

Dlaczego DSP



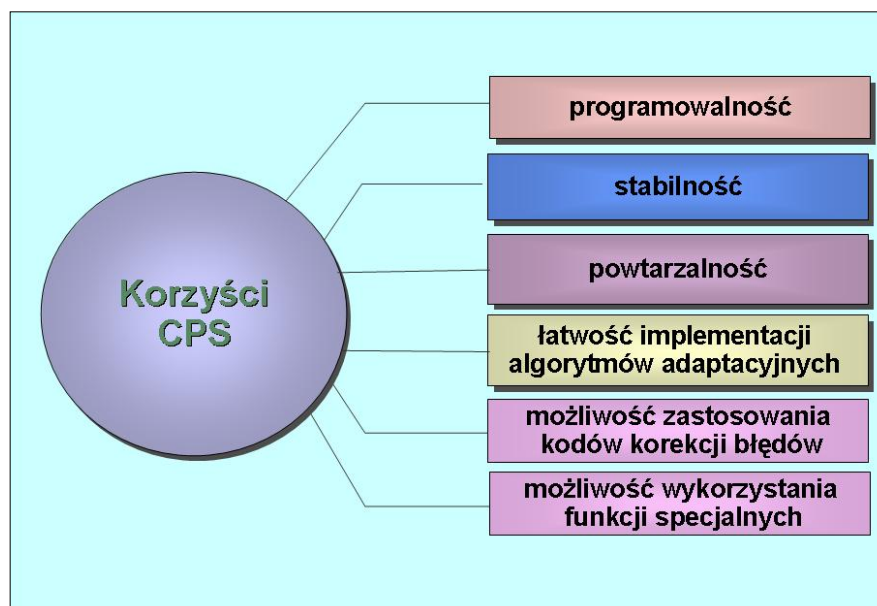
(Wykorzystano materiały książek Marven C., Ewers G.: „Zarys cyfrowego przetwarzania sygnałów” Warszawa WKŁ 1999; Tariov A., “Modele algorytmiczne i struktury wysokowydajnych procesorów cyfrowego przetwarzania sygnałów” (w języku rosyjskim), Szczecin, Informa, 2001 oraz wykładu prof. A. Materki)

Do tej pory dowiedzieliśmy się z grubsza co to jest DSP i jak się ono rozwijało na przestrzeni ostatnich 50 lat. Nie wiemy jednak jeszcze dlaczego DSP jest tak atrakcyjne. W końcu w celu realizacji większości zadań przewidzianych dla cyfrowego przetwarzania sygnałów być może wystarczające okazać się mogą układy analogowe. Z drugiej strony na opracowanie coraz to szybszych i bardziej wydajnych układów DSP przemysł półprzewodnikowy zainwestował, może niepotrzebnie, ogromne sumy pieniędzy.

Skąd się więc bierze taka popularność cyfrowego przetwarzania sygnałów?

Odpowiedź na to pytanie nie jest krótka i jednoznaczna.

Stosowanie **uniwersalnego** cyfrowego przetwarzania sygnałów daje wiele korzyści i przewag. Korzyści te dotyczą również bardziej wyspecjalizowanych zastosowań – **istnieje odrębna klasa zadań, które mogą być zrealizowane tylko przy zastosowaniu DSP z wyłączeniem metod analogowych.**



Istnieje także wiele obszarów techniki, jak np. **transmisja, przechowywanie** czy **kompresja** danych, gdzie zastosowanie metod cyfrowych pozwoli zrealizować konkretne zadanie **o wiele bardziej efektywnie**, niż przy użyciu metod analogowych.

Analizując przedstawioną listę wydawać by się mogło, że DSP jest uniwersalnym panaceum na wszystkie dotychczasowe niedogodności. Niestety sytuacja nie jest aż tak różowa - istnieją znaczące ograniczenia w możliwości zastosowań urządzeń DSP dnia dzisiejszego. Co więcej, można wskazać wiele dziedzin, w których rozwiązania analogowe są preferowane. Tym nie mniej w niniejszym wykładzie postaramy się przeanalizować przewagi i omówić podstawowe cechy i możliwości DSP.

Programowalność

Jednym z powodów powszechnego użycia komputerów cyfrowych (takich jak na przykład PC) jest ich **programowalność i reprogramowalność**. **W przeciągu kilku sekund możemy zmienić funkcję naszego komputera osobistego z procesora tekstu na maszynę grającą**. Czynimy to przez załadowanie innego oprogramowania.

