

CZY „OVERSAMPLING” RÓŻNI SIĘ OD „UPSAMPLINGU”? (1)

Prof. Zbigniew Kulka z Politechniki Warszawskiej wyjaśnia różnice między dwoma rodzajami operacji próbkowania nadmiarowego, stosowanego w cyfrowej technice fonicznej.

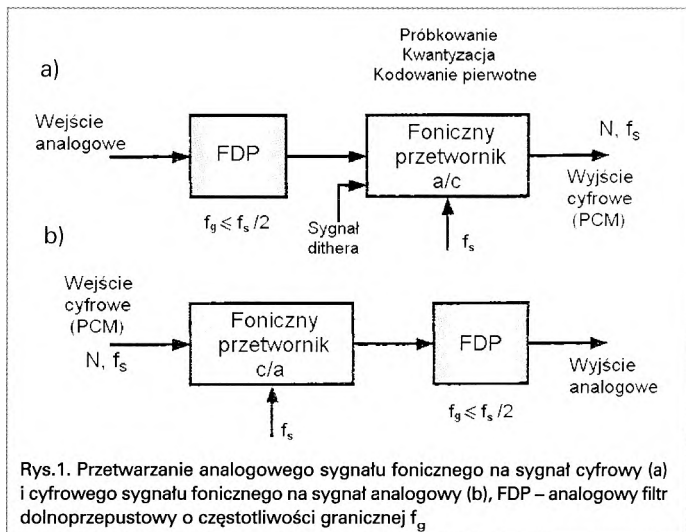
Cyfrowe urządzenia foniczne zarówno powszechnego użytku (np. odtwarzacze CD lub DVD), jak i profesjonalne (np. magnetofony DAT lub rejestratory twarodyskowe) są często charakteryzowane dla potrzeb handlowych jako urządzenia pracujące w trybie „oversamplingu” lub „upsamplingu”. Obydwa terminy są angielskimi nazwami operacji próbkowania nadmiarowego wykonywanej na sygnałach fonicznych. O ile w ujęciu matematycznym są to operacje podobne, o tyle w praktycznych implementacjach obu tych operacji występują pewne różnice. Zasadniczym celem artykułu jest wyjaśnienie wspomnianych różnic, przy czym używane w tekście określenie sygnały foniczne dotyczy wyłącznie sygnałów muzycznych (sygnałami fonicznymi są również sygnały mowy i sygnały sztucznie generowane za pomocą instrumentów elektronicznych). W celu uzyskania cyfrowego sygnału fonicznego, który nadaje się do zapisu, obróbki, zapamiętania lub transmisji, na analogowym sygnale fonicznym należy wykonać szereg operacji składających się na proces zwany kodowaniem sygnału fonicznego. Odczytany z medium pamięciowego lub odebrany sygnał cyfrowy jest poddawany procesowi odwrotnemu, czyli dekodowaniu, aby odzyskać analogowy sygnał foniczny. Kodowanie/dekodowanie sygnału fonicznego jest koniecznością w cyfrowej technice fonicznej, ale równocześnie umożliwia rozwiązanie wielu problemów, związanych np. z wykrywaniem i korekcją błędów.

Stosowane są różne formy kodowania/dekodowania, przy czym kodowanie pierwotne ma szczególnie ważne znaczenie. Funkcję kodera pierwotnego spełnia foniczny przetwornik analogowo-cyfrowy (a/c), przekształcający analogowy sygnał foniczny na ekwiwalentny cyfrowy sygnał foniczny. Koder ten wyznacza maksymalną jakość sygnału, jaką może zapewnić cały cyfrowy system foniczny. Co więcej, każda degradacja wprowadzona podczas kodowania pierwotnego pozostaje już w sygnale cyfrowym, na którym są wykonywane kolejne operacje z użyciem metod i algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów. Ta pierwotna jakość sygnału cyfrowego zależy zarówno od jakości analogowego sygnału fonicznego uzyskiwanego z mikrofonu (przekształcającego sygnał akustyczny na sygnał elektryczny), jak i od parametrów przetwornika a/c. Z kolei przy odsłuchu, cyfrowy sygnał foniczny musi być poddany dekodowaniu, przy czym

