

Telewizja cyfrowa i standard MPEG2

Czym jest telewizja cyfrowa, dlaczego powstaje wokół niej tyle zamieszania, co oznacza skrót MPEG2? Przeczytaj poniższy artykuł, a poznasz odpowiedzi na te pytania.

Powszechnie uważa się, że w ciągu dwudziestu lat wszystkie analogowe formy emisji radiowych i telewizyjnych ustąpią miejsca systemom cyfrowym. Proces ten rozpoczyna się obecnie. W przeciągu mniej niż dziesięciu lat technika cyfrowa stała się dominującą w przemyśle płytowym, a pojęcie „transmisja cyfrowa” jest coraz częściej używane przez nadawców programów.

Niniejszy artykuł stanowi próbę wyjaśnienia problemów związanych z emisją telewizji cyfrowej, przedstawienia możliwości ich rozwiązania oraz korzyści, jakie telewizja cyfrowa przyniesie.

Cyfrowa transmisja kablowa, telewizja satelitarna i naziemna wykorzystują standard kodowania MPEG2, wprowadzony przez Motion Picture Experts Group oraz International Standards Organisation (ISO), będący standardem cyfrowej kompresji sygnału. Znaczenie tego standardu będzie w miarę zapoznawania się z niniejszym tekstem coraz bardziej zrozumiałe.

Od analogowego do cyfrowego

Stosowane obecnie analogowe systemy telewizji są oparte na precyzyjnej synchronizacji kamery i odbiornika, tak aby 25 razy na sekundę na ekranie pojawił się przekazywany obraz. Obraz jest w całości odtwarzany za każdym razem, nawet wtedy, gdy nie nastąpił w nim żaden ruch. W systemach telewizji cyfrowej obraz tworzony jest w pamięci i wyprowadzany z niej w sposób analogiczny jak w przypadku karty graficznej i monitora komputera.

Aby uzyskać reprezentację cyfrową sygnału analogowego należy poddać go próbkowaniu z odpowiednio dużą częstotliwością, często dwu- lub trzykrotnie wyższą od maksymalnej częstotliwości sygnału analogowego. Każda z próbek sygnału jest przetwarzana na wartość cyfrową, jak to ilustruje rys.1.

W przypadku obrazu TV wynikiem próbkowania jest strumień danych binarnych przedstawiający punkt po punkcie oryginalny obraz, poczynając od lewego górnego do prawego dolnego rogu obrazu. Obraz telewizyjny jest najczęściej dzielony na kolumny i wiersze. Pojedynczy element obrazu nosi nazwę piksela.

W przypadku obrazu złożonego z 625 linii, 576 nich zawiera informację obrazową, natomiast pozostałe niosą teletext lub są

puste. Jeśli stosunek wymiarów obrazu wynosi 5:4, pojedyncza linia zawiera $576 \cdot 5/4$, czyli 720 pikseli. Tych 720 pikseli powinno zostać wyświetlonych w czasie odpowiadającym jednej linii, czyli 52ms, z czego wynika, że pojedynczy piksel „trwa” 72,2ns. Zakładając, że kolejne piksele zmieniają się z czarnych na białe i vice versa, częstotliwość takiego sygnału wynosiłaby 6,9MHz. W takim razie najniższa częstotliwość próbkowania powinna wynosić 14MHz. W standardzie MPEG2 sygnał luminancji jest rzeczywiście próbkowany z częstotliwością 13,5MHz.

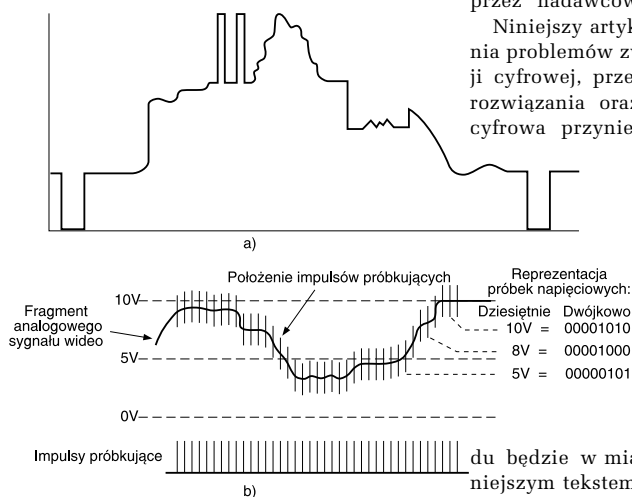
Przesłanie obrazu telewizji kolorowej zawierającego 625 linii i 25 obrazów na sekundę, przetworzonego na sygnał cyfrowy i przekształconego w strumień danych o szybkości 216Mbit/s wymagałoby pasma 108MHz. W pasmie takim mieści się 13 kanałów telewizji analogowej - po cóż więc telewizja cyfrowa?

