

Rozdział 1

Od telegrafu do terabitów

1.1. Rys historyczny

Od najdawniejszych czasów informacja była potrzebna człowiekowi, by lepiej rozumieć otaczający świat i by móc podejmować właściwe decyzje. Przez całe tysiąclecia nośnikiem informacji był człowiek. W 490 roku p.n.e. Filipides przybiegł do Aten z wiadomością o zwycięstwie nad Persami pod Maratonem. Pamiętamy o tym wydarzeniu do dzisiaj. Posłaniec na koniu niósł wiadomość znacznie szybciej; w wielu krajach zorganizowano pocztę konną. Czas przesyłania informacji ciągle mierzono dniami, a nawet tygodniami. Czas ten w przypadku krótkich informacji skracano, rozpalając kolejne ogniska. Około roku 1184 p.n.e. przy pomocy łańcucha ognisk przesłano do Myken wiadomość o zdobyciu Troi. Rzymianie rozwinęli tę formę rozsyłania dobrych wiadomości. W roku 43 n.e. cesarz Klaudiusz w podobny sposób przekazał do Rzymu wiadomość o zwycięstwie w Brytanii. Indianie używali do sygnalizacji dymu z ognisk, o czym wiadomo z wielu filmów o Dzikim Zachodzie.

Wielką potrzebę wymiany informacji i rozkazów odczuwali marynarze okrętów wojennych, aby synchronizować działania kilku, a często kilkudziesięciu jednostek. W roku 1738 francuski oficer Bertrand-Freançois Mahé de la Bourdonnais opracował kod sygnalizacyjny, w którym za pomocą trzech flag tworzył sygnały o cyfrach od 0 do 9, co pozwalało na tworzenie kombinacji setek rozmaitych informacji i rozkazów. W roku 1763 kapitan Sébastien François Bigot opublikował *Tactique Navale ou Traite des Evolutions et des Signaux* i rozwinął opracowany we Francji system sygnalizacji.

W roku 1783 Pierwszy Lord Admiralicji Richard Earl Howe wprowadził w marynarce angielskiej swój własny kod sygnałowy. Końcowym momentem zmian było wydanie w roku 1799 książki *Signal Book for Ships of War*. Kod ten wkrótce wykorzystał admirał Horatio Nelson, aby 21 października 1805 roku koło przylądka Trafalgar z okrętu HMS Victory przestać flocie angielskiej kodem flagowym słynny rozkaz: „England expects that every man will do his duty”.

Doświadczenia marynarek wojennych wpłynęły na rozwój podobnie działających lądowych systemów transmisji informacji. W roku 1791 dwaj bracia Claude i Ignace Chappe zaprezentowali telegraf optyczny. Ustawiając położenia trzech ramion na maszcie, sygnalizowali litery alfabetu, aby z kolejnych liter złożyć informację. Budowano łańcuch stacji na wieżach bądź dachach, odległych od siebie o około 10 km. Sygnały pojawiające się na stacji

początkowej powtarzano, aż informacja dotarła do stacji końcowej. Szybkość transmisji wynosiła około 1 bit na sekundę. W roku 1792 takim łańcuchem połączono stację w Paryżu ze stacją w Lille. W roku 1849 Paryż miał połączenia z 29 największymi miastami Francji.

Telegraf optyczny stał się w Europie bardzo popularny w pierwszej połowie XIX wieku. Już w roku 1794 Szwecja uruchomiła telegraf optyczny, aby przesyłać wiadomości ze Sztokholmu do Drottningholm. W roku 1800 w Kanadzie – wtedy kolonii brytyjskiej – zaczęła pracę linia telegraficzna na trasie Halifax – Nowa Szkocja. W 1833 roku w Prusach uruchomiono linię telegrafu optycznego między Berlinem a Koblencją o znacznej długości 750 km. Na terenach Polski pierwsza linia telegrafu optycznego powstała na trasie Warszawa – Modlin w roku 1830. Pięć lat później uruchomiono linię Warszawa – Sankt Petersburg, która była obsługiwana przez 146 przekaźników. W roku 1838 na trasie Warszawa – Moskwa zaczął działać telegraf optyczny, utworzony z 220 stacji pośrednich.

Przytoczone fakty pokazują, że potrzeba transmisji informacji była ogromna. Rządy potrzebowały wieści o kryzysach politycznych, dowództwa armii – o ruchach wojsk sąsiadów, a sfery gospodarcze – o klęskach urodzaju i cenach zboża.

Zauważmy, że telegraf optyczny wykorzystywał transmisję sygnału optycznego. Jego źródłem było słońce, telegraf milkł o zachodzie i wznawiał pracę o wschodzie.

1.2. Czas telegrafu i telefonu

Nadchodziła era elektryczności i nie trzeba było długo czekać, by w latach trzydziestych XIX wieku pojawiły się patenty o wykorzystaniu prądu elektrycznego do transmisji informacji. Samuel Morse w roku 1837 zaprezentował telegraf elektryczny wraz z tak zwanym alfabetem Morse'a. Telegraf elektryczny mógł działać całą dobę. Już w roku 1843 Kongres USA przyznał poważną na owe czasy sumę 30 000 dolarów na budowę linii telegraficznej o długości 61 km między Waszyngtonem a Baltimore.