w wyniku dekodowania pierwotnego, odzyskuje się sygnał analogowy. Funkcję dekoderu pierwotnego spełnia foniczny przetwornik cyfrowo-analogowy (c/a), którego parametry mają również istotny wpływ na jakość rekonstruowanego sygnału analogowego. Sygnał ten po wzmocnieniu i przekształceniu w słuchawce lub głośniku na sygnał akustyczny jest odbierany przez słuchacza, który ocenia subiektywnie ostateczną jakość dźwięku. W fonicznym przetworniku a/c są wykonywane trzy podstawowe operacje na analogowym sygnale fonicznym: **próbkowanie** (dyskretyzacja sygnału w czasie), **kwantowanie** (dyskretyzacja wartości pobranych próbek) i **kodowanie** (przedstawienie uzyskanych wartości dyskretnych w odpowiednio dobranym bipolarnym kodzie dwójkowym). Cyfrowy sygnał foniczny jest zatem sygnałem dyskretnym zarówno w czasie, jak i wartości. Określają go dwa parametry: częstotliwość próbkowania i długość w bitach (rozdzielczość) słów kodowych. Iloczyn tych parametrów daje przepływność bitową, która wyznacza wymagane pasmo cyfrowego sygnału fonicznego. Z kolei iloczyn przepływności bitowej, liczby kanałów i czasu (w sekundach) definiuje wielkość pliku muzycznego.

W większości zastosowań cyfrowej techniki fonicznej są stosowane trzy standardowe wartości częstotliwości próbkowania: 32 kHz (radio cyfrowe), 44,1 kHz (sprzęt foniczny powszechnego użytku) i 48 kHz (foniczny sprzęt studyjny). Wszystkie podane wartości są nieco większe od podwojonej wartości największej częstotliwości pasma fonicznego (15 kHz w przypadku radia cyfrowego i 20 kHz w przypadku sprzętu fonicznego). Zagadnienie zwiększania częstotliwości próbkowania jest szerzej rozważane w dalszej części niniejszego artykułu.

Długość słów kodowych określona liczbą N bitów zależy od roz-



Rys.1. Przetwarzanie analogowego sygnału fonicznego na sygnał cyfrowy (a) i cyfrowego sygnału fonicznego na sygnał analogowy (b), FDP – analogowy filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości granicznej f_g

dzielczości kwantyzatora. Najczęściej jest stosowane kwantowanie równomierne (liniowe), tzn. kwantowanie ze stałą wartością przedziału (kroku) kwantowania. Inaczej mówiąc, rozdzielczość sygnału cyfrowego jest określonym zakresem liczbowym, który może być przyporządkowany wartości każdej próbki. Na przykład w systemie CD, w którym wykorzystuje się kwantowanie 16-bitowe, sygnał cyfrowy może przyjmować 2^{16} , tj. 65535 różnych wartości w dwójkowym kodzie bipolarnym uzupełniania do 2 (U2). Słowo kodowe 0111111111111111 odpowiada liczbie +32767 (najwyższy możliwy poziom), słowo 0000000000000000 odpowiada liczbie 0, zaś słowo 1000000000000000 odpowiada liczbie -32768 (najniższy możliwy poziom). Kwantyzator 16-bitowy zapewnia teoretyczną dynamikę ok. 96 dB (6 dB/bit \times 16 bitów = 96 dB). Stosowanie słów kodowych o skończonej długości (ograniczonej rozdzielczości) do reprezentowania wartości próbek, wiąże się z wprowadzeniem błędów kwantowania. Błędy wprowadzane przez kwantowanie są silnie zależne od kwantowanego sygnału. Błędy kwantowania dla sygnałów o dużych poziomach w porównaniu z wartością przedziału kwantowania, mogą być traktowane jako szum biały. Jeśli poziom sygnału jest porównywalny z wartością przedziału kwantowania, to wówczas błędy kwantowania są silnie skorelowane z sygnałem wejściowym i mają postać tzw. szumu granulacyjnego, co jest przyczyną powstawania zniekształceń. Aby „wybielić” szum granulacyjny, do sygnału kwantowanego dodaje się przed kwantizatorem niskopoziomowy sygnał szumu szerokopasmowego, zwany *ditherem* niesubtraktywnym (nie odejmowanym w późniejszych operacjach na sygnale fonicznym). Dodanie *dithera* eliminuje wspomniane korelacje, ale powoduje podniesienie progu szumowego i tym samym zmniejszenie dynamiki (zazwyczaj akceptowalne, jeśli nie przekracza kilku decybeli). W celu zwiększenia dynamiki i obniżenia poziomu szumu kwantowania (progu szumowego) są stosowane kwantyzatory o rozdzielczościach większych od 16 bitów, tj. 18-, 20- i 24-bitowe.

