francuski matematyk –Jean Fourier dowiódł, że każdą nieskończoną funkcję okresową $g(t)$ o okresie T można przedstawić w postaci nieskończonej sumy funkcji sinus i cosinus:

$$g(t) = \frac{1}{2}c + \sum_{n=1}^{\infty} a_n sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n cos(n\omega t), \tag{1}$$

gdzie $\omega = 2\pi f$, $f = 1/T$ - częstotliwość podstawowa. Współczynniki a_n i b_n są amplitudami $n-$tych harmonicznych. Taki rozkład funkcji okresowej $g(t)$ nazywa się reprezentacją tej funkcji za pomocą szeregów Fouriera. Występujące we wzorze (**??**) współczynniki oblicza się z wzorów:

$$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T g(t)sin(n\omega t)dt, \tag{2}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T g(t)cos(n\omega t)dt, \tag{3}$$

$$c = \frac{2}{T}\int_0^T g(t)dt. \tag{4}$$

W rzeczywistości czas trwania każdego sygnału jest wielkością skończoną. Rozkładając skończony sygnał o czasie trwania od 0 do T na szereg Fouriera zakłada się, że sygnał ten powtarza się okresowo także w czasach $T - 2T$, $2T - 3T$, itd.

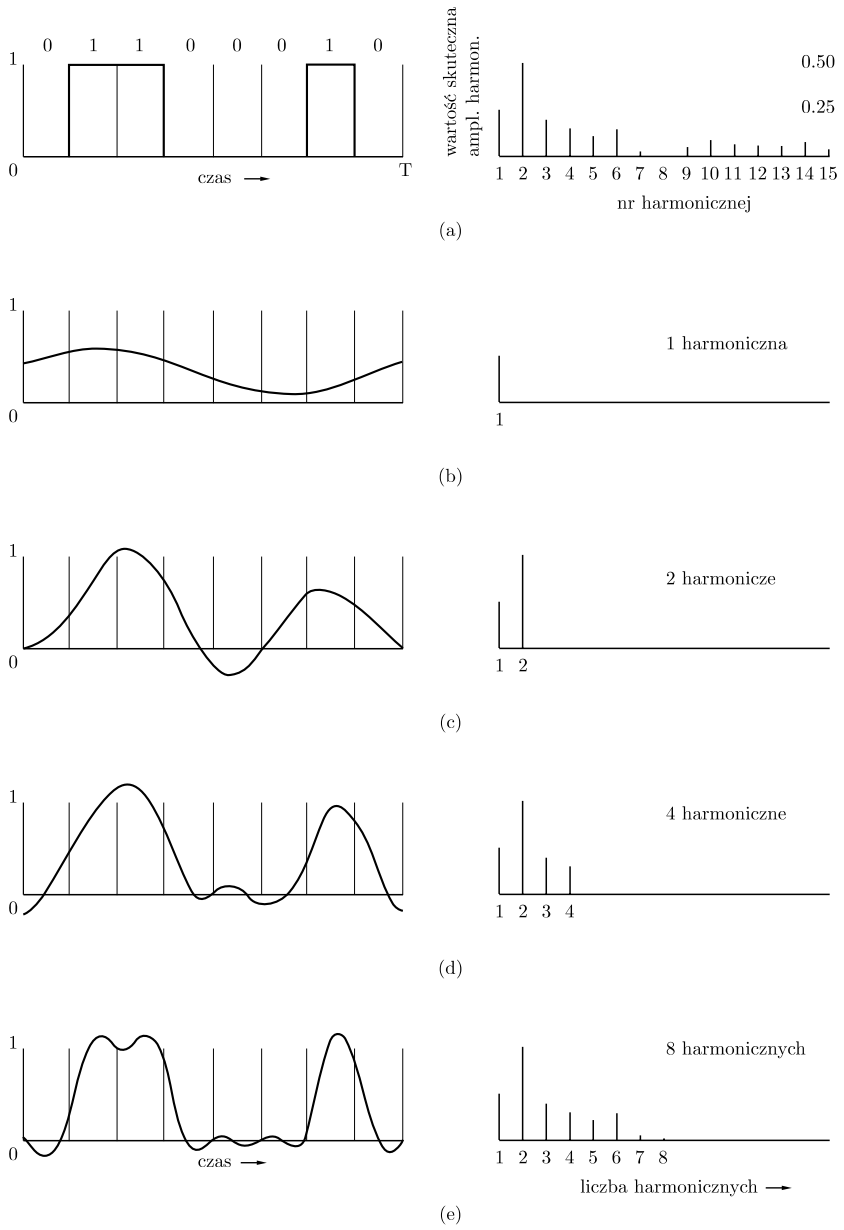
Dane z komputera przekazuje się do kanału transmisyjnego w postaci ciągu 8-bitowych bajtów, które zamienia się na sygnał za pomocą różnych metod kodowania, czyli przyporządkowywania wartościom logicznym 0 i 1 odpowiednich wartości napięcia. W najprostszym przypadku logicznemu zeru przyporządkowuje się napięcie zerowe, a logicznej jedynce napięcie o pewnej ustalonej wartości. Na rys. **??**. pokazano przypadek kodowania danych za pomocą tego systemu, przy czym założono tu, że przesyła się informację, odpowiadającą literze **b** w kodzie ASCII (01100010). Dla tego przypadku otrzymano następujące wzory na współczynniki szeregu Fouriera:

$$a_n = \frac{1}{n\pi}[cos(n\pi/4) - cos(3n\pi/4) + cos(6n\pi/4) - cos(7n\pi/4), \tag{5}$$

$$b_n = \frac{1}{n\pi}[sin(3n\pi/4) - sin(n\pi/4) + sin(7n\pi/4) - sin(6n\pi/4), \tag{6}$$

$$c = 3/8. \tag{7}$$

Kwadraty amplitud i wartości skutecznej harmonicznych są proporcjonalne do energii, przekazywanej kanałem za pomocą sygnałów o tych częstotliwościach.



Rysunek 1: (a) Sygnał binarny i wartości skuteczne amplitud jego harmonicznych w rozkładzie Fouriera. (b) – (e) Kolejne aproksymacje sygnału z rys. (a)

Żaden kanał transmisyjny nie umożliwia przesyłania energii bez strat. Jeśliby wszystkie harmoniczne były przez kanał jednakowo tłumione, to na wyjściu kanału sygnał posiadałby taki sam kształt, jak na wejściu, tylko proporcjonalnie do tłumienia zmniejszony. W rzeczywistości takich kanałów nie ma, a poszczególne harmoniczne są zniekształcane w różnym stopniu, co niekiedy w znaczny sposób zmienia kształt sygnału na wyjściu kanału. Zwykle kanał posiada określone pasmo przepuszczania, np. od częstotliwości 0 do pewnej częstotliwości granicznej f_c, dla której tłumienie amplitudy jest $3dB$, powyżej której wszystkie harmoniczne są tłumione. Na ogół mniejsza wartość f_c powoduje znaczniejsze zniekształcenia sygnału. Można to zaobserwować na rys. **??**. (b) - (e), gdzie przedstawiono, jak zmienia się kształt sygnału w zależności od liczby przepuszczanych harmonicznych, czyli od częstotliwości granicznej kanału.

Szybkość transmisji zależy od sposobu kodowania sygnału i od tzw. szybkości modulacji, którą mierzy się w *bodach*. Jeśli czas trwania 1 sygnału elementarnego wynosi s, to szybkość modulacji jest równa $1/s$ bodów. Z kolei każdy sygnał elementarny może przenosić m bitów informacji, wobec tego szybkość transmisji będzie równa m/s bitów na sekundę. Pojęcia szybkości modulacji i szybkości transmisji są w wielu książkach interpretowane niewłaściwie; często pisze się np. że szybkość transmisji modemu wynosi 1200 bodów. Tymczasem szybkość modemu wynosi 1200 bitów na sekundę, czyli jest równa szybkości modulacji tylko wówczas, gdy jeden element sygnału niesie jeden bit informacji.

Jeśli szybkość transmisji wynosi b bit/s, to czas T, wymagany do przesłania jednego znaku kodu ASCII wyniesie $8/b$ sekund. Tak więc częstotliwość pierwszej harmonicznej sygnału wyniesie $b/8$ Hz. Jeśli do transmisji danych zastosuje się znormalizowany kanał telefoniczny powszechnego użytku, którego górna granica pasma przenoszenia wynosi 3400 Hz, wówczas możliwe będzie przesłanie takim kanałem $3400/(b/8) = 27200/b$ harmonicznych. Dla kilku znormalizowanych przez CCITT szybkości transmisji otrzyma się więc następującą tabelkę:

Tabela 1: Liczba przesyłanych harmonicznych dla kilku znormalizowanych przez CCITT szybkości transmisji

Szybkość transmisji	***T*** **ms**	**1. harmoniczna Hz**	**Liczba przesłanych harmonicznych**
300	26,67	37.5	80
600	13,33	75	40
1200	6,67	150	20
2400	3,33	300	10
4800	1,67	600	5
9600	0,83	1200	2

Z tabelki wynika, że transmisja sygnałów cyfrowych w postaci impulsów prostokątnych za pomocą kanału telefonicznego może odbywać się z szybkością co najwyżej 2400 bit/s. Wówczas sygnał odebrany ma podobną postać jak na rys. **??**. (e) i w miarę dobrze aproksymuje ciąg binarny 01100010. Jeśli taki sygnał usiłowano by przesłać w tych warunkach z szybkością 9600 bit/s, to przez kanał byłyby przepuszczone tylko 2 harmoniczne, a zniekształcenia sygnału nie pozwoliłyby na bezbłędne odtworzenie nadanej informacji (rys. **??**. (c)).

Opisane tu ograniczenie zaobserwował w roku 1924 H. Nyquist, który badał teoretycznie maksymalną szybkość transmisji w bezszumowych kanałach o ograniczonym paśmie. Podobne badania podjął pod koniec lat 40. C. Shannon, który z kolei badał graniczne własności kanałów transmisyjnych o ograniczonym paśmie przy obecności zakłóceń. Według Shannona graniczna wartość szybkości transmisji w takich kanałach wynosi:

$$v_{max} = H \log_2(1 + S/N) \text{ bitów na sekundę}, \tag{8}$$

gdzie H- szerokość pasma przepuszczania kanału w Hz, S/N - stosunek mocy sygnału użytecznego do mocy szumów w decybelach.

Dla typowego kanału telefonicznego $H = 3000$ Hz, $S/N = 30$ dB, skąd v_{max}=15000 bit/s. Jest to granica, którą w praktyce trudno osiągnąć. Stosowanie do celów transmisji danych sygnałów bezpośrednio z wyjścia komputera pozwalało uzyskać o wiele niższe wartości szybkości transmisji niż wynika to z wzoru Shannona. Zbliżenie się do podanej przez Shannona granicy stało się możliwe po wprowadzeniu specjalnych metod kodowania danych, generowanych przez komputer oraz opracowaniu metod modulacji, zamieniających sygnał cyfrowy na postać jak najlepiej dostosowaną do właściwości kanału. Chodzi tu o to, by składowe sygnału zmodulowanego nie wykraczały poza górną częstotliwość pasma przenoszenia kanału.

Część I
Środki transmisji

Zadaniem warstwy fizycznej jest przesłanie strumienia bitów pomiędzy dwoma komunikującymi się ze sobą komputerami. Stosuje się w tym celu różnorodne środki transmisji, których charakterystyki powinny być znane osobom, zajmującym się projektowaniem, budową i eksploatacją sieci komputerowych.

Przekazywanie danych między komputerami odbywa się zawsze w przestrzeni i w czasie, gdyż komputery są zwykle od siebie oddalone na pewną odległość, a szybkość rozchodzenia się sygnałów w kanale trwa pewien czas, ze względu na skończoną szybkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Zapis danych na różnych nośnikach można nazwać transmisją w

czasie, odpowiadającą przechowywaniu informacji.

W zależności od wielkości fizycznej, używanej jako sygnał w kanale transmisyjnym, rozróżnia się kanały mechaniczne, akustyczne, optyczne, elektryczne i radiowe, przy czym w sieciach komputerowych używa się wyłącznie trzech ostatnio wymienionych rodzajów kanałów.

Część II
Nośniki magnetyczne

Jednym z najpowszechniej stosowanych środków przenoszenia danych z jednego komputera do innych komputerów jest dysk elastyczny lub taśma magnetyczna. Po przepisaniu danych z jednego systemu komputerowego na dysk lub taśmę magnetyczną, co odpowiada transmisji danych w czasie, bowiem zapisane dane na nośniku magnetycznym można w dowolnym terminie odtworzyć, przewozi się te środki do komputerów docelowych, dokonując transmisji tych danych w przestrzeni, i odczytuje ponownie. Metoda ta jest dużo prostsza i znacznie tańsza od innych metod, np. od stosowania łączy satelitarnych. Tanim środkiem transportu można bowiem przewieźć, np. 500 taśm magnetycznych po 180 MB każda na odległość 60 km, co nie powinno zająć więcej niż jedną godzinę. Jak łatwo obliczyć, w rozpatrywanym przypadku osiągnęłoby się szybkość transmisji około 200 Mbit/s. Taki sposób transmisji danych jest jednak nie do przyjęcia w sieciach komputerowych, ponieważ wprowadza znaczne opóźnienia.