Do przesłania sygnałów elektrycznych używano jednego, izolowanego przewodu, a obwód zamykany był przez uziemienie. Kod Morse'a polegał na transmisji kropek i kresek, czyli krótkich i dłuższych sygnałów elektrycznych. Grupy uformowanych kropek i kresek tworzyły litery, cyfry i słowa. Powstał sposób na transmisję informacji złożonej ze słów i liczb. Transmisja takich informacji miała ogromną wartość.

W roku 1858 położono pierwszy kabel transatlantycki między Irlandią i Nową Funlandią. Z punktu widzenia technicznych warunków tamtych czasów było to przedsięwzięcie bardzo trudne i ryzykowne. Wkrótce kabel uległ awarii, położono następne.

W tabeli 1.1 zestawiono kilka parametrów transatlantyckich połączeń telegraficznych, aby odnotować powolny wzrost szybkości transmisji.

Tabela 1.1. Porównanie parametrów transatlantycznych połączeń telegraficznych

| Linia telegraficzna | Rok | Szybkość transmisji |
|-------------------------------------|-----------|-----------------------|
| Atlantyk: Irlandia – Nowa Funlandia | 1858 | Kilka słów na godzinę |
| Atlantyk: Irlandia – Nowa Funlandia | 1866 | 6-8 słów na minutę |
| Odcinki transmisyjne na kontynencie | 1880-1898 | 40 słów na minutę |
| Nowa Funlandia – Azory | 1928 | 2500 liter na minutę |

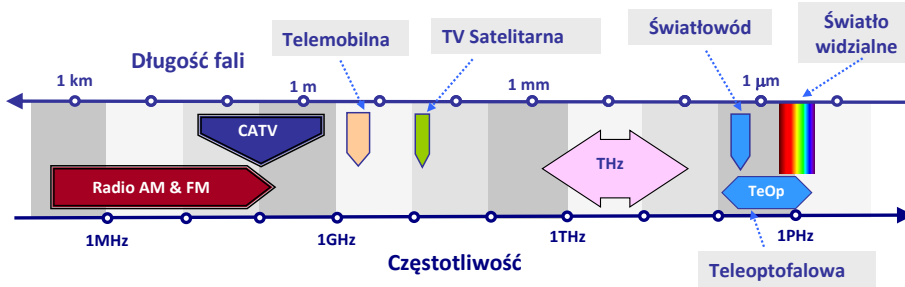
Linie telegrafu elektrycznego, którymi kodem Morse’a transmitowano informacje, pokrywały glob coraz bardziej gęstą siecią połączeń, kiedy w roku 1876 Alexander Graham Bell opatentował telefon. Można było rozmawiać z wybraną osobą oddaloną o wiele kilometrów. Rozpoczęła się era telekomunikacji analogowej. Wynalazek telefonu miał wielką wagę w historii telekomunikacji, a telefon jest narzędziem niezmiennie używanym do tej pory.

Za wynalazcę radia powszechnie uznano Guglielmo Marconiego. Wykorzystał on falę elektromagnetyczną propagowaną w wolnej przestrzeni do transmisji informacji. Pierwsza transmisja miała miejsce w Rzymie w 1895 roku. W roku 1899 dokonano transmisji radiowej przez kanał La Manche, a w roku 1901 przekazano wiadomość z Anglii do Kanady. W pierwszych transmisjach przesyłano sygnały, wykorzystując kod Morse’a. W roku 1927 uruchomiono połączenia telefoniczne, dzięki transmisji radiowej.

W latach 1918–1939 nastąpił rozkwit radiofonii. Zajmowano coraz to nowe pasma częstotliwości. Rosła moc nadajników, czułość i liczba odbiorników. Era radia trwa nieprzerwanie nadal. W rozmaitych pasmach częstotliwości wysyłane są do wielomilionowej rzeszy słuchaczy informacje, muzyka, reklamy. Radia słuchają prawie wszyscy. Jednakże popularne radio umożliwia transmisję tylko w jedną stronę, a przekaz może dotrzeć do wielkiej liczby odbiorców. W wielu przypadkach istnieje konieczność transmisji informacji do ograniczonej liczby słuchaczy. Telefon w tych przypadkach jest niezastąpiony.

W roku 1931 Rene Barthelemy dokonał pierwszej transmisji obrazu, narodziła się telewizja. Przesyłanie obrazu ma niezwykłą wagę w telekomunikacji. Dzisiaj wiemy, że poza transmisją telewizyjną obrazów rozmowa telefoniczna z możliwością wzajemnego widzenia rozmówców jest bardzo popularna.

Lata trzydzieste to intensywny rozwój technologii próżniowych lamp elektronowych. Lampy umożliwiają wzmacnianie sygnałów radiowych, zarówno bardzo słabych w odbiornikach, jak i o bardzo dużej mocy rzędu setek kilowatów w nadajnikach. Poza tym lampy umożliwiają generację sygnałów w różnych pasmach częstotliwości, a także przemianę częstotliwości. Przełomowym wynalazkiem techniki radiowej był, nadal powszechnie używany, odbiornik heterodynowy.



Rys. 1.1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego od fal radiowych długich do ultrafioletu, z zaznaczeniem wybranych pasm: Telemobilna – pasma wykorzystane przez telekomunikację komórkową, THz – pasmo częstotliwości 0,3–30 THz, TeOp – telekomunikacja optykowa.

Cechą charakterystyczną wielodekadowego rozwoju techniki transmisji radiowej było opanowywanie kolejnych pasm częstotliwości i przesuwanie granicy technologicznej w stronę coraz krótszych fal.