Do przekształcania cyfrowych sygnałów fonicznych na sygnały analogowe służą foniczne przetworniki cyfrowo-analogowe (c/a). Ścisłe biorąc, operacje jakie wykonuje przetwornik c/a nie są dokładną odwrotnością operacji realizowanych w przetworniku a/c. O ile operacja próbkowania przy spełnieniu określonych warunków jest operacją odwracalną, o tyle kwantowanie jest operacją nieodwracalną na skutek ograniczonej rozdzielczości kwantyzatora. Dlatego przetwornik c/a nie może zrekonstruować dokładnie oryginalnego, analogowego sygnału fonicznego. Na wyjściu przetwornika c/a otrzymuje się tylko przybliżone odtworzenie oryginalnego sygnału w postaci przebiegu schodkowego, reprezentującego próbki o skwantowanych wartościach sygnału. Przebieg ten jest jeszcze wygładzany za pomocą analogowego filtra dolnoprzepustowego.

W cyfrowej technice fonicznej są stosowane konwencjonalne przetworniki a/c o rozdzielczościach od 16 do 20 bitów i przetworniki a/c sigma-delta ($\Sigma\Delta$) o rozdzielczościach od 16 do 24 bitów oraz przetworniki c/a (konwencjonalne i $\Sigma\Delta$) o rozdzielczościach od 16 do 24 bitów, wytwarzane w postaci układów scalonych (najczęściej monolitycznych, rzadziej hybrydowych).

CZY „OVERSAMPLING” RÓŻNI SIĘ OD „UPSAMPLINGU”? (2)

W pierwszej części artykułu przedstawiono ogólne problemy przetwarzania a/c i c/a w technice fonicznej.

Ta część jest poświęcona zagadnieniu próbkowania sygnałów fonicznych!

Próbkowanie

Sygnały analogowe mogą być przedstawiane w postaci funkcji czasu lub w postaci widmowej. Mówi się wówczas o ich reprezentacji odpowiednio w dziedzinie czasu lub dziedzinie częstotliwości. Znając przebieg czasowy sygnału można określić jego widmo i odwrotnie, znając widmo sygnału można określić jego przebieg czasowy. Wykorzystuje się w tym celu przekształcenia Fouriera. Widmo każdego sygnału okresowego, np. przebiegu sinusoidalnego reprezentującego dźwięk (ton) prosty, jest widmem prążkowym. Natomiast widmo sygnału nieokresowego reprezentującego dźwięk złożony, np. sygnału muzycznego, jest widmem ciągłym. W praktycznych zastosowaniach mamy zawsze do czynienia z sygnałami o ograniczonym pasmie (widmie częstotliwościowym). Można więc wyróżnić górną częstotliwość graniczną f_B , powyżej której nie ma składowych sygnału. Widmo może być także ograniczone od dołu i wtedy wprowadza się pojęcie dolnej częstotliwości granicznej. Jeśli częstotliwość ta może przyjmować wartość zerową, to wówczas w sygnale występuje składowa stała. W systemach fonicznych operujących na sygnałach muzycznych, w których kluczowe znaczenie ma zachowanie wrażeń artystycznych jest wymagane pasmo o szerokości ok. 20 kHz, tj. od 20 Hz do 20 kHz.

Próbkowanie (*sampling*) jest operacją dyskretyzacji w czasie ciągłego sygnału analogowego. W cyfrowej technice fonicznej stosuje się próbkowanie równomierne, tj. próbki analogowego sygnału fonicznego są pobierane w ustalonych momentach $t = nT_s$, gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$, zaś T_s jest okresem próbkowania równym odwrot-

ności częstotliwości próbkowania f_s , czyli $T_s = 1/f_s$. W wyniku próbkowania uzyskuje się analogowy sygnał foniczny dyskretny w czasie, reprezentowany przez ciąg próbek. Operacja próbkowania w konwencjonalnych, fonicznych przetwornikach a/c kodujących sygnał z użyciem modulacji PCM (*pulse-code modulation*) jest realizowana za pomocą układów próbkująco-pamiętających, wbudowywanych do przetworników. Natomiast, w fonicznych przetwornikach a/c kodujących sygnał z użyciem modulacji SDM (*sigma-delta modulation*), układy próbkująco-pamiętające nie są potrzebne, ponieważ modulator sigma-delta spełnia m. in. funkcję układu samo-próbkującego. Sygnał analogowy (ciągły w czasie) i jego próbki (sygnał analogowy dyskretny w czasie) uważa się za równoważne, jeśli próbkowanie zachowuje charakter widma sygnału oraz jeśli istnieje możliwość całkowitego, tj. bezstratnego w sensie przeniesionej przez ten sygnał informacji, odtworzenia sygnału analogowego ciągłego w czasie na podstawie jego próbek. A zatem, aby odtworzyć sygnał analogowy na podstawie ciągu jego próbek pobieranych w równych odstępach czasu, musi być spełnione twierdzenie o próbkowaniu, z którego wynikają dwa warunki:

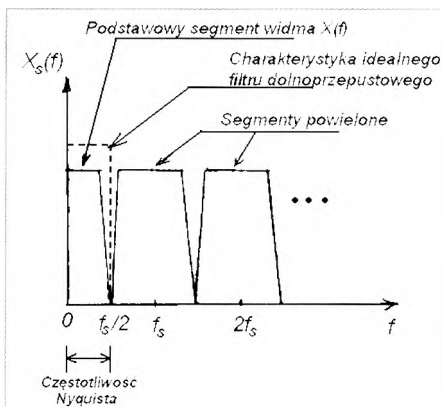
□ widmo wejściowego sygnału analogowego musi mieć ograniczone pasmo, tzn. może zawierać tylko składowe o często-

ściach nie przekraczających częstotliwości f_B , czyli w widmie nie może być składowych powyżej f_B ,

□ do bezstratnego odtworzenia informacji zawartej w sygnale o ograniczonym pasmie o szerokości f_B , częstotliwość próbkowania musi spełniać warunek $f_s \geq 2f_B$, czyli sygnał wejściowy może być jednoznacznie reprezentowany przez swoje wartości próbek pobieranych w jednakowych odstępach czasu T_s nie większych od $1/2f_B$.

Minimalna szybkość próbkowania wynikająca z twierdzenia o próbkowaniu, tj. $f_s = 2f_B$ jest określana szybkością Nyquista (*Nyquist rate*). Dla dowolnych wartości częstotliwości próbkowania f_s , częstotliwość $f_s/2$ jest nazywana częstotliwością Nyquista (*Nyquist frequency*).

Można wykazać, że próbkowanie sygnału analogowego w dziedzinie czasu powoduje okresowość widma tego sygnału w dziedzinie częstotliwości, tzn. próbkowanie wprowadza efekt powielania okresowego widma sygnału analogowego. Oprócz podstawowego segmentu widma pojawiają się jego repliki wokół kolejnych, całkowitych wielokrotności częstotliwości próbkowania. Na przykład, sygnał okresowy o częstotliwości 1 kHz spróbkowany z częstotliwością 44,1 kHz będzie miał składowe o częstotliwościach 43,1 kHz, 45,1 kHz, 87,2 kHz, 89,2 kHz, itd. Jest to konsekwencją dualizmu między dziedziną czasu i dziedziną częstotliwości. Mówiąc inaczej, sygnał okresowy ma widmo dyskretne, zaś sygnał dyskretny ma widmo okresowe. Jeśli częstotliwość próbkowania zostanie dobrana zgodnie z twierdzeniem o próbkowaniu, to powielone segmenty widma nie będą zachodziły na siebie. Wówczas informacja zawarta w podstawowym segmencie widma (pasmie podstawowym) może być bezstratnie odtworzona, wykonując idealną „prostokątną” filtrację dolnoprzepustową. Jednak – po pierwsze – idealny filtr dolnoprzepustowy nie jest realizowalny fizycznie, i po drugie – każdy rzeczywisty sygnał ma skończony czas trwania, przy czym czasy trwania sygnałów mogą być różne. Z kolei z teorii sygnałów wynika, że każdy sygnał



Rys. 2. Widmo spróbkowanego sygnału analogowego w przypadku próbkowania idealnego, tzn. gdy impulsy próbkujące mają postać impulsów Diraca ($f_s = 2f_B$)

o skończonym czasie trwania ma widmo o nieskończonym pasmie. Zatem, ściśle biorąc, żaden sygnał rzeczywisty nie spełnia podstawowego warunku wynikającego z twierdzenia o próbkowaniu dotyczącego ograniczonego pasma. Zazwyczaj jednak, sygnał o nieograniczonym pasmie może być potraktowany jako sygnał o pasmie ograniczonym częstotliwością f_B , akceptując pewien błąd zwany błędem ucięcia pasma. Dlatego ogranicza się pasmo sygnału na wejściu przetwornika a/c za pomocą analogowego filtra dolnoprzepustowego (filtru ochronnego), który „obcina” część widma powyżej częstotliwości równej połowie przyjętej częstotliwości próbkowania ($f_S/2$). W ten sposób można uniknąć nakładania się powielonych okresowo segmentów widma i zniekształceń powstających na krawędziach segmentów. Nakładanie się segmentów widma jest nazywane *aliasingiem*, zaś zniekształcenia na krawędziach segmentów określają się jako błąd *aliasingu*. Oczywiście, *aliasing* może też wystąpić przy niewłaściwym doborze częstotliwości próbkowania, tj. gdy $f_S < 2f_B$. Rezultatem *aliasingu* jest pojawienie się fałszywych składowych częstotliwościowych i nie jest możliwe bezstratne odtworzenie informacji zawar-

tej w segmencie podstawowym widma. Niestety, unikając błędu wynikającego z *aliasingu* wprowadza się błąd ucięcia pasma.

