzeczywistego: z wibracji sejsmicznych, obrazów wizyjnych, fal dźwiękowych itd. DSP to matematyka, algorytmy i rozwiązania techniczne stosowane do operowania tymi sygnałami po ich przetworzeniu w postaci cyfrową. DSP służy do realizacji wielu różnych celów, takich jak udoskonalanie obrazów, rozpoznawanie i generacja mowy, kompresja danych w celu ich magazynowania i przesyłania itd. Załóżmy, że do komputera dołączyliśmy przetwornik analogowo-cyfrowy i zebraliśmy pewną porcję danych ze świata rzeczywistego. Wtedy system DSP zapyta: *I co dalej?*

Korzenie DSP sięgają lat 60. i 70. ubiegłego wieku, gdy pojawiły się komputery cyfrowe. Komputery były wówczas bardzo drogie, a systemy DSP ograniczały się tylko do niewielu szczególnie ważnych zastosowań. Pionierskie prace zrealizowano w czterech dziedzinach o dużym znaczeniu. Były to: *radary* i *sonary*, od których zależało bezpieczeństwo narodu; *poszukiwania ropy*, na których można było zarobić wielkie pieniądze, *badania kosmiczne*, w których dane są niepowtarzalne i *obrazowanie medyczne*, mogące ratować życie. Rewolucja w dziedzinie komputerów osobistych w latach 80. i 90. spowodowała eksplozję zastosowań DSP w nowych dziedzinach. Motywacją rozwoju DSP były już nie tylko potrzeby wojskowe i państwowe, ale nagle stały się nią także wymagania rynku. Każdy, kto sądził, że może zarobić na tej szybko rozwijającej się dziedzinie, od razu stawał się dostawcą systemów DSP. Technika DSP dotarła do szerokich kręgów społeczeństwa w takich urządzeniach, jak telefony komórkowe, odtwarzacze płyt kompaktowych i elektroniczna poczta głosowa. Niektóre z tych różnorodnych zastosowań zestawiono na rys. 1.1.

Rewolucja techniczna postępowała z góry do dołu. We wczesnych latach 80. DSP nauczano na poziomie *studiów magisterskich* na wydziałach elektrycznych i elektroniki. Dziesięć lat później DSP stało się standardową częścią programu *studiów inżynierskich*. Teraz znajomość techniki DSP jest *podstawową umiejętnością* wymaganą od inżynierów i naukowców w wielu dziedzinach. Szybki postęp DSP można porównać z poprzednią rewolucją techniczną – w *elektronice*. W dziedzinie elektroniki niemal wszyscy specjaliści mają podstawową wiedzę z zakresu projektowania układów. Bez tych wiadomości byłiby zagubieni w świecie techniki. Taka sama przyszłość czeka DSP.

Dzieje rozwoju DSP to nie tylko ciekawostka, mają one znaczny wpływ na *wasze* możliwości nauczania się i stosowania DSP. Załóżmy, że napotykanie problemy z zakresu DSP i szukanie potrzebnych rozwiązań w książkach i innych publikacjach. Na ogół znajdziecie tam całe strony pełne wzorów, nieznanymi symboli matematycznych i niejasnej terminologii. Prawdziwy koszmar! Większość literatury dotyczącej DSP wprawia w zakłopotanie nawet czytelników mających już pewne doświadczenie w tej dziedzinie. Nie są to, oczywiście, publikacje złe, lecz po prostu



Rys. 1.1. Technika DSP zrewolucjonizowała wiele dziedzin nauki i techniki. Na rysunku przedstawiono niektóre z tych rozmaitych zastosowań

przeznaczone dla wąskiego kręgu czytelników o ścisłej specjalizacji. Tego rodzaju szczegółowe rozważania matematyczne są potrzebne prowadzącym badania w zakresie DSP do zrozumienia teoretycznych implikacji tego zagadnienia.

Przy pisaniu tej książki przyjęto podstawowe założenie, że większości zagadnień praktycznych DSP można się nauczyć i stosować je bez tradycyjnej bariery tworzonej przez szczegółową matematykę i teorię. *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Praktyczny poradnik dla inżynierów i naukowców* napisano dla tych, którzy traktują DSP jako *narzędzie*, a nie nową drogę kariery zawodowej.