Celowość stosowania TV cyfrowej

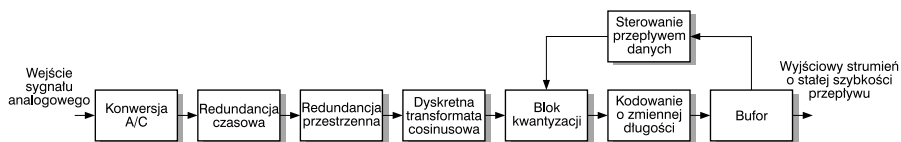
Zmiana techniki analogowej na cyfrową w TV stała się zasadna dopiero wtedy, gdy inżynierowie zajmujący się emisją programów przeanalizowali nieco dokładniej obraz telewizyjny i stwierdzili, że znaczna część informacji przesyłanej w TV analogowej powtarza się. Poważną, potencjalną korzyścią, która wynikłaby ze stosowania cyfrowej techniki, jest możliwość przechowywania obrazu i przesyłania jedynie informacji o różnicach występujących między kolejnymi obrazami. W odbiorniku informacja taka służyłaby do zaktualizowania obrazu znajdującego się w pamięci i w drodze aktualizacji powstawałaby kolejna ramka. Idea ta stanowi podstawę MPEG2, czyli standardu kompresji danych, wykorzystywanego do transmisji wysokiej jakości obrazu (i dźwięku) przy wąskim pasmie.

Ponieważ standard MPEG2 najpewniej będzie w przyszłości obecny w naszym codziennym życiu, dobrze byłoby przyrzeć się stosowanemu w nim przetwarzaniu sygnału, ponieważ ułatwi to zrozumienie cyfrowej TV. W drodze między konsolą studyjną i nadajnikiem sygnał jest poddawany siedmiu operacjom, w wyniku których powtarzające się informacje są usuwane, a informacje pozostałe, wraz z danymi identyfikacyjnymi i synchronizacyjnymi, są dzielone na pakiety multipleksowane z innymi programami TV, a wszystko to łączone z dźwiękiem. **Rys.2** przedstawia 7 etapów przetwarzania standardu MPEG2, zapewniających kompresję danych w stosunku 160:1.

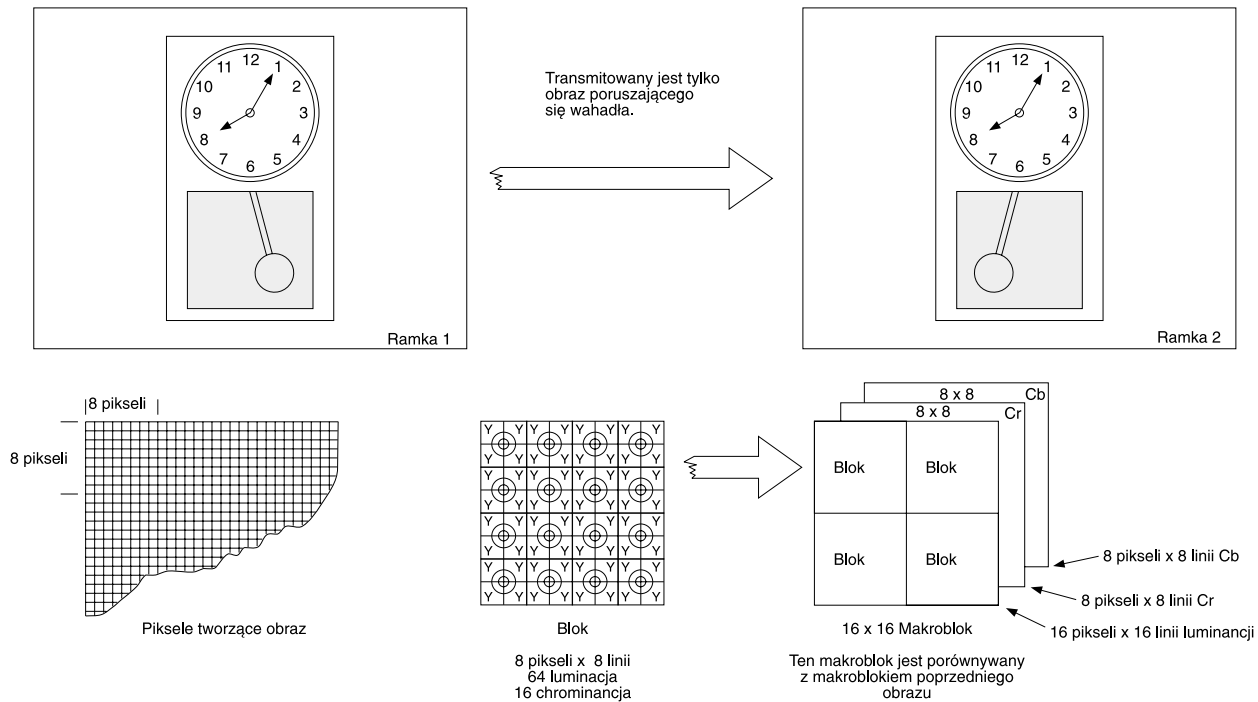
Bardzo często redundancja w obrazie TV osiąga 95%. Na pierwszym etapie sygnały luminancji i chrominancji są próbkowane i poddawane przetwarzaniu A/C. Sygnał luminancji jest próbkowany z częstotliwością 13,5MHz, natomiast różnicowe sygnały koloru R-Y i C-Y, w postaci cyfrowej oznaczane jako Cr i Cb, są próbkowane z częstotliwością 6,75MHz każdy. 8-bitowa konwer-