Technologia mikroprocesorowa udostępnia identyczną możliwość systemom cyfrowego przetwarzania sygnałów. Możliwe jest zaprojektowanie jednej konfiguracji sprzętowej, która, przez załadowanie odpowiedniego oprogramowania, może być wykorzystana do realizacji wielu różnych zadań cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Na przykład, bez żadnej zmiany sprzętowej **filtr cyfrowy** może być przeprogramowany tak, by w jednym zastosowaniu był filtrem dolnoprzepustowym, w innym zaś –górno-przepustowym. W przypadku rozwiązania analogowego taka zmiana wymagała będzie modyfikacji całego projektu sprzętowego.

Możliwość zmiany algorytmu systemu przez zwykłą zamianę pojedynczego układu pamięci stałej jest niewątpliwą przewagą DSP. W wielu przypadkach nie wymagane jest nawet przeładowanie oprogramowania. Przykładem może tu służyć system naprowadzania rakiet, w którym warunki bojowe mogą spowodować zaistnienie sytuacji uniemożliwiającej taką czynność.

W przeciwieństwie do DSP konieczność prostej zmiany parametrów układu analogowego wiąże się zwykle z koniecznością dokonania kilku przelutowań podzespołów o dostosowanych do nowych wymagań wartościach znamionowych - poważniejsza modyfikacja wymaga już zmiany projektu całej płytki drukowanej.

Stabilność

Jeśli weźmiemy pod uwagę wymagania eksploatacyjne, tzn. **sposób zachowania się systemu elektronicznego z upływem czasu** lub **przy zmianach temperatury**, wówczas sytuacja staje się jeszcze bardziej krytyczna. Podzespoły elektroniczne, takie jak **rezystory, pojemności** czy **wzmacniacze operacyjne** zmieniają swoje parametry pod wpływem zmian temperatury.

Oznacza to, że **układ analogowy** przy temperaturze 0°C może zachowywać się całkiem inaczej niż przy temperaturze 70°C. Natomiast, w dopuszczalnym zakresie operacyjnym, **układ cyfrowy** nie wykazuje żadnych fluktuacji swych parametrów roboczych pod wpływem zmian temperatury. Innym istotnym czynnikiem wpływającym na zmianę parametrów układów analogowych jest **upływ czasu**. Szczególnie podatne na wpływ czasu są **elementy pojemnościowe**.

Dzieje się tak ze względu na starzenie się ich materiału dielektrycznego, co powoduje zmianę impedancji i w efekcie nieprawidłową pracę układu. Utrata parametrów związana ze zmianami **temperaturowymi i czasowymi** może być częściowo wyeliminowana przez zastosowanie metod kompensacyjnych. Powoduje to jednak znaczne skomplikowanie układu i może mieć wtórny wpływ na inne parametry systemu.

Tym niemniej istnieje jednak ogromna liczba funkcjonujących poprawnie systemów analogowych, co świadczy o tym, że wspomniane niedogodności są do przezwyciężenia.

Problem jednak istnieje i może być rozwiązany przez zastosowanie cyfrowego przetwarzania sygnałów. Co więcej, układy DSP mogą być zaprogramowane w ten sposób, by wykrywały i kompensowały wszystkie niepożądane zmiany w analogowych i mechanicznych częściach systemu jako całości.

Powtarzalność

Systemy cyfrowe są z natury powtarzalne. Jeśli na pięciuset komputerach cyfrowych wykonamy analogiczną operację polegającą na sumowaniu identycznych sekwencji liczb, wówczas rezultat wszystkich operacji będzie dokładnie taki sam, o ile oczywiście komputery te są sprawne. Jeśli natomiast na wejścia pięciuset układów analogowych, zbudowanych z wykorzystaniem podzespołów o analogicznych specyfikacjach, podamy identyczny sygnał, wówczas z całą pewnością odpowiedzi poszczególnych układów będą różne. Dzieje się tak z prostego powodu - stosowane podzespoły analogowe charakteryzują się określonym rozrzutem parametrów.

Tolerancja rozrzutu parametrów **rezystorów** wynosi zwykle 5% - dostępne są także droższe rezystory precyzyjne o tolerancjach 2% lub 1%. Z kolei typowa **pojemność** charakteryzuje się zwykle tolerancją 20% lub gorszą.

