

Sygnał okietznany

Cyfrowe procesory sygnałowe zdomowały się w bardzo wielu nowoczesnych urządzeniach. Również komputery coraz częściej wykorzystują ich możliwości. CHIP przedstawi najważniejsze cechy tych układów.

Telefony komórkowe, wzmacniacze audio, urządzenia medyczne, systemy przetwarzania mowy i obrazów, a nawet samochody nie potrafią już obyć się bez procesorów sygnałowych (Digital Sound Processing). Układy DSP znajdują też szerokie zastosowanie w technice komputerowej. Są one wykorzystywane do obróbki danych we wszystkich nowoczesnych płytach głównych, w modemach i wielu kartach dźwiękowych. Ciekawym rozwiązaniem są karty wielofunkcyjne. Ich procesory, po odpowiednim zaprogramowaniu, przetwarzają albo dane audio, albo modemowe.

Zauważane niemal wyłącznie przez fachowców procesory sygnałowe podlegają dynamicznemu rozwojowi. Na udoskonalenie technologii przeznaczane są ogromne sumy, przez co każda nowa generacja układów odznacza się większą wydajnością oraz bogatszym zestawem funkcji.

DSP są specjalizowanymi procesorami przeznaczonymi do cyfrowej obróbki sygnałów. Wszelkie operacje wykonywane są na bazie zadanych algorytmów. Jednocześnie możliwe jest przeprogramowanie procesorów w trakcie pracy, co znacznie zwiększa ich elastyczność. Moc obliczeniowa nowoczesnych układów DSP dorównuje, bądź wręcz przewyższa możliwości współczesnych procesorów PC.

Dzięki zastosowaniu układów DSP możliwe jest dowolne manipulowanie w czasie rzeczywistym sygnałami cyfrowymi. Przetworzony sygnał – również w postaci cyfrowej – pojawia się na wyjściu procesora, skąd w większości przypadków doprowadzany jest do przetwornika cyfrowo-analogowego.

Cyfrowa obróbka sygnałów ma wiele zalet w porównaniu z techniką analogową. Układy cyfrowe są programowalne,

co zapewnia ich większą elastyczność, a funkcje urządzenia można szybko zmienić, bez użycia lutownicy. Wyniki są w pełni powtarzalne – w przypadku układów analogowych jest to trudne do spełnienia ze względu na rozrzut wartości elementów. Z tego powodu przetwarzanie cyfrowe zapewnia większą precyzję. Nie trzeba też martwić się zmianą parametrów układu wywołaną starzeniem się elementów składowych. Dzięki przedstawionym zaletom technika DSP szybko zyskała popularność, pomimo wysokich kosztów w początkowej fazie jej rozwoju.

Ponadto cyfrowe przetwarzanie sygnałów pozwala uzyskać efekty, które metodami analogowymi byłyby trudne lub wręcz niemożliwe do zrealizowania. Przykładem są cyfrowe filtry o idealnych charakterystykach transmitancji.

Cyfrowe przetwarzanie sygnałów

Ideę cyfrowego przetwarzania sygnałów przedstawia schemat na stronie 79. W odstępach czasu określonych przez okres próbkowania T , przetwornik analogowo-cyfrowy odczytuje wartość napięcia sygnału wejściowego. Odczytana wartość dostarczana jest do DSP. Odwrotność okresu T nazywamy częstotliwością próbkowania f_A . Aby poprawnie skwantować sygnał wejściowy, f_A musi być (zgodnie z twierdzeniem Shannona) najmniej dwukrotnie większa od maksymalnej częstotliwości przetwarzanego sygnału.

Filtr dolnoprzepustowy na wejściu przetwornika usuwa wszystkie wyższe częstotliwości z widma analizowanego sygnału, których ewentualna obecność jest przyczyną zniekształceń określanymi efektem aliasingu. Zmierzona przez przetwornik wartość napięcia obciążona jest pewnym błędem. Dokładność pomiaru zależy od rozdzielczości i dokładności przetwarzania.

Przetwarzaniu analogowo-cyfrowemu towarzyszy szum zwany szumem kwantyzacji. Jego poziom (w przeciwieństwie do szumu charakterystycznego dla urządzeń analogowych) można łatwo przewidzieć, gdyż zależy wyłącznie od rozdzielczości przetwornika A/C. W dodatku wartość szumu nie wzrasta w trakcie cyfrowej obróbki sygnału.