Rys. 1. (a) Typowy sygnał pojedynczej linii obrazu w TV analogowej; (b) konwersja analogowo-cyfrowa tego sygnału.



Rys. 2. Etapy przetwarzania sygnału TV według standardu MPEG2.



Rys. 3. Eliminacja redundancji czasowej - bloki i makrobloki.

sja zapewnia 256 poziomów szarości, ale we współczesnych studiach częściej spotyka się konwersję 10-bitową.

Różnice między kolejnymi ramkami są wykrywane poprzez porównywanie ramek, a następnie zostają wysłane do odbiornika w celu uaktualnienia zapamiętanego tam obrazu. Gdyby przesyłany był obraz nieruchomy lub testowy, po jednokrotnej transmisji można byłoby wyłączyć nadajnik! Niestety wszyscy ci, którzy włączyliby swe odbiorniki trochę później, nie odebraliby w takiej sytuacji żadnego sygnału, dlatego też kompletny obraz jest okresowo przesyłany, by umożliwić odbiorcom zmianę kanału lub włączenie odbiornika w trakcie emisji.

Redundancja czasowa

Proces odrzucania powtarzającej się w obrazach informacji nosi nazwę usuwania redundancji czasowej i stanowi drugi etap przetwarzania cyfrowego sygnału obrazu (rys. 2). Twórcy filmów rysunkowych wykorzystują podobną technikę nakładając ruchome elementy na statyczną część obrazu zamiast wielokrotnego rysowania takiego obrazu.

Każdy obraz jest dzielony na bloki pikseli, początkowo po osiem pikseli na każde osiem

linii luminancji, które następnie są grupowane po cztery bloki luminancji (16 pikseli na 16 linii) oraz dwa bloki chrominacji Cr i Cb. Taka większa struktura nosi nazwę makrobloku (rys. 3).

Porównania kolejnych obrazów odbywają się na poziomie makrobloku. Różnice poddawane dalszemu przetwarzaniu są określone na podstawie operacji zbliżonej do odejmowania. Makrobloki są łączone w sekwencje zgodnie ze sposobem analizowania pierwotnego obrazu: od lewej do prawej i od góry do dołu.

Kilka kolejnych makrobloków jest łączonych w jednostkę o nazwie „slice” (rys. 4), zawierającą odpowiednią liczbę danych wygodną z punktu widzenia detekcji i korekcji błędów. „Slices” są zazwyczaj łączone po dwanaście w ciągi odpowiadające jednemu obrazowi, bądź ciągowi obrazów. Wraz z kodami identyfikacyjnymi oraz synchronizacyjnymi tworzą sekwencję wideo. Taka grupa jest dogodna z punktu widzenia edycji i przełączania.

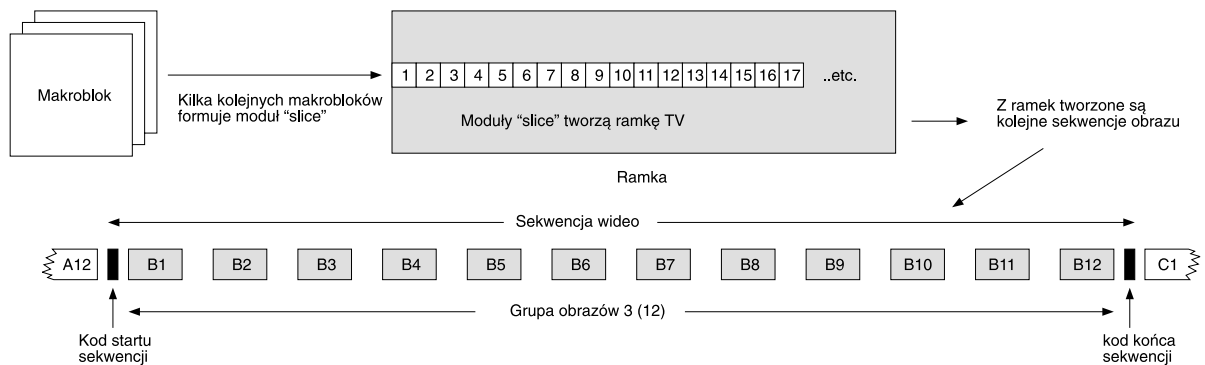
Następnie analizowane jest podobieństwo sąsiadujących pikseli danego obrazu i kodowana jest liczba pikseli posiadających takie same lub zbliżone poziomy luminancji

i chrominacji. Jeśli np. cała linia obrazu posiada wartość luminancji 0,6, Cr=2,2 i Cb=8,3, w wyniku tej analizy powstanie następująca informacja „Linia 78, piksel 1, Y=0,6, Cr=2,2, Cb=8,3, powtórzyc 719 razy”.