Podobnie analogowe (liniowe) układy półprzewodnikowe nie mają stałych parametrów, lecz parametry te znajdują się w pewnym zakresie wartości, a gwarantowane zakresy są niejednokrotnie odmienne dla różnych producentów. **Oznacza to, że niemożliwością jest precyzyjne przewidzenie zachowania się układu analogowego.**

W konsekwencji, dla bardziej wymagających zastosowań wymagany jest żmudny proces nastrajania i testowania każdego układu, stosowanie procedur kalibracyjnych, wykorzystywanie regulowanych i o wiele droższych rezystorów lub pojemności itp.

Łatwiejsza implementacja algorytmów adaptacyjnych

Kilka lat temu opracowano oparty na DSP system wyciszania niektórych szumów w kabinach samochodów, helikopterów i samolotów. W przypadku samochodów eliminowano szумы związane z rezonansem ścian kabiny powodowanym przez wibracje silnika.

Układ eliminacji szumów wykorzystywał aktualną szybkość obrotów silnika i na tej podstawie generował tzw. „antyszum”, który dzięki swym właściwościom fazowym znosił słyszalny szum kabiny. Wewnątrz kabiny, w miejscach usytuowania znajdujących się tam osób, zainstalowane były ponadto mikrofony rejestrujące efekt generacji „antyszumu”.

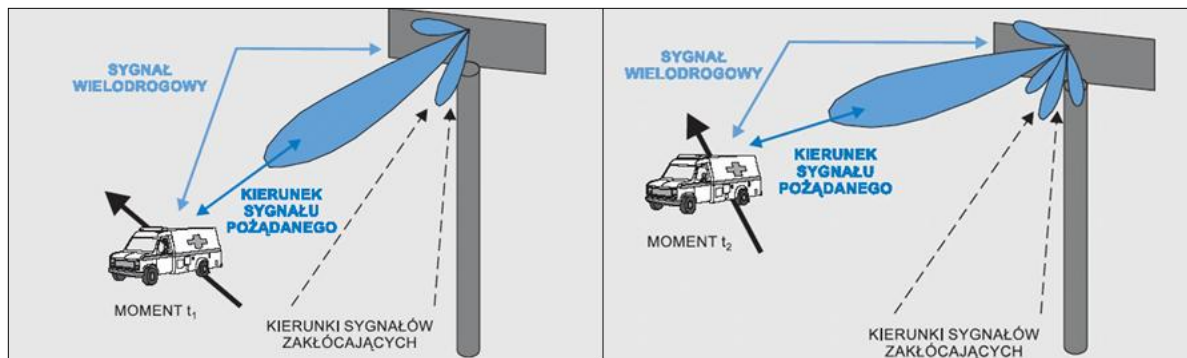
Pozwoliło to na odpowiednią korektę fazy, intensywności i kierunkowości wytwarzanej fali.

W przypadku zmiany szybkości obrotów silnika system adaptował się do nowych warunków.

Tak więc systemy DSP mogą łatwo dostosowywać się do zmian niektórych zmiennych środowiskowych.

Działanie współczesnych systemów telekomunikacji bezprzewodowej opiera się na strukturze komórkowej, w której rolę interfejsu radiowego spełnia ruchomy kanał radiowy. Przy użyciu tego kanału użytkownik systemu uzyskuje dostęp do usług telekomunikacyjnych poprzez **stację bazową**. Urządzenie antenowe stacji bazowej w postaci anteny inteligentnej, które ma współpracować z „zapchanym widmowo” bezprzewodowym medium transmisyjnym, tzn. ze środowiskiem propagacji fal radiowych, musi dostosowywać w czasie rzeczywistym swoje właściwości kierunkowe do zmieniającego się położenia terminalu użytkownika ruchomego oraz do zmieniającego się rozkładu sygnałów zakłócających.

Oznacza to, że w celu zapewnienia ciągłości transmisji wiązka główna anteny inteligentnej musi być zawsze zorientowana w kierunku użytkownika ruchomego, a ściślej w kierunku nadejścia sygnałów od tego użytkownika. Ponadto, w celu ograniczenia wpływu sygnałów zakłócających, na kierunkach ich nadejścia powinny być położone lokalne minima charakterystyki promieniowania tej anteny.



Algorytm adaptacyjny oblicza zbiór kolejnych parametrów koniecznych dla nowo powstałych warunków i zapamiętuje je w pamięci, zamieniając wartości poprzednie. Pewien niewielki zakres adaptacji jest również możliwy w systemach analogowych, jednak całkowita zmiana charakterystyk złożonego zbioru filtrów niezbędnego do realizacji omawianego przykładu znajduje się poza zasięgiem praktycznego układu analogowego.

Kody korekcji błędów

Stosowanie technik wykrywania i korekcji błędów stało się w ostatnich czasach sprawą niezwykle istotną. Niezawodny odczyt i transmisja danych uzależnione są od szeregu potencjalnych źródeł błędów.