Właściwa obróbka sygnału zachodzi w procesorze DSP. Przetwarza on sygnał w sposób zaprogramowany przez użytkownika. Cechą charakterystyczną procesorów sygnałowych jest to, że sposób ich działania można zmieniać w szerokim zakresie na drodze programowej. Na wyjściu procesora znajduje się przetwornik cyfrowo-analogowy oraz filtr dolnoprzepustowy, który wygładza schodkowy przebieg sygnału.



W niektórych przypadkach nie ma potrzeby stosowania przetwornika analogowo-cyfrowego na wejściu DSP. Jeśli procesor pracuje jako generator sygnałowy lub syntezytor wawetable, wówczas dane wyjściowe generowane są programowo.

Architektura DSP znacznie różni się od typowej dla mikroprocesorów PC architektury Von Neumanna, która charakteryzuje się współdzieleniem pamięci przez dane i program. Magistrala procesorów sygnałowych pracuje zgodnie z technologią Harvard. W tym przypadku pamięć danych jest oddzielona od pamięci programu (patrz rysunek „Architektura DSP”). Istotną zaletą takiego rozwiązania jest możliwość jednoczesnego dostępu do kodu rozkazu i do danych. Nie można jednak dowolnie dzielić całej dostępnej pamięci na program i dane. Procesor DSP posiada kilka wewnętrznych szyn danych i adresowych. Specjalny układ logiczny steruje wewnątrz układu przełącznikami, które łączą odpowiednie magistrale wewnętrzne z zewnętrznymi.

ALU i rejestry

Najważniejszym elementem procesora DSP jest jednostka arytmetyczno-logiczna (ALU). W niej wykonywane są operacje dodawania lub mnożenia dwóch liczb, z których przynajmniej jedna jest zazwyczaj wartością napięcia sygnału. Często ALU mnoży dwie liczby, po czym składa je w rejestrze zwanym akumulatorem (rozkaz MAC, Multiply-Accumulate). Zazwyczaj operacje takie wykonywane są w jednym, względnie dwóch cyklach zegarowych. Z jednej strony jest to możliwe dzięki zastosowaniu architektury Harvard, z drugiej strony operacje dodawania i mnożenia realizowane są sprzętowo, a nie za pośrednictwem mikrokodów.

Jednostka arytmetyczno-logiczna pozwala ponadto dokonywać przesunięć na bitach oraz logicznie łączyć dwie liczby. Dzięki takim narzędziom programista procesora DSP jest w stanie rozwiązać praktycznie wszystkie problemy związane z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów. Jedynym ograniczeniem jest moc obliczeniowa procesora.

Układy DSP posiadają wewnętrzne komórki pamięci On-Chip-RAM, które – podobnie jak w procesorach uniwersalnych – noszą nazwę rejestrów. Dostęp do rejestrów jest dużo szybszy niż do pamięci zewnętrznej. DSP posiadają też specyficzne rejestry (tzw. rejestry wskaźnikowe), wykorzystywane do pośredniego adresowania pamięci.

Zależnie od typu procesora rejestry mają długość 16, 24 lub 32 bitów. Wraz ze wzrostem długości rejestru zwiększa się

Algorytmy wykorzystywane przez DSP

Dyskretna transformata Fouriera (DFT) ma kluczowe znaczenie dla cyfrowego przetwarzania sygnałów. Jako przykłady zastosowania DFT można wymienić filtrację i analizę widmową sygnałów. Dyskretna transformata Fouriera jest algorytmem matematycznym pozwalającym przedstawiać sygnały w dziedzinie częstotliwości – w postaci amplitudy i fazy składowych widmowych. W efekcie uzyskujemy pojedyncze (dyskretne), zespolone prążki spektralne.

Transformatę Fouriera przeprowadza się dla ciągu N próbek f_n – tzw. okienka. Im wartość N jest większa, tym wyższa jest dokładność analizy. W praktyce najczęściej stosuje się $N=1024$. Działanie algorytmu sprowadza się – w uproszczeniu – do wielokrotnego mnożenia i dodawania wyników pośrednich. Największym problemem jest duża liczba wymaganych operacji – konieczne jest przeprowadzenie N^2 mnożeń i $N*(N-1)$ sumowań na liczbach zespolonych.

Szybka transformata Fouriera (FFT) jest odmianą DFT postępującą

się mniej złożonym algorytmem, dając przy tym identyczne wyniki. Zaleca ta sprawa, że FFT jest bardzo często wykorzystywana przez układy DSP. Najczęściej wykorzystywanym algorytmem FFT jest algorytm Cooley-Tukey'a, który wymaga, aby N było potęgą liczby 2. W praktyce warunek ten nie jest jednak znaczącym ograniczeniem.