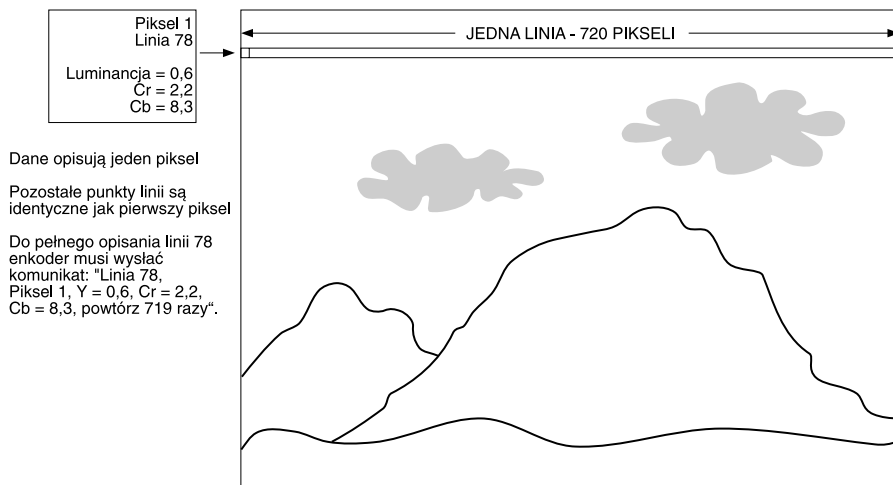
Redundancja przestrzenna

Trzeci etap przetwarzania przedstawiony na rys. 2 nosi nazwę eliminacji redundancji przestrzennej i dotyczy wyłącznie jednego obrazu. Jego idea zobrazowana została na rys. 5, a cały proces służy dalszej eliminacji nadmiarowej informacji obecnej w obrazie.

Dalszą redukcję liczby przesyłanych danych uzyskuje się stosując krótkie kody dla często występujących sekwencji oraz sygnałów synchronizujących. System jest pod tym względem zbliżony do kodu Morse’a, gdzie najczęściej wykorzystywanym literom alfabetu przyporządkowano najkrótsze kody, np. literze E - kropkę, literze T - kreskę, natomiast literze Z kod dłuższy: kreska, kreska, kropka, kropka. Dodatkowo można także zakodować dłuższe ciągi zer lub jedynek, np. x zer, po których następuje y jedynek można zakodować w postaci (x,0)(y,1).



Rys. 4. Grupa obrazów.



Rys. 5. Eliminacja redundancji przestrzennej.

Dłuższe ciągi zer są spotykane w końcowej części sekwencji danych i ciągom tym są przypisywane krótkie kody oznaczające koniec danych. Wszystkie te zabiegi pozwalają oszczędzić przestrzeń, a cała operacja nosi nazwę statystycznej redundancji.

Prezyzyjna synchronizacja obecna w sygnale telewizyjnym jest bardzo przydatna, gdy przychodzi do określenia przemieszczenia grupy pikseli stanowiących część ruchomego obrazu, ponieważ taka synchronizacja umożliwia prognozowanie ruchu grup pikseli. Prognozowanie dokonuje się na poziomie makrobloków. W prosty sposób można wyznaczyć prędkość ruchu, jego zwrot i cały wektor opisujący ruch. Wartości Y, Cr i Cb w makroblokach, odpowiadające tym samym pozycjom obrazów mogą zostać porównane, a różnice między nimi mogą umożliwić wygenerowanie krótkiego kodu.

Transformacja cosinusowa

Do tego momentu cały proces eliminacji redundancji był odwracalny, tj. nie została utracona żadna informacja. Kolejny etap przetwarzania stanowi tzw. dyskretna transformacja cosinusowa. Odpowiada ona czwartemu etapowi przetwarzania na rys. 2, a bardziej szczegółowo prezentuje ją rys. 6.