Przy właściwym doborze częstotliwości f_S , częstotliwość Nyquista $f_S/2$ definiuje częstotliwości graniczne obydwu analogowych filtrów dolnoprzepustowych umieszczanych na wejściu przetwornika a/c i wyjściu przetwornika c/a. Filtr rekonstruujący na wyjściu przetwornika c/a nie tylko wygładza wytwarzany przebieg schodkowy, jak wspomniano poprzednio, ale również tłumi powielone w wyniku próbkowania segmenty widma podstawowego. Wartości częstotliwości f_B i f_S zależą od zastosowania. Na przykład, sygnał foniczny o pasmie 20 kHz musi być próbkowany z szybkością (częstotliwością) przynajmniej 40 kHz. W systemie CD przyjęto częstotliwość próbkowania równą 44,1 kHz rozszerzając pasmo systemu do 22,05 kHz, przede wszystkim ze względu na skończoną szybkość opadania charakterystyki amplitudowej dolnoprzepustowego filtra rekonstruującego w zakresie przejściowym między pasmem przepustowym i zaporowym. Oznacza to, że tłumienie filtra na wyjściu przetwornika c/a powinno wynosić 0 dB do często-

ści 20 kHz i przynajmniej 90 dB do częstotliwości 22,05 kHz, co wynika z 16-bitowej rozdzielczości słów kodowych w systemie CD. Takie same wymagania musi spełniać dolnoprzepustowy filtr ochronny (*antyaliasingowy*) umieszczony na wejściu przetwornika a/c.

We wcześniejszych cyfrowych systemach fonicznych (CD, DAT) do ograniczania pasma stosowano wyłącznie analogowe filtry dolnoprzepustowe ochronne i rekonstruujące. Stawiano im wysokie wymagania odnośnie minimalizacji zafalowań charakterystyki amplitudowej w pasmie przepustowym i jej dużej stromości w zakresie przejściowym oraz dużego tłumienia w pasmie zaporowym. Były to złożone konstrukcyjnie i kosztowne filtry wysokiego rzędu (9-13 biegunowe), które nie zapewniały jednak liniowej charakterystyki fazowej w górnym krańcu 20 kHz pasma fonicznego, co postrzegano jako jedną z głównych przyczyn pogorszenia jakości dźwięku.

W trzeciej, ostatniej części artykułu będą omówione operacje nadpróbkowania (*oversampling*) i przepróbkowania (*upsampling*).

Zbigniew Kulka

CZY „OVERSAMPLING” RÓŻNI SIĘ OD „UPSAMPLINGU”? (3)

W poprzednich częściach artykułu omówiono zagadnienia próbkowania oraz przetwarzania a/c i c/a sygnałów fonicznych. Ta końcowa część jest poświęcona nadpróbkowaniu i przepróbkowaniu tych sygnałów.

Nadpróbkowanie

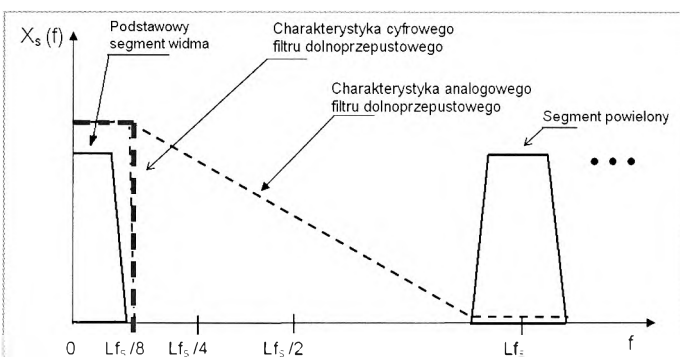
Ogólnie biorąc, próbkowanie z częstotliwością większą niż częstotliwość oryginalna, czyli taką jaką wynika z twierdzenia o próbkowaniu, może być realizowane wewnątrz systemów przetwarzania a/c i c/a lub poza takimi systemami. Jeśli w systemie przetwarzania a/c lub c/a oryginalna częstotliwość próbkowania f_s zostaje zwiększona L -krotnie, gdzie $L = 2, 4, 8, \dots$, itd., to wówczas taka operacja jest nazywana **nadpróbkowaniem** (*oversampling*) ze współczynnikiem L .