FFT wykorzystuje symetrię zachodzącą pomiędzy elementami równania (zapisanymi w postaci macierzowej), która pozwala wyłączyć niektóre współczynniki przed nawias. Dzięki temu można zredukować liczbę wymaganych operacji do $N*\log_2 N$.

Po przeprowadzeniu DFT lub FFT otrzymane widmo sygnału można poddać dalszym przekształceniom. Aby zmienić brzmienie dźwięku wystarczy cyfrowo wzmocnić jedne i wytłumiczyć inne prążki widma. Następnie należy przeprowadzić odwrotną transformatę Fouriera, przedstawiającą sygnał z powrotem w dziedzinie czasu. Wynik przekształceń słyszalny jest na wyjściu przetwornika C/A.

dokładność obliczeń. Nawet wtedy, kiedy sygnał wejściowy skwantowany został z rozdzielczością 16 bitów, stosowanie dłuższych rejestrów zmniejsza błędy zaokrąglania wyników pośrednich. Aby zapobiec przepelnieniom, wyniki dodawania i mnożenia składowane są najczęściej w specjalnych rejestrach o podwójnej długości.

Arytmetyka stałoprecyzyjowa i zmiennoprecyzyjowa

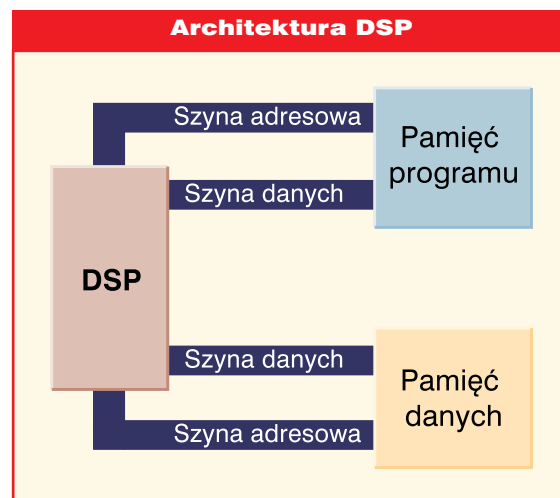
Procesory sygnałowe dzielą się na stałoprecyzyjne (fixed-point) i zmiennoprecyzyjne (floating-point). Obecnie procesory stałoprecyzyjne produkowane są jedynie w wersjach 16- i 24-bitowych. Wszystkie wartości przedstawiają w postaci liczb całkowitych, co w niektórych sytuacjach zmusza programistę do stosowania specjalnych zabiegów. Zazwyczaj najbardziej znaczący bit wykorzystywany jest do zapisania informacji o znaku liczby. Arytmetyka stałoprecyzyjna niesie ze sobą potencjalne niebezpieczeństwo przekroczenia zakresu przez wynik sumowania lub mnożenia. Obowiązkiem programisty jest nie dopuścić do takiej sytuacji, stosując w razie konieczności operacje skalowania.

Procesory zmiennoprecyzyjne posiadają najczęściej architekturę 32-bitową. Dzięki specyficznemu sposobowi zapisu liczb czasochłonne skalowanie wartości

stało się zbędne. W 32-bitowym słowie 8 bitów przeznaczonych jest na zapisanie mantysy, 24 na eksponentę, z czego jeden bit przechowuje informację o znaku. Procesory zmiennoprecyzyjne są szczególnie przydatne w przypadku obróbki sygnałów o bardzo dużej amplitudzie, jednak przy takiej samej długości rejestrów stałoprecyzyjne DSP z poprawnie dobranym skalowaniem cechują się większą dokładnością.

Po resecie

Wiele procesorów sygnałowych posiada wewnętrzną pamięć nieulotną, w której



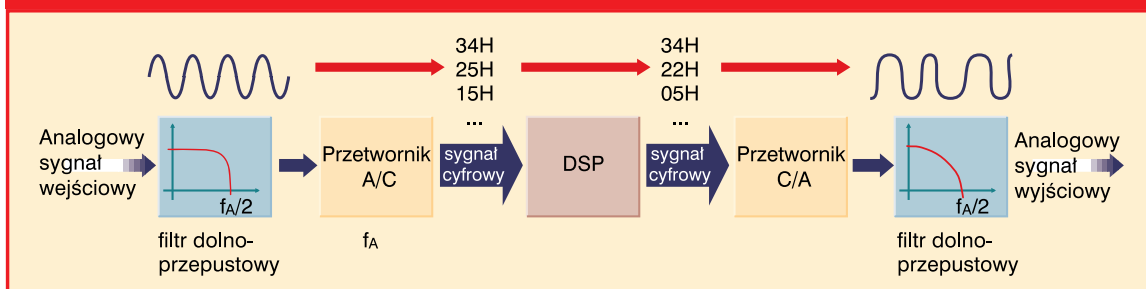
Cechą charakterystyczną architektury procesorów DSP jest rozdzielenie przestrzeni adresowej programu i danych