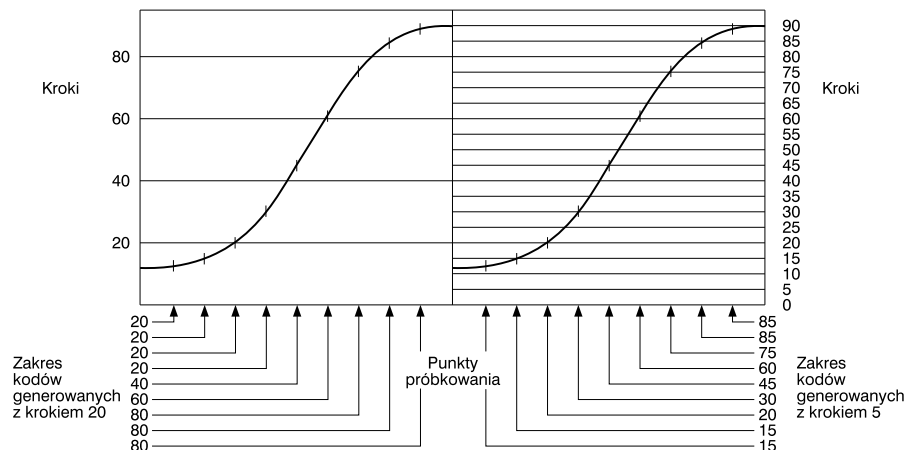
Transformacji tej są poddawane wartości luminancji i chrominancji bloków 8x8 pikseli i polega ona na konwersji danych z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości. W uproszczeniu można powiedzieć, że fali prostokątnej o czasie narastania 25ns odpowiada częstotliwość 10MHz. W wyniku transformacji cosinusowej powstaje nowy zbiór liczb, które są następnie zaokrąglane do najbliższej wartości, których zbiór ustalony został ze stałym krokiem. Załóżmy, że dysponujemy zbiorem wartości ustalonych z krokiem 20 i należy przedstawić przy ich pomocy liczbę 47 - zostanie jej przyporządkowana wartość 40. Jeśli następna zaokrąglana liczba wynosi 77, wybrana zostanie wartość 80. Im większy jest krok kwantyzacji, tym większe popełnia się w niej błędy. W przypadku tych samych liczb 47 i 77, ale przy wartości kroku kwantyzacji 5 przyporządkowane im zostaną liczby 45 i 75, a więc powstaną mniejsze błędy kwantyzacji.

Kwantyzacja umożliwia dalszą redukcję przesyłanych danych i w koderze MPEG proces kwantyzacji jest - jak to zostanie przedstawione dalej - zmienny.

Trzy rodzaje obrazów

W standardzie MPEG2 wykorzystywane są trzy rodzaje obrazów - I (obraz główny - Intraframe), P (obraz prognozowany) i B (obraz interpolowany dwukierunkowo). Obrazy I są obrazami odniesienia, tj. nie podlegają ani interpolacji, ani prognozowaniu (rys.7). Obrazy typu I są umieszczane w ciągu obrazów w odstępach dwunastu pozycji i stanowią odniesienie umożliwiające szybkie dekodowanie obrazu - w czasie poniżej połowy sekundy. Obrazy takie nie są poddawane tak znacznej kompresji jak obrazy B i P.

Obrazy typu I umożliwiają entuzjastom ciągłej zmiany kanałów i przypadkowym telewidzom niemal natychmiastowe uzyskanie obrazu. W liczącej dwanaście obrazów sekwencji obrazy 3, 6, 9 są prognozowane na podstawie poprzedniego obrazu I i z odniesieniem do następnego obrazu I, natomiast obrazy 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 i 11 są obrazami typu B, powstającymi w wyniku interpolacji między obrazami I oraz P. Znaczna część informacji wideo pochodzi z poprzedniego obrazu, uzupełniona o istotne zmiany, często z użyciem krótkich kodów.



Rys. 6. Kwantyzacja.

Odbiornik TV w pełni zgodny z normą MPEG2 powinien mieć dostatecznie dużą pamięć, by pomieścić wszystkie trzy rodzaje obrazów. Jednak w pełni zadawalające wyniki uzyskuje się zapamiętując tylko obrazy typu I oraz P, natomiast obrazy B są odtwarzane na bieżąco w odbiorniku.

Pakiety danych

Kompresja danych osiągnęła etap, w którym już nie można jej odwrócić. Dane wideo zostają teraz połączone w pakiety o długości 204 bity, o strukturze przedstawionej na rys. 8.