W przypadku konwencjonalnego systemu przetwarzania a/c, nadpróbkowanie polega na zwiększeniu liczby pobieranych próbek sygnału analogowego. Nadpróbkowanie w dziedzinie analogowej zwiększa ilość informacji przenoszonej przez sygnał spróbkowany, co jest równoznaczne z rozszerzeniem pasma takiego systemu. Natomiast w przypadku konwencjonalnego systemu przetwarzania c/a, nadpróbkowanie w dziedzinie cyfrowej sztucznie zwiększa oryginalną częstotliwość próbkowania, ponieważ nowe próbki są interpolowane (zwykle przy zastosowaniu prostych operacji arytmetycznych) pomiędzy próbkami oryginalnymi. Tego rodzaju nadpróbkowanie ani nie zwiększa ilości informacji przenoszonej przez sygnał ani też nie rozszerza oryginalnego pasma systemu. Jednak zwiększone zostają częstotliwości, które muszą być odfiltrowane. Taka operacja jest łatwiejsza w realizacji praktycznej, gdyż do tego celu może być użyty prosty filtr analogowy niskiego rzędu.

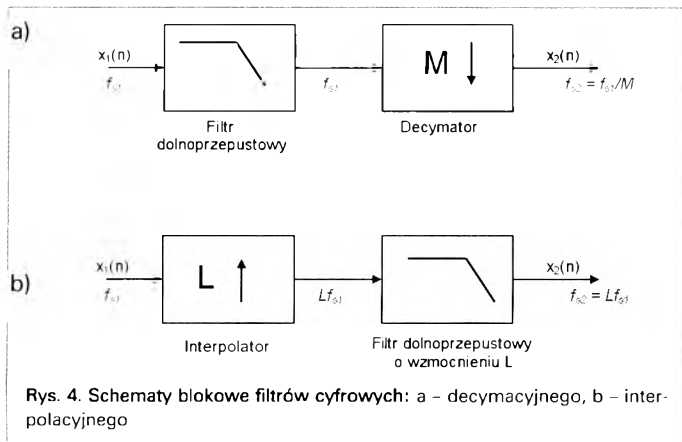
Choć nadpróbkowanie w konwencjonalnych systemach przetwarzania a/c i c/a nie jest konieczne, tzn. nie wynika z ich zasady działania, to ma dwie zasadnicze zalety. Po pierwsze, łagodzi wymagania stawiane analogowym filtrom dolnoprzepustowym, umieszczanym odpowiednio na wejściu przetwornika a/c (filtru ochronnego) i na wyjściu przetwornika c/a (filtru rekonstruującego). Filtry te mogą być niskiego rzędu (1-3 biegunowe) o znacznie łagodniej opadającej charakterystyce w zakresie przejściowym, są mniej złożone konstrukcyjnie niż filtry wyższych rzędów – i co ważne – można w nich uzyskać prawie liniową charakterystykę fazową. Po drugie, przy nadpróbkowaniu obniża się poziom szumu kwantyzacji, ponieważ szum zostaje „rozłożony” w pasmie $Lf_s/2$ (tzn. L -krotnie szerszym niż pasmo Nyquista $f_s/2$). Należy zaznaczyć, że współczynnik nadpróbkowania L dobiera się w zależności od minimalnego czasu przetwarzania przetwornika a/c lub c/a, przy jakim wytwórca gwarantuje zachowanie katalogowych parametrów przetwornika. Im większa jest rozdzielczość fonicznego przetwor-

nika a/c lub c/a, tym jego czas przetwarzania jest dłuższy i tym mniejszy może być współczynnik nadpróbkowania. Przetworniki a/c charakteryzują się dłuższymi czasami przetwarzania niż przetworniki c/a i typowe wartości stosowanych współczynników nadpróbkowania L wynoszą od 2 do 8. Przetworniki c/a są szybsze i współczynniki nadpróbkowania mogą przyjmować typowe wartości od 2 do 32.