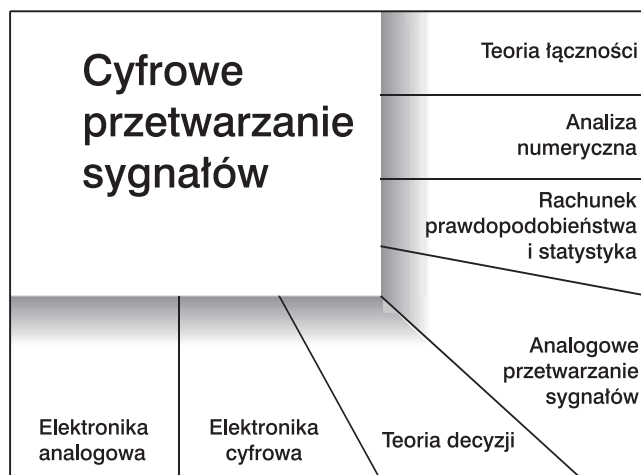
W dalszej części tego rozdziału będą przedstawione dziedziny, w których DSP spowodowało rewolucyjne zmiany. Poznając kolejne zastosowania, zauważcie, że DSP ma charakter wybitnie *interdyscyplinarny*, wykorzystując rozwiązania techniczne z wielu pokrewnych ze sobą dziedzin. Jak wynika z rys. 1.2, granice między DSP i innymi dziedzinami nie są ostre i wyraźnie określone, lecz raczej rozmyte i zachodzące na siebie. Jeśli chcecie specjalizować się w DSP, to pamiętajcie o tych pokrewnych dziedzinach, które też będziecie musieli poznać.

Telekomunikacja

Telekomunikacja to przesyłanie informacji na odległość. Przesyłana informacja może mieć wiele różnych form: rozmowy telefoniczne, sygnały telewizyjne, pliki komputerowe i inne typy danych. Do przesłania informacji jest konieczny *kanal* między dwiema lokalizacjami. Kanałem może być para przewodów, łącze radiowe, światłowód itd. Firmy telekomunikacyjne pobierają od swoich klientów *opłaty* za przesyłanie informacji, a w zamian muszą ponosić *koszty* utrzymania i konserwacji kanału. Rachunek ekonomiczny jest prosty: im więcej informacji firmy telekomunikacyjne są w stanie przesłać jednym kanałem, tym więcej pieniędzy mogą zarobić. Technika DSP zrewolucjonizowała telekomunikację w wielu obszarach: w generacji i wykrywaniu tonu sygnalizacji, przesuwania pasm częstotliwości (*frequency band shifting*), filtracji w celu usunięcia tętnień sieciowych itd. Omówimy teraz trzy charakterystyczne przykłady z dziedziny sieci telefonicznych – multipleksowanie, kompresję, a także tłumienie echa.

Multipleksowanie

Na świecie jest ok. *1 miliarda* telefonów. Systemy telefoniczne umożliwiają, za naciśnięciem kilku przycisków, połączenie każdego z tych telefonów z dowolnym innym. Ogrom tego zadania jest zdumiewający! Do lat 60. do uzyskania połączenia między dwoma telefonami było konieczne przesłanie analogowego sygnału głosowego przez przełączniki mechaniczne i wzmacniacze. Jedno połączenie wymagało jednej pary przewodów. Stosując zaś DSP, przetwarza się sygnały głosowe w strumień szeregowych danych cyfrowych. Ponieważ bity można łatwo przeplatać ze sobą i potem rozdzielać, więc jednym kanałem można przesłać wiele rozmów telefonicznych. Na przykład standard telefoniczny zwany *T-carrier* (USA) umożliwia jednoczesne przesyłanie 24 sygnałów głosowych. Każdy z nich jest próbkowany 8000 razy na sekundę przy użyciu kompandrowego, 8-bitowego przetwarzania analogowo-cyfrowego (z kompresją logarytmiczną). W rezultacie każdy sygnał głosowy jest reprezentowany przez strumień o przepływności bitowej 64 000 bit/s i wszystkie 24 kanały można zawrzeć w strumieniu o przepływności 1,544 Mbit/s. Taki sygnał można przesłać na odległość ok. 1800 m zwykłą linią telefoniczną z drutu miedzianego o średnicy ok. 0,64 mm. Jest to typowa odległość połączenia. Znaczne są korzyści ekonomiczne wynikające z przesyłania cyfrowego. Przełączniki analogowe są drogie, cyfrowe bramki logiczne zaś – tanie.