Na odczyt danych z dysku kompaktowego wpływ mają stan i ewentualne uszkodzenia jego powierzchni, defekty samej płyty, czy też jej złe ustawienie w napędzie. W przypadku zaś modemu jakość transmisji zależy od szumów i odbić linii długiej, co jest szczególnie istotne dla analogowych linii telefonicznych.

Metody cyfrowe umożliwiają dodanie do przekazywanego strumienia bitów pewnej porcji informacji „nadmiarowej”, która jest wykorzystywana w celu wykrycia błędu zaistniałego w podstawowej części danych.

W bardziej zaawansowanych systemach stosowane są algorytmy generujące taką postać bitów nadmiarowych, na podstawie których **można zrekonstruować uszkodzoną informację** danych oryginalnych.

Pierwszy z omówionych przypadków może dotyczyć znanej metody **sprawdzania parzystości**; drugi z nich łączy się z o wiele bardziej złożonymi technikami, takimi jak **kody blokowe** czy **korekcja błędów**.

Jest to tematyka bardzo poważna omówiono ją w wielu tekstach poświęconych transmisji danych, jednak znajduje się ona poza zasięgiem naszych wykładów.

Funkcje specjalne

Istnieje kilka ważnych zadań przetwarzania sygnałów, które nie mogą być rozwiązane z pomocą układów analogowych. Klasycznym przykładem są **filtry liniowe fazowo**. Filtr cyfrowy o skończonej odpowiedzi impulsowej z symetrycznie rozłożonymi współczynnikami w stosunku do punktu środkowego ma liniową charakterystyką fazową.

Innym typem filtru, który łatwo może być zrealizowany za pośrednictwem metod cyfrowych jest filtr **szczelinowy** o stromym punkcie odcięcia częstotliwości granicznej. Jest praktycznie niemożliwe wykonanie takiego filtru metodami analogowymi.

Kompresja danych

Powodem, dla którego kompresja mowy, obrazów i innych danych okazuje się tak ważna jest to, że kanały transmisyjne i nośniki informacji są drogie, a zatory linii transmisyjnych często wymuszają wykorzystywanie kompresji danych, szczególnie przy ograniczeniach wynikających z warunków pracy w czasie rzeczywistym.

Satelity, światłowody czy zwykłe kable są kosztowne zarówno podczas ich instalacji jak i eksploatacji. Podstawowym celem jest więc możliwość przekazania jak największej ilości informacji w jak najkrótszym czasie.

We wszystkich zastosowaniach kompresji analogowej część informacji jest zawsze tracona. Typowym przykładem jest tu analogowa linia telefoniczna o paśmie limitowanym w celu umożliwienia przesyłu rozmów multipleksowanych. Efektywne pasmo przenoszenia pojedynczego kanału wynosi w tym przypadku nie więcej niż 3 kHz.

Podczas wykorzystywania cyfrowej transmisji i przechowywania informacji stosowane są dwie formy kompresji: **bezstratna** i **stratna**. Użycie kompresji bezstratnej powoduje, że informacja odtworzona jest identyczna z informacją oryginalną. Dla kompresji mowy i obrazów niewielkie pogorszenie jakości może być akceptowane, bądź wręcz niedostrzegalne przez odbiorcę. Stosowanie kompresji stratnej powoduje utratę pewnej części informacji, dotyczącej najczęściej mniej znaczących szczegółów. Oczywiście podczas przesyłania informacji o finansach czy kodów komputerowych żadna strata informacji nie jest dozwolona. Zaletą kompresji stratnej polega po prostu na tym, że jej użycie powoduje jeszcze większy stopień zagęszczenia informacji i dodatkowe zmniejszenie masywów danych.