Elektronicy uważają, że określone pasmo częstotliwości jest opanowane, gdy:

- umiemy wytwarzać/generować sygnały elektryczne w tym paśmie,
- potrafimy je wzmacniać na małych i dużych poziomach mocy,
- oraz gdy opanowaliśmy umiejętność modulacji, czyli nakładania informacji na sygnał sinusoidalny (fala nośna) i demodulacji, to jest odzyskiwania informacji po usunięciu fali nośnej.

Opanowywanie kolejnych pasm częstotliwości było warunkiem powiększania możliwości transmisyjnych systemu telekomunikacyjnego. Na rys. 1.1 przedstawiono widmo promieniowania elektromagnetycznego z zaznaczeniem przeznaczenia tylko niektórych pasm wykorzystywanych do transmisji w wolnej przestrzeni. Powołano międzynarodowe grupy ekspertów, aby wydzielić podpasma dla różnych zastosowań, cywilnych i wojskowych. W wieku XX opanowano kolejne pasma fal długich, średnich i krótkich dla potrzeb radiofonii, fal ultrakrótkich dla transmisji telewizyjnych i radiowych. W pasmach fal decymetrowych i centymetrowych pracują urządzenia przemysłowe i medyczne, stacje radiolokacyjne, telefonia mobilna i telekomunikacja satelitarna. W czasie drugiej wojny światowej uruchamianie radarów w coraz wyższych pasmach częstotliwości było jedną z dróg do zwycięstwa. Niektóre obszary zastosowań fal milimetrowych opisane zostaną w rozdziałach 12 i 13.

W pasmach promieniowania widzialnego rozwinęto wielkiej wagi gałąź techniki zwaną optoelektroniką. Wykorzystując jej zdobycze, stworzono technikę telekomunikacji światłowodowej w paśmie bliskiej podczerwieni, gdyż światłowod kwarcowy jest w tym paśmie przewodniczą fali elektromagnetycznej o najmniejszych znanych stratach. Technika ta pozwoliła zbudować współczesne systemy telekomunikacyjne o nieznaney do pory przepustowości i sprawności działania. Kolejne rozdziały tej książki opisują podstawy działania tych systemów.

Między pasmami fal milimetrowych i dalekiej podczerwieni, w granicach 300 GHz–30 THz, leżą pasma terahercowe jeszcze nieopanowane – w rozumieniu podanym wyżej – do końca. Stanie się to z pewnością w czasie najbliższych 20 lat.

Mimo rozwoju techniki radiowej położone na dnie Atlantyku kable telegraficzne pracowały nadal. Przełomowym okazał się rok 1956, w którym uruchomiono pierwszy telefoniczny transatlantycki kabel współosiowy TAT-1.

Tabela 1.2. Porównanie parametrów pierwszych transatlantyckich połączeń telefonicznych wykorzystujących kabel koncentryczny

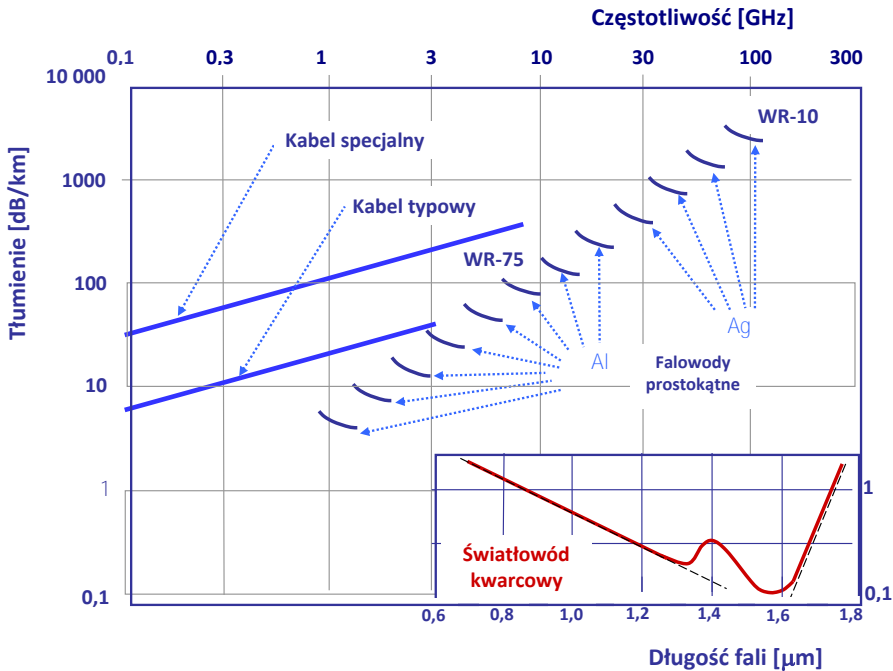
| Nazwa | Lata pracy | Technologia | Pojemność kanałów | Połączenie |
|-------|------------|--------------|-------------------|--------------------------|
| TAT-1 | 1956-1978 | L. próżniowe | 36-48 | Nowa Funlandia – Szkocja |
| TAT-2 | 1959-1982 | L. próżniowe | 48-72 | Nowa Funlandia – Francja |
| TAT-3 | 1963-1986 | Tranzystory | 138-276 | New Jersey – Anglia |
| TAT-4 | 1965-1987 | Tranzystory | 138-345 | New Jersey – Francja |
| TAT-5 | 1970-1993 | Tranzystory | 845-2112 | Rhode Island – Hiszpania |
| TAT-6 | 1976-1994 | Tranzystory | 4000-10 000 | Rhode Island – Francja |
| TAT-7 | 1978-1994 | Tranzystory | 4000-10 500 | New Jersey – Anglia |