Rys. 1.2. Granice między cyfrowym przetwarzaniem sygnałów i innymi dziedzinami nauki, techniki i matematyki są rozmyte i zachodzą na siebie

Kompresja

Przy próbkowaniu sygnału głosowego z częstotliwością 8000 próbek/sekundę większość informacji cyfrowych to informacje *nadmiarowe* (redundancyjne). Informacja zawarta w jednej próbce jest bowiem w znacznym stopniu powielona w próbkach sąsiednich. Opracowano wiele algorytmów DSP do przetwarzania cyfrowych danych głosowych na strumień danych o mniejszej wymaganej przepływności bitowej (bit/s). Są to algorytmy **kompresji danych**. Równoważne im algorytmy **dekompresji** stosuje się do odtwarzania sygnału w jego oryginalnej postaci. Poszczególne algorytmy różnią się od siebie stopniem kompresji i uzyskiwaną jakością dźwięku. Ogólnie biorąc, zredukowanie przepływności bitowej danych z 64 kbit/s do 32 kbit/s nie powoduje pogorszenia jakości dźwięku. Przy kompresji do przepływności bitowej 8 kbit/s wpływ na jakość dźwięku jest już wprawdzie zauważalny, lecz taką kompresję można jeszcze stosować w sieciach telefonicznych dalekiego zasięgu. Najwyższa osiągalna kompresja do ok. 2 kbit/s powoduje znaczne zniekształcenia dźwięku, lecz jest przydatna w niektórych zastosowaniach – np. wojskowych i w łączności podmorskiej.

Tłumienie echa

Występowanie echa jest poważnym problemem w łączności telefonicznej dalekiego zasięgu. Gdy mówimy do mikrofonu aparatu telefonicznego, sygnał reprezentujący nasz głos wędruje do aparatu odbiorczego, z którego część sygnału powraca jako echo. Jeśli odległość wynosi kilkaset kilometrów, to czas powrotu echa jest równy kilka milisekund. Ucho jest przyzwyczajone do odbioru echa o tak małym opóźnieniu i połączenie jest traktowane jako prawidłowe. Przy większych odległościach echo staje się coraz bardziej słyszalne i irytujące. Opóźnienie może osiągać kilkaset milisekund w łączności międzykontynentalnej i jest wtedy szczególnie nieprzyjemne. Cyfrowe przetwarzanie sygnałów daje rozwiązanie tych trudności przez pomiar sygnału powrotnego i generowanie odpowiedniego *antysygnału* likwidującego kłopotliwe echo. Ta sama technika umożliwia użytkownikom aparatów telefonicznych z głośnikami jednoczesne słuchanie i mówienie bez kłopotów ze sprzężeniem akustycznym (gwizdami interferencyjnymi). Może też być stosowana do tłumienia szumu otoczenia przez redukcję go *antyszumem* generowanym cyfrowo.

Przetwarzanie sygnału fonicznego

Wzrok i słuch to dwa najważniejsze nasze zmysły. Właśnie dlatego znaczna część zastosowań DSP jest związana z przetwarzaniem obrazu i dźwięku. Słuchamy zarówno *muzyki*, jak i *mowy*. Technika DSP spowodowała rewolucyjne zmiany w obu tych dziedzinach.