Część III
Skrętka dwużyłowa

Dla większości zastosowań sieciowych wymagane są kanały typu „on line", umożliwiające odbiór danych praktycznie równocześnie z ich nadawaniem. Najstarszym reprezentantem kanałów tego typu, stosowanym powszechnie do dziś, zwłaszcza w sieciach telefonicznych, jest tzw. skrętka dwużyłowa, składająca się z pary izolowanych przewodów miedzianych o średnicy około 1 mm. Przewody skręca się ze sobą w odpowiedni sposób, aby poprawić charakterystyki elektryczne tego kanału transmisyjnego. Wiele par przewodów, tworzących skrętki dwużyłowe, umieszcza się w kablu o odpowiedniej powłoce ochronnej. Jeśli kabel zawiera np. 100 skrętek, to za pomocą specjalnej techniki (tory pochodne i podwójnie pochodne) można na tym kablu utworzyć odpowiedniki dodatkowych 75 skrętek.

Skrętki dwużyłowe można stosować zarówno do transmisji analogowej jak i cyfrowej. Szerokość pasma zależy od długości skrętki oraz od grubości

przewodów, a uzyskiwana szybkość transmisji dochodzi do kilku Mbit/s na odległość kilku kilometrów. Jest to względnie tani środek transmisji, który prawdopodobnie będzie jeszcze w użyciu przez wiele lat.

Część IV
Kabel koncentryczny

Kabel koncentryczny składa się z jednego sztywnego przewodu miedzianego, otoczonego izolacją, do której przylega drugi przewód cylindryczny, często w postaci siatki miedzianej. Zewnętrzny przewód pokryty jest plastykową powłoką ochronną. Dzięki takiej konstrukcji kabel koncentryczny jest środkiem transmisji o dość dużej szerokości pasma, odporny na zakłócenia dzięki ekranującej roli zewnętrznego przewodnika. Możliwa do uzyskania szerokość pasma zależy od długości kabla. Na kablu koncentrycznym o długości rzędu 1 km łatwo osiąga się szybkość transmisji 10 Mbit/s. Na krótszych odcinkach kabla można oczywiście uzyskać większe szybkości transmisji. Stosuje się też odcinki kabla dłuższe niż 1 km, z mniejszą niż 10 Mbit/s szybkością transmisji.

Kable koncentryczne znajdują szerokie zastosowanie w telefonii dalekosiężnej oraz w lokalnych sieciach komputerowych. Istnieją dwa sposoby łączenia komputera z kablem koncentrycznym. Pierwszy sposób polega na zastosowaniu złącza typu **T** i wymaga przecięcia kabla. Można też zastosować tzw. „odczep wampira", polegający na precyzyjnym wykonaniu małego otworu w izolacji kabla, sięgającego do przewodu wewnętrznego, i wprowadzeniu do tego otworu specjalnego przewodu, łączącego kabel koncentryczny z komputerem. Ten sposób nie wymaga przecinania kabla i jest stosowany tam, gdzie nie można przerywać działania sieci komputerowej w trakcie podłączania do niej nowych użytkowników.

Przy stosowaniu kabla koncentrycznego rozpowszechnił się wygodny sposób reprezentacji symboli logicznych, czyli sposób kodowania danych, zwany metodą Manchester. Sposób ten polega na podziale czasu trwania jednego bitu na dwie połowy; podczas przesyłania jedynki logicznej w pierwszej połowie czasu trwania bitu napięcie jest wysokie, w drugiej niskie. Przy przesyłaniu zera logicznego odwrotnie; najpierw sygnał ma poziom niski, a następnie wysoki. Zatem, precyzyjnie w połowie czasu trwania bitu, przejście typu poziom wysoki – poziom niski, oznacza logiczną jedynkę, a przejście odwrotne logiczne zero. Ten system reprezentacji danych, a zwłaszcza jego odmiana różnicowa, jest bardziej odporny na zakłócenia i nie reaguje na zmiany fazy o 180 stopni w kanale transmisyjnym. Wymaga on jednak dwa razy szerszego pasma od metody bezpośredniej.

Na kablu koncentrycznym można budować systemy transmisji analogowej lub cyfrowej. Systemy transmisji analogowej stosują technologię telewizji

kablowej, w której kabel może pracować na odległość rzędu 100 km przy szerokości pasma 300 – 450 MHz. Wymaga się przy tym wzmacniania sygnału analogowego co kilka lub kilkanaście kilometrów. Aby za pomocą takich systemów można było przesyłać strumień bitów, należy stosować odpowiednie przetworniki typu sygnał cyfrowy – sygnał analogowy i odwrotnie, które zużywają od 1 do 4 Hz pasma przenoszenia kabla na 1 bit przesłanej informacji. W rezultacie osiąga się na kablu koncentrycznym z analogowym systemem transmisyjnym szybkości transmisji rzędu 150 Mbit/s. W tym systemie pasmo użytkowe dzieli się na kanały o paśmie 6 MHz, którymi przesyła się albo telewizję analogową, albo audycje radiowe HiFi, albo transmisję danych z szybkością 3 Mbit/s. Tym samym kablem można przesyłać zarówno dane cyfrowe jak i sygnały telewizyjne lub radiowe, ale w różnych kanałach. W takich systemach rozdzielone są kierunki transmisji, co wymaga stosowania dwóch kabli koncentrycznych.

Część V
Kabel światłowodowy

W łączach światłowodowych do transmisji danych stosuje się impulsy świetlne: jedynkę może oznaczać impuls, zero – brak impulsu. Światło widzialne posiada częstotliwość około 10^8 MHz, co czyni ze światłowodu kanał o potencjalnie bardzo dużej szybkości transmisji.

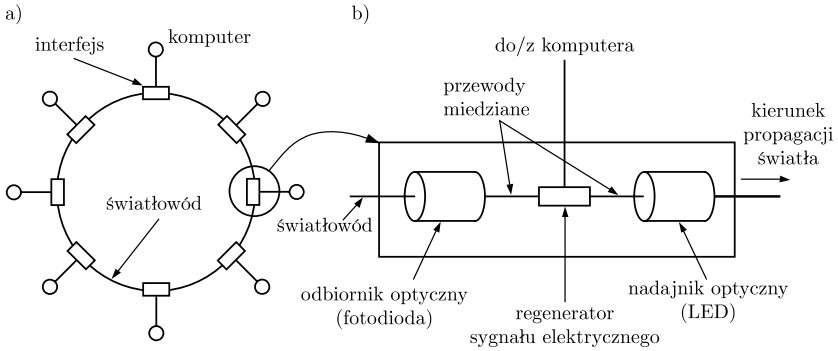
Transmisyjny system optyczny składa się z trzech elementów: środka transmisji, źródła światła i detektora. Środkiem transmisji jest kabel światłowodowy w postaci cieniutkiego włókna szklanego lub plastiku. Źródłem światła jest dioda świecąca LED (Light Emitting Diode) lub dioda laserowa, emitujące impulsy świetlne po przyłożeniu do nich napięcia elektrycznego. Detektorem jest fotodioda, która generuje impuls elektryczny, jeśli pada na nią światło. Umieszczając diodę LED lub diodę laserową na jednym końcu światłowodu a fotodiodę na drugim, otrzyma się jednokierunkowy system transmisji danych, który odbiera impulsy elektryczne, zamienia je na impulsy świetlne przesyłane światłowodem, przetwarzane ponownie na końcu światłowodu na sygnały elektryczne.

Rdzeń kabla światłowodowego zrobiony jest ze szkła lub plastiku o bardzo dużej czystości, przez który przechodzi światło od początku do końca kabla. Istotnym elementem światłowodu jest szklana powłoka rdzenia, odbijająca jak lustro przechodzące przez światłowód promienie świetlne do wewnątrz rdzenia. Rozróżnia się światłowody wielomodowe, napędzane diodami LED, w których różne promienie świetlne odbijają się wewnątrz światłowodu pod różnymi kątami, oraz światłowody jednomodowe, prowadzące promienie świetlne zasadniczo bez odbić. Światłowody multimodowe stosują długości fali świetlej $\lambda = 0,85 - 1,3\mu m$, zaś jednomodowe $\lambda = 1,55\mu m$. Światło-

wody jednomodowe są bardziej efektywne niż wielomodowe i mogą pracować na większych odległościach, lecz wymagają jako nadajników droższych diod laserowych. Średnica rdzenia światłowodów wielomodowych waha się w granicach 50 – 1000 mikronów, a średnica powłoki ochronnej 125 – 1050 mikronów. Światłowody jednomodowe mają zaś średnicę rdzenia rzędu 4 – 10 mikronów, a średnicę powłoki 75 – 125 mikronów.

Aktualnie dostępne systemy transmisji danych z zastosowaniem światłowodów mogą pracować z szybkością rzędu 1000 Mbit/s na odległości 1 km. Laboratoryjnie osiągano wyższe szybkości transmisji, ale na krótszych dystansach. Eksperymenty pokazały też, że lasery większej mocy mogą napędzać światłowody o długości rzędu 100 km bez stosowania po drodze wzmacniaczy sygnału, jednak przy mniejszych szybkościach transmisji.

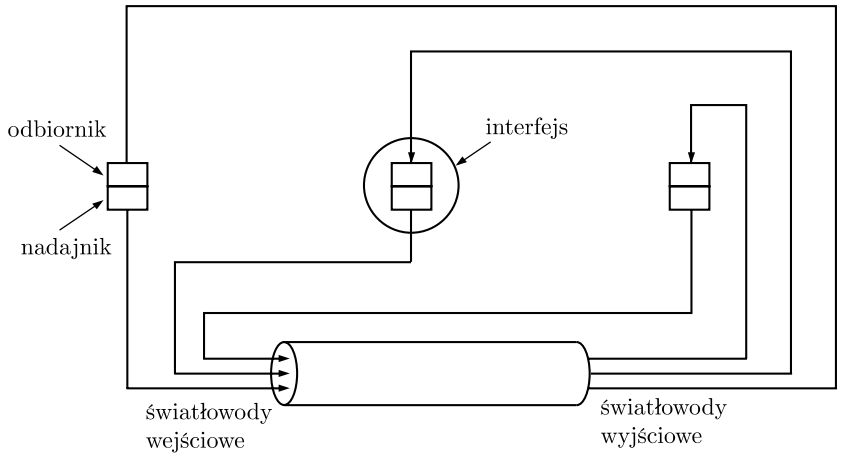
Światłowody zaczęły powszechnie wypierać systemy transmisyjne z kablami koncentrycznymi w dalekosiężnych sieciach telekomunikacyjnych i aktualnie stają się podstawową technologią dla sieci lokalnych LAN. Podstawowym problemem technicznym, który nie został jeszcze ostatecznie rozwiązany jest tworzenie „odczepów wampirowych", powodujących w chwili obecnej dość duże straty sygnału świetlnego.



Rysunek 2: Pierścień światłowodowy z interfejsem aktywnym

Sieć lokalną typu pierścień z zastosowaniem światłowodów pokazano na rys. **??**. (a). Interfejs z każdego komputera przekazuje strumień impulsów świetlnych do następnego komputera i spełnia rolę złącza typu **T**, pozwalającego komputerowi wysyłać i odbierać dane. Stosuje się tu dwa typy interfejsów: aktywne i bierne. Interfejs bierny składa się z dwóch odczepów przyspawanych do głównego światłowodu. Jeden z odczepów ma na końcu odbiorczym fotodiodę, a drugi, po stronie nadawczej, diodę LED lub diodę laserową. Taki interfejs jest bardzo niezawodny, bo odczepy są całkowicie bierne, a uszkodzenie diody świecącej lub fotodiody nie powoduje przerwania pierścienia, lecz tylko odłącza od pierścienia jeden komputer. Wadą interfejsu biernego jest strata sygnału świetlnego na każdym odczepie, przez co liczba komputerów i długość pierścienia są ograniczone.

Interfejs aktywny pokazano na rys. **??**. (b). Przychodzące impulsy świetlne są tu przetwarzane na sygnał elektryczny, regenerowane do maksymalnego poziomu, jeśli zostały stłumione, zamienione z powrotem na impulsy świetlne i w tej postaci retransmitowane do następnego komputera. Komputer jest połączony za pomocą interfejsu przewodem miedzianym z regeneratorem sygnałów. Jeśli ten element zawiedzie, pierścień zostanie przerwany i sieć przestanie działać. Zaletą tego interfejsu jest możliwość stosowania połączeń międzykomputerowych rzędu kilku kilometrów, ponieważ przy każdym komputerze sygnał jest regenerowany, co praktycznie nie powoduje ograniczeń co do wielkości pierścienia.



