SAMPLOWANIE w teorii i w praktyce

Artur Muszyński

Jeśli zajmujesz się muzykowaniem na Amidze, albo potrzebujesz efektów specjalnych do swojej nowej gry, czy dema, to na pewno będziesz potrzebować samplera. Wszyscy zainteresowani samplowaniem powinni znaleźć tu nieco przydatnych informacji. (Tytuł mógłby sugerować, że tekst nafaszerowany jest masą wzorów i wyższą matematyką, ale spokojnie, niczego takiego tu nie ma.)

Co to jest sampler? Sampler jest urządzeniem pozwalającym na zapamiętanie przebiegu sygnału analogowego w postaci cyfrowej. W interesującym nas przypadku sygnałem wejściowym jest sygnał akustyczny. Źródłem dźwięku może być mikrofon, syntezator, magnetofon, CD itp. W kolejnych odstępach czasu sygnał analogowy po wzmocnieniu i filtracji podawany jest na wejście przetwornika analogowo-cyfrowego, a po przetworzeniu na postać cyfrową zapamiętywany jest w pamięci komputera w postaci liczby, której wartość odpowiada poziomowi napięcia na wejściu samplera. Ze względu na możliwości odtwarzania dźwięku przez wyjścia audio Amigi, stosuje się zwykle samplery o długości słowa (określającego jednocześnie rozdzielczość przetwarzania) wynoszącego 8 bitów oraz maksymalnej częstotliwości próbkowania, co najmniej 30 kHz. Te dwie wielkości są najważniejszymi parametrami samplera i najwięcej mówią o jakości przetwarzania. Omówię je zaraz dokładniej.

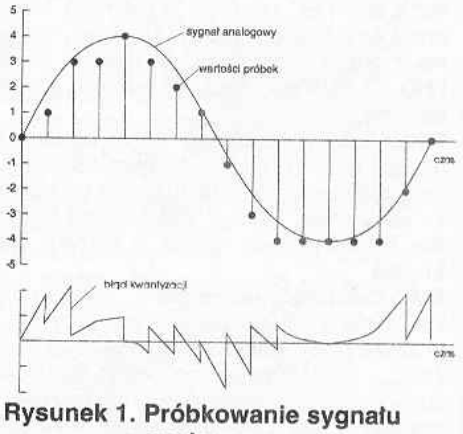
Rozdzielczość

Przetwornik analogowo-cyfrowy zamienia próbkę analogową, znajdującą się w jakimś przedziale napięć na postać cyfrową będącą n-bitowym słowem cyfrowym. Na przykład przetwornik ośmiobitowy zamienia sygnał analogowy na liczby z zakresu od -128 do 127. Sygnał analogowy podlega więc w procesie przetwarzania skwantowaniu, postać cyfrowa sygnału analogowego może przybierać tylko określone wartości. Kwantowanie sygnału powoduje powstanie błędu kwantyzacji powodującego zniekształcenia dźwięku zwane szumem kwantyzacji. Szum ten jest tym mniejszy, im większa rozdzielczość przetwornika, czyli wyrażając się jaśniej - im więcej ma bitów. Maksymalny stosunek mocy sygnału do szumu w decybelach wyraża się wzorem S/N=6n+10 [dB]. Dla przetworników szesnastobitowych wartość ta wynosi 106 dB, a ośmiobitowych 58dB. Dla orientacji nieco ponad 100 dB to granica możliwości dobrego wzmacniacza akustycznego, 60 dB to stosunek sygnał/szum magnetofonu kasetowego (bez włączonego układu redukcji szumów Dolby). Nasz sampler nie nadaje się więc do zastosowań profesjonalnych, ale nam jakość generowanego przez niego dźwięku powinna pod tym względem zupełnie wystarczyć. Szum kwantyzacji jest szumem ziarnistym, bardzo nieprzyjemnym dla ucha (słychać coś w rodzaju brzęczenia), dlatego czasem stosuje się tak zwany dithering. Dithering polega na dodaniu do sygnału cyfrowego szumu białego na poziomie szumu kwantyzacji. Szum biały jest znacznie bardziej akceptowany przez ucho.

Słabo zaprojektowane samplery dają większe zniekształcenia niż wynikałoby to z teorii. Jeśli masz możliwość porównania z lepszym samplerem, podaj na wejścia obu urządzeń sygnał o bardzo małej głośności. Przetworzony dźwięk prześlij na wyjście audio Amigi (robi to każdy program mający możliwość samplowania, na przykład AudioMaster - daj dużą częstotliwość próbkowania i próbkuj za pomocą opcji SAMPLER, a nie MONITOR). W ten sposób wpływ dokładności przetwarzania będzie o wiele lepiej słyszalny. Dobry sampler będzie dawał mniejsze zniekształcenia. Z powyższych względów wynika ważna uwaga: Aby zminimalizować szum, poziom sygnału powinien być możliwie duży. Zwykle dobrze jest nawet nieco go przesterować, szczególnie nie przeszkadza przesterowywanie instrumentów perkusyjnych.