Muzyka

Droga prowadząca od mikrofonu muzyka do głośnika audiofila jest długa. Dzięki cyfrowej reprezentacji przesyłanych danych zapobiega się pogorszeniu jakości związanemu zwykle z analogowym przetwarzaniem i zapamiętywaniem. Jest to oczywiste dla każdego, kto porównywał jakość muzyki uzyskiwanej z magnetofonu z muzyką z płyty kompaktowej. Utwór muzyczny jest w studiu dźwiękowym zazwyczaj nagrywany w wielu kanałach lub na wielu ścieżkach. W niektórych przypadkach nagrywa się osobno nawet poszczególne instrumenty i wokalistów. Inżynier dźwięku ma wtedy większą swobodę w tworzeniu nagrania finalnego. Złożony proces łączenia z sobą indywidualnych ścieżek nagraniowych nazywa się *miksowaniem*. Do realizacji kilku ważnych funkcji podczas miksowania można zastosować DSP. Są to: filtracja, sumowanie i odejmowanie sygnałów, edycja sygnałów i inne.

Jednym z najciekawszych zastosowań DSP w dziedzinie przygotowania muzyki jest *sztuczny pogłos*. Jeśli sygnały z poszczególnych kanałów są po prostu sumowane, to brzmienie dźwięku wydaje się rozrzedzone i kruche, jakby muzycy grali gdzieś w otwartej przestrzeni. Słuchacz odnosi takie wrażenie, gdyż są w dużym stopniu przyzwyczajeni do echa i pogłosu zawartego w słuchanej muzyce, a te właśnie efekty są na ogół minimalizowane

w studiu dźwiękowym. Technika DSP daje podczas miksowania możliwość wprowadzania sztucznego echa i pogłosu w celu symulacji różnych pomieszczeń odsłuchowych. Echo z opóźnieniem kilkuset milisekund stwarza wrażenie słuchania w pomieszczeniu, takim jak katedra. Dodanie echa z opóźnieniem 10–20 ms daje wrażenie odsłuchu w pomieszczeniu o skromniejszych wymiarach.

Generacja mowy

Generacja i rozpoznawanie mowy znajdują zastosowanie w komunikacji człowiek–maszyna. Zamiast rąk i oczu można używać ust i uszu. Jest to bardzo wygodne w sytuacjach, gdy ręce i oczy są zajęte innymi czynnościami, takimi jak prowadzenie samochodu, wykonywanie operacji chirurgicznej lub (niestety) celowanie z broni do wroga. Są dwa sposoby komputerowej generacji mowy: *rejestracja cyfrowa* i *symulacja organu głosowego*. Przy rejestracji cyfrowej sygnał mowy jest przetwarzany do postaci cyfrowej i rejestrowany, zwykle w formie skompresowanej. Podczas odtwarzania zapisane dane podlegają dekompresji i są z powrotem przetwarzane na sygnał analogowy. Jednogodzinny zapis mowy wymaga tylko ok. 3 megabajtów pamięci, a więc w granicach możliwości nawet małych systemów komputerowych. Jest to obecnie najczęściej stosowana metoda generacji mowy.

Symulatory organu głosowego są bardziej skomplikowane, gdyż są próbą naśladowania fizycznych mechanizmów tworzenia mowy. U człowieka organ głosowy jest wnęką akustyczną o częstotliwościach rezonansowych określonych rozmiarami i kształtem komór. Są dwa podstawowe źródła powstawania dźwięku w organie głosowym, dające głoski *dźwięczne* i *bezdźwięczne* (np. *trące*). Głoski dźwięczne powstają, gdy powietrze jest wypychane z płuc przez struny głosowe i dalej przez usta i/lub przez nos. Głoski bezdźwięczne powstają zaś w wyniku turbulencji powietrza w zwężeniach, takich jak zęby i wargi. Symulatory organu głosowego działają na zasadzie generacji sygnałów cyfrowych przypominających dwa wymienione rodzaje sygnałów pobudzających. Właściwości komory rezonansowej są symulowane przez przepuszczanie sygnału pobudzającego przez filtr o podobnych właściwościach rezonansowych. Taką metodę przyjęto w jednym z pierwszych uwieńczonych powodzeniem zastosowań DSP, jakim był sprzedawany w dużych ilościach system *Speak & Spell*, urządzenie dla dzieci, wspomagające nauczanie.