Rysunek 3: Sieć światłowodowa typu gwiazda bierna

Za pomocą światłowodów można też budować sieć LAN z kanałami typu rozgłoszeniowego w postaci tzw. gwiazdy biernej (rys. **??**.). W tej konstrukcji każdy interfejs do komputera, składający się z optycznego nadajnika i odbiornika posiada dwa światłowody. Wszystkie światłowody z wyjść nadajników stanowią wejścia optyczne do jednego końca cylindra krzemowego. Do drugiego końca cylindra przylegają światłowody, połączone z odbiornikami wszystkich interfejsów. Jeśli którykolwiek nadajnik emituje impulsy świetlne, to są one przekazywane do każdego odbiornika za pośrednictwem cylindra krzemowego, stanowiącego kanał typu rozgłoszeniowego. Liczba węzłów takiej sieci jest ograniczona i zależy od czułości zastosowanych fotodiod, ponieważ moc sygnału z jednego nadajnika dzieli się na wszystkie odbiorniki w sieci.

Podstawową zaletą światłowodu w porównaniu z kablami symetrycznymi (złożonymi ze skrętek dwużyłowych) i koncentrycznymi jest ogromna szerokość pasma i małe straty mocy sygnału, przez co odległości między regeneratorami sygnału mogą być dużo większe. Światłowody są całkowicie odporne na zakłócenia elektromagnetyczne oraz na korodujące czynniki środowiskowe

i mogą być z powodzeniem stosowane na obszarach zakładów przemysłowych, gdzie kable elektryczne nie działają niezawodnie. Poza tym światłowody są znacznie cieńsze i lżejsze od kabli elektrycznych. Światłowody są też bardzo bezpieczne, ponieważ nie promieniują energii, co uniemożliwia podsłuch, a ponieważ każdy odczep powoduje znaczne straty energii sygnału, każda próba podsłuchu zostaje wykryta.

Wadą tego typu kanałów transmisyjnych jest dużo trudniejsza eksploatacja, wymagająca specjalnych kwalifikacji i umiejętności, których nie posiadają standardowo szkoleni elektronicy. Mimo to, zalety światłowodów znacznie górują nad ich wadami, dlatego też prowadzi się intensywne prace, mające na celu obniżenie kosztów produkcji łączy światłowodowych oraz usprawnienie technologii ich wytwarzania.

Część VI
Łącza optyczne i mikrofalowe

Obok systemów transmisyjnych, używających kabli miedzianych lub światłowodów, istnieją systemy nie używające takich środków transmisji, lecz wysyłające dane bezpośrednio w przestrzeń. Są to systemy używające podczerwieni, laserów oraz fal radiowych. Mają one zastosowanie wszędzie tam, gdzie układanie kabli lub światłowodów jest niemożliwe lub niepożądane. Można bowiem bez ograniczeń stosować kable lub światłowody wewnątrz budynku, ale połączenia sieciowe między budynkami wymagałyby kładzenia kabli pod jezdniami dróg, co jest kosztowne i często niedozwolone. Wygodną alternatywą jest w tym przypadku umieszczenie lasera lub nadajnika, i odbiornika podczerwieni na dachach budynków. Transmisja z zastosowaniem laserów, mikrofal lub podczerwieni jest przy tym w pełni cyfrowa, a stosowane łącza mają właściwości kierunkowe i nie są podatne na podsłuchy lub zagłuszanie. Jednakże deszcz lub mgła może wpływać negatywnie na jakość transmisji, która zależy od długości wybranej fali.

Szeroko stosowaną alternatywą dla telekomunikacji dalekosiężnej, za pomocą kabli koncentrycznych, są łącza mikrofalowe w postaci anten parabolicznych, montowanych na wieżach, usytuowanych co 10 – 100 km, w zależności od wysokości wieży (przy 100 m wysokości osiąga się łatwo pewną transmisję na odległości 100 km). Budowa łącza mikrofalowego jest znacznie tańsza niż kładzenie kabla koncentrycznego tej samej długości, zwłaszcza w terenie gęsto zaludnionym lub terenie górskim.

Łącza mikrofalowe pracują na częstotliwościach od 2 do 40 GHz, co odpowiada długości fal od 15 do 0,75 cm. Częstotliwości te dzielone są na pasma, przydzielane centralnie różnym użytkownikom, jak telewizja, instytucje wojskowe, itp. Systemy mikrofalowe stosuje się powszechnie do transmisji sygnałów telewizyjnych oraz do rozmów telefonicznych.

Część VII
Satelity komunikacyjne

Satelita komunikacyjny działa podobnie jak stacja pośrednia w łączu mikrofalowym, usytuowana w przestrzeni kosmicznej. Zawiera on jeden lub więcej tzw. *transponderów*, czyli urządzeń, odbierających przesyłane sygnały z ziemi w pewnym zakresie częstotliwości, wzmacniających te sygnały, i następnie retransmitujących je z powrotem w innym paśmie częstotliwości, aby uniknąć interferencji z sygnałami przychodzącymi. Kierowana na ziemię wiązka fal może być szeroka, obejmująca dużą część powierzchni ziemi, albo wąska, która po dotarciu do ziemi ma średnicę rzędu setek kilometrów. Widzialność satelity z ziemi zależy od wysokości i parametrów jego orbity. Orbity satelitów komunikacyjnych sytuuje się na wysokości około 36000 kilometrów nad równikiem, dzięki czemu czas ich obiegu wokół ziemi wynosi 24 godziny. Takie satelity widziane są z ziemi jako obiekty stacjonarne, a łączność z nimi zapewniają mało kosztowne anteny, które nie muszą śledzić satelity, jak to ma miejsce w przypadku niższych orbit.

Aktualna technologia łączy satelitarnych dopuszcza 4 stopniowy odstęp między satelitami, tak więc w płaszczyźnie równikowej można umieścić równocześnie 90 satelitów geostacjonarnych. Przy mniejszych odległościach kątowych, między satelitami, wysyłana z ziemi wiązka fal radiowych docierałaby nie tylko do właściwego satelity, ale też do jego sąsiadów.

Aby zapobiec chaosowi, istnieją porozumienia międzynarodowe, ustalające organizację łaczy satelitarnych oraz przydział częstotliwości. Tak więc pasma 3,7 – 4,2 GHz oraz 5,925 – 6,425 GHz zarezerwowano dla satelitów komunikacyjnych, odpowiednio dla wiązek przesyłanych od satelity do ziemi i odwrotnie. Te zakresy częstotliwości są też używane w naziemnych łączach mikrofalowych, czyli można tu mówić o pewnym zagęszczeniu. Następne pasmo, jeszcze nie całkowicie zajęte, dotyczy częstotliwości 12 – 14 GHz, przy której satelity można umieszczać co 1 stopień. Jednakże woda doskonale pochłania fale radiowe z tego zakresu, co powoduje konieczność zapobiegania wpływom pogody na niezawodność transmisji w tym paśmie.

Typowy system satelitarny rozdziela pasmo 500 MHz na kilkanaście transponderów, obsługujących pasmo 36 MHz. Każdy transponder można używać jako pojedynczy kanał do transmisji danych cyfrowych z szybkością 50 Mbit/s, albo jako 800 kanałów cyfrowej telefonii o szybkości transmisji 64k bit/s. Możliwe jest też tworzenie innych jeszcze kombinacji kanałów do przesyłania danych. Dzięki stosowaniu poziomej lub pionowej polaryzacji sygnału radiowego, dwa transpondery mogą pracować w tym samym paśmie częstotliwości bez interferencji.

Satelity komunikacyjne posiadają pewne własności, które je różnią całkowicie od łączy naziemnych. Przede wszystkim wprowadzają one znaczne opóźnienie, sięgające 250 – 300 ms, które jest w przybliżeniu stałe i zale-

ży od odległości użytkownika od stacji naziemnej oraz od wysokości satelity nad horyzontem. Warto wiedzieć, że dla naziemnych łączy mikrofalowych opóźnienie to wynosi w przybliżeniu 3 μs/km, a w łączach z kablem koncentrycznym 5 μs/km (fala elektromagnetyczna biegnie szybciej w powietrzu niż w kablu). Tak więc satelita wydaje się szybszy od łączy naziemnych, pracujących z szybkością 9600 bit/s, jeśli przesyła się wiadomości dłuższe niż 2600 bitów. Systemy satelitarne cechuje też niższa stopa błędów i stąd rzadsze żądania retransmisji odebranej błędnie informacji, niż w przypadku łączy naziemnych, dzięki czemu efektywna szybkość transmisji jest duża. Koszt transmisji satelitarnej jest w przybliżeniu stały i nie zależy od odległości.

Istotną różnicą między łączami naziemnymi a satelitarnymi jest szerokość oferowanego pasma. Większość łączy naziemnych pracuje z szybkością 56 kbit/s, a nieliczne, zacznie kosztowniejsze, z szybkością 1,544 Mbit/s, podczas gdy łącza satelitarne gwarantują około 1000 razy większą szybkość. Oznacza to, że przesłanie 200 Mbit kanałem naziemnym o szybkości 56 kbit/s trwa niecałą godzinę, zaś wysłanie tej samej liczby bitów kanałem satelitarnym, 4 sekundy.

Pewną niedogodnością łączy satelitarnych jest to, że wysłana z satelity wiązka fal pokrywa dość dużą powierzchnię, na której odbiór transmisji jest możliwy. Do informacji, przesyłanej łączami satelitarnymi mogą zatem mieć dostęp osoby do tego nie upoważnione, należy więc przesyłane dane szyfrować.

Część VIII
System satelitarny Irydium

Pierwsze satelity komunikacyjne (Sputnik 1957, Telstar 1963) umieszczano na niskich orbitach. Ten system wymagał bardzo dokładnej synchronizacji lotu kilkudziesięciu satelitów, poruszających się z szybkością 20000 km/s. Związane z tym problemy techniczne były wówczas trudne do rozwiązania, co powodowało częste zaburzenia w transmisji, które w konsekwencji doprowadziły praktycznie do wyłącznego stosowania satelitów geostacjonarnych. Z kolei zasadniczą wadą systemów geostacjonarnych jest konieczność przesyłania z satelity w kierunku ziemi sygnału o stosunkowo dużej mocy.

Pod koniec lat 80. nastąpił duży postęp w technologiach komunikacji kosmicznej, powrócono więc do systemu satelitów niskoorbitalnych, które znajdując się znacznie bliżej ziemi, mogą wysyłać sygnał o dużo mniejszej mocy, wobec czego mogą być one znacznie mniejsze, a współpracujące z nimi terminale mogą być dużo mniej skomplikowane i tańsze. W oparciu o takie systemy buduje się systemy telefonii komórkowej, stosujące aparaty o wadze około 300 gramów i zużywające zaledwie 2 waty energii. I chociaż obecna technologia pozwala precyzyjnie synchronizować pracę satelitów ni-

skoorbitalnych, to jednak taki system jest niezmiernie kosztowny (miliardy dolarów), gdyż wymaga umieszczenia na orbitach od kilkudziesięciu do kilkuset satelitów. Mimo to, systemy takie będą opłacalne, ponieważ zapewniają komunikację z miejscami trudnodostępnymi, jak wysokie góry, dżungla czy pustynia, gdzie nigdy nie założy się kabli ani nie zbuduje stacji dla tradycyjnych systemów telefonii komórkowej.

Te przesłanki spowodowały, że w roku 1991 firma Motorola opracowała swój niskoorbitalny system satelitarny Irydium. Nazwa systemu pochodzi od irydu: atomy tego pierwiastka posiadają po 77 elektronów i tyle satelitów początkowo przewidywano w projektowanym systemie. Ostatecznie tę liczbę zredukowano do 66 stacji satelitarnych, krążących na orbitach oddalonych od ziemi o 780 km. Nie wpłynęło to na zmianę nazwy systemu, który posiada aktualnie około 22 satelitów, krążących po swoich orbitach.

Właścicielem systemu, który rozpoczął pracę pod koniec września 1998 r., jest firma Irydium LCC, która rozdała do testowania różnym osobom i instytucjom 2000 aparatów telefonicznych, przypominających telefony komórkowe. Od listopada 1998 system jest już normalnie eksploatowany.

Abonenci Irydium znajdują się ciągle w zasięgu któregoś z satelitów, krążących wzdłuż południków, 780 km nad ziemią i omiatających ziemię wiązką fal radiowych o średnicy 4700 km. Ośrodki kontroli tej sieci satelitarnej znajdują się w USA i we Włoszech, a centra obsługi klientów w USA, Holandii i Australii. W trakcie trwania rozmowy sygnał trafia od jednego z abonentów do najbliższego satelity i za pośrednictwem innych satelitów trafia do drugiego abonenta. Wkrótce abonenci Irydium będą się mogli łączyć z tradycyjnymi sieciami telefonicznymi, czyli siecią kablową i komórkową. Będzie w tym pośredniczyć 11 stacji przekaźnikowych. Dwie z nich umieszczono w Europie: pod Rzymem (m. in. do obsługi abonentów z Polski) i pod Moskwą.

Firma Irydium LCC podpisała już ponad 300 umów z firmami, które będą sprzedawać usługi tej globalnej telekomunikacji ruchomej — obejmą one ponad 100 milionów abonentów w 122 krajach. W Polsce w imieniu firmy Irydium działa spółka niemiecka Irydium Communications Germany, która aktualnie pertraktuje z TP SA. Oczekuje się, że z sieci Irydium w roku 1999 będzie korzystać 700 000 abonentów, a w roku 2002 4,5 miliona, z czego 1,5 miliona z Europy.