zapisano program inicjujący procesor (Bootstrap-ROM). Program ten uruchamiany jest po restarcie układu i odpowiada za wczytanie i uruchomienie właściwego programu procesora.

W seryjnie produkowanych urządzeniach właściwy program znajduje się w zewnętrznym EPROM-ie, skąd jest ładowany, a następnie uruchamiany.

Procesory DSP posiadają też wiele innych możliwości, takich jak obsługa przerwań, bezpośredni dostęp do pamięci (DMA) i wielozadaniowość. Funkcje te

Zasada cyfrowego przetwarzania sygnałów



Przed konwersją sygnału do postaci cyfrowej jest on przepuszczany przez filtr dolnoprzepustowy w celu uniknięcia zniekształceń (efektu aliasingu)

realizowane są w różny sposób przez różnych producentów, a ich opis przekracza ramy niniejszego artykułu.

Pierwsze programy

Jak już wcześniej wspomnieliśmy, zastosowania procesorów sygnałowych są

bardzo różnorodne. Zależnie od rodzaju uruchomionego oprogramowania, ten sam układ może realizować odmienne funkcje.

Bardzo prostym przykładem zastosowania DSP jest cyfrowa regulacja głośności dźwięku. Wartości kolejnych próbek pojawiających się na wejściu procesora mnożone są przez zadany współczynnik, a wynik mnożenia wysyłany jest na wyjście. Jednostka arytmetyczno-logiczna realizuje mnożenie w jednym albo dwóch cyklach maszynowych. Jeżeli współczynnik jest mniejszy od 1, wówczas dźwięk jest tłumiony, a tor sygnałowy zachowuje się jak dzielnik napięciowy. Po dobraniu współczynnika większego od jedności układ będzie działał jak wzmacniacz.

Oczywiście funkcje realizowane w rzeczywistych urządzeniach są znacznie bardziej skomplikowane. Regulację głośności znacznie łatwiej można przeprowadzić za pomocą zwykłego potencjometru, który nie wymaga sterowania z poziomu komputera PC. Jednak w opisanym poniżej przykładzie zastosowanie procesora DSP jest znacznie bardziej uzasadnione.

Niewiele trudniej niż cyfrowy potencjometr wykonać można modulator sygnału. W tym przypadku zamiast stałego współczynnika wzmocnienia należy zastosować mnożnik, którego wartość zmienia się zgodnie z przyjętym algorytmem. Jeśli funkcja przyjmuje kolejne wartości sygnału sinusoidalnego, wówczas efektem mnożenia będzie zmodulowany sygnał wejściowy.

Efekt pogłosu lub echa uzyskuje się zapamiętując kolejne próbki, a następnie dodając próbkę do aktualnej wartości sygnału z opóźnieniem. W tym przypadku programuje się obszar pamięci jako bufor spełniający rolę linii opóźniającej. Posługując się indeksowym (pośrednim) adresowaniem pamięci, funkcję taką można zrealizować stosunkowo łatwo. Algorytm realizujący funkcję cyfrowego regulatora głośności jest bardzo prosty – cały program assemblerowy nie przekracza 10 linii.

DSP dla początkujących

Jest rzeczą naturalną, że producenci DSP zainteresowani są rozpowszechnianiem swoich produktów. Z tą myślą proponują niedrogi zestaw DSP sprzedawane razem z oprogramowaniem rozwojowym przeznaczonym dla początkujących i średniozaawansowanych programistów. Na przykład Texas Instruments proponuje DSP-Starter-Kit w cenie



ok. 350 zł. Zestaw ten można polecić osobom, które pragną zaznajomić się z techniką DSP. Jego możliwości są więcej niż zadowalające: taktowany zegarem 50 MHz procesor TI jest w stanie dekodować w czasie rzeczywistym sygnał audio zakodowany w standardzie MPEG. Początkujący mają więc niemal nieograniczone możliwości eksperymentowania. Jest to wy tłumaczeniem dla ogromnej popularności grup użytkowników pakietów DSP, których członkowie wymieniają się między sobą samodzielnie napisanymi aplikacjami i bibliotekami programów. Przykład takiej grupy znaleźć można na internetowym

serwerze firmy TI, który bezpłatnie udostępnia swoje zasoby.