Rozpoznawanie mowy

Automatyczne rozpoznawanie mowy jest nieporównanie trudniejsze niż jej generacja. Rozpoznawanie mowy to klasyczny przykład zadania, które mózg ludzki realizuje dobrze, a komputer – słabo. Komputery cyfrowe są w stanie zapamiętać i przywołać z pamięci ogromne ilości danych, wykonywać obliczenia matematyczne z zadziwiającą szybkością i realizować wielokrotnie powtarzające się czynności bez znużenia i pogorszenia wydajności. Niestety komputery współczesne bardzo słabo sobie radzą z danymi pochodzącymi bezpośrednio z czujników. Łatwo można nauczyć komputer comiesięcznego wysyłania rachunków za energię elektryczną, ale nauczanie tego samego komputera rozumienia naszego głosu jest trudnym przedsięwzięciem. Przy użyciu DSP problem rozpoznawania głosu jest rozwiązywany w dwóch etapach: *wydzielenie cech* i następnie *dopasowanie cech*. Każde słowo w sygnale akustycznym zostaje wyodrębnione i następnie przeanalizowane w celu zidentyfikowania rodzaju pobudzenia i częstotliwości rezonansowych. Te parametry są porównywane z wcześniejszymi przykładami wymawianych słów, aby wybrać najlepiej dopasowany odpowiednik. Działanie tych systemów ogranicza się często zaledwie do kilkuset słów i mogą one akceptować tylko mowę z wyraźnymi przerwami między słowami. Systemy muszą być przetestowane dla każdej osoby mówiącej. Takie rozpoznawanie mowy jest wystarczające w wielu zastosowaniach komercyjnych, lecz jego ograniczenia są znaczne w stosunku do możliwości ludzkiego słyszenia. W tej dziedzinie jest jeszcze bardzo dużo do zrobienia. Nagrodą dla tych, którzy z powodzeniem opracują i wprowadzą na rynek dobre urządzenia do rozpoznawania głosu, będą znaczne korzyści finansowe.

Echolokacja

Powszechnie stosowanym sposobem uzyskiwania informacji o odległym obiekcie jest *odbijanie* od niego jakichś fal. Na przykład radar działa na zasadzie wysyłania impulsów fal radiowych i analizy sygnału powracającego jako echo odbite od samolotu. W sonarze fale dźwiękowe są przesyłane w środowisku wodnym w celu wykrycia łodzi podwodnych i innych obiektów zanurzonych. Geofizycy od dawna badają kulę ziemską przez wywoływanie wybuchów i odsłuchiwanie sygnałów echa z głęboko położonych warstw skalnych. Chociaż idea działania jest jednakowa we wszystkich tych zastosowaniach, to każde z nich ma swoją specyfikę i wymagania. Cyfrowe przetwarzanie sygnałów wywołało rewolucyjne zmiany we wszystkich tych dziedzinach.

Radary

Nazwa radar jest akronimem *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*ang*ING* (detekcja radiowa i wyznaczanie odległości). W najprostszym urządzeniu radarowym nadajnik radiowy wytwarza impuls fal radiowych o czasie trwania kilku mikrosekund. Impuls jest wprowadzany do anteny kierunkowej, z której fale są wysyłane z prędkością światła. Samolot, który znajduje się na drodze tych fal, odbije niewielką część ich energii z powrotem w kierunku anteny odbiorczej umieszczonej blisko nadajnika. Odległość do obiektu jest obliczana na podstawie czasu, jaki upłynął od wysłania impulsu do odebrania echa. Prostsze jest wyznaczanie kierunku lokalizacji obiektu, gdyż znane jest *ustawienie* anteny kierunkowej w chwili odbioru echa.

Zakres działania radaru jest określony dwoma parametrami: energią zawartą w nadawanym impulsie i poziomem szumu w odbiorniku. Niestety zwiększanie energii impulsu wymaga na ogół *zwiększenia jego czasu trwania*. Szerszy impuls powoduje z kolei zmniejszenie dokładności pomiaru czasu opóźnienia. Występuje tu więc sprzeczność wymagań dotyczących dwóch ważnych parametrów: zdolności wykrywania obiektów na duże odległości i możliwości dokładnego określenia odległości od obiektu.