Właścicielami firmy Irydium LCC jest ponad 20 koncernów, pracujących dla techniki kosmicznej i telekomunikacji, a koszt budowy całego systemu ma wynieść prawie 5 miliardów dolarów. Nowy system nie jest konkurencją dla znacznie tańszej, tradycyjnej telefonii komórkowej, lecz stanowi jej uzupełnienie. Klientami tego systemu będą głównie biznesmeni, narzekający na źle działającą łączność lokalną w krajach słabo rozwiniętych. Szacuje się, że w podróży znajduje się ciągle około 4 milionów biznesmenów. Telefony dla Irydium będzie produkować Motorola i japońska firma Kyocera.

Część IX
Sieć satelitarna Globstar

Najgroźniejszym konkurentem systemu Irydium jest sieć Globstar, nad którą pracują m. in. firmy Alcatel, France Telecom i Hyunday. Sieć ta rozpocznie pracę na początku 2000 roku i w niedługim czasie rozpocznie umieszczanie na orbitach, oddalonych od ziemi o 1400 km, swoich 48 satelitów, z których każdy będzie ważył po 480 kg. Satelity będą krążyć na 8 płaszczyznach orbitalnych, po 6 satelitów na każdej. Niedawno Globstar podpisał porozumienie o współpracy z TP SA.

W odróżnieniu od systemu Irydium system Globstar wykorzystuje efektywnie naziemne systemy telekomunikacyjne. Dlatego też sieć ta ma kosztować 2,5 miliarda dolarów, a świadczone przez nią usługi będą tańsze: abonenci Irydium mają płacić za 1 minutowe połączenie 3 dolary, zaś Globstar przewiduje koszt tej usługi w granicach 35 – 65 centów.

Część X
System Sky Bridge

Najbardziej zaawansowanym projektem tzw. infostrady kosmicznej jest Sky Bridge, proponowany przez firmę francuską Alcatel, współpracującą m. in. z amerykańską Loral Space & Communications Corporation i japońskimi Toshiba i Mitsubishi. System ma tworzyć most, którym może płynąć przez kosmos szeroki strumień informacji między dwoma dowolnymi punktami na ziemi. Ma to być konstelacja 64 satelitów, krążących 1390 km nad naszym globem, uformowana w dwie podkonstelacje, składające się z 32 satelitów. Pierwsza podkonstelacja ma rozpocząć świadczenie usług już w 2001 roku, druga w latach następnych, zależnie od potrzeb. Każdy satelita o wadze 800 kg, wyposażony ma być w 45 aktywnych anten nadawczych i odbiorczych, z których każda swoim zasięgiem obejmuje na ziemi okrąg o średnicy 350 km. Łącznie satelita obsługuje obszar o średnicy 3000 km.

Podstawowym problemem jest tu uzyskanie zgody na korzystanie z odpowiednich częstotliwości, z których najbardziej atrakcyjne są w użyciu przez systemy geostacjonarne. Wobec tego projektanci Sky Bridge'a opracowali bezkolizyjną metodę używania tych samych częstotliwości, co satelity geostacjonarne.

Sky Bridge ma zapewnić szerokopasmowe połączenia typu asynchronicznego: z satelity do terminala naziemnego można będzie przesłać strumień danych z szybkością 60 Mbit/s, a z powrotem maksymalnie 2 Mbit/s. Jest to sposób idealnego dostępu do Internetu, który cechuje się taką właśnie asymetrią. Stwarza to nadzieję na tani i szybki dostęp do zasobów Internetu,

nie wymagający drogich urządzeń światłowodowych.

Transmisja w systemie Sky Bridge ma charakter cyfrowy i będzie obsługiwać przede wszystkim abonentów lokalnych sieci komputerowych i telekomunikacyjnych. Twórcy tego systemu liczą na 15 – 20 milionów użytkowników.

Część XI
Transmisja analogowa

Przy budowie sieci komputerowych rzadko tworzy się podsieci komunikacyjne, natomiast z reguły do celów transmisji danych stosuje się środki, oferowane przez sieć telekomunikacyjną powszechnego użytku. Jak wiadomo, sieci takie były budowane wiele lat temu, a głównym ich zadaniem jest przesyłanie na odległość sygnałów mowy, czyli tzw. sygnałów analogowych. Analogowe systemy transmisji są nadal bardzo popularne, należy więc wiedzieć, jakie są możliwości i warunki stosowania tych systemów do przesyłania danych cyfrowych.

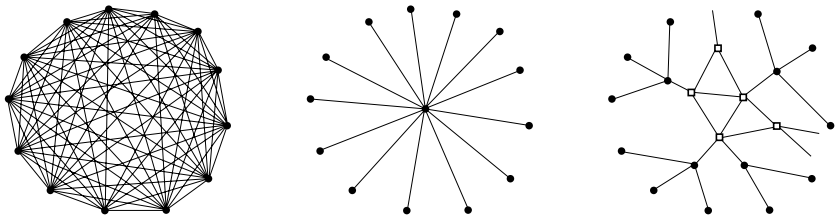
Część XII
Sieci telefoniczne powszechnego użytku

Tworzone na sieciach telekomunikacyjnych kanały do transmisji danych nie są dostosowane do wymagań sieci komputerowych, ale często stanowią one jedyną alternatywę podsieci komunikacyjnej dla wielu sieci komputerowych, zwłaszcza rozległych.

Łącząc bezpośrednio dwa komputery za pomocą kabla koncentrycznego lub światłowodu można osiągnąć szybkość transmisji rzędu 10^7 – 10^8 bit/s. Stopa błędów jest przy tym tak niewielka, że nawet trudno jest ją zmierzyć. W każdym razie jeśli średnio występuje jeden błąd dziennie, wówczas takie łącze uważa się za słabe. Jeden błąd na dzień odpowiada przy takiej szybkości transmisji jednemu bitowi przekłamanemu na 10^{12} – 10^{13} bitów wysłanych. W komutowanych sieciach telefonicznych można dane przesyłać z maksymalną prędkością rzędu 10 kbit/s, przy stopie błędów rzędu 10^{-5} (jeden bit odebrany błędnie na 10^5 bitów przesłanych). Powstaje więc problem skuteczności działania takich kanałów w sieci komputerowej.

Liczba zainstalowanych na świecie telefonów jest rzędu $3 \cdot 10^8$ i teoretycznie dowolne dwa telefony mogą być połączone ze sobą. Liczba potencjalnych połączeń wynosi więc $4,5 \cdot 10^{16}$. Najprościej taki system telefoniczny możnaby zrealizować łącząc każdy telefon z każdym za pomocą pary przewodów

miedzianych, zwanych linią telefoniczną (rys. **??**. (a)). Inny prosty sposób



(a) (b) (c)

Rysunek 4: Topologie sieci telefonicznej. (a) – topologia zupełna, (b) – sieć typu gwiazda, (c) – sieć o hierarchii dwupoziomowej

mógłby polegać na połączeniu każdego abonenta linią telefoniczną z jednym punktem centralnym, w którym dokonywanoby wybierania abonentów, pragnących się komunikować. Otrzymanoby w ten sposób sieć typu gwiazda (rys. **??**. (b)). Te rozwiązania są jednak nierealne, więc w rzeczywistości światowy system telefoniczny jest skomplikowaną strukturą zhierarchizowaną, w której każdy abonent połączony jest z centralą lokalną za pomocą sieci typu gwiazda, a centrale lokalne są połączone specjalnymi łączami z centralami nadrzędnymi (centrale międzymiastowe, regionalne, międzynarodowe, itp.) w sieć o strukturze wielobocznej, jak na rys. **??**. (c).

W telekomunikacji stosuje się różne środki transmisji. W sieciach lokalnych są to zwykle pary izolowanych przewodów w kablach symetrycznych. Do połączeń między centralami o różnym stopniu hierarchii stosuje się kable koncentryczne, łącza mikrofalowe, falowody i światłowody. Te ostatnie są w stanie łatwo zastąpić wszystkie łącza kablowe. Kanały transmisyjne między centralami służą z reguły do równoczesnego przesyłania wielu rozmów telefoniczych, co jest równoznaczne z możliwością znacznie szybszej transmisji danych za pomocą tych środków.

Część XIII
Modemy

Połączenia każdego abonenta z lokalną centralą telefoniczną dokonywane są za pomocą pary przewodów miedzianych, umożliwiającej bez specjalnych problemów transmisję danych z szybkością rzędu 1 – 2 Mbit/s. Jednak dochodzący od abonenta sygnał kierowany jest do innych abonentów przez centralę za pomocą kanału o ograniczonym paśmie (300 – 3400 Hz), a bezpośrednie przesłanie takim kanałem sygnału cyfrowego jest nieefektywne i wolne, ponieważ sygnał ma postać impulsów prostokątnych prądu stałego.

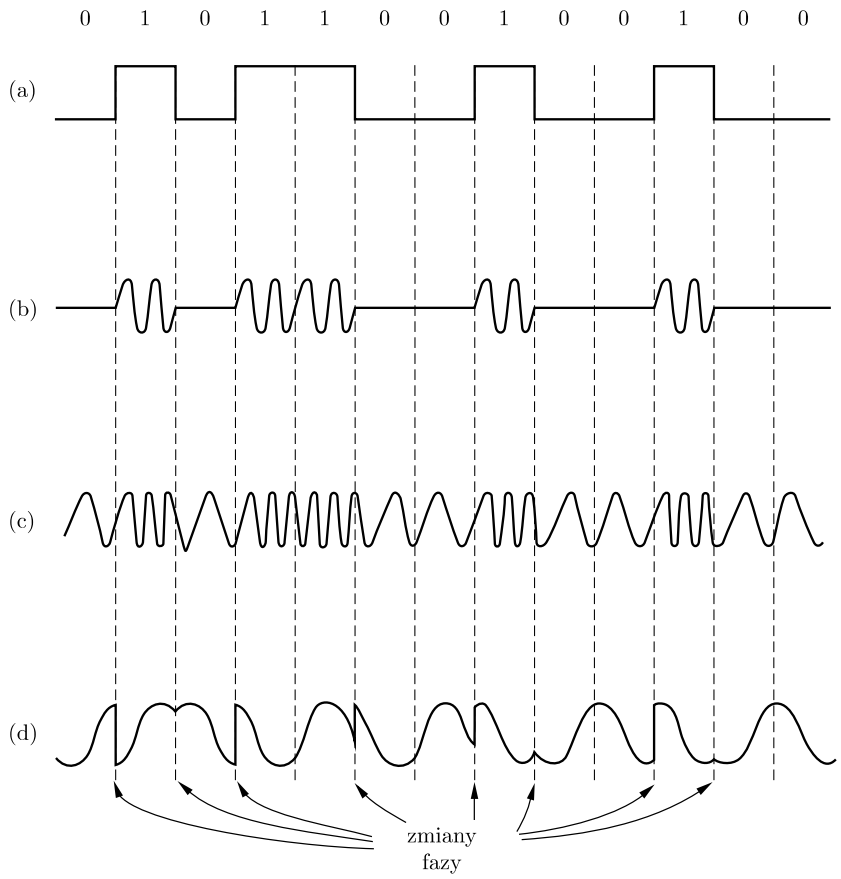
Jak wiadomo, w kanałach telefonicznych sygnały o różnych częstotliwościach są tłumione w różnym stopniu, wobec czego ciąg impulsów prostokątnych, reprezentujący strumień bitów jest w trakcie transmisji znacznie zniekształcany. Szybko więc takich prób zaniechano, zastępując impulsy prądu stałego sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości w zakresie 1000 – 2000 Hz

$$s(t) = U \cdot \sin(\omega t + \phi), \;\; \omega = 2\pi f.$$

Aby taki sygnał mógł przenosić informacje, należy odpowiednio zmodyfikować jego amplitudę U, częstotliwość f lub fazę ϕ. Sygnał sinusoidalny, niosący informację, potocznie nazywa się falą nośną, a sposób jego modyfikowania, pozwalający na przenoszenie informacji za pośrednictwem tego sygnału nazywa się modulacją. Dla reprezentacji stanów logicznych 0 lub 1 w modulacji amplitudowej stosuje się dwa różne poziomy amplitud (U_0, U_1), w modulacji częstotliwościowej dwie ustalone częstotliwości (f_0, f_1), a w fazowej dwie fazy początkowe (ϕ_0, ϕ_1). Modulację sygnału sinusoidalnego, dostosowującą ten sygnał do przenoszenia informacji, nazywa się kluczowaniem amplitudy, częstotliwości i fazy. Na rys. **??** pokazano sygnał cyfrowy i różne postaci zmodulowanego sygnału sinusoidalnego, niosącego informację, zawartą w sygnale cyfrowym. Urządzenie, wytwarzające na jednym ze swoich wyjść sygnał zmodulowany a na drugim sygnał cyfrowy w postaci strumienia bitów, posiadające też dwa wejścia: dla sygnału cyfrowego i zmodulowanego, nazywa się *modemem*, od słów modulator – demodulator. Modem jest instalowany między systemem cyfrowym – komputerem, a układem analogowym w postaci kanału telefonicznego.