Rozwój technologii lamp próżniowych umożliwił uruchomienie telefonicznej linii transatlantyckiej. W roku 1956 położono transoceaniczny kabel koncentryczny między Nową Funlandią a Szkocją, którym można było prowadzić 36 rozmów telefonicznych jednocześnie. W połączeniu użyto 300 lamp elektronowych, po 3 lampy w każdej stacji regeneratora, zapewniających wzmocnienie sygnału. Był to początek nowej ery w telekomunikacji. Równolegle rozwijano technologię tranzystorów, elementów półprzewodnikowych, których działanie odkryto w roku 1948. Już w roku 1963 w kolejnym łączy transatlantyckim tranzystory zastąpiły lampy próżniowe, a liczba kanałów telefonicznych wzrosła do 138. Ostatnie łączy tej rodziny położono w roku 1978 i wykorzystywano je do roku 1994, w którym je wyłączono. Rozpoczęła się era transmisji światłowodowych.

1.3. Światłowod na scenie

Szkło kwarcowe jest materiałem znanym od dawna ze swej niezwykłej przezroczystości. Analizując rozwiązania równań Maxwella zauważono, że istnieje możliwość propagacji fali elektromagnetycznej EM falowodem dielektrycznym, bez obecności metalu. Jako mate-

riał, z którego można wykonać falowód dielektryczny dla pasm optycznych, czyli światłowód, wybrano szkło kwarcowe. Po dziesiątkach prób i badań udoskonalono technologię światłowodu kwarcowego i stał się on bezkonkurencyjną przewodnicą falową, przewyższającą małym tłumieniem w dwóch pasmach promieniowania EM wszystkie inne znane do tej pory.



Rys. 1.2. Porównanie tłumień wyrażonych w dB/km dla trzech rodzajów przewodnic fal elektromagnetycznych: kabla współosiowego, falowodów prostokątnych wykonanych z aluminium i srebra, oraz światłowodu kwarcowego w zakresie najmniejszego tłumienia.

Na rys. 1.2 przedstawiono tłumienia trzech różnych typów przewodnic falowych. Linia współosiowa, dwuprzewodowa, w katalogach nazywana kablem, historycznie jedna z pierwszych przewodnic, wykorzystywana jest powszechnie w instalacjach telewizji kablowej CATV. Dla zakresów częstotliwości powyżej 1 GHz traci swoją użyteczność ze względu na silne tłumienie. Falowody prostokątne mają szerokie pole zastosowań, wykorzystywane są w systemach radarowych, militarnych i przemysłowych. Tłumienie falowodów prostokątnych szybko rośnie w kolejnych pasmach częstotliwości. Ich pasma pracy są niewielkie, stosunek częstotliwości maksymalnej do minimalnej to zwykle 3 : 2, z tego powodu nie są wykorzystywane w systemach telekomunikacyjnych.

Dla porównania na rys. 1.2 pokazano wykres tłumienia światłowodu kwarcowego. Skala tłumienia jest identyczna, natomiast dodano inną skalę długości fali (dla $\lambda = 1,5\mu\text{m}$ częstotliwość $f = 200\text{THz}$). Porównując przedstawione parametry, widać zdecydowaną

przewagę światłowodu kwarcowego nad innymi typami przewodnic falowych. Jednak opowanie pasma częstotliwości z telekomunikacyjnego punktu widzenia to jeszcze konieczność opracowania źródeł promieniowania, detekcji, modulacji i wzmacniania.

Działanie pierwszego lasera zademonstrowano w roku 1960. Bardzo szybko postawiono tezę, że promieniowanie lasera można użyć do transmisji informacji. Produkowane wtedy światłowody miały bardzo duże tłumienie. Koło roku 1970 udało się wykonać światłowody o tłumieniu 20 dB/km w zakresie długości fali około 1000 nm, co było osiągnięciem przełomowym. W tym też czasie skonstruowano pierwsze półprzewodnikowe lasery z arsenku galu GaAs. Droga do rozwijania telekomunikacji optofalowej była otwarta. Obserwując jej rozwój z obecnej perspektywy, można dostrzec kilka ważnych etapów.

W wielu opracowaniach przyjęto, że za początek intensywnego rozwoju komunikacji światłowodowej można przyjąć rok 1975. Jedną z miar rozwoju jest wzrost szybkości transmisji B , mierzony w bitach na sekundę [b/s]. Inną z miar jest iloczyn BL [bkm/s] – szybkości transmisji przez długość L [km] łącza światłowodowego. Otóż z oszacowań wynika, że iloczyn BL podwaja się co rok właśnie od roku 1975.

Pierwsze prace nad budową łączy światłowodowych rozpoczęto w paśmie 850 nm, wykorzystując lasery GaAs i światłowody wielomodowe. W roku 1980 komercyjnie dostępny system oferował szybkość transmisji 34–45 Mb/s z układami regeneratorów rozmieszczonymi co 10 km. W systemach wykorzystujących kable koncentryczne o podobnych parametrach, regeneratory musiano instalować co 1 km ze względu na duże tłumienie. Uznano wtedy, że przyszłość należy do łączy światłowodowych.