DSP zrewolucjonizowało radar w trzech aspektach, z których wszystkie są związane ze wspomnianą sprzecznością wymagań. Po pierwsze, przy użyciu DSP można impuls poddać *kompresji* po jego odbiorze, uzyskując lepsze wyznaczenie odległości bez zmniejszania zasięgu działania. Po drugie, system DSP może odfiltrować odebrany sygnał, tłumiąc szum. Dzięki temu zwiększa się zasięg bez pogorszenia dokładności pomiaru odległości. Po trzecie, DSP umożliwia szybką selekcję i generację impulsów o różnych kształtach i szerokościach. To daje możliwość m.in. optymalizacji impulsów dla różnych problemów detekcji. I teraz najważniejsze: większość tych zadań jest realizowana z częstotliwością próbkowania porównywalną ze stosowaną częstotliwością radiową, a więc kilkaset megaherców. Jeśli chodzi o radar, DSP jest równie ważne w postaci rozwiązań sprzętowych o dużej szybkości działania, jak i w formie algorytmów.

Sonar

Nazwa sonar jest akronimem: *SO*und *NA*vigation *AN*d *R*ang*ING* (dźwiękowa nawigacja i wyznaczanie odległości). Istnieją dwa rodzaje sonaru: *aktywny* i *pasywny*. W sonarze aktywnym impulsy dźwiękowe o częstotliwości w zakresie od 2 do 40 kHz są wysyłane do środowiska wodnego a powracające sygnały echa są wykrywane i analizowane. Zastosowania sonaru aktywnego obejmują: wykrywanie i lokalizację obiektów podwodnych, nawigację, łączność oraz sporządzanie map dna morskiego. Typowy maksymalny zasięg roboczy wynosi od 10 do 100 km. Działanie sonaru pasywnego polega na *nastuchu* dźwięków podwodnych, których źródłem mogą być naturalne turbulencje, życie podwodne, odgłosy mechaniczne z łodzi podwodnych i statków płynących na powierzchni morza. Sonar pasywny nie wysyła żadnej energii, dlatego jest doskonały do operacji ukrytych. To tak, jakbyśmy chcieli wykryć *jakiegoś faceta*, a on nie mógł wykryć *nas*. Najważniejszą

dziedziną zastosowania sonaru pasywnego są wojskowe systemy inwigilacyjne do wykrywania i śledzenia łodzi podwodnych. W sonarach pasywnych pracuje się na ogół na mniejszych częstotliwościach niż w aktywnych, gdyż takie sygnały są słabiej pochłaniane w wodzie. Zasięg wykrywania może wynosić nawet tysiące kilometrów.

DSP zrewolucjonizowało sonar w tych samych aspektach, co radar. Są to: generacja i kompresja impulsów oraz filtracja wykrywanych sygnałów. Pod pewnym względem sonar jest *łatwiejszy* od radaru – pracuje z mniejszymi częstotliwościami. Pod innym względem jest jednak trudniejszy, gdyż środowisko, w którym działa, jest mniej jednorodne i mniej stabilne. W systemach sonarowych stosuje się zazwyczaj rozległe sieci elementów nadawczych i odbiorczych, a nie tylko jeden kanał. Przez odpowiednie sterowanie sygnałami i ich mieszanie w tych wielu elementach, urządzenie sonarowe może wysyłać impulsy do żądanych miejsc i określać kierunki, z których są odbierane sygnały echa. Do obsługi tych wielu kanałów sonary wymagają DSP o takiej efektywności pracy, jak w radarach.

Sejsmologia odbiciowa

Już w latach 20. XX wieku geofizycy wykryli, że strukturę skorupy ziemskiej można badać falami dźwiękowymi. Poszukiwacze wywoływali wybuchy i rejestrowali sygnały echa pochodzące od warstw granicznych znajdujących się głębiej niż 10 km pod powierzchnią ziemi. Takie sejsmogramy odczytywano bezpośrednio wzrokowo i na ich podstawie odwzorowywano strukturę warstw podziemnych. Odbiciowe metody sejsmiczne stały się nagle głównym sposobem wyszukiwania złóż ropy i innych bogactw naturalnych, i takim pozostają do dziś.

