

Jacek Kuszniér
Politechnika Białostocka, Białystok

HISTORIA ROZWOJU TELEKOMUNIKACJI OPTYCZNEJ

HISTORY OF THE DEVELOPMENT OF TELECOMMUNICATION OPTICAL

Streszczenie: Artykuł przedstawia najważniejsze wydarzenia w rozwoju telekomunikacji optycznej od czasów antycznych, kiedy wykorzystywano heliografy do czasów współczesnych, kiedy królują światłowody. Znaczącym wynalazkiem, który również został omówiony były linie telegrafu optycznego, które królowały w telekomunikacji przez 150 lat w wieku osiemnastym i dziewiętnastym.

Abstract: The article presents the most important events in the development of optical communications since ancient times, when used heliografy to modern times, when dominated by fiber optics. A significant invention, which was also discussed were the optical telegraph lines, which reigned in telecommunications for 150 years in the eighteenth and nineteenth century.

Słowa kluczowe: telekomunikacja optyczna, technika światłowodowa, historia techniki
Keywords: optical telecommunications, fiber optics, history of technology

1. Wstęp

Od najdawniejszych czasów ludzie używali światła w komunikacji. Jest ono postrzegane przez człowieka za pośrednictwem zmysłu wzroku, który należy do pięciu podstawowych zmysłów człowieka (obok: słuchu, dotyku, węchu i smaku). Wzrok odpowiada za pozyskanie z otoczenia więcej niż 80 % informacji, które do nas docierają. Światło jest więc dla nas najbardziej naturalnym medium komunikacyjnym. Promieniowanie jest też najszybszym „gońcem” jaki może nieść informacje. Prędkość światła w próżni sięga prawie 300 000 km/s, to jest ponad 1 000 000 000 km/h. Prędkość biegu najszybszych ludzi może sięgać około 40 km/h, ale jest możliwa do utrzymania tylko na krótkim dystansie. Goniec na koniu w galopie mógł pędzić z prędkością 70 km/h, natomiast dźwięk w powietrzu osiąga prędkość 1200 km/h. Światło jest więc najszybsze, a pozwala również na przesyłanie informacji na duże odległości.

Współczesna telekomunikacja jest oparta na przesyłaniu informacji za pomocą sygnałów optycznych. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu techniki światłowodowej. Pozwoliła ona na powstanie i rozwój globalnej sieci telekomunikacyjnej, zdolnej do przesyłania ogromnych ilości informacji. Tylko w takich warunkach mogła powstać sieć WWW (internet) z jakiej dzisiaj korzystamy. Obecnie tylko transmisja światłowodowa jest w stanie zaspokoić zapotrzebowanie na przesłanie takich ilości infor-

macji. Doprowadziło to do powstania współczesnego społeczeństwa informacyjnego, co zostało docenione w 2009 roku przez Komitet Noblowski przyznaniem nagrody w zakresie fizyki Charlsowi K. Kao "za przełomowe osiągnięcia w dziedzinie przesyłania światła we włóknach optycznych na duże odległości". Światło jest wykorzystywane również w przechowywaniu i prezentowaniu informacji (np. z użyciem płyt CD, DVD, BRD oraz w drukarkach laserowych).

2. Początki telekomunikacji optycznej

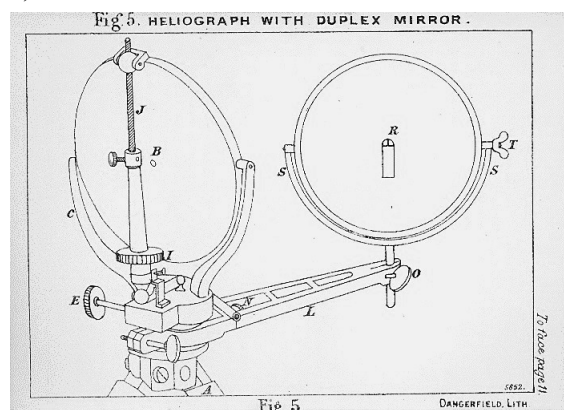
Sygnały dymne, używane już przed tysiącami lat pozwalały na przekazywanie informacji nawet na odległość wielu kilometrów. Jakość transmisji zależała jednak od warunków atmosferycznych. Sygnały świetlne z latarni mogły już być widoczne z odległości kilkudziesięciu kilometrów. Latarnia morska na wyspie Faros u wejścia do portu w Aleksandrii wybudowana 280 lat p.n.e, została uznana za jeden z siedmiu cudów świata antycznego. Dzięki swej wysokości, która sięgała 117 metrów była jedną z najwyższych budowli ówczesnego świata, ustępując nieco jedynie piramidom Cheopsa i Chefrena. Zastosowanie zwierciadeł ustawionych za płomieniem pozwalało na uzyskanie zasięgu sięgającego prawie 50 km.