Pakiet otwiera bajt synchronizacji, zazwyczaj o wartości 47h. Po nim następuje 187 bajtów danych wideo, audio lub innych danych. Pakiet zamyka 16-bajtowa suma testowa, wykorzystywana do korekcji błędów w odbiorniku. 16-bajtowa suma testowa pozwala stwierdzić poprawność danych pakietu. Dla ułatwienia procesu korekcji błędów dane są poddawane indeksowaniu wg systemu Reeda-Solomona. Polega ona na następującym przestawieniu bitów każdego bajtu:

numer bitu : 8 7 6 5 4 3 2 1
po przestawieniu : 7 1 4 5 2 8 6 3

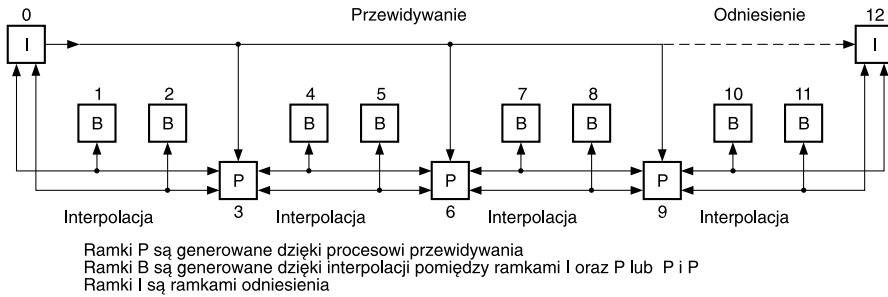
Dzięki takiemu przestawieniu w przypadku utraty na skutek zakłóceń kilku kolejnych bitów bajtu po przywróceniu wyjściowej kolejności bitów utracony blok zostanie rozdzielony, dzięki czemu korekcja błędów jest bardziej skuteczna, np.:

sekwencja bitów : 7 1 4 x x x 6 3 (odebrana z utratą 3 bitów)
sekwencja z odtwo- : x 7 6 x 4 3 x 1 rzoną kolejnością

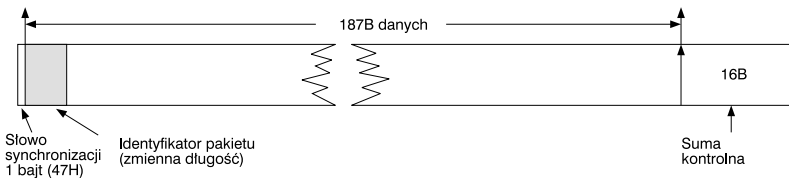
Utracone bity są rozłożone w bajcie równomiernie. Taki system stosowany jest m.in. przy płytach CD.

Pojedyncze pakiety danych audio, wideo i danych jednego programu TV są łączone razem w elementarny strumień pakietów (blok 6 na rys.2 - VLC), do którego dodawana jest informacja synchronizacyjna, wykorzystywana przez odbiornik do zsynchronizowania dźwięku i obrazu. Jest ona niezbędna dlatego, że dane wideo ulegają podczas przetwarzania znacznym opóźnieniom, zwłaszcza jeśli zastosowane zostaje jeszcze dodatkowe kodowanie (scrambling).

Na tym etapie szybkość bitowa danych nie jest stała. Dane są wprowadzane do



Rys. 7. Obrazy MPEG.



Rys. 8. Struktura pakietu danych MPEG.

bufora (rys. 2, etap 7) przed ostatecznym multipleksowaniem z sygnałami innych programów. Multipleksowanie to wymaga stałej szybkości bitowej strumienia danych.

Kontrola szybkości bitowej danych

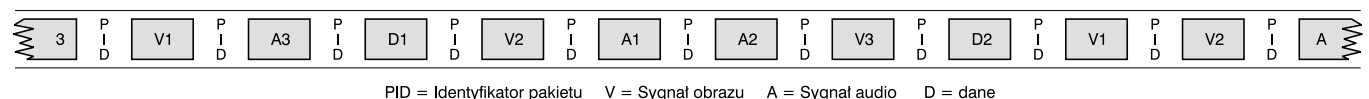
Gdy do kodera MPEG2 dociera szybko zmieniający się obraz o dużej liczbie szczegółów, jego wierne odtworzenie w odbiorniku wymaga dużej szybkości bitowej danych. Może więc dojść do przepełnienia bufora. Gdy występuje taka sytuacja, układ kontroli szybkości bitowej danych, znajdujący się między kwantyzatorem i buforem, obniża tę szybkość dzięki modyfikacji procesu kwantyzacji polegającej na zwiększeniu jej kroku. Towarzyszący temu spadek jakości obrazu trwa bardzo krótko i tylko wytrawni i spostrzegawczy telewidzowie są w stanie go odnotować.

Elementarny strumień danych zostaje połączony z elementarnymi strumieniami innych programów w transportowy strumień pakietów (rys.8). Pakiety wideo, audio i danych zostają połączone w sposób losowy. Przypadkowość ich zmultipleksowania nie ma znaczenia zważywszy, że każdy pakiet posiada element identyfikacyjny. Ten element (pakiet) identyfikacyjny umożliwia właściwe demultipleksowanie strumienia danych oraz odtworzenie informacji na temat rodzaju kodowania, przynależności danych do konkretnej stacji TV i danych synchronizacyjnych w odbiorniku.