Częstotliwość

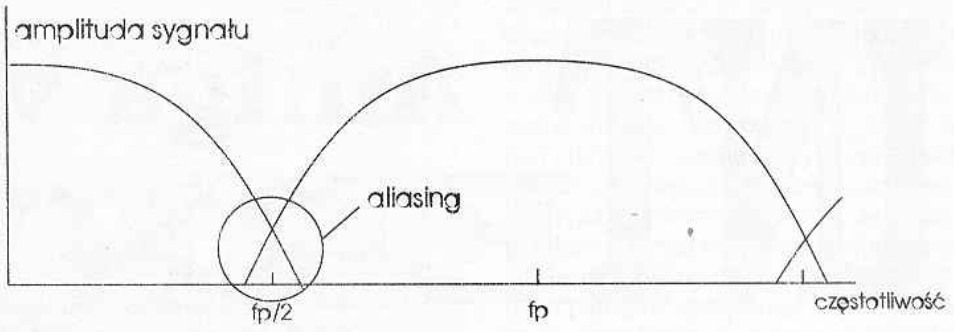
Po przetworzeniu otrzymujemy sygnał nie ciągły, lecz złożony z szeregu próbek. Zgodnie z twierdzeniem Kotielnikowa-Shannona o próbkowaniu, z sygnału spróbkowanego da się dokładnie odtworzyć sygnał analogowy, jeżeli częstotliwość próbkowania jest ponad dwa razy większa od najwyższej częstotliwości występującej w sygnale (połowa częstotliwości próbkowania nazywa się częstotliwością Nyquista). Twierdzenie to wynika z faktu, że sygnał spróbkowany ma widmo powstałe przez przesunięcie widma sygnału analogowego o wielokrotność częstotliwości próbkowania. Jeśli sygnał w postaci cyfrowej wyślemy na wyjście audio Amigi i odfiltrujemy wszystkie częstotliwości powy



Rysunek 1. Próbkowanie sygnału analogowego.

żej częstotliwości Nyquista, to sygnał wyjściowy będzie niezniekształcony w stosunku do sygnału oryginalnego (jedyne nieodwracalne zniekształcenia powoduje kwantyzacja dźwięku). Przy doborze częstotliwości próbkowania weź pod uwagę fakt, że sygnały okresowe niesinusoidalne składają się w rzeczywistości z tonu o częstotliwości podstawowej oraz harmonicznych o częstotliwościach będących wielokrotnościami tonu podstawowego. Amplitudy wysokich harmonicznych są zwykle bardzo małe, ale zwykle trzeba uwzględnić kilka pierwszych, aby nie zniekształcić brzmienia instrumentu.

Niespełnienie twierdzenia o próbkowaniu powoduje zjawisko zwane aliasingiem, czyli zniekształcenia spowodowane nakładaniem się fragmentów widma dźwięku. Wynika z tego, to że na wejściu dźwięku do samplera powinien znajdować się filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej niższej od połowy częstotliwości próbkowania. Zwykle jednak w samplerach albo nie daje się takiego filtru, albo jest on mało skuteczny. Taki sam filtr powinien znajdować się także na wyjściu przetwornika cyfrowo-analogowego przy odtwarzaniu dźwięku. W przeciwnym razie oprócz oryginalnego dźwięku będziemy słyszeli składowe o częstotliwościach różnicowych i sumacyjnych. Wyjaśnię to dokładniej na przykładzie: samplujemy generowany przez syntezator dźwięk o częstotliwości podstawowego A, czyli 440 Hz. Uwzględniając kilka harmonicznych dźwięku moglibyśmy próbkować z częstotliwością na przykład 5 kHz. Po spróbkowaniu otrzymamy dodatkowe składowe o częstotliwości 5000 Hz - 440 Hz oraz 5000 Hz + 440 Hz, a także wyższe wokół częstotliwości 10 kHz itd. Dodatkowe tony powstają więc w zupełnie słyszalnym zakresie częstotliwości. Tak samo słyszalny efekt występuje oczywiście również wtedy, gdy próbkujemy na wysokiej częstotliwości, ale odtwarzamy na niższej. Wystarczy posłuchać modułów muzycznych z wyłączonym filtrem. Zapewnienie prawidłowej filtracji było problemem na tyle skomplikowanym, że projektanci Amigi zdecydowali się na kompromis. Na wyjściach obu kanałów audio można włączyć filtry o nieregulowanej częstotliwości odcięcia 7 kHz. Usuwa on większość efektów związanych z próbkowaniem, ale niestety praktycznie całkowicie wycina także dźwięki o wysokich częstotliwościach. Aby zapewnić słyszalność wysokich tonów, filtr ten powinien przepuszczać częstotliwości co najmniej do dwunastu kiloherców (dla porównania tuner FM odtwarza częstotliwości do 15 kHz, a magnetofon z kasetą żelazową jeszcze mniej, nie musimy



Rysunek 2. Widmo częstotliwościowe dźwięku po spróbkowaniu (fp - częstotliwość próbkowania).

od razu żądać uzyskania jakości CD). Najczęściej więc wyłącza się go.