Komunikacja z wykorzystaniem sygnałów optycznych była też wykorzystywana w starożytnej Grecji i Rzymie. 405 lat p.n.e, w trakcie wojny peloponeskiej Spartanie używali wypole-

rowanych tarcz do sygnalizacji. Urządzenie takie nazywamy heliografem, a tworzy go układ zwierciadeł wykorzystujący światło słońca. Cesarz Tyberiusz (który panował w latach 14-37) przesyłał sygnały z wyspy Capri w zatoce neapolitańskiej na ląd również w podobny sposób. Ze szczytu Monte Solaro (596 m npm) można dostrzec stały ląd, co pozwalało na przesyłanie sygnałów świetlnych. Heliografy były używane przez wojsko do czasu I wojny światowej, kiedy wyparła je komunikacja radiowa. Należy podkreślić, że były to urządzenia, które dobrze sprawdzały się w warunkach polowych, były proste w obsłudze oraz korzystały ze światła słonecznego i nie wymagały dodatkowego źródła zasilania (rys. 1). Poruszając lustrami lub przesłoną można było uzyskać błyski zgodne z kodem Morse'a. Dla nieuzbrojonego oka odbiorcy komunikacja była możliwa do odległości 50 km. Rekordowy zasięg transmisji wyniósł 295 km i został osiągnięty w 1894 roku między górami stanów Utah i Colorado. Pewną odmianą heliografu jest lampa sygnałowa, zwana także lampą Aldisa – używana do dzisiaj głównie w marynarce. Pozwala ona na komunikację z zachowaniem ciszy radiowej.

Oprócz heliografów, które były urządzeniami mobilnymi opracowano również system telegrafów optycznych. Pierwsze takie urządzenia (semafory) opracował jeden z największych naukowców i wynalazców XVII wieku, angiłk Robert Hooke w 1684 roku. Jego projekt nie znalazł jeszcze wtedy praktycznej realizacji. W roku 1790 Claude Chappe opracował system telegrafu optycznego we Francji. W ten sposób powstała pierwsza wykorzystywana w praktyce sieć telekomunikacyjna czasów rewolucji przemysłowej. Wieże telegrafu były usytuowane w odległościach od 16 do 32 km. Pierwszy działający semafor miał 196 pozycji (rys. 2). Pierwsza linia semaforowa pomiędzy Paryżem, a Lille rozpoczęła działalność w 1792 roku. Czas transmisji przeciętnej wiadomości (36 znaków) na odległość 192 km wynosił 32 minuty. W 1794 r. linia semaforowa przekazała Paryżanom informację o zajęciu przez Austriaków Condé-sur-l'Escaut w mniej niż godzinę po tym fakcie. Sieć telegrafów Clauda Chappe pokryła Francję 556 stacjami na dystansie 4800 km (rys. 3).

a)



b)



Rys. 1. Heliograf używany przez brytyjską armię. a) rysunek przedstawiający heliograf z wojskowej instrukcji z 1886 roku, b) karta pocztowa z 1906 roku

Pozwalały one na przesyłanie informacji na odległości setek kilometrów w ciągu kilkunastu minut. Swoją świetność system ten przeżywał w czasach napoleońskich. Telegraf taki został wspomniany w powieści Aleksandra Dumas „Hrabia Monte Christo”.

W kolejnych latach stworzono podobne systemy w innych krajach. W Wielkiej Brytanii stosowane były systemy Murraya i Popham-Pasleya (rys. 4). Nieco inne systemy były stosowane w Holandii, Prusach, Szwecji, Rosji, brytyjskich Indiach, francuskiej Algierii i innych krajach (rys. 5).

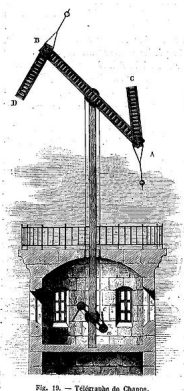


Fig. 13. — Télégraphe de Chappe.

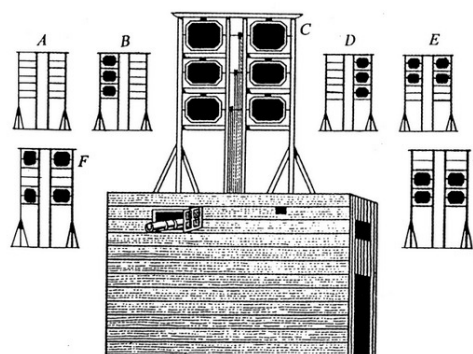
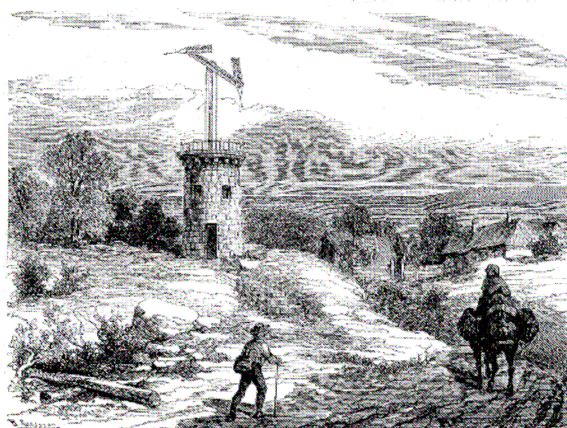