W kolejnym etapie przeniesiono transmisję do pasma 1300 nm, gdzie tłumienie światłowodów wynosiło wtedy około 1 dB/km. Przejście do nowego pasma wymagało skonstruowania nowej generacji laserów, wykorzystujących InGaAsP. Jednocześnie opanowano technologię światłowodu jednomodowego. W rezultacie w roku 1981 zademonstrowano łącze ze światłowodem jednomodowym w paśmie 1300 nm, z tłumieniem około 0,5 dB/km i szybkością transmisji 2 Gb/s na odległość 44 km. W roku 1988 firmy oferowały łącza o szybkości transmisji 1,7 Gb/s z regeneratorami odległymi o 50 km.

Pierwsze transoceaniczne łącze światłowodowe TAT-8 położono w roku 1988. Liczba kanałów transmisyjnych wzrosła do 40 000. W ciągu następnych 5 lat uruchomiono kolejnych 5 linii transoceanicznych przez Atlantyck.

Naturalnym dążeniem konstruktorów było przejście do pasma 1550 nm, gdzie tłumienie światłowodu było najmniejsze, około 0,2 dB/km. Jednakże w tym paśmie pojawił się problem zredukowania skutków dyspersji światłowodu jednomodowego. Aby je zmniejszyć, opracowano technologię światłowodu o przesuniętej charakterystyce dyspersji i lasera o czystym widmie. W roku 1985 w publikacjach opisano łącze pracujące w paśmie 1550 nm przy szybkości transmisji 4 Gb/s i przy odległości 100 km między regeneratorami. Na początku lat 90. zeszłego wieku odnotowano dalszy wzrost szybkości transmisji do 10 Gb/s.

W roku 1989 opublikowano parametry opracowanego wzmacniacza optycznego EDFA, wykorzystującego światłowód domieszkowany erbem. Wzmacniacz EDFA pracuje w paśmie długości fali 1530–1565 nm, oznaczonym literą C. Użycie wzmacniacza światłowodowego pozwoliło istotnie zmniejszyć liczbę regeneratorów przy transmisjach na duże odległości.

Tabela 1.3. Porównanie parametrów pierwszych transatlantyckich połączeń telefonicznych wykorzystujących światłowód

| Nazwa | Lata pracy | Technologia | Pojemność kanałów | Połączenie |
|-----------|------------|------------------------------------|--------------------|------------------------|
| TAT-8 | 1988-2002 | Światłowód | 40 000 | USA – Anglia – Francja |
| TAT-9 | 1992-2004 | Światłowód | 80 000 | USA – Europa |
| TAT-10 | 1992-2003 | Światłowód | 2 x 565 Mbit/s | USA – Niemcy |
| TAT-11 | 1993-2003 | Światłowód | 2 x 565 Mbit/s | USA – Francja |
| TAT-12/13 | 1996 | Światłowód, Wzm. EDFA | 12 x 2,5 Gbit/s | USA – Europa |
| TAT-14 | 2000 | Światłowód, EDFA, WDM – 16 laserów | 4 x 16 x 10 Gbit/s | USA – Wlk. Brytania |

W roku 1980 przeprowadzono laboratoryjny eksperyment transmisji dwóch sygnałów optycznych jednym światłowodem. Powstała koncepcja multipleksacji, czyli zwielokrotniania liczby sygnałów optycznych generowanych przez różne lasery, transmitowanych światłowodem. Każdy z sygnałów był modulowany odrębnym strumieniem informacji. Wprowadzenie multipleksacji WDM (ang. *Wavelength-Division Multiplexing*) otworzyło nowe możliwości zwiększenia szybkości transmisji B[b/s] i długości łączy światłowodowych.

W roku 1991 przeprowadzono eksperyment, w którym stwierdzono możliwość transmisji sygnału na odległość 14 000 km przy prędkości transmisji $B = 5$ Gb/s, a na odległość 21 000 km przy prędkości $B = 2,5$ Gb/s. Wyniki zdecydowały o zainstalowaniu kolejnej generacji transoceanicznych światłowodowych linii transmisyjnych przez Atlantyk. Równolegle budowano połączenia telekomunikacyjne przez Pacyfik; tam odległości są prawie dwukrotnie dłuższe. Zbudowano wiele łączy telekomunikacyjnych opasujących Chiny i Indie, kontynent Afrykański i Amerykę Południową.

Magnesem, który skierował uwagę konstruktorów na pasma bliskiej podczerwieni były – jak wiemy – parametry światłowodu kwarcowego, jego nadzwyczajnie małe tłumienie. Rezultatem prowadzonych prac był rozwój technik transmisji informacji z wykorzystaniem fali nośnej z pasma optycznego, czyli telekomunikacji optofalowej. Okazało się przy tym, że znaczny wzrost częstotliwości fali nośnej umożliwił poszerzenie pasma transmisji, a tym samym mierzonej w bitach na sekundę szybkości transmisji informacji. Ta nowa technika

transmisji musiała wytworzyć inne narzędzia, niż rozwinięta wcześniej radiotechnika i telekomunikacja mikrofalowa. Przyrządem wykorzystywanym w pasmach od fal metrowych do milimetrowych jest tranzystor. Ten uniwersalny przyrząd półprzewodnikowy wykorzystujemy do budowy oscylatorów, wzmacniaczy, modulatorów i detektorów. Takim przyrządem fotonika jeszcze nie dysponuje. Dla każdej z wymienionych funkcji: generacji, wzmacniania, modulacji i detekcji trzeba było znaleźć inne przyrządy. Ta praca została wykonana, a jej rezultaty przeszły wcześniejsze oczekiwania. Kolejne rozdziały tej książki wprowadzą Czytelnika w najważniejsze z opracowanych technik.