W skład dostarczanego pakietu wchodzi kompletna karta, na której zamontowany jest zmiennoprzecinkowy procesor TMS320C31 o 32-bitowej architekturze. Zawarty w zestawie przewód umożliwi połączenie karty z portem równoległym komputera PC. Karta posiada wejście i wyjście analogowe, użytkownik musi jedynie zatroszczyć się o zasilanie układu. Po podłączeniu standardowego zasilacza sieciowego można rozpocząć pracę. Dołączone oprogramowanie zawiera kompilator assemblera, debugger i kilka przykładowych aplikacji.

Texas Instruments oferuje także Teaching-Kit za ok. 700 zł. Został on stworzony z myślą o uczelniach wyższych, nadaje się jednak znakomicie dla wszystkich, którzy chcą zapoznać się z podstawami cyfrowego przetwarzania obrazów. Zestaw ten – bardzo podobny do TI-Starter-Kit – pracuje ze stałoprzecinkowym procesorem 40 MHz. Poza tym jego dokumentacja ma raczej dydaktyczny charakter, a zestaw programów jest bardziej rozbudowany.

Motorola proponuje moduł rozwojowy oznaczony symbolem DSP56002EVM w cenie 600 zł. Serce zestawu jest 24-bitowy procesor stałoprzecinkowy DSP56002. Kartę łączy się z komputerem PC za pośrednictwem złącza szeregowego. Również w tym pakiecie zawarta jest dokumentacja i kompilator.

Już w niedalekiej przyszłości dostępne będą w sprzedaży modele DSP56811EVM za ok. 350 zł i DSP56030EVM kosztujący ok. 810 zł.

Producenci procesorów sygnałowych

Do czołowych producentów procesorów DSP należą Texas Instruments, Motorola, Analog Devices i AT&T. Oferta tych firm jest bardzo bogata i niemal w zupełności pokrywa zapotrzebowanie na urządzenia DSP. Dla początkujących oraz dla osób, które chcą sprawdzić w jaki sposób programuje się procesory sygnałowe przeznaczone są specjalne zestawy. W ramce „DSP dla początkujących” wymieniono kilka godnych polecenia artykułów. Możliwości ich wykorzystania jest bardzo wiele. Po podłączeniu do domowego zestawu stereo można, na przykład, zaprogramować efekt symulacji pomieszczeń o różnych rozmiarach. Dodanie czujnika na wejściu pozwala przekształcić układ w programowalny system pomiarowy.

IBM produkuje popularny układ Mwave-Chip, który w notebookach wykorzystywany jest do obróbki dźwięku oraz sygnałów modemowych. Japońska firma Hitachi posiada układ wchodzący w skład serii mikrokontrolerów SuperH, w których zintegrowano funkcje DSP. Ramka informacyjna na końcu artykułu zawiera kilka adresów URL, pod którymi znaleźć można więcej informacji.

Przyszłość DSP w branży PC

W branży PC zauważalny jest odwrót od układów DSP. Duża moc obliczeniowa procesorów Pentium Pro pozwala wykorzystać je do zadań, które jeszcze do niedawna były domeną specjalizowanych układów sygnałowych. Nadal jednak nie można jednoznacznie przesądzić przyszłości DSP, ponieważ cyfrowe przetwarzanie sygnałów bardzo mocno angażuje procesor Pentium, znacznie spowalniając wykonywanie pozostałych zadań. Przyszłość pokaże, czy główny procesor przejmie zadania DSP, czy też nadal potrzebne będą specjalizowane karty i układy.

oprac. Jerzy Michalczyk (jk)



DSP w Internecie

Strony WWW związane z DSP:

<http://www.mot.com/SPS/DSP>

<http://www.ti.com/sc/docs/dsps/dsphome.htm>

<http://www-dsp.rice.edu>

<http://www-dsp.rice.edu>

Grupa dyskusyjna (news)
o DSP: comp.dsp

Uwaga



Dodatkowe informacje związane z procesorami DSP znajdują się na naszym CD-ROM-ie (**Hardware | DSP**)