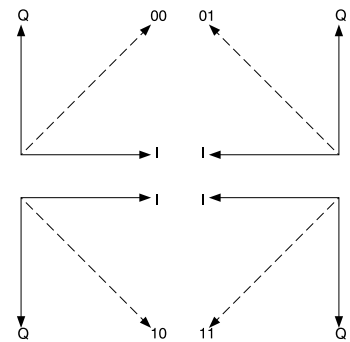
Załóżmy, że strumień pakietów zawiera dane pochodzące z czterech programów. Organizację strumienia transportowego dla takiego przypadku przedstawia rys. 9. W takiej postaci dane są kierowane do nadajnika.

Wybór modulacji

Końcowym problemem jest wybór modulacji do transmisji i w przypadku TV satelitarnej wybór padł na QPSK - kwadraturowe



Rys. 9. Organizacja strumienia transportowego.



Rys. 10. Kwadraturowe kluczowanie fazy.

Sprzęt współpracujący z siecią kablową może wymagać zmian, niemniej jednak ze względu na konieczność ciągłego serwisowania jest on zwykle lokowany w łatwo dostępnych miejscach. Tak więc przyszłość należy do TV cyfrowej i jej era zbliża się bardzo szybko. Korzyści dla nadawców programów są tak znaczne, że to właśnie oni stymulować będą marsz w kierunku w pełni cyfrowej emisji programów TV.

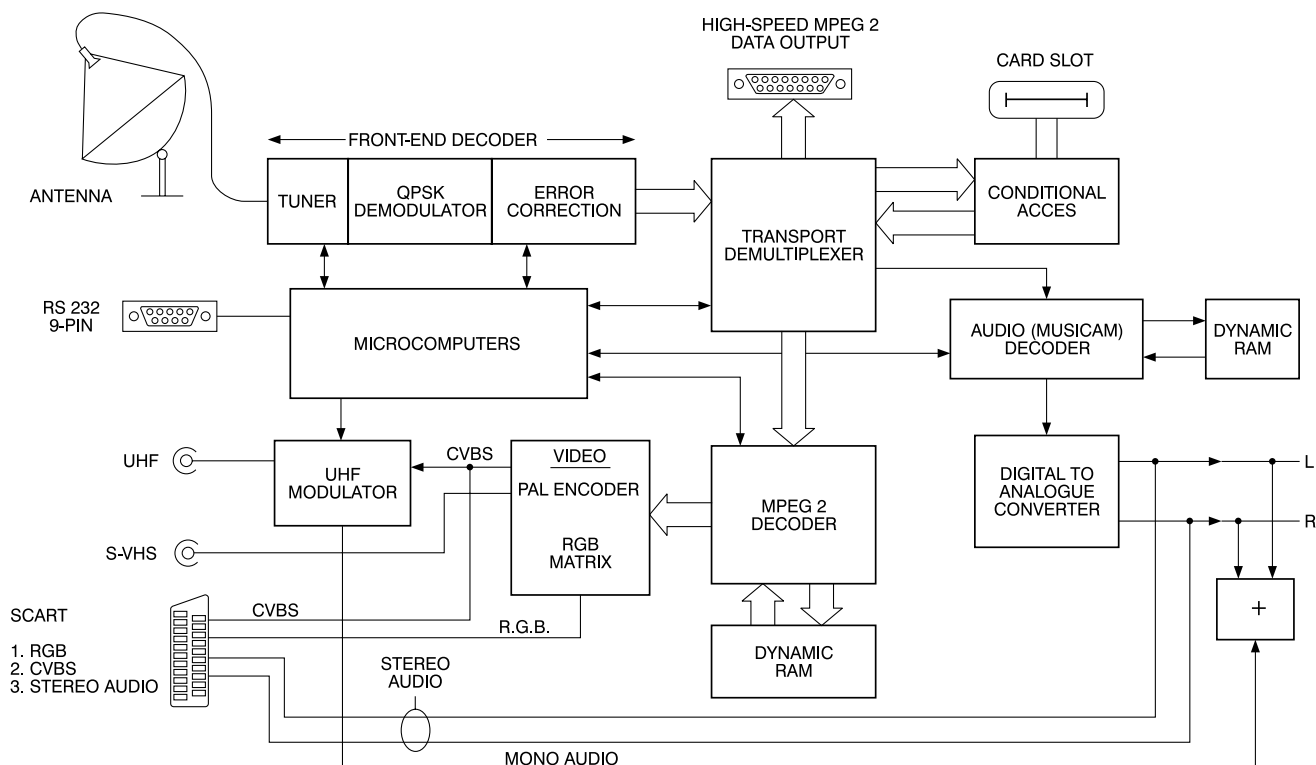
Oferta dla widzów

Jakie korzyści cyfrowa TV przyniesie telewidzom? Będzie to znacznie szerszy wybór programów, niż jest to obecnie. Np. cztery transmisje sportowe będą mogły być przekazywane na jednej częstotliwości nośnej. Będą mogły np. zawierać cztery sygnały pochodzące z czterech kamer umieszczonych w różnych punktach stadionu lub boiska. Widz będzie miał możliwość oglądania wszystkich czterech obrazów jednocześnie, dzieląc ekran na cztery części.