Aby zapewnić wysoką częstotliwość odtwarzania sampli instrumentów, stosuje się różne triki, jak na przykład używanie oddzielnych sampli dla każdej oktawy. W ten sposób zapewnia się co najwyżej dwukrotną zmianę częstotliwości odtwarzania próbek. Należy jednak pamiętać o ograniczonej przepustowości DMA Amigi. W ciągu jednej linii ramki mogą być przesłane najwyżej dwa sample na kanał, co daje maksymalną częstotliwość próbkowania 28 kHz. Układ Paula, który generuje dźwięk dopuszcza ustawienie wyższej częstotliwości, ale DMA nie będzie nadążał z pobieraniem próbek, co spowoduje słyszalne zniekształcenia. Niektóre programy pozwalają na odtwarzanie z pominięciem DMA, co pozwala na przekroczenie granicy 28 kHz. ProTracker jednak nie zagra dźwięku na tak wysokiej częstotliwości.

Jeśli sampler nie ma wbudowanego filtru, a chcemy mieć pewność, że nie wystąpi zjawisko aliasingu, można samplować na wysokiej częstotliwości (nawet 50 kHz, o ile pozwala na to sampler), a następnie za pomocą filtru dolnoprzepustowego odfiltrować wysokie częstotliwości (w AudioMasterze należy wywołać opcję menu Digital Filter, ustawić dolną częstotliwość na minimum, górną na żądaną częstotliwość odcięcia, działanie filtru na 100% i kliknąć na PASS) i zastosować tak zwany downsampling, czyli zmniejszyć częstotliwość próbkowania.

Przed rozpoczęciem zabawy należy sprawdzić maksymalną częstotliwość próbkowania samplera. Zwykle jej przekroczenie powoduje nieprawidłowe jego działanie. Wiele tanich samplerów zbudowanych jest z wykorzystaniem układu scalonego ADC0804 lub ADC0809. Maksymalna częstotliwość próbkowania bez zniekształceń wynosi dla tego układu około 15 kHz (częstotliwość zegara 1 MHz). Zwykle producenci samplerów wymuszają większą częstotliwość pracy układu (na przykład 4 MHz), co daje znacznie większą maksymalną częstotliwość próbkowania, ale powoduje znaczny spadek dokładności przetwarzania. Użytkownicy dysponującym generatorem akustycznym mogą łatwo sprawdzić poziom tych zniekształceń podając na wejście samplera przebieg trójkątny o małej częstotliwości (kilkadziesiąt Hz). Uzyskany przebieg powinien być zupełnie gładki, a nie poszarpany (ale ze względu na obecność kondensatora na wejściu samplera niekoniecznie musi być to idealny trójkąt, zwykle będzie on lekko powyginany).

Żeby nie było za dobrze

Dodatkowe problemy stwarza nierównomierność pobierania próbek (tak zwany jitter). Samplery podłączane są zwykle do portu równoległego. Konwersja wyzwalana jest sygnałem STROBE, który pojawia się z dokładnością czasu jednego cyklu zegara (około u1s). Poza tym zegar samplera jest asynchroniczny do impulsów wyzwalania. Powoduje to zniekształcenia fazowe sygnałów o dużej amplitudzie i wysokiej częstotliwości. Zjawisko to jest stosunkowo mało dokuczliwe dla samplerów ośmiobitowych, ale staje się istotne przy próbkowaniu szesnastobitowym. W ogóle wymagania stawiane szesnastobitowym przetwornikom A/C i C/A są znacznie wyższe niż ośmiobitowym. Tak przy okazji: metoda odtwarzania sampli szesnastobitowych opisana niedawno przez Mobiusa w Amiga Magazynie nie daje takich efektów, jak zastosowanie prawdziwego przetwornika szesnastobitowego (wcale nie jestem pewien, czy da się chociaż uzyskać rozdzielczość dwunastu bitów). Po prostu przetworniki C/A Amigi mają zbyt małą liniowość, więc błąd przetwarzania będzie na pewno znacznie większy niż na poziomie jednego bitu.

Zdaję sobie sprawę, że nie wyczerpałem do końca tematu. Omówiłem jedynie to, co powinno wam się przydać w pierwszej kolejności. Życzę twórczego samplowania! ❑