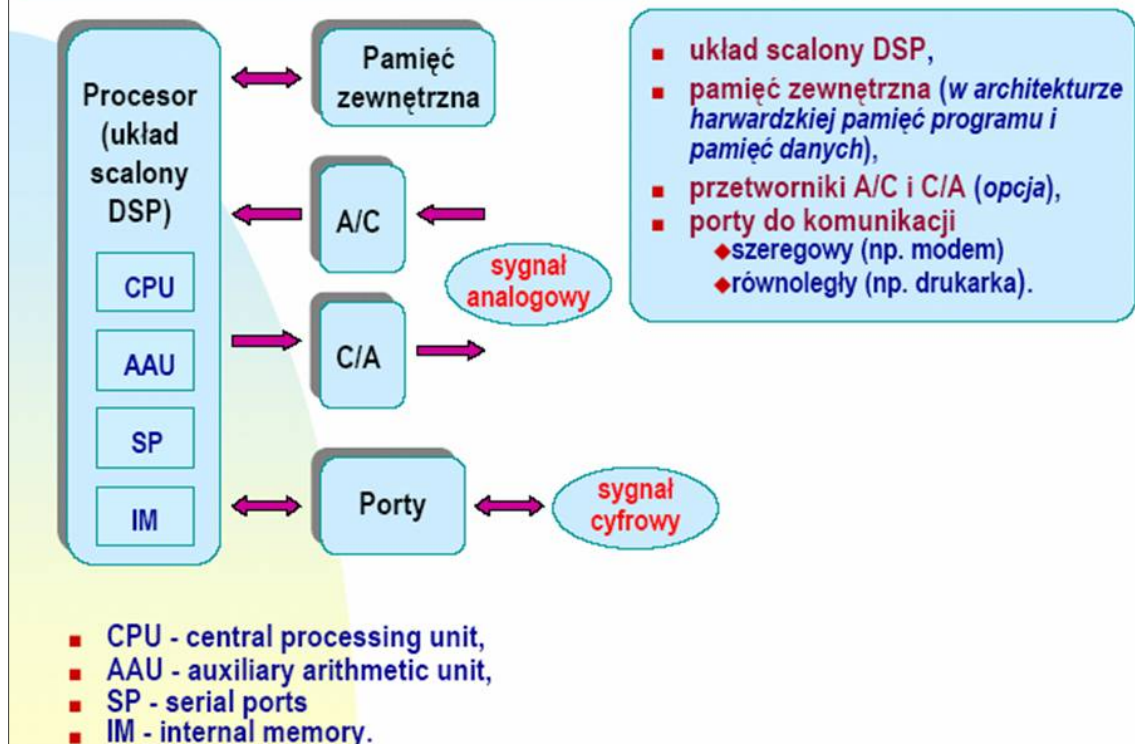
Praktyczne systemy DSP

Zastosowania CPS:

- urządzenia radiokomunikacji lądowej dla przemysłowego, komercyjnego i wojskowego użytku, włączając w to aparaturę systemów trankingowych, komórkowych i przywoławczych;
- telekomunikacyjne systemy satelitarne;
- systemy światłowodowe i aparatura łączności optycznej (uwzględniając podczerwień);
- systemy i aparatura telemetryczna;
- aparatura łączności faksymile;
- osprzęt nowoczesnych central telefonicznych;
- urządzenia radiolokacyjne i radionawigacyjne (włączając aparaturę stacji poszukiwania, rozpoznawania, wykrywania, naprowadzania i automatycznego śledzenia);
- systemy oraz aparatura optyczno-elektroniczna dla wyszukiwania i obserwacji, wraz z aparaturą kontroli, testowania oraz inny osprzęt wspomagający;
- aparatura hydrolokacyjna i hydroakustyczna, systemy poszukiwania, rozpoznania i podążania;
- systemy „wizji maszynowej” i dedykowanego monitoringu ;
- radioelektroniczna aparatura meteorologiczna i radioastronomiczna;
- aparatura do pomiarów geofizycznych;
- sprzęt przeciwdziałania radiowego (włączając stacje generowania zakłóceń radiowych i aparaturę podwodną);
- wyspecjalizowane urządzenia dla „wywiadu radiotechnicznego”;

- systemy nawigacyjne i aparatura samolotów, okrętów, pojazdów lądowych (autopiloty, latarnie radiowe, pelengatory, aparatura systemów nawigacji krótko dystansowej);
- aparatura cyfrowej telewizji i audycji radiowej;
- systemy astroorientacji rakiet oraz statków kosmicznych;
- aparatura rejestracji i odtwarzania materiałów dźwiękowych;
- aparatura kontroli bezinwazyjnej metali i materiałów (defektoskopy, przyrządy do pomiarów emisji akustycznej);
- karty i układy multimedialnego wspomagania komputerów PC (procesory geometryczne, akceleratory, karty graficzne, wideoprocessory itd.)