Inna możliwość to interaktywna TV - umieszczenie w odbiorniku telewizyjnym modemu umożliwi stworzenie połączenia zwrotnego przez sieć telefoniczną. W ten sposób można będzie nawet przeprowadzać głosowania.

Telewizja cyfrowa zapewnia wspaniałą jakość obrazów studyjnych. Ich transmisja wymaga szybkości bitowych leżących pomiędzy 10Mbitów/s a 15Mbitów/s. Uzyskana jakość będzie nieco różna od otrzymywanej na studyjnych monitorach. Przekazywanie większej liczby kanałów na jednej nośnej oznaczać będzie oczywiście spadek jakości, aż do poziomu domowego standardu VHS, jednak obraz będzie wolny od zaników i jittera. Szybkość bitowa transmisji wynosić tu będzie 5Mb/s lub mniej, a jedna nośna służyć będzie do przekazania nawet 8 programów.

W przypadku niższych szybkości bitowych problemy pojawiają się, gdy następuje całkowita zmiana obrazu, gdy obrazy zmieniają się szybko i zawierają wiele szczegółów. W takich sytuacjach niezbędne są większe szybkości bitowe i przekazywanie takich obrazów odbywać się będzie przy większym kroku kwantyzacji,



Rys. 11. Schemat blokowy odbiornika cyfrowej TV satelitarnej.

pociągając za sobą chwilowy spadek rozdzielczości. Widzowie będą musieli zdać sobie sprawę z faktu, że większą liczbę programów uzyskuje się kosztem jakości obrazu.

Odbiornik cyfrowej satelitarnej TV

Odbiornik cyfrowej TV satelitarnej, którego schemat blokowy przedstawiono na rys.11, stanowi całkowicie nowe rozwiązanie. Część wejściowa będzie różnić się zależnie od rodzaju transmisji: satelitarnej, naziemnej lub kablowej, natomiast dalsze układy pozostaną takie same tak długo, jak długo wykorzystywany będzie standard MPEG.

Sygnal jest demodulowany w części wejściowej, w której również przeprowadzana jest korekcja błędów. Z bloku korekcji dane trafiają do demultiplexera strumienia transportowego, który stanowi potężny kawałek epoksydu (specjalizowany układ scalony), wyposażony w 160 wyprowadzeń. Demultiplexer strumienia transportowego rozdziela poszczególne programy, sygnały audio i wideo, a także dane sterujące.

Sygnal audio jest demodulowany w kolejnym dużym układzie scalonym, przetwarzany do postaci analogowej i przekazywany do dodatkowych wyjść oraz modulatora UHF. Sygnały synchronizujące, występujące w pakietach audio, zapewniają precyzyjną synchronizację obrazu i dźwięku. Pamięć współpracująca z procesorem audio może opóźnić sygnał audio nawet o jedną sekundę.

Dane wideo są przetwarzane w innym układzie LSI o wysokiej liczbie wyprowadzeń, a odtworzone dane są wykorzystywane do zbudowania obrazu telewizyjnego w pamięci, po czym zostają odczytane, poddane przetwarzaniu do postaci analogowej i przesłane do części wyświetlającej obraz. Odbiornik TV satelitarnej prawdopodobnie zapewni także konwersję sygnału TV do standardu PAL oraz zawierał będzie modulator dający standardowy sygnał UHF. Złożony sygnał wideo, sygnały RGB oraz sygnał S-VHS także będą dostępne.

Przyszłość

Oczywiście wiele programów będzie kodowanych, by za przyjemność ich oglądania

włącznie z reklamami można było ściągać od widzów pieniądze - taka jest rzeczywistość! Proces dekodowania wprowadza dalsze opóźnienie do i tak już złożonego przetwarzania sygnału w torze odbiornika. Z tego właśnie powodu stosuje się sygnały synchronizacyjne.

Dodatkowo zainstalowane zapewne będą gniazda umożliwiające dostęp do procesorów odbiornika z zewnętrznego komputera - dla celów diagnostycznych oraz modyfikacji parametrów systemu. Należy się także spodziewać wyjścia strumienia danych MPEG2, które pozwoli na wprowadzanie tych danych do komputera.

Zbliżanie się ery emisji cyfrowej TV zapowiada nową rzeczywistość w zakresie serwisu i napraw, choć możliwości realizacji konstrukcji elektronicznych w warunkach domowych spadną ze wzrostem złożoności rozwiązań stosowanych w cyfrowych odbiornikach TV.

Czy to się nam podoba, czy nie, cyfrowa TV jest telewizją przyszłości!

Artykuł publikujemy na podstawie umowy z redakcją miesięcznika "Everyday Practical Electronics".