Historia rozwoju telekomunikacji jest sama w sobie obszarem bardzo interesującym. Obituje w liczne odkrycia i przełomowe wynalazki. Zainteresowani nią Czytelnicy znajdą wiele wyczerpujących opracowań.

1.4. Budujemy infosferę

Przytoczone wyżej daty i liczby ilustrują ogromne tempo rozwoju systemów transmisji informacji. Na opisane dane można spojrzeć, jak na rozwój jednej z wielu gałęzi technologii. W ostatnich dekadach unowocześniono transport lotniczy, ogromnie wzrosła produkcja energii, testowane są samochody bez kierowcy. Jednakże na postęp w tej dziedzinie należy spojrzeć z innej perspektywy.

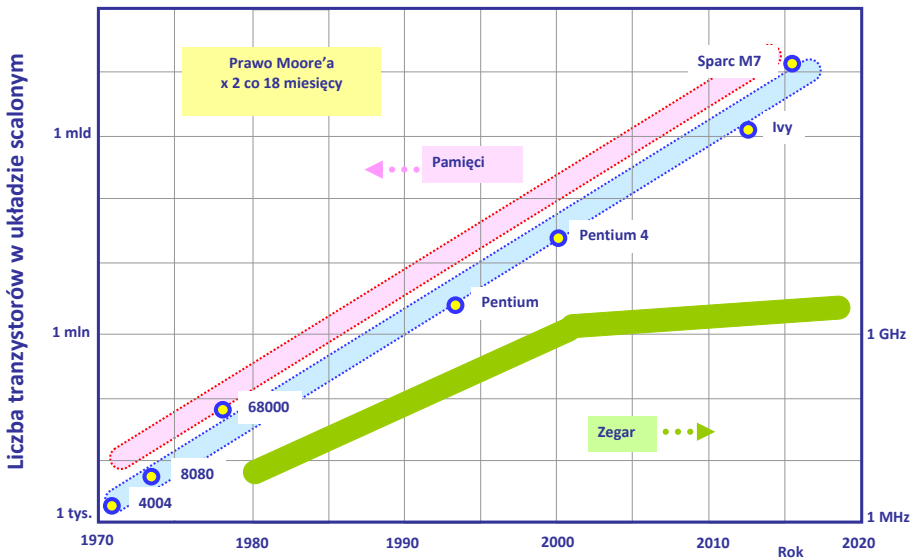
Rzeczywisty rozwój systemów telekomunikacyjnych był możliwy ponieważ w znacznym stopniu opierał się na rozwoju mikroelektroniki. Chodzi tutaj o progres technologii półprzewodnikowych układów scalonych, o rozwój technologii procesorów i ich funkcjonalności, a także technologii i rozmiaru pamięci półprzewodnikowych.

W roku 1965 Gordon E. Moore poczynił obserwację, że kolejne generacje obwodów scalonych zawierają coraz więcej tranzystorów, a ich liczba podwaja się co 18 miesięcy. Analiza postępów w opracowaniach kolejnych układów scalonych potwierdziły tę hipotezę. Spostrzeżenie nazwano prawem Moore'a. 50 lat obserwacji wykazało, że było nadzwyczaj trafne.

Na rys. 1.3 przedstawiono linie wzrostu liczby tranzystorów w układach pamięci (linia czerwona) oraz w układach procesorów na przestrzeni ostatnich kilku dekad. Przekroczona została liczba 10 miliardów tranzystorów w układzie i wszystko wskazuje na to, że liczba ta nadal będzie rosła. Linia zielona pokazuje wzrost częstotliwości zegara pracującego w komputerach.

W oparciu o opracowane układy scalone procesorów i pamięci możliwe jest przetwarzanie wielkiej liczby danych i prowadzenie złożonych procesów obliczeniowych. Współczesna telekomunikacja światłowodowa wykorzystuje te możliwości w pełni. To wykorzystanie procesorów i pamięci umożliwiło cyfryzację systemów telekomunikacyjnych. Szybkość transmisji mierzonej w bitach na sekundę można testować w warunkach laboratoryjnych, wykorzystując do tego celu generatory impulsów. W warunkach rzeczywistych, aby transmitować strumień informacji z prędkością 1000 Gb/s, trzeba zebrać strumienie

informacji od dziesiątek tysięcy użytkowników. Bez procesorów i pamięci operacja taka nie będzie możliwa.