Wprowadzenie nadpróbkowania w konwencjonalnych przetwornikach a/c i c/a wiąże się zwykle z koniecznością użycia decymacyjnego filtra cyfrowego (złożonego z filtra dolnoprzepustowego i decymatora) na wyjściu przetwornika a/c, zmniejszającego częstotliwość próbkowania oraz interpolacyjnego filtra cyfrowego (złożonego z interpolatora i filtra dolnoprzepustowego) na wejściu przetwornika c/a, zwiększającego częstotliwość próbkowania. Decymacja (podpróbkowanie) napróbkowanego cyfrowego sygnału fonicznego o współczynnik M polega na wybraniu co M -tego słowa kodowego (M -tej próbki) i odrzuceniu pozostałych. Częstotliwość próbkowania po decymacji nie może być mniejsza od oryginalnej częstotliwości próbkowania ze względu na możliwość wystąpienia *aliasingu*. Filtr decymacyjny jest zbędny, jeśli format wyjściowego sygnału cyfrowego z przetwornika a/c jest zgodny z przewidywanym formatem zapisu. Interpolacja (nadpróbkowanie) spróbkowanego cyfrowego sygnału fonicznego jest operacją odwrotną w stosunku do decymacji. Jak wspomniano poprzednio – polega na zwiększeniu szybkości próbkowania przez obliczenie nowych wartości słów kodowych (próbek). Operacja nadpróbkowania o współczynnik L , wykonywana w cyfrowym filtrze interpolacyjnym poprzedzającym przetwornik c/a, polega na obliczeniu $L-1$ pośrednich wartości (nowych próbek) pomiędzy każdymi dwiema sąsiednimi próbkami sygnału oryginalnego. Operacje decymacji i interpolacji są najczęściej realizowane za pomocą liniowofazowych filtrów cyfrowych SOI (o skończonej odpowiedzi impulsowej) wysokich rzędów, które



rys. 3. Wpływ nadpróbkowania na nachylenie charakterystyki analogowego filtra dolnoprzepustowego (ochronnego lub rekonstruującego) w zakresie przejściowym pomiędzy pasmem przepustowym i zaporowym (linia przerywana bez kropek, kształt segmentów widma jak przy próbkowaniu idealnym)

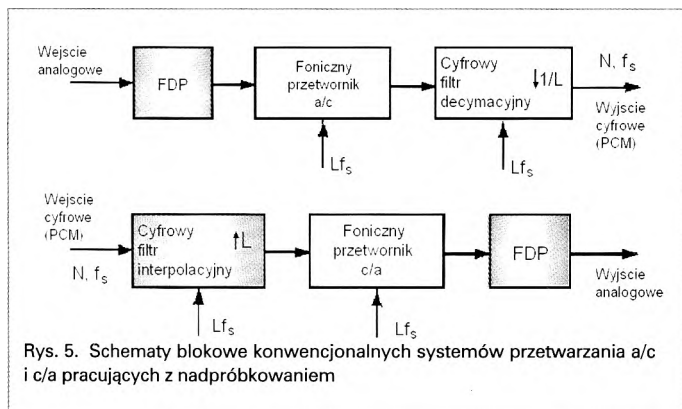


jednocześnie wykonują zasadniczą filtrację sygnałów w systemach przetwarzania a/c i c/a. Proste filtry analogowe niskiego rzędu spełniają wówczas funkcję pomocniczą, tłumiąc składowe wysokoczęstotliwościowe.

Nadpróbkowanie w systemach przetwarzania a/c i c/a $\Sigma\Delta$ jest natomiast konieczne, gdyż wynika z zasady ich działania. Zazwyczaj stosuje się duże nadpróbkowanie, tj. z wartościami współczynników L, np. 32, 64, 128 lub większymi, które połączone z kształtowaniem widma szumu kwantyzacji umożliwia „przesunięcie” szumu w zakres ultradźwiękowy i uzyskanie wymaganego stosunku sygnału do szumu w pasmie podstawowym (audio). Decymacyjne i interpolacyjne filtry cyfrowe są niezbędne w przetwornikach a/c i c/a $\Sigma\Delta$ pracujących z sygnałami cyfrowymi – odpowiednio na wyjściu i wejściu – w formacie PCM, np. przy zapisie i odczycie informacji w systemach DVD-Audio. Nie są jednak stosowane w systemie SACD (Super Audio CD), ponieważ sygnał w formacie 2,8224 MHz/1 bit jest bezpośrednio zapisywany na płytę SACD (taki sam sygnał jest także bezpośrednio odczytywany z płyty).