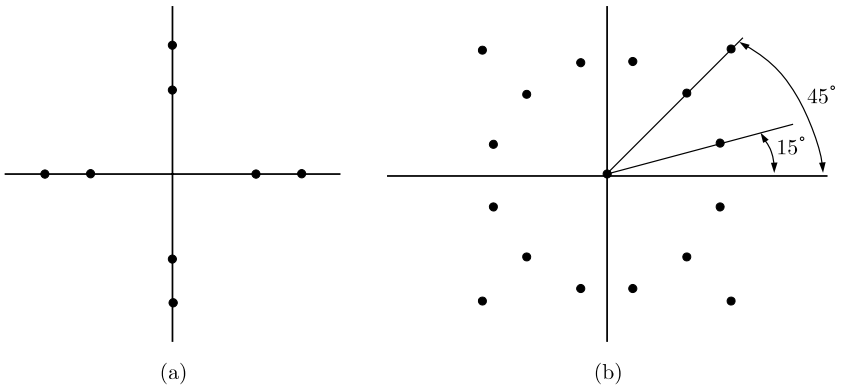
Modemy, zwłaszcza o większych szybkościach transmisji, są urządzeniami dość skomplikowanymi, gdyż stosuje się w nich łączenie różnych sposobów modulacji, najczęściej kluczowania amplitudy i fazy. Na rys. **??** (a) pokazano tzw. wykres sygnału na płaszczyznę amplitudowo-fazową. Osie wykresu oznaczają 4 kąty: 0, 90, 180 i 270 stopni, a kropki na tych osiach dwa różne poziomy amplitudy. Przedstawiony tu sygnał może posiadać 8 dyskretnych wartości, każdej z nich można przyporządkować jedną z ośmiu sekwencji trójbitowych 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 lub 111. Tak więc jeden element sygnału niesie tu 3 bity informacji (3 bity/bod). Na rys. **??** (b) widać 16 punktów, reprezentujących napięcia o określonych amplitudach i fazach. Modem, generujący sygnał takiego typu (mimo że jest to sygnał modulowany amplitudowo i fazowo, ten typ modulacji nazywa się kwadraturową modulacją amplitudy) pracuje z szybkością modulacji 2400 bodów, co odpowiada szybkości transmisji 9600 bit/s, ponieważ jeden element sygnału zawiera 4 bity informacji.

Aparat telefoniczny jest połączony z centralą lokalną jedną parą przewodów, w której sygnały można przesyłać w obydwu kierunkach. Aby możliwe było przejście sygnału mowy z centrali lokalnej, do central o wyższej hierarchii, musi nastąpić rozdzielenie kierunków transmisji: każdy kierunek, tzn.

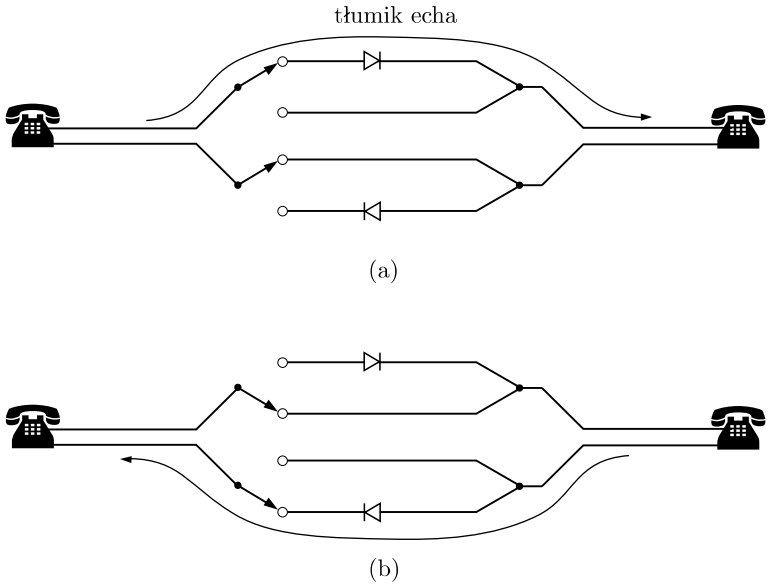


Rysunek 5: Sygnał bierny – (a), sygnał binarny zmodulowany amplitudowo – (b), częstotliwościowo – (c) i fazowo (d)

docelowy i powrotny, posiada oddzielną parę przewodów. Ułatwia to konstrukcję dalekosiężnych kanałów telekomunikacyjnych, które charakteryzują się dużymi szerokościami przepuszczanego pasma i którymi równocześnie przesyła się wiele rozmów telefonicznych, ale jest też powodem powstawania tzw. echa. Efekt echa obserwuje się na dalekosiężnych połączeniach telefonicznych i polega on na tym, że osoba mówiąca słyszy swój głos, odbity od końca kanału z pewnym opóźnieniem. Z psychologicznego punktu widzenia, jest to dla osoby mówiącej uciążliwe, ponieważ utrudnia porozumiewanie się. To szkodliwe zjawisko wyeliminowano przez zastosowanie specjalnych urządzeń, zwanych tłumikami echa. Instaluje się je na liniach o długości powyżej 2000 km, ponieważ przy krótszych dystansach opóźnienie jest małe i nie jest obserwowalne przez abonentów. Tłumik echa działa w taki sposób, że wykrywa sygnał mowy przychodzący z jednego końca połączenia i tłumi wszystkie sygnały, przesyłane w kierunku przeciwnym. Jeśli pierwsza osoba przestaje



Rysunek 6: Przestrzeń amplitudowo-fazowa sygnału zmodulowanego. (a) – modulacja typu 3 bity/bod, (b) – modulacja 4 bity/bod



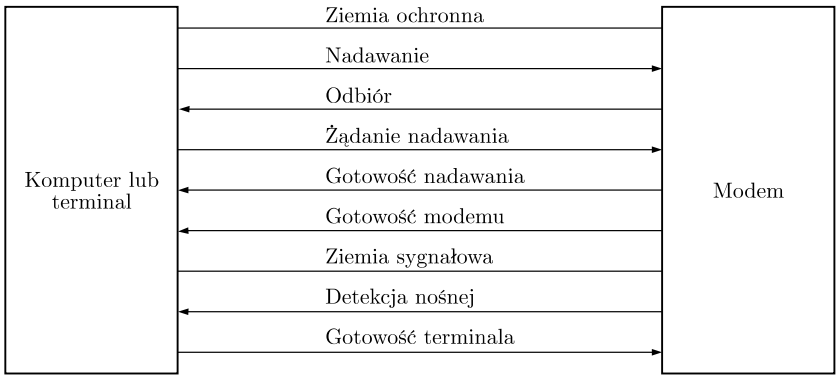
Rysunek 7: Zasada działania tłumika echa. (a) – transmisja z A do B, (b) – transmisja z B do A

mówić, a druga osoba zaczyna, tłumik echa przełącza kierunek transmisji.

Na rys. **??**. (a) pokazano w bardzo uproszczony sposób zasadę działania tłumika echa. Dla zaznaczenia kierunku dozwolonej transmisji sygnału, zastosowano tu symbol diody. Z zasady tej wynika, że w kanałach z zainstalowanymi tłumikami echa równoczesna transmisja sygnałów w obydwu kierunkach nie jest możliwa, co jest bardzo niepożądane z punktu widzenia transmisji danych. Dlatego też tłumiki echa zmodyfikowano w taki sposób, że wyposażono je w możliwość detekcji sygnału sinusoidalnego, o częstotliwości 2100 Hz i dostatecznie dużej amplitudzie. Przy obecności tego sygnału tłumik echa przestaje funkcjonować, co umożliwia użytkowanie łącza w systemie dupleksowym, czyli równoczesne przesyłanie danych w obu kierunkach.

Część XIV
Interfejs RS-232-C i RS-449

Przykładem protokołu warstwy fizycznej jest interfejs między komputerem lub terminalem a modemem, określający szczegóły mechaniczne, elektryczne, funkcjonalne i proceduralne styku między tymi dwoma urządzeniami. Opis interfejsu zawarty jest w normie amerykańskiej RS-232-C, zwanej poprawnie EIA RS-232-C. EIA (Electronic Industries Association) jest skrótem organizacji handlowej producentów urządzeń elektronicznych. Odpowiednikiem międzynarodowym tej normy jest zalecenie CCITT o nazwie V.24, różniące się nieznacznie od normy amerykańskiej w zakresie definicji niektórych, rzadziej używanych obwodów. W tych normach komputer lub terminal nazywa się oficjalnie DTE (Data Terminal Equipment), a modem DCE (Data Circut-Terminating Equipment), czyli urządzenie końcowe transmisji danych. Mechanicznie, interfejs oznacza znormalizowaną łączówkę 25 pinową. Piny, czyli wystające szpilkowe styki łączówki umieszczone są w dwóch rzędach. W rzędzie górnym, piny są ponumerowane od 1 do 13, w dolnym od 14 do 25, licząc od strony lewej do prawej. Do tej łączówki przykładane są sygnały elektryczne, których poziom mniejszy od -3 V oznacza logiczną jedynkę, a większy od +3 V logiczne zero. Sygnały te oczywiście reprezentują informację binarną, która nie może być transmitowana w interfejsie szybciej niż 20 kbit/s. Maksymalna długość kabli doprowadzających nie powinna przekroczyć 15 m. Opis funkcjonalny interfejsu precyzuje nazwę każdego pinu, oznaczającą jaki obwód jest do niego podłączony. Na rys. **??** pokazano funkcjonalny opis 9 pinów interfejsu RS-232-C, występujących w każdym modemie. Interfejs służy do wymiany informacji między modemem a terminalem według następującej procedury: Po włączeniu zasilania do terminala na pinie nr 20 pojawia się sygnał logicznej jedynki, co oznacza gotowość do pracy urządzenia DTE. Jeśli modem jest włączony, wytwarza na styku nr 6 sygnał logicznej jedynki, sygnalizując w ten sposób gotowość do pracy



Rysunek 8: Najczęściej używane obwody interfejsu RS-232-C

modemu. Po wykryciu przez modem w linii telefonicznej zmodulowanej fali nośnej, na pinie nr 8 pojawia się logiczna jedynka. Jeśli terminal ma dane do przesłania, ustawia pin nr 4 na poziomie logicznej jedynki. Jedynka logiczna na pinie nr 5 oznacza, że modem jest przygotowany do przyjęcia danych. Dane nadawane przechodzą z terminala do modemu na pinie nr 2, a dane odbierane w odwrotym kierunku na pinie 3. Inne piny interfejsu, bardzo często używane w praktyce, służą do wybierania szybkości transmisji, dostarczania impulsów synchronizujących, testowania modemu lub przesyłania danych w kanale powrotnym.

Opis proceduralny interfejsu określa dopuszczalną kolejność zdarzeń, tzn. sekwencję występowania określonych sygnałów logicznych na poszczególnych pinach. Protokół warstwy fizycznej oparto na parze akcja – reakcja. Kiedy np. terminal, ustawiając na pinie nr 4 jedynkę logiczną (żądanie nadawania) zgłasza gotowość do nadawania danych, modem odpowiada na tę akcję, ustawiając logiczną jedynkę na pinie nr 5, co oznacza gotowość modemu do przyjęcia od terminala danych do nadania. Podobne pary działań protokół definiuje dla każdego obwodu.

Często zachodzi potrzeba bezpośredniego połączenia dwóch komputerów za pomocą interfejsu RS-232-C. Dokonuje się tego za pomocą tzw. modemu zerowego w postaci wielożyłowego kabla, zakończonego stosowną częścią łączówki interfejsu RS-232-C, z odpowiednio skrzyżowanymi przewodami, np. obwód o nazwie dane nadawane (pin nr 2), z komputera przesyłającego dane, łączy się z obwodem nr 3 (dane odbierane) komputera przygotowanego do odbioru danych. W podobny sposób w modemie zerowym łączy się inne pary obwodów.

Interfejs RS-232-C funkcjonuje od wielu lat. W międzyczasie ograniczenie szybkości transmisji do 20 kbit/s i długości kabla do 15 metrów stało się niepożądane. Opracowano więc nową normę, RS-449, która w istocie jest zbiorem trzech norm. Opis właściwości mechanicznych, funkcjonalnych i pro-

ceduralnych interfejsu warstwy fizycznej zawarto w normie RS-449, zaś interfejs elektryczny zdefiniowano w normach RS-423-A i RS-422-A. Pierwsza z tych norm, podobna do interfejsu RS-232-C zakłada, że wszystkie obwody mają wspólną ziemię. Dotyczy ona tzw. transmisji niesymetrycznej, w przeciwieństwie do normy RS-442-A, która wymaga, by każdy obwód posiadał dwa przewody, co zapewnia transmisję symetryczną względem ziemi. W wyniku tych postanowień, normę RS-442-A można stosować przy szybkościach do 2 Mbit/s i długości kabla do 60 metrów. Przy krótszych kablach szybkość transmisji może być większa od 2 Mbit/s.

Wprowadzenie obwodów dwuprzewodowych spowodowało, że norma RS-449 przewiduje wprowadzenie 2 łączówek: 37 i 9 stykowej. Jeśli nie stosuje się kanałów powrotnych, wystarcza sama łączówka o 37 pinach.

W tabeli **??** pokazano porównanie normy RS-449 z normami RS-232-C i V.24 CCITT.