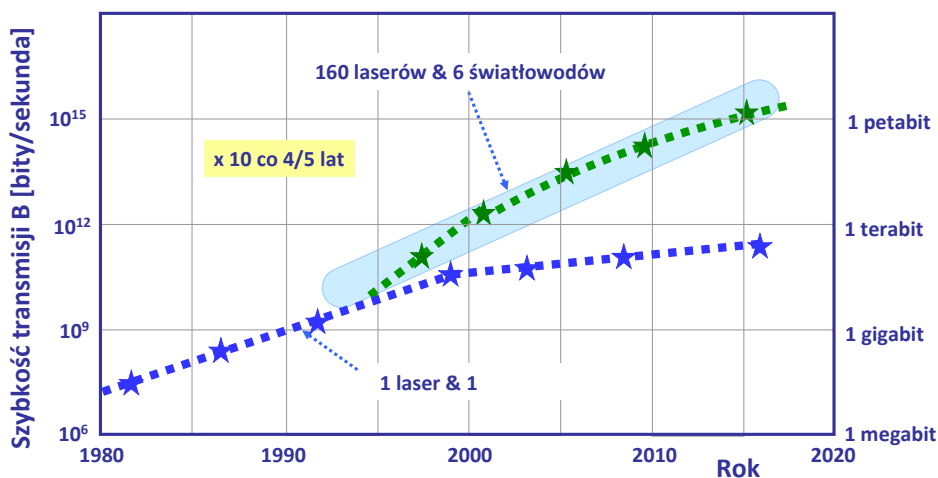


Rys. 1.3. Rozwój układów scalonych mierzony liczbą tranzystorów w układzie na przestrzeni ostatnich dekad. Wykres zielony opisuje wzrost częstotliwości zegarów komputerów.

Na rys. 1.4 pokazano jak w ciągu ostatnich 40 lat wzrastała szybkość B [b/s] transmisji bitów. Krzywa niebieska, obrazująca możliwości transmisji danych jednym światłowodem z jednym laserem jako źródłem sygnału optycznego, wykazuje efekt nasycenia. Układy elektroniczne współpracujące z laserem, bądź z zewnętrznym modulatorem (patrz rozdział 4), nie potrafiły przekroczyć częstotliwościowej granicy 80 GHz. Granica ta została przekroczona przez zastosowanie modulacji wielostanowej, gdy jednym impulsem można przesać informację o dwóch czy czterech bitach.

Krzywa zielona pokazuje rezultaty zastosowania multipleksacji WDM, gdy zmodulowane sygnały wytworzone przez wiele laserów przesyłane są jednym światłowodem. Problem multipleksacji WDM opisano szczegółowo w rozdziale 11.

W rozdziale 12 zaprezentowane zostaną sposoby współpracy optycznych układów transmisji danych z systemami telekomunikacji komórkowej, mobilnej. Procesy rozwoju telekomunikacji komórkowej i optofalowej przebiegały równoległe, tworząc złożony, ale dobrze funkcjonujący system transmisji informacji, który można nazwać infosferą. Planowano wcześniej stworzyć system, który umożliwi praktycznie wszystkim mieszkańcom globu prowadzenie rozmów telefonicznych.



Rys. 1.4. Wzrost szybkości transmisji światłowodowych łączy transmisyjnych, która co 4-5 lat wzrasta dziesięciokrotnie.

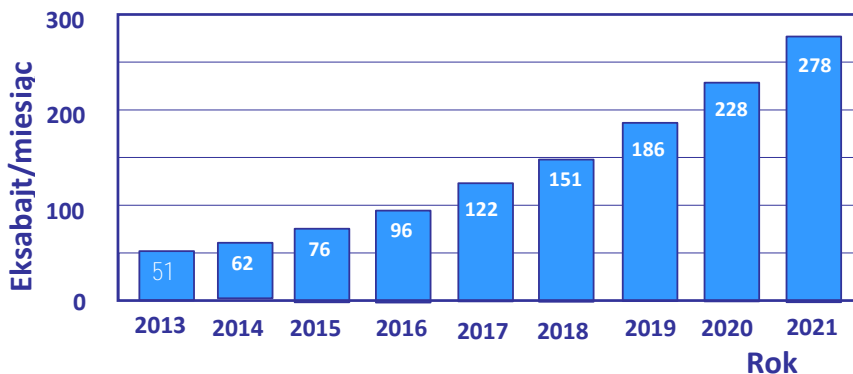
Tymczasem powstała globalna sieć połączonych ze sobą komputerów, gromadzących wielką liczbę danych. Opracowano zbiór protokołów komunikacyjnych pozwalających miliardom użytkowników pobierać i wymieniać między sobą informacje – Internet – który już wywarł wpływ na kształt naszej cywilizacji. Aby zobaczyć, w jakim tempie rosły możliwości transmisyjne tworzonej infosfery, można spojrzeć na dane zawarte w tabeli 1.4.

Tabela 1.4. Porównanie ilości transmitowanych na naszym globie danych w bajtach na sekundę w różnych latach. Według Cisco [1.6]

| Rok | Globalna transmisja w Internecie mierzona w gigabajtach |
|------|---|
| 1992 | 100 GB na dzień |
| 1997 | 100 GB na godzinę |
| 2002 | 100 GB na sekundę |
| 2007 | 2000 GB na sekundę |
| 2016 | 26 000 GB na sekundę |
| 2021 | 105 800 GB na sekundę |

W roku 1992 suma transmisji danych w ciągu dnia doszła do 100 gigabajtów. Po 10 latach tej wielkości transmisję dokonywano w czasie 1 sekundy. W roku 2016 w ciągu sekundy transmitowano już 26 000 GB.