W przypadku idealnym impuls dźwiękowy wysyłany w głąb Ziemi wytwarza pojedynczy sygnał echa od każdej warstwy granicznej, przez którą impuls przechodzi. Niestety, nie zawsze jest to takie proste. Każdy powracający sygnał echa musi znowu przejść przez wszystkie warstwy graniczne leżące powyżej miejsca jego powstania. Może to wywołać odbijanie się echa między warstwami i wykrywanie *ech echa* na powierzchni. Wykryty sygnał może, w wyniku ech wtórnych, być bardzo skomplikowany i trudny do interpretacji. Od lat 60. szeroko stosuje się DSP do wyizolowania echa pierwotnego z ech wtórnych w sejsmogramie odbiciowym. Jak geofizycy radzili sobie niegdyś bez DSP? Odpowiedź jest prosta – szukali *łatwych* miejsc, gdzie odbicia wielokrotne były minimalne. DSP umożliwia znalezienie ropy w *trudnych* miejscach, np. pod oceanem.

Przetwarzanie obrazów

Obrazy są sygnałami o szczególnych właściwościach. Po pierwsze, są one wyrażane parametrami *przestrzennymi* (odległościami), podczas gdy większość innych sygnałów jest wyrażana parametrami *czasowymi*. Po drugie, obrazy zawierają bardzo dużo informacji. Na przykład trzeba 10 MB pamięci do zarejestrowania 1 sekundy telewizyjnego sygnału wideo. Jest to ponad tysiąc razy więcej niż dla sygnału głosowego o podobnym czasie trwania. Po trzecie, ostateczną oceną jakości obrazu jest często subiektywna ocena widza, a nie kryterium obiektywne. Z powodu tych specyficznych właściwości przetwarzanie obrazów stanowi oddzielną grupę zastosowań w ramach DSP.

Medycyna

W roku 1895 Wilhelm Konrad Roentgen odkrył, że promieniowanie X może przenikać przez znaczne obszary materii. Możliwość zaglądania do wnętrza organizmu żywego człowieka zrewolucjonizowała medycynę. W ciągu zaledwie kilku lat medyczne urządzenia rentgenowskie rozprzestrzeniły się na całym świecie. Mimo oczywistego sukcesu obrazowanie przy użyciu promieni X miało cztery ograniczenia, zanim w latach 70. nie wprowadzono DSP i podobnych technik. Po pierwsze, nakładające się na siebie tkanki

i narządy mogą pozostać ukryte. Na przykład fragmenty serca mogą być niewidoczne za żebrami. Po drugie, nie zawsze da się odróżnić tkanki podobne do siebie. Na przykład można odróżnić kości od tkanek miękkich, ale trudno – nowotwór od wątroby. Po trzecie, obrazy rentgenowskie pokazują *anatomię*, budowę organizmu, a nie *fizjologię*, czyli jego funkcjonowanie. Obraz rentgenowski człowieka żywego jest dokładnie taki sam jak martwego! Po czwarte, naświetlanie promieniowaniem X może spowodować raka, dlatego powinno być stosowane oszczędnie i tylko w uzasadnionych przypadkach.

Problem nakładających się tkanek i narządów rozwiązano w roku 1971, wprowadzając pierwszy **tomograf komputerowy** (najpierw nazywany CAT – komputerowy tomograf, lub skaner, osiowy – *Computed Axial Tomography*). Tomografia komputerowa (CT) jest klasycznym przykładem cyfrowego przetwarzania sygnałów. Promieniowanie X z wielu kierunków przechodzi przez badaną część ciała pacjenta. Zamiast prostego tworzenia obrazów na podstawie promieni X, odebrane sygnały są przetwarzane do postaci danych cyfrowych i gromadzone w komputerze. Następnie wykorzystuje się tę informację do *obliczeń* dających obrazy będące *przekrojami przez badany fragment ciała*. Na takich obrazach jest uwidocznionych dużo więcej szczegółów niż w konwencjonalnym badaniu rentgenowskim, dzięki czemu diagnoza i leczenie są znacznie skuteczniejsze. Wpływ tomografii komputerowej na medycynę był prawie tak duży, jak pierwsze wprowadzenie badań rentgenowskich. W ciągu kilku lat każdy większy szpital na świecie uzyskał dostęp do tomografu komputerowego. W roku 1979 dwaj główni twórcy tomografii komputerowej, Godfrey N. Hounsfield i Allan M. Cormack, otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie medycyny. *To jest dobre DSP!*