Część XV
Transmisja cyfrowa

Transmisja analogowa od początku zdominowała przemysł telekomunikacyjny, gdyż nadawane sygnały mowy mają postać zmiennej w czasie, funkcji ciągłej. Dopiero powstanie techniki cyfrowej i komputerów spowodowało, że szerokopasmowe łącza dalekosiężne zaczęto w krajach uprzemysłowionych stosować do transmisji cyfrowej, czyli do przesyłania zamiast sygnałów ciągłych sekwencji zer i jedynek. W krajach najbardziej uprzemysłowionych inwestowano ogromne środki na rozwój łączy cyfrowych, dlatego też posiadają one od wielu lat systemy transmisji cyfrowej. już od central lokalnych.

Transmisja cyfrowa gwarantuje niższą stopę błędów niż transmisja analogowa. Chociaż w transmisji analogowej stosuje się wzmacniacze sygnału, nie udaje się nigdy idealnie jednakowo wzmocnić przebiegów o wszystkich częstotliwościach, leżących w paśmie przepuszczania, gdyż są one w różnym stopniu tłumione. Ten błąd się akumuluje, dlatego też przy wielu wzmacniaczach zainstalowanych w łączach dalekosiężnych sygnał ulega znacznemu zniekształceniu. W przeciwieństwie do tego regeneratory sygnałów binarnych mogą odtwarzać sygnał binarny dokładnie, ponieważ posiada on tylko dwie wartości. Poza tym regeneratory cyfrowe nie powodują akumulowania błędów.

Tabela 2 (a): Porównanie norm RS-232-C, V.24 CCITT i RS-449

	RS – 232 – C			CCITT V.24		
	Kod	Wtyk	Obwód	Kod	Styk	Obwód
	AA	1	Ziemia ochronna	101	1	Ziemia ochronna
	AB	7	Ziemia sygnałowa	102	7	Ziemia sygnałowa
	BA	2	Dane nadawane	103	2	Dane nadawane
	BB	3	Dane odbierane	104	3	Dane odbierane
	CA	4	Żądanie nadawania	105	4	Żądanie nadawania
	CB	5	Gotowość do nadawania	106	5	Gotowość do nadawania
	CC	6	Gotowość DCE	107	6	Gotowość DCE
	CD	20	Gotowość DTE	108	20	Gotowość DTE
	CE	22	Wskaźnik wywołania	125	22	Wskaźnik wywołania
	CF	8	Poziom sygnału odbieranego	109	8	Poziom sygnału odbieranego
	CG	21	Jakość sygnału odbieranego	110	21	Jakość sygnału odbieranego
	CH	23	Wybór szybkości przez DCE	111	23	Wybór szybkości przez DCE
	CI	18	Wybór szybkości przez DCE	112	18	Wybór szybkości przez DCE
				136		Nowy sygnał
				126	11	Wybór częstotliwości nadawania
	DA	24	Podstawa czasu z DTE dla elementów nadawanych	113	24	Podstawa czasu z DTE dla elementów nadawanych
	DB	15	Podstawa czasu z DCE dla elementów nadawanych	114	15	Podstawa czasu z DCE dla elementów nadawanych
	DD	17	Podstawa czasu z DCE dla elementów odbieranych	115	17	Podstawa czasu z DCE dla elementów odbieranych
Kanał powrotny	SBA	14	Dane nadawane w kanale powrotnym	118	14	Dane nadawane w kanale powrotnym
Kanał powrotny	SBB	16	Dane odbierane w kanale powrotnym	119	16	Dane odbierane w kanale powrotnym
Kanał powrotny	SCA	19	Żądanie nadawania w kanale powrotnym	120	19	Żądanie nadawania w kanale powrotnym
Kanał powrotny	SCB	13	Gotowość kanału powrotnego	121	13	Gotowość kanału powrotnego
Kanał powrotny	SCF	12	Poziom sygnału odbieranego w kanale powrotnym	122	12	Poziom sygnału odbieranego w kanale powrotnym

Tabela 2 (b): Porównanie norm RS-232-C, V.24 CCITT i RS-449

RS – 449		
Kod	Styk	Obwód
–	1	
SG	19	Ziemia sygnałowa
SC	37	Przewód wspólny danych wysyłanych
RC	20	Przewód wspólny danych odbieranych
SD	4,22	Dane nadawane
RD	6,24	Dane odbierane
RS	7,25	Żądanie nadawania
CS	9,27	Gotowość do nadawania
DM	11,29	Tryb danych
TR	12,30	Gotowość DTE
IC	15	Rozmowa przychodząca
RR	13,31	Gotowość odbiornika
SQ	33	Jakość sygnału odebranego
SR	16	Signaling rate
SI	2	Signaling indicators
IS	28	Terminal in service
NS	34	Nowy sygnał
SF	16	Wybór częstotliwości
TT	17,35	Taktowanie terminala
ST	5,23	Taktowanie nadawania
RT	8,26	Taktowanie odbioru
SSD	3	Dane nadawane
SRD	4	Dane odebrane
SRS	7	Żądanie nadawania
SCS	8	Gotowość do nadawania
SRR	2	Gotowość odbiornika
LL	10	Local loopback
RL	14	Remote loopback
TM	18	Tryb testowania
SS	32	Wybór rezerwy
SB	36	Wskaźnik rezerwy

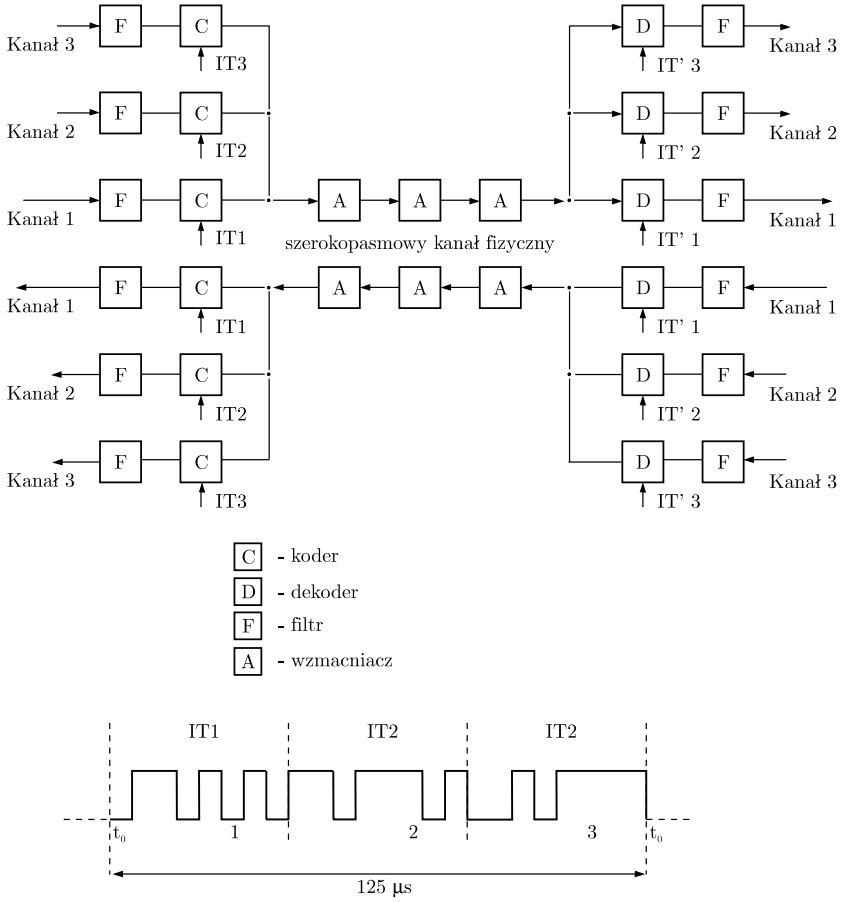
Część XVI

Modulacja kodowa-impulsowa i czasowe rozdzielanie kanałów

C. Shannon dowiódł, że każdy sygnał, nie zawierający w swoim widmie składowych o częstotliwościach wyższych od pewnej częstotliwości granicznej f_c, można odtworzyć bez straty informacji z próbek tego sygnału pod warunkiem, że częstotliwość pobierania próbek będzie co najmniej równa $2f_c$. Twierdzenie to jest podstawą teoretyczną cyfrowych metod transmisji sygnałów analogowych, ponieważ daje wskazówkę, w jaki sposób należy przekształcić ten sygnał w ciąg impulsów binarnych, reprezentujących sygnał logiczny.

Chociaż widmo sygnału mowy zawarte jest w paśmie 20 – 20000 Hz, to analogowy sygnał telefoniczny został ograniczony zaleceniami CCITT do pasma 300 – 3400 Hz, ponieważ w tym paśmie występuje największa część mocy sygnału. Wobec tego przyjęto częstotliwość 8000 Hz, jako częstotliwość próbkowania tego sygnału (częstotliwość próbkowania wybrano z pewnym zapasem, gdyż teoretycznie powinno wystarczyć 6800 Hz). Aby zatem wiernie odtworzyć ciągły, analogowy sygnał telefoniczny po stronie odbiorczej, trzeba go próbkować co 125 μs. Każdą próbkę sygnału należy skwantować, czyli aproksymować ją jedną spośród 128 lub 256 wartości za pomocą konwertera analogowo-cyfrowego (7 lub 8 bitów). Ta operacja wprowadza do sygnału pewne zakłócenie, zwane szumem kwantowania. Jest pożądane, by szum ten był proporcjonalny do amplitudy sygnału, wobec czego przed kwantyfikacją stosuje się logarytmiczną kompresję amplitudy próbki. Podczas odtworzenia sygnału z próbek następuje proces odwrotny: dekompresja, następnie konwersja cyfrowo-analogowa. Jest to zasada modulacji kodowo-impulsowej, zwanej w skrócie PCM (Pulse Code Modulation).

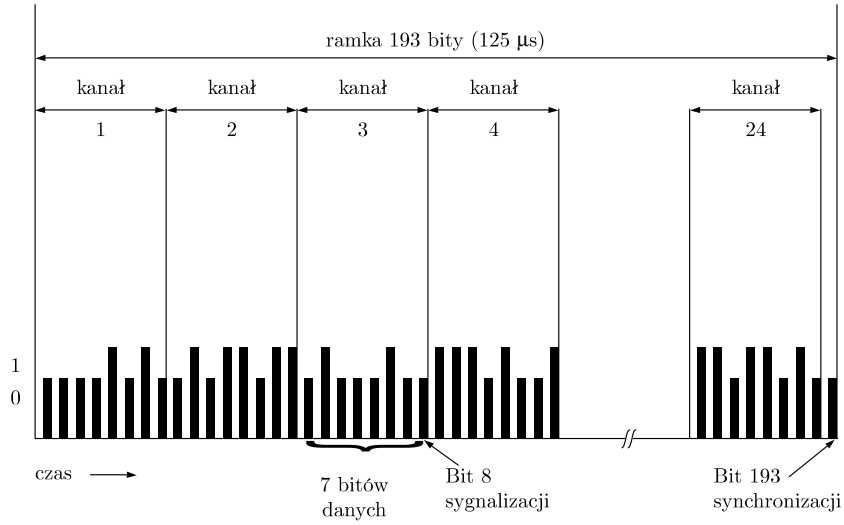
Modulację kodowo-impulsową stosuje się łącznie z czasowym rozdziałem kanałów. Każdą próbkę należy wysyłać, zgodnie z ustaloną częstotliwością próbkowania, co 125 μs, ale w czasie przewidzianym na jeden okres próbkowania można przesłać więcej niż jedną próbkę. Na rys. **??** pokazano przypadek tworzenia trzech kanałów z rozdziałem czasowym, polegający na podziale odcinka czasu 125 μsek na trzy przedziały. W każdym kanale, po stronie nadawczej filtr F ogranicza widmo sygnału do postaci znormalizowanej, a koder C dokonuje próbkowania, kompresji amplitudy próbki, konwersji próbki na postać cyfrową, którą następnie przekazuje szeregowo do szerokopasmowego kabla, w którym co pewien odstęp umieszczane są wzmacniacze A, służące do regeneracji sygnału cyfrowego. Każdy kanał ma swój przedział czasowy IT1, IT2 oraz IT3, podczas którego przesyła cyfrowy sygnał próbki do kanału transmisyjnego. Po stronie odbiorczej, na końcu kabla, każdy kanał jest wyposażony w dekoder D, dokonujący konwersji sygnału cyfrowego



Rysunek 9: Zasada czasowego rozdzielania kanałów

na odpowiednie napięcie, dekompresuje i całkuje sygnał odebrany, oraz w filtr F, ograniczający pasmo sygnału odebranego, odtworzonego z próbek. Na końcach kabla, na którym tworzy się n kanałów transmisyjnych rozdzielanych czasowo, znajduje się $2n$ filtrów oraz n koderów i n dekoderów. Ten zespół urządzeń realizuje się w postaci jednego układu scalonego o nazwie COFIDEC (koder-filtr-dekoder), jeśli zawiera filtry, lub CODEC w wersji bez filtrów, które wówczas umieszcza się w innym układzie. Układy te otrzymywać muszą oczywiście odpowiednie impulsy zegarowe do wyznaczania czasu trwania bitu oraz informację synchronizacyjną, odpowiadającą chwilom t_0.