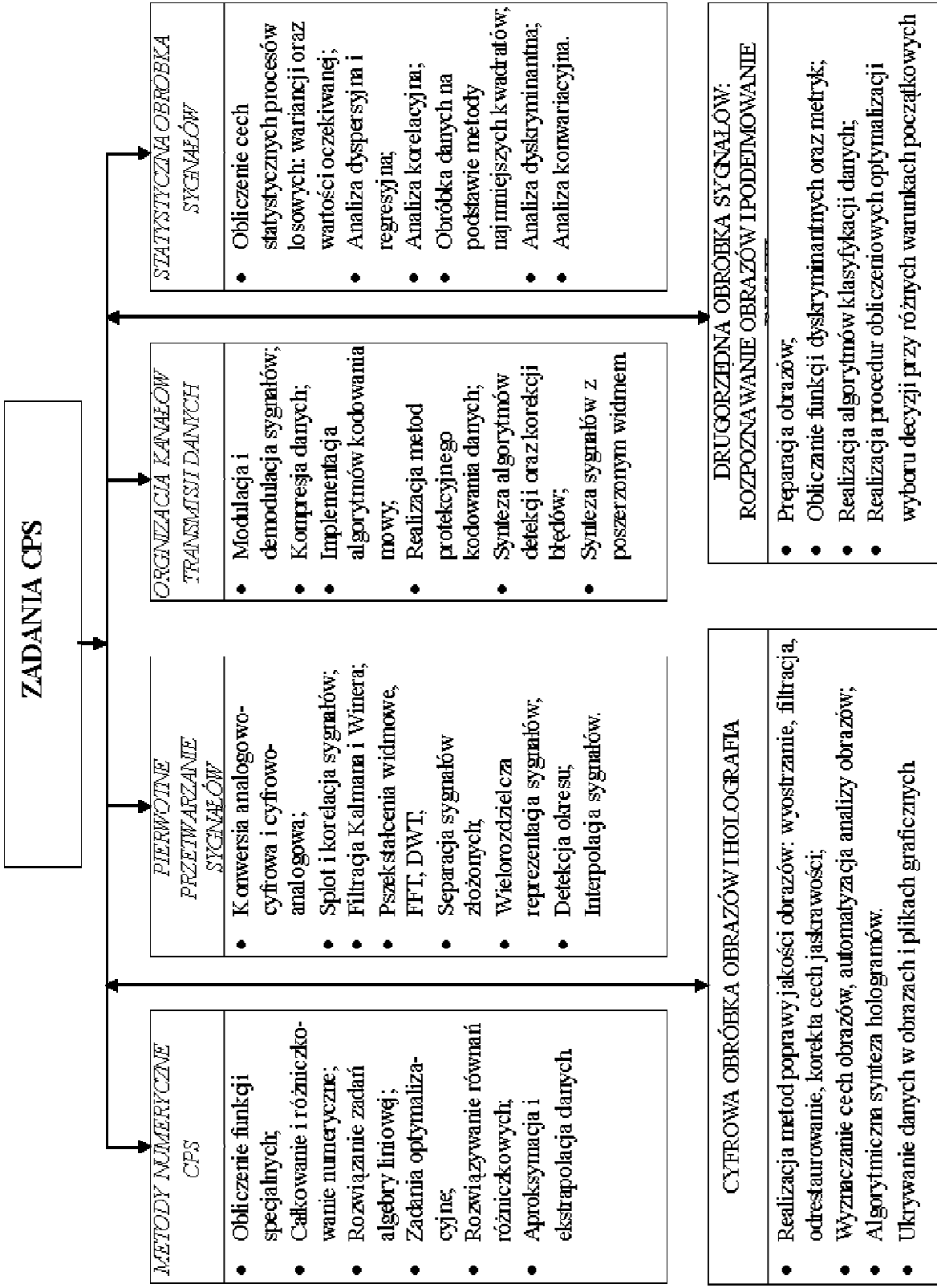
Typowy system cyfrowego przetwarzania sygnałów



Układy CPS dzielą się na stało- i zmiennoprzecinkowe.

Procesory zmiennoprzecinkowe dopuszczają większy zakres dynamiki sygnału - nie wymagają skalowania wyników obliczeń, zmniejszają ryzyko przepełnienia.

Procesory stałoprzecinkowe są szybsze w działaniu i tańsze.