Trzy dalsze wymienione ograniczenia badań rentgenowskich rozwiązano, stosując do penetracji organizmu rodzaje energii inne niż promieniowanie X, takie jak fale dźwiękowe i radiowe. We wszystkich tych metodach kluczową rolę odgrywa DSP. Na przykład w obrazowaniu przy użyciu rezonansu magnetycznego (MRI – *Magnetic Resonance Imaging*) do badania wnętrza ciała człowieka stosuje się pole magnetyczne w połączeniu z falami radiowymi. Przy właściwym doborze natężenia i częstotliwości tych pól jądra atomów w jakimś obszarze ciała wchodzą w rezonans, zmieniając energię między pewnymi skwantowanymi stanami. Rezonans daje emisję wtórnych fal radiowych wykrywanych przez antenę umieszczoną w pobliżu ciała pacjenta. Wartość i inne parametry odebranego sygnału dostarczają informacji o obszarze, w którym zachodzi rezonans. Dobór pola magnetycznego umożliwia przesuwanie badanego obszaru rezonansowego wzdłuż ciała, co daje odwzorowanie struktury wewnętrznej. Ta informacja jest zazwyczaj przedstawiana w formie obrazów, podobnie jak w tomografii komputerowej. Badanie rezonansem magnetycznym nie tylko daje doskonałe rozróżnianie między różnymi rodzajami tkanek miękkich, ale dostarcza też informacji o zjawiskach fizjologicznych, np. o przepływie krwi w tętnicach. Metoda rezonansu magnetycznego jest nieodłącznie związana z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów i bez DSP nie może być realizowana.

Badania kosmiczne

Czasem powstaje konieczność uzyskania jak największej ilości informacji z bardzo złego obrazu. Taka potrzeba często zachodzi w przypadku obrazów pochodzących z bezzałogowych satelitów i pojazdów kosmicznych. Nikt przecież nie wyśle na Marsa pracownika serwisu, aby tam pokręcił dwiema gałkami w kamerze! Przy użyciu DSP można kilkoma sposobami poprawić jakość obrazów uzyskiwanych w skrajnie niekorzystnych warunkach. Można dobrać jasność i kontrast, wykrywać kontury, tłumić szum, dobierać ostrość, zmniejszać rozmycie wywołane ruchem itd. Można również *doprowadzać* do właściwej postaci obrazu obarczone zniekształceniami przestrzennymi, np. płaskie obrazy kulistej planety. W jedną bazę danych można łączyć wiele pojedynczych obrazów, co daje możliwość wyświetlania informacji w unikatowy sposób, np. w formie sekwencji wideo symulującej lot nad powierzchnią odległej planety.

Komercyjne urządzenia obrazowe

Duża ilość informacji zawarta w obrazach jest problemem w urządzeniach masowo sprzedawanych klientom. Urządzenia *komercyjne* (oferowane na rynku) powinny być *tanie*, co raczej nie idzie w parze z wymogami dużych pamięci i dużych szybkości przesyłania danych. Jednym z rozwiązań tego dylematu jest *kompresja obrazu*. Obraz, podobnie jak sygnał głosowy, zawiera dużą ilość informacji nadmiarowych. Dlatego dane obrazowe można przetwarzać przy użyciu algorytmów zmniejszających liczbę bitów informacji niezbędnych do reprezentowania obrazu. Do kompresji nadają się zwłaszcza obrazy telewizyjne i inne obrazy ruchome, gdyż większość informacji w kolejnych ramkach pozostaje taka sama. Dostępnymi na rynku urządzeniami, w których wykorzystano tę metodę, są na przykład: telefony wideo, programy komputerowe do wyświetlania obrazów ruchomych oraz telewizja cyfrowa.