W krajach europejskich stosuje się tego typu system o 30 kanałach. W tym celu okres 125 μsek, zwany ramką, dzieli się na 32 interwały czasowe, IT0 – IT31. W przedziale czasu IT0 przesyła się informację synchronizacyjną ramki, a w przedziale IT15 informacje sygnalizacji (wybieranie numeru, odłożenie mikrotelefonu, itp.). W każdym z kanałów przesyła się próbkę 8 bitową co każde 125 μsek; odpowiada to szybkości transmisji w kanale równej 64 kbit/s. Tak więc europejskie telefoniczne łącza cyfrowe, oparte na modulacji kodowo-impulsowej i czasowym rozdziale kanałów posiadają szybkość transmisji 2048 kbit/s, czyli 2,048 Mbit/s.



Rysunek 10: Amerykański system telefonii kodowo-impulsowej z czasowym rozdziałem kanałów

W Japonii i USA zastosowano inny standard modulacji kodowo-impulsowej, tzw. system T1, który obsługuje 24 kanały telefoniczne z rozdziałem czasowym (rys. **??**). W tym systemie jedna próbka sygnału analogowego jest zamieniana na 7-bitową wartość cyfrową, do której dorzucany jest 1 bit sterujący. Daje to szybkość transmisji danych w jednym kanale równą $7 \cdot 8000 = 56000$ bit/s oraz szybkość transmisji danych sygnalizacyjno-sterujących $1 \cdot$

8000 = 8000 bit/s. Ramka składa sie tu z $24 \cdot 8 = 192$ bitów, do których dorzuca się dodatkowo jeden bit, służący do synchronizacji ramki. Tak więc szybkość transmisji w systemie wynosi 8000·193=1,544 Mbit/s.

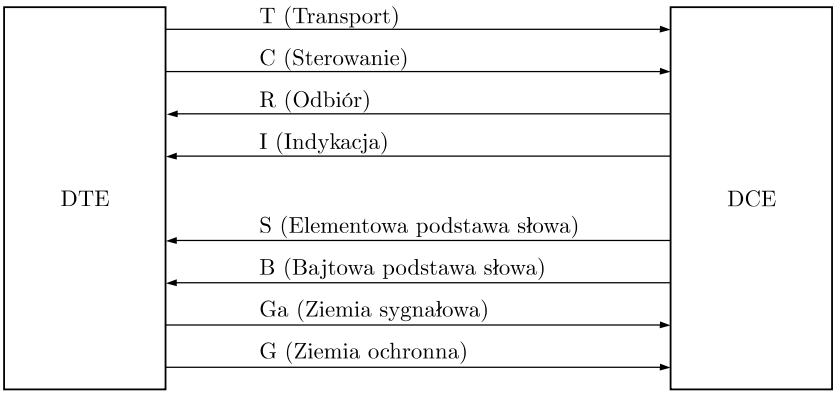
Po zastosowaniu modulacji kodowo-impulsowej do transmisji sygnałów analogowych, zaczęto próbować ograniczać liczbę bitów na kanał za pomocą technik statystycznych. Działania w tym kierunku oparto na spostrzeżeniu, że zmiany sygnału są dużo wolniejsze od częstotliwości próbkowania, przez co informacja zawarta w siódmiobitowej lub ośmiobitowej próbce posiada znaczny nadmiar. Jedna z metod kompresji sygnału cyfrowego polega na przesyłaniu różnicy między bieżącą wartością próbki a wartością próbki poprzedniej. Metoda ta, zwana różnicową modulacją kodowo-impulsową, pozwala średnio zaoszczędzić 2 bity na próbce.

Modulacja kodowo-impulsowa jest stosowana szeroko w centralach telefonicznych o hierarchii wyższej niż centrale lokalne. Trwają prace nad wprowadzeniem tego systemu do central lokalnych, dzięki czemu możliwe będzie przesyłanie danych za pomocą sieci telefonicznej powszechnego użytku z szybkością 1,544 lub 2,048 Mbit/s.

Część XVII
Interfejs X.21 CCITT

Już w roku 1969 organizacja CCITT przewidywała stosowanie systemów transmisji cyfrowej, o działaniu podobnym do systemu modulacji impulsowo-kodowej, między aparatem telefonicznym a centralą lokalną. Dlatego też w roku 1976 opracowano zalecenie o nazwie X.21, określające w jaki sposób użytkownik komputera, podłączony do linii telefonicznej, mógłby zestawiać łącze transmisji danych, poprzez wymianę sygnałów na styku komputer (DTE) - aparatura do cyfrowej transmisji (DCE).

Na rys. **??** pokazano 8 podstawowych obwodów interfejsu X.21, który używa łączówki 15 stykowej, ale nie wszystkie styki tej łączówki są zajęte. Urządzenie DTE stosuje obwody T i C odpowiednio do przesyłania danych i informacji sterującej w kierunku urządzenia DCE. Dane z urządzenia DCE przekazywane są do urządzenia DTE poprzez obwód R, a informacja sterująca obwodem I. Obwodem S do terminala, czyli urządzenia DTE, dociera z urządzenia transmisji danych (DCE) ciąg impulsów synchronizacyjnych, dzięki czemu terminal zna czas, w którym zaczyna się i kończy każdy przesyłany bit informacji. Podobne działanie ma obwód B, którym DCE przekazuje do DTE czas rozpoczęcia i zakończenia każdego bajtu, czyli impulsy synchronizacji bajtowej. Obwód Ga jest ziemią dla wszystkich sygnałów, zaś G ziemią ochronną. Przed rozpoczęciem nadawania informacji sterującej, DTE musi przesłać do DCE 2 znaki sterujące o nazwie SYN alfabetu międzynarodowego nr 5, podobnego do kodu ASCII.



Rysunek 11: Podstawowe obwody interfejsu X.21

Tabela 3: Przykład stosowania interfejsu X.21

krok	***C***	***I***	**opis zdarzenia**	***T***	***R***
0	NIE	NIE	stan spoczynku	1	1
1	TAK	NIE	DTE podnosi mikrotelefon	0	
2	TAK	NIE	DCE wytwarza sygnał zgłoszenia		$+\cdots+$
3	TAK	NIE	DTE wybiera numer	adres	
4	TAK	NIE	zdalny telefon dzwoni		rezultat wybierania
5	TAK	TAK	zdalny DTE podnosi mikrotelefon		1
6	TAK	TAK	rozmowa	dane	dane
7	NIE	TAK	DTE kończy rozmowę	0	
8	NIE	NIE	DCE kończy rozmowę		0
9	NIE	NIE	DCE odkłada mikrotelefon		1
10	NIE	NIE	DTE odkłada mikrotelefon	1	0

Chociaż zalecenie CCITT X.21 jest dokumentem długim i zawiłym, odsyłającym często czytelnika do innych, równie obszernych i skomplikowanych dokumentów, sam proces używania interfejsu nie jest skomplikowany. Pokazano to w tabeli **??**, stosując terminologię typową dla opisu rozmów telefonicznych.

W stanie spoczynku, tzn. przy braku sygnału w obwodach R i T, sygnały czterech obwodów do przekazywania informacji sterującej C, I, S oraz B są na poziomie logicznej jedynki (1 odpowiada stanowi OFF lub NIE w polskich tłumaczeniach dokumentów CCITT, a 0 stanowi ON lub TAK). Jeśli terminal, czyli DTE, zamierza nawiązać połączenie, ustawia obwody C i T na TAK, co jest równoważne z podniesieniem mikrotelefonu. Gdy urządzenie transmisji danych DCE, jest gotowe do nawiązania połączenia, wysyła w kierunku DTE na obwodzie R znaki "+" kodu ASCII, co odpowiada pojawieniu się sygnału centrali w słuchawce aparatu telefonicznego podczas wykonywania normalnej rozmowy telefonicznej. DTE, po odbiorze znaków "+", do obwodu T przekazuje szeregowo, bit po bicie, serię znaków kodu ASCII, odpowiadającą adresowi zdalnego terminala, czyli zdalnego DTE, z którym zamierza wymieniać dane. Po dokonaniu tej czynności, DCE informuje DTE o postępach podczas nawiązywania połączenia, przesyłając obwodem R specjalny sygnał, zdefiniowany w zaleceniu CCITT X.96. Sygnał ten składa się z dwóch liczb dwucyfrowych, z których pierwsza określa ogólny rezultat próby nawiązania połączenia (zajęty numer, zdalny terminal niesprawny, blokada sieci, itp.), a druga podaje szczegóły. Jeśli połączenie ze zdalnym terminalem zostanie nawiązane, to DCE ustawia obwód I w stan TAK, informując DTE, że można rozpocząć transmisję danych. Od tego momentu ustanowione zostaje połączenie dupleksowe między terminalami, które mogą do woli wysyłać i odbierać dane. Każdy terminal może zakończyć transmisję, ustawiając swój obwód C na NIE. Po zakończeniu transmisji, terminal nie może wysyłać danych, ale musi być przygotowany na ich odbiór, dopóki drugi terminal nie skończy nadawania. W tabeli **??**, w kroku 7, DTE właśnie w ten sposób usiłuje zakończyć transmisję. Na ten sygnał jego DCE ustawia na obwodzie I stan NIE. Jeśli zdalny terminal ustawi również swój obwód C na NIE, DCE po stronie inicjującej połączenie ustawia obwód R na 1. Ostatecznie DTE ustawia T na 1, wobec czego interfejs jest w stanie jałowym, oczekując na inne połączenia.

W tabeli **??** pokazano działanie interfejsu X.21 przy rozmowie wychodzącej. Podobnie działa interfejs przy rozmowach przychodzących. Jeśli równocześnie z rozmową wychodzącą ma miejsce rozmowa przychodząca, wówczas następuje kolizja rozmów. CCITT zadecydowało, by w trakcie kolizji anulować rozmowę przychodzącą.

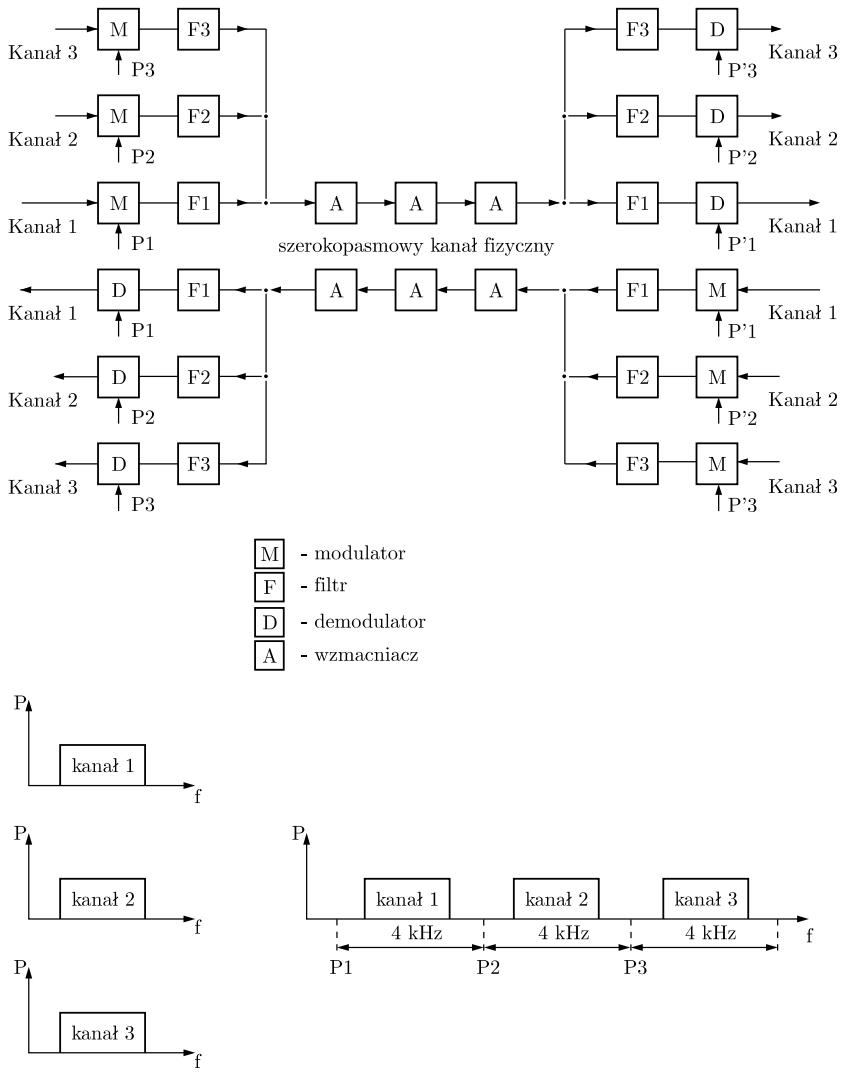
Część XVIII
Transmisja i komutacja

Przesyłanie informacji, zwłaszcza w postaci cyfrowej, stwarza wiele nowych problemów technicznych, z których najważniejsze zostaną opisane niżej.