Kolejne porównanie przedstawiono na rys. 1.5. Pokazano comiesięczne transmisje danych mierzone w eksabajtach = 10^{18} bajtów. Liczby transmitowanych danych wskazują, jak szybko infosfera i Internet stają się narzędziem potrzebnym ludzkości, podobnie jak system zaopatrywania w energię czy też systemy transportu lotniczego. Wiele przemawia za tym, by przyjąć pogląd, że praca wykonana przez zespoły badawcze całego świata nad utworzeniem globalnej sieci połączeń światłowodowych stworzyła warunki przesilenia cywilizacyjnego, takiego, jakie dokonało się po wynalezieniu druku przez Johanna Gutenberga w roku 1440.



Rys. 1.5. Comiesięczna transmisja danych w Internecie w wymiarze globalnym w eksabajtach/miesiąc. Według Cisco [1.2] i [1.6].

Proces przekształceń trwa, zmieniają się techniki zarządzania przedsiębiorstwami czy korporacjami, powstają nowe narzędzia propagandy i informacji, ewoluje metodyka kształcenia, są nowe możliwości dostępu do wiedzy, sposoby wyrażania opinii, aprobaty i protestów. Z chaosu zmian wyłania się kształt przyszłości, w której infosfera będzie jednym z ważniejszych składników.

1.5. Kierunki rozwoju

Wykorzystanie fal elektromagnetycznych z pasm optycznych do transmisji informacji było oczekiwaną i naturalną konsekwencją rozwoju, polegającego na opanowywaniu kolejnych zakresów częstotliwości. Nadzwyczajnie małe tłumienie światłowodu kwarcowego w paśmie 1200–1700 nm sprawiło, że prace badawcze skoncentrowano w tym zakresie częstotliwości. Opracowano nowe rodziny laserów, fotodetektorów, modulatorów, wzmacniaczy optycznych i światłowodów. Wykorzystując rozwinięte narzędzia fotoniki, poszerzono front badań i zastosowań o nowe obszary. Poniżej kilka najważniejszych.

- Opracowano kilka generacji łączy optycznych w wolnej przestrzeni z szerokim zastosowaniem od transmisji międzysatelitarnych do transmisji między samochodami jadącymi autostradą. Technologia ta jest intensywnie rozwijana.

- Rozbudowano systemy transmisji optycznej współpracujące z telekomunikacją komórkową. Także tutaj trwają prace nad nowymi rozwiązaniami.
- Sformułowano fotoniczne metody i układy instalowane w systemach fazowanych szyków antenowych, pracujących w pasmach mikrofalowych, umożliwiające elektroniczne sterowanie wiązką promieniowania, a także kierunkowy odbiór sygnałów z kilku kierunków równocześnie.
- Wprowadzono optyczne sieci transmisji w pojazdach mechanicznych, samochodach, pociągach i samolotach, spełniające bardzo różnorodne warunki. Są one lekkie, niezawodne i niewrażliwe na zakłócenia zewnętrzne.
- Powstała nowa dziedzina techniki, jaką jest fotonika mikrofalowa. Opracowano między innymi optyczne układy filtracji sygnałów mikrofalowych oraz oscylatory sygnałów mikrofalowych o wysokiej czystości widma.
- Wykorzystano metody i techniki komunikacji optofalowej do transmisji między elementami systemów obliczeniowych strumieni danych na odległości kilku metrów. W publikacjach opisano chipy układów scalonych połączone łączami optycznymi o dużej szybkości transmisji danych.

W XXI wieku dokonuje się gruntowna transformacja globalnego systemu telekomunikacyjnego. Dwa główne filary nowego kształtu tego systemu to telekomunikacja komórkowa, mobilna – docierająca bezpośrednio do każdego użytkownika – i telekomunikacja światłowodowa, zapewniająca transmisję informacji na odległości od kilku do tysięcy kilometrów. Systemy telekomunikacyjne spełniają swoje zadania dzięki użyciu nowych generacji układów scalonych, pozwalających zapamiętać i przetwarzać wielkie ilości danych. Proces zmian może trwać jeszcze wiele lat. Pomysłowość naukowców i konstruktorów przyniesie z pewnością nowe opracowania i rozwiązania.

Bibliografia rozdziału 1

- 1.1 R.J. Essiambre, R.W. Tkach, "Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 5, 2012.
- 1.2 Cisco public, "Exhibit E: The Zettabyte Era – Trends and Analysis", White Paper, 2014.
- 1.3 A.E. Willner et al., "Optics and Photonics: Key Enabling Technologies", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, Special Centennial Iss., 2012.
- 1.4 A. Teixeira, G.M.T. Beleffi, *Optical Transmission*, Springer 2012.
- 1.5 M. Nakazawa, "Exabit optical communication explored using 3M scheme", *Japanese Journal of Applied Physics*, Review Paper, 2014.
- 1.6 Cisco public, "The Zettabyte Era: Trends and Analysis", White Paper, June 2017.
- 1.7 D. Thomson et al., "Roadmap on silicon photonics", *Journal of Optics*, Vol. 18, No. 7, 2016.
- 1.8 J. Yu, J. Zhang, "Recent progress on high-speed optical transmission", *Digital Communications and Networks*, Vol. 2, No. 2, 2016.

- 1.9 Huawei Technologies Co., Ltd., "White Paper on Technological Developments of Optical Networks", 2016, <http://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/white%20paper/White-Paper-on-Technological-Developments-of-Optical-Networks.pdf>.
- 1.10 E. Agrell et al., "Roadmap of optical communications", *Journal of Optics*, Vol. 18, 2016.