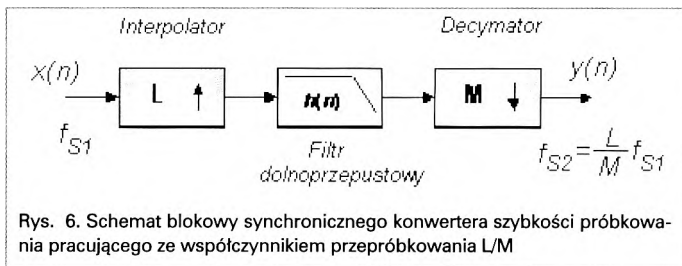
Przepróbkowanie

Operacja próbkowania nadmiarowego może być również realizowana poza systemami przetwarzania a/c i c/a i wówczas jest nazywana **przepróbkowaniem** (*upsampling*). Przepróbkowanie dotyczy wyłącznie dziedziny cyfrowej z użyciem interpolacyjnych i decymacyjnych filtrów cyfrowych. Najczęściej jest stosowane przy zmianach formatów cyfrowych sygnałów fonicznych, tj. częstotliwości próbkowania – z wykorzystaniem konwerterów szybkości próbkowania i długości słów kodowych – z wykorzystaniem *dithering*



Rys. 5. Schematy blokowe konwencjonalnych systemów przetwarzania a/c i c/a pracujących z nadpróbkowaniem

ringu. Na przykład, sygnał cyfrowy w formacie 32 kHz/16 bitów może być zamieniony na sygnał w formacie 96 kHz/24 bity (jeden z możliwych formatów DVD-Audio) lub też format 96 kHz/24 bity na 48 kHz/16 bitów. Korzystniejsza ze względu na jakość dźwięku jest taka zmiana szybkości próbkowania, przy której stosunek wejściowej i wyjściowej częstotliwości próbkowania jest stosunkiem wymiernym. Najmniejszy wpływ na jakość dźwięku ma zmiana o liczbę całkowitą. Na przykład, przy zmianie częstotliwości próbkowania 44,1 na 88,2 lub 176,4 kHz, lub też 48 na 96 lub 192 kHz. Stosowany jest wówczas stosunkowo prosty układ zwany synchronicznym konwerterem szybkości próbkowania. Jeśli natomiast wspomniany stosunek częstotliwości jest stosunkiem niewymiernym i ponadto konwertowane częstotliwości mogą się zmieniać w czasie, to wówczas stosuje się bardziej złożony układ zwany asynchronicznym konwerterem szybkości próbkowania. W konwerterach asynchronicznych występuje zwykle konieczność bardzo dużego nadpróbkowania sygnału wejściowego, aby możliwe było wybranie z nadpróbkowa-



Rys. 6. Schemat blokowy synchronicznego konwertera szybkości próbkowania pracującego ze współczynnikiem przepróbkowania L/M

wanego sygnału odpowiednich próbek potrzebnych do utworzenia sygnału wyjściowego z określoną dokładnością (np. 16-bitową). Im większe wymagania odnośnie jakości sygnału wyjściowego, tym większy musi być współczynnik nadpróbkowania. Warto zaznaczyć, że przepróbkowanie nie dodaje żadnej nowej informacji do tej, jaka była zawarta w sygnale oryginalnym. Na przykład, w przypadku sygnału spróbkowanego z częstotliwością 44,1 kHz, widmo zarówno wejściowego strumienia danych, jak i strumienia danych przepróbkowanych jest zawarte w pasmie 22,05 kHz (praktycznie tylko do 20 kHz).

Podsumowanie

Różnice terminologiczne pomiędzy nadpróbkowaniem (*oversampling*) i przepróbkowaniem (*upsampling*) dotyczą raczej semantyki, natomiast nie wyjaśniają niczego w aspektach jakościowych percypowanego dźwięku. Nadpróbkowanie w systemach przetwarzania c/a oraz przepróbkowanie w cyfrowych torach fonicznych niemal we wszystkich przypadkach jest realizowane z użyciem cyfrowych filtrów interpolacyjnych i jakość dźwięku w ocenie subiektywnej zależy przede wszystkim od jakości zastosowanych algorytmów. Niewątpliwą zaletą nadpróbkowania w systemach przetwarzania a/c i c/a jest możliwość uproszczenia konstrukcji dolnoprzepustowych filtrów analogowych. Charakterystyki fazowe filtrów analogowych niskich rzędów są bardziej liniowe niż filtrów wysokich rzędów, co ma istotne znaczenie dla jakości dźwięku. Z kolei, jeśli przepróbkowanie jest konieczne i jeśli może być zrealizowane za pomocą synchronicznego konwertera szybkości próbkowania, to wpływ tego procesu na jakość dźwięku jest mniejszy niż w przypadku użycia konwertera asynchronicznego. Trudno sprecyzować jakie aspekty brzmieniowe mogą ulec zmianie. To, że są wykonywane identyczne lub prawie identyczne operacje matematyczne na cyfrowym sygnale fonicznym nie gwarantuje uzyskania oczekiwanego brzmienia w odczuciu subiektywnym.

Zbigniew Kulka