Wymagania dla systemów CPS

N ^o	Obszar zastosowań	Wymagana prędkość (op./sek)	Zakres dynamiki, (bity)
1.	Systemy łączności radiowej i telefonii, obróbka sygnałów mowy, defektoskopia	10^8	Stały przecinek, 8-16
2.	Kodowanie i kompresja obrazów, radio i hydrolokacja, telewizja przemysłowa	10^9	Stały przecinek, 8-16
3.	Systemy astroorientacji, kartografia cyfrowa i fotografia satelitarna, hydroakustyka	10^9	Zmienny przecinek, 16-32
4.	Nawigacja według map terenowych, Radiowe układy pomiaru wysokości, dalmierze radiowe	10^9 - 10^{10}	Stały przecinek, 8-16
5.	Systemy astroorientacji, kartografia cyfrowa i fotografia satelitarna, hydroakustyka	10^9 - 10^{10}	Stały przecinek, 8-16
6.	Rozpoznawanie wzorców, analiza scen dynamicznych	10^9 - 10^{10}	Stały przecinek, 16-32
7.	Systemy i środki modelowania przestrzennego, wizualizacji i grafiki komputerowej	10^{10} - 10^{11}	Zmienny przecinek, 16-32
8.	Systemy obróbki procesów i sygnałów szybkozmiennych	10^9 - 10^{10}	Zmienny przecinek, 8-16
9.	Holografia cyfrowa, cyfrowe procesory optyczne	10^{10} - 10^{11}	Stały przecinek, 8-16
10.	Przyszłościowe systemy CPS, sieci neuronowe, molekularne procesory DSP	10^{12}	Zmienny przecinek, 3 2-64

Powinniśmy teraz nieco obniżyć poziom entuzjazmu jaki mógł się pojawić u Państwa na temat cyfrowego przetwarzania sygnałów. DSP ma niestety pewne ograniczenia związane z możliwościami jego praktycznego zastosowania. Niezależnie od tego, że nieustannie pojawiają się coraz to nowsze i bardziej szybkie urządzenia DSP, to wciąż istnieje wiele poważnych barier, uniemożliwiających zastosowanie tej techniki w warunkach czasu rzeczywistego. Ograniczenia stają się jeszcze bardziej wyraziste, gdy pod uwagę brany jest koszt systemu. Nowe rozwiązania przetwarzania równoległego DSP mogą być realnie rozpatrywane i wykorzystywane w nowych dziedzinach zastosowań pod warunkiem uwzględnienia ciągle rosnącego kosztu takich opracowań. Jako przykład możliwości aplikacyjnych dostępnych obecnie urządzeń DSP rozpatrzmy kilku generacji rodziny TMS320 firmy Texas Instruments (TI).

Rodzina procesorów TMS320

Stałoprzecinkowe 16-bitowe (niski koszt)

- C1x - sterowniki dysków twardych
- C2x - aparaty faksymile
- C2xx - sterowniki wbudowane
- C5x - procesory głosu
- C54x - cyfrowe telefony komórkowe

Zmiennoprzecinkowe 32-bitowe (duża dokładność)

- C3x - hi-fi, wideotelefon, poczta głosowa, grafika 3D
- C4x - przetwarzanie równoległe (VR, przetwarzanie obrazów)

Inne

- C8x (4 DSP + RISC) - wideotelefon, grafika 3D, VR, multimedia
- C6x - VLIW (very long instruction word) (2 mnożarki, 6 ALU → 1600 MIPS) - zastosowania wielokanałowe i wielofunkcyjne (stacje bazowe telefonii komórkowej, modemy kablowe, wielokanałowe systemy telefoniczne)

Nie podaję tutaj konkretnych cen tych urządzeń, gdyż okazać się one mogą już nieaktualne. Chcę natomiast podkreślić, że nie są to układy drogie, a cena typowego urządzenia stałoprzecinkowego wynosi mniej niż jeden dolar za MIPS (milion operacji na sekundę).

Aczkolwiek lista ta jest imponująca, tym niemniej nadal istnieją ograniczenia możliwości stosowania jednoukładowych urządzeń DSP.

Nie mamy do tej pory niezawodnego systemu kontrolowania dostępu sterowanego mowa ludzką, czy też niezależnego od głośnika systemu rozpoznawania mowy.

Ujemna strona zastosowań DSP, czyli ścisła zależność między ceną a wydajnością systemu wciąż jeszcze uniemożliwia wprowadzanie nowych rozwiązań ze względów ekonomicznych.

Na całe szczęście technologia półprzewodnikowa ma tę właściwość, że stosunek **wydajność/cena** jest przez producentów nieprzerwanie obniżany i liczba oraz zakres kolejnych zastosowań DSP stale się powiększa. Przenikanie systemów DSP do urządzeń powszechnego użytku pozwoliło znacznie zmniejszyć koszt obwodów DSP. Jednocześnie rozwój równoległego przetwarzania DSP udostępnił systemy o wiele bardziej wydajne.

Tak więc zakres zastosowań DSP rozszerza się zarówno od strony powodowanej niskim kosztem urządzeń, jak i od strony wysokiej wydajności i funkcjonalności systemu.