Część XIX
Czasowe i częstotliwościowe zwielokrotnianie kanałów

Duże znaczenie dla telekomunikacji ma oszczędność. Wobec tego, że koszt położenia i eksploatacji kabla między dwiema centralami lokalnymi prawie nie zależy od szerokości przepuszczanego przez kabel pasma, opracowano cały szereg sposobów, pozwalających na zwielokrotnianie kanałów, czyli na przesyłanie jednym kanałem fizycznym w postaci skrętki czy kabla koncentrycznego wiele rozmów telefonicznych. Istnieją dwie podstawowe metody zwielokrotniania: z podziałem częstotliwości i z podziałem czasu. Systemy z podziałem czasu przydzielają każdemu kanałowi logicznemu cyklicznie całe pasmo na krótki okres czasu (rozdz. **??**). Metoda druga polega na podziale pasma przepuszczania szerokopasmowego kanału fizycznego na pewną liczbę kanałów logicznych wąskopasmowych. W praktyce każdemu kanałowi telefonicznemu (300 – 3400 Hz) przydziela się pasmo o szerokości 4000 Hz. Rozdzielanie kanałów polega na zastosowaniu modulacji częstotliwości. Przebieg sinusoidalny o częstotliwości P, zwany falą nośną, zmodulowany sygnałem sinusoidalnym o dużo mniejszej częstotliwości f zawiera falę nośną i sygnały o częstotliwościach P-f oraz P+f, zwane wstęgami bocznymi. Aby maksymalnie wykorzystać pasmo częstotliwości, w telekomunikacji stosuje się jednowstęgową modulację częstotliwości, tzn. za pomocą filtrów jedną wstęgę boczną obcina się, i równocześnie eliminuje się falę nośną. W ten sposób, zamiast przesyłać cały sygnał zmodulowany, przesyła się tylko sygnał o częstotliwości P+f i ewentualnie niewielką porcję sygnału o częstotliwości P. Przy demodulacji, aby uzyskać sygnał modulujący o częstotliwości f, należy zregenerować falę nośną i odtworzyć obciętą wstęgę boczną o częstotliwości P-f. Technicznie są to zabiegi dosyć skomplikowane.

Na rys. **??** pokazano zasadę częstotliwościowego zwielokrotniania, pozwalającego utworzyć trzy kanały logiczne na jednym kanale fizycznym oraz zestaw aparatury, realizującej tę zasadę. Stosuje się tu trzy fale nośne o częstotliwościach P1, P2 i P3. Częstotliwości fal nośnych po stronie nadawczej i odbiorczej (P'1, P'2, P'3) mogą się nieco różnić (nie więcej niż 1 Hz).



Rysunek 12: Przykład częstotliwościowego zwielokrotniania kanałów

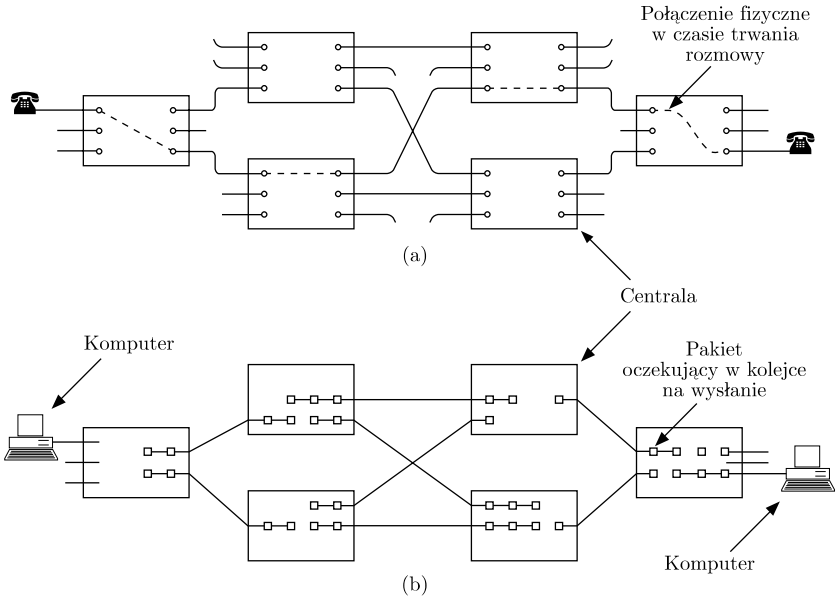
W telekomunikacji stosuje się znormalizowane systemy częstotliwościowego zwielokrotniania kanałów. Stosując dwanaście częstotliwości nośnych w odstępie 4 kHz w zakresie częstotliwości 12 – 60 kHz lub częściej 60 – 108 kHz, tworzy się w jednym kanale fizycznym o szerokości pasma 48 kHz 12 kanałów telefonicznych. Jest to tzw. grupa pierwotna. Z kolei grupując 60 kanałów telefonicznych z 5 grup pierwotnych i przesuwając pasma tych grup za pomocą 5 częstotliwości nośnych, rozmieszczonych w odstępie 48 kHz otrzymuje się 60 kanałową grupę wtórną, zajmującą pasmo 240 kHz w zakresie częstotliwości 312 – 552 kHz. W podobny sposób tworzy się grupę trójną, zawierającą 5 grup wtórnych, czyli 300 kanałów telefonicznych w paśmie 812 – 2044 kHz,

a z 3 grup trójnych można zestawić 900 kanałów telefonicznych w zakresie częstotliwości 8516 – 12388 kHz, czyli grupę czwórną.

Charakter rozmowy telefonicznej różni się znacznie od przesyłania danych między komputerami. W czasie rozmowy wąski kanał telefoniczny używany jest ciągle, a przerwy w rozmowie są bardzo krótkie. Podczas komunikowania się ze sobą dwóch komputerów z reguły należy przesłać jak najszybciej serię danych, po czym następuje przerwa, często trwająca 20 i więcej minut. System telefoniczny dostosowany jest do komunikacji międzyludzkiej i nawet zwielokrotnianie kanałów nie jest dopasowane do transmisji danych.

Część XX
Komutacja kanałów

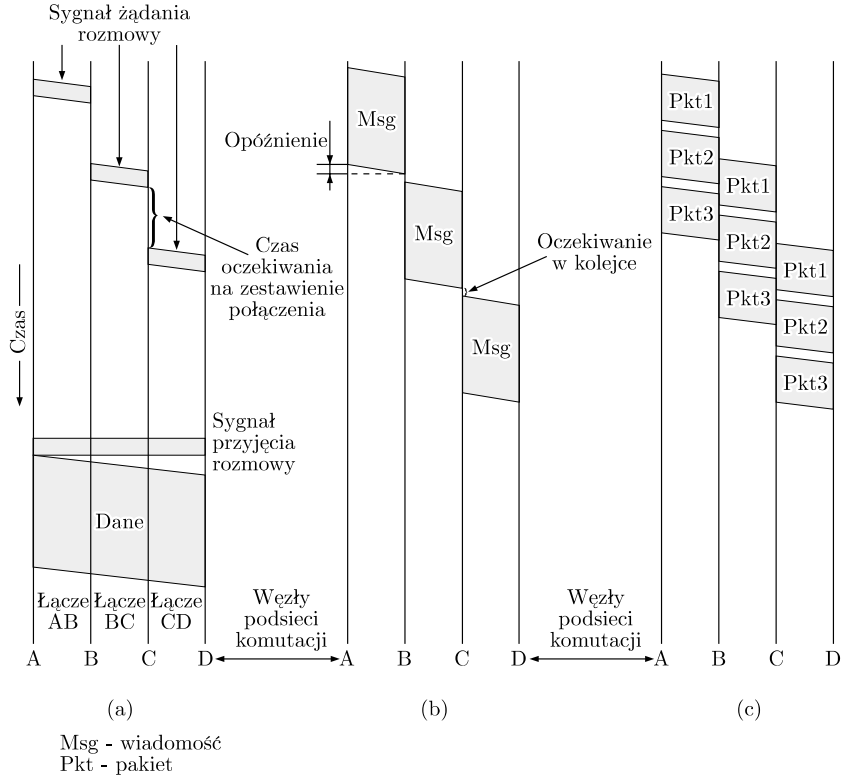
Podczas zestawiania łącza telefonicznego, układy przełączające sieci telefonicznej powszechnego użytku szukają możliwości połączenia fizycznego dwóch aparatów telefonicznych za pomocą przewodów miedzianych. Pokazano to na rys. **??** (a). Każdy prostokąt reprezentuje tu centralę o różnym stopniu hierarchii. W tym przykładzie każda centrala ma 3 linie przychodzą-



Rysunek 13: Komutacja kanałów (a) i komutacja pakietów (b)

ce do niej i 3 linie wychodzące z centrali. Kiedy sygnał rozmowy przechodzi przez centralę, ustalane jest połączenie fizyczne między linią, na której sygnał do centrali dochodzi i jedną z linii wyjściowych, co pokazują linie

przerywane. Jest to oczywiście model uproszczony, ponieważ część połączenia między dwoma telefonami przebiegać może łączami mikrofalowymi lub światłowodami, niekoniecznie zaś przewodami z miedzi. Mimo to rysunek ilustruje podstawową ideę, ponieważ połączenie między dwoma telefonami istnieje do czasu zakończenia rozmowy. Ważną własnością komutacji kanałów jest ustanowienie połączenia między telefonami przed przesyłaniem sygnału rozmowy. Czas między zakończeniem wybierania numeru a rozpoczęciem wysyłania sygnału dzwonienia zależy od długości połączenia i wynosi średnio około 10 sekund. W tym czasie system poszukuje odpowiednich wolnych



Rysunek 14: Szeregowanie zdarzeń podczas komutacji kanałów (a), komutacji wiadomości (b) i komutacji pakietów (c)

fragmentów połączenia, jak pokazano to na rys. **??** (a). Należy zauważyć, że przed rozpoczęciem wysyłania sygnału rozmowy musi najpierw być wysłany na całej trasie sygnał dzwonienia, oznaczający żądanie połączenia, które musi być potwierdzone. Przy komutacji kanałów, jedynym opóźnieniem podczas przesyłania sygnału po ustanowieniu połączenia jest czas propagacji fali elektromagnetycznej, wynoszący około 6 ms/1000 km. Nie ma też groźby przeciążenia sieci komunikacyjnej, tzn. podczas prowadzenia rozmowy nie otrzymuje się na ogół sygnału zajętości, jeśli sieć ta jest technicznie

sprawna.

Część XXI
Komutacja wiadomości i komutacja pakietów

Alternatywą komutacji kanałów jest komutacja wiadomości, pokazana na rys. **??** (b). W tej metodzie nie zestawia się trwałego połączenia między nadawcą i odbiorcą danych. Zamiast tego, jeśli nadawca ma do wysłania blok danych w postaci jednej wiadomości, jest on zapamiętany w najbliższym węźle i w dogodnej chwili kierowany do następnego węzła. Każdy blok odbierany jest w węzłach pośredniczących jako całość, sprawdzany na obecność przekłamań, a następnie retransmitowany do następnego węzła. Sieć komunikacyjna stosująca tę technikę, nazywa się siecią typu "zapamiętaj i skieruj dalej" (store-and-forward).

Podobną metodą jest komutacja pakietów. Przy komutacji wiadomości nie ma ograniczeń co do rozmiaru bloku, stanowiącego jedną wiadomość, wobec czego węzły muszą być wyposażone w pamięci dyskowe, zdolne do buforowania długich bloków. Komutacja wiadomości może prowadzić do zablokowania linii na wiele minut, uniemożliwiając pracę w trybie konwersacyjnym. Metoda komutacji pakietów ogranicza górną granicę rozmiaru bloku w taki sposób, by pakiet można było zapamiętać w pamięci operacyjnej pracującego w węźle komputera komunikacyjnego, a nie na dysku. Dzięki temu jeden użytkownik nie zajmuje linii dłużej niż kilkadziesiąt milisekund, przez co sieci komunikacyjne z przełączaniem pakietów są dostosowane do obsługi transmisji, prowadzonej w formie dialogu. Wyższość komutacji pakietów nad komutacją wiadomości można zaobserwować na rys. **??** (b) i (c): przy transmisji wiadomości wielopakietowej pierwszy pakiet można zacząć przesyłać przed odbiorem pełnego drugiego pakietu, redukując w ten sposób opóźnienie i zwiększając przepustowość. Z tego powodu w sieciach komputerowych używa się przeważnie komutacji pakietów, i w mniejszym zakresie komutacji kanałów, lecz nigdy komutacji wiadomości.

Podstawową różnicą między komutacją kanałów a komutacją pakietów jest rezerwowanie z góry całej szerokości pasma przy komutacji kanałów, podczas gdy komutacja pakietów umożliwia chwilowe zwalnianie kanału w razie potrzeby. Tak więc przy komutacji kanałów niewykorzystane pasmo zostaje zmarnowane, zaś w przypadku komutacji pakietów nieużywane pasmo może być użytkowane przez inne pakiety. Przy komutacji pakietów węzły podsieci komunikacyjnej mogą w prosty sposób dokonywać konwersji kodów, zmian szybkości transmisji oraz korekcji błędów. Pakiety można także dostarczać do miejsca przeznaczenia bez zachowania kolejności, i porządkować

je po stronie odbiorczej, co jest nie do pomyślenia w przypadku komutacji kanałów.