PODSUMOWANIE

W ostatnich dziesięciu latach osiągnięto znaczący postęp w dziedzinie projektowania układów analogowych.

Własności układów analogowych

- mała dokładność,
- wrażliwość na zakłócenia,
- możliwość zastosowania w zakresie dużych częstotliwości oraz do przetwarzania słabych i silnych sygnałów,

Okres ten charakteryzuje się także ogromnym wzrostem wykorzystania urządzeń do cyfrowego przetwarzania sygnałów. Z pomocą DSP rozwiązano cały szereg nierealizowalnych przedtem problemów.

Zalety cyfrowego przetwarzania sygnałów są przeogromne i wątpliwym wydaje się by w najbliższej przyszłości nastąpił jakiś przełom w dziedzinie analogowego przetwarzania sygnałów. W chwili obecnej układy analogowe można rozpatrywać w niektórych zastosowaniach jako funkcjonujące w partnerstwie z DSP, w innych zaś jako pełniące rolę układów wspomagających, realizujących pewien stopień przetwarzania wstępnego.

Zalety cyfrowego przetwarzania sygnałów

- wynikające z użycia układów cyfrowych zamiast analogowych,
- związane z ograniczeniami analogowych metod przetwarzania sygnałów.



Główna zaleta układów cyfrowych jest elastyczność funkcjonalna wynikająca z możliwości *programowania*.
(Programowanie układów analogowych przez zmianę połączeń i nastawianie wzmacnienia jest niepraktyczne.)

Inne zalety układów cyfrowych

- większe dopuszczalne tolerancje wartości elementów układu,
- mała wrażliwość na czynniki zewnętrzne (np. temperaturę, sygnały zakłócające) i wewnętrzne (starzenie elementów, dryft),
- dokładność operacji może być regulowana przez dobór długości słowa,
- układy są całkowicie reprodukowalne (nie wymagają strojenia)
- wytwarzanie układów jest ułatwione (nie wymagają stosowania dużych pojemności i indukcyjności).

Zalety cyfrowego przetwarzania sygnałów

Niektóre operacje przetwarzania są skomplikowane w realizacji analogowej, podczas gdy ich implementacja cyfrowa jest prosta.

Układy łatwo realizowane w formie cyfrowej

- idealna pamięć, o nieskończenie długim okresie przechowywania sygnału (pozwala na przetwarzanie sygnałów o bardzo małej częstotliwości),
- filtry o liniowej charakterystyce fazowej (transmisja danych, telewizja),
- układy adaptacyjne (samoregulujące),
- układy do obliczania transformat sygnałów (np. FFT)
- układy do przetwarzania sygnałów wielowymiarowych (np. obrazów).

Jest również oczywiste, że DSP charakteryzuje się ograniczeniami częstotliwościowymi wynikającymi z czasu cyklu procesora oraz złożonością algorytmów. Tak więc dla sygnałów o szerszych pasmach stosowane są wciąż techniki analogowe.

Wady cyfrowego przetwarzania sygnałów (CPS)

- układy cyfrowe pobierają znaczną moc z zasilacza (pasywne układy cyfrowe nie są jeszcze znane),
- układy cyfrowe nie mogą przetwarzać sygnałów o bardzo dużej częstotliwości (jednak zakres częstotliwości ciągle rośnie),
- zastosowanie CPS w środowisku analogowym wymaga użycia przetworników AC i CA, które mogą być skomplikowane i drogie,
- przetwarzanie AC i CA sygnałów słabych (np. antenowych) i silnych (np. sterujących głośnikiem) jest bardzo trudne; wymagane jest stosowanie odpowiednio przedwzmacniaczy i układów mocy w takich przypadkach,
- przetwarzanie sygnałów określonego rodzaju (np. sygnału mowy) wymaga układów CPS o znacznie szerszym paśmie w porównaniu do układów analogowych.

Powoduje to dalszy rozwój technologii analogowych w takich zastosowaniach, jak na przykład komunikacja bezprzewodowa.

Zarówno w stosunku do dziedziny przetwarzania analogowego jak i cyfrowego kolejne etapy postępu technologicznego są intensywnie wykorzystywane przez użytkowników, a potrzeby nowych systemów elektronicznych inspirują nieustannie projektantów urządzeń półprzewodnikowych.



Do przetwarzania sygnałów wykorzystuje układy mieszane, zawierające zarówno obwody analogowe jak i cyfrowe (ang. *mixed-signal circuits*).