Figure 1.1 Murray's shutter system, devised for the Admiralty in 1796
Source: Admiralty Archives, London



Rys. 2. Claude Chappe i opracowany przez niego telegraf., ilustracje z "Les merveilles de la science", Louis Figuiet, 1868 [2]

b)

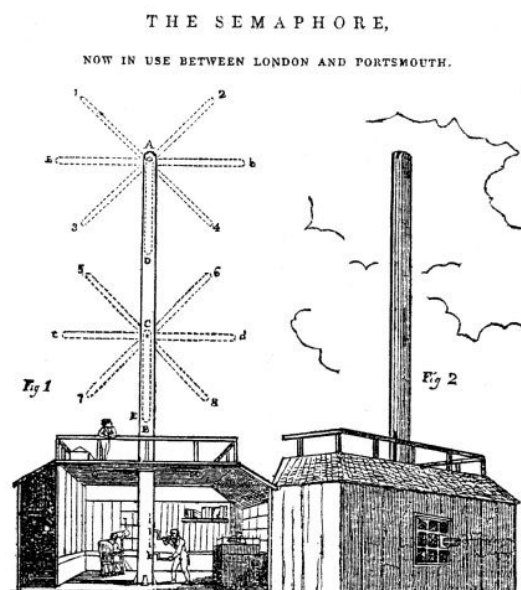
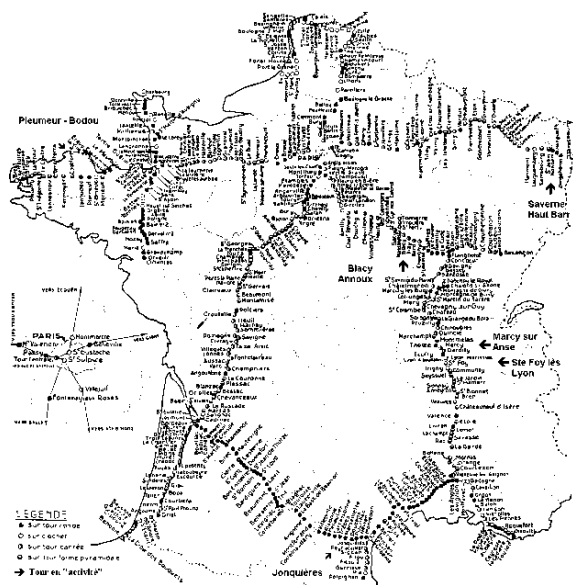


Figure 1.5 A London-Portsmouth semaphore station
Source: Mechanic's Magazine, 24th September 1825

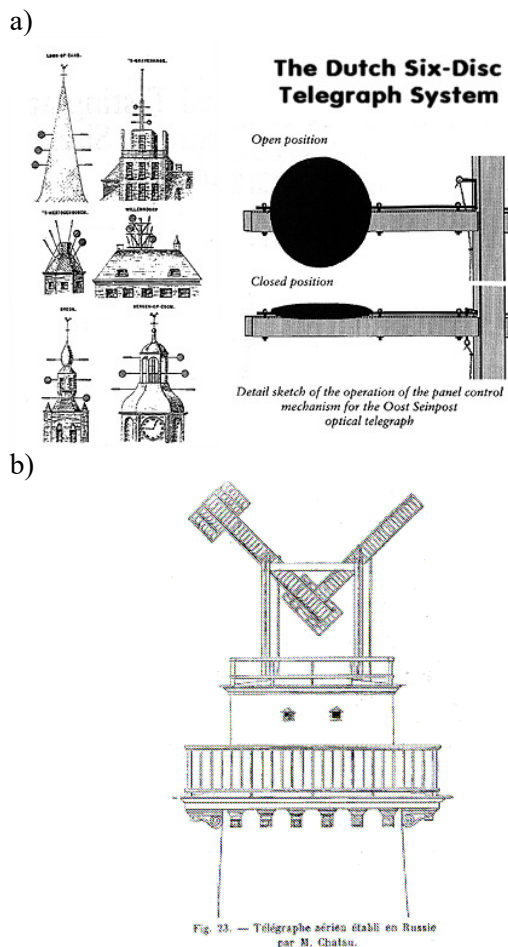


Rys. 3. Sieć telegrafów optycznych Clauda Chappe pokrywająca Francję w 1820 roku, z zaznaczeniem stacji telegraficznych [3]

a)

Rys. 4. Brytyjskie telegrafy optyczne [4]. a) system sześciu przesłon Murraya. b) system semaforowy Popham – Pasley

Na ziemiach polskich również pojawiła się sieć telegrafów optycznych. W okresie zaborów Warszawa była najbardziej na zachód wysuniętym dużym miastem imperium rosyjskiego. Pierwsza linia rozpoczęła pracę około 1830 roku i połączyła Warszawę z twierdzą w Modlinie. W 1831 roku „Kurier Warszawski” napisał: „Na szczycie nowego teatru zaczęto urządzać telegraf, za pomocą którego w kilka minut będzie można mieć wiadomość od armii”. Do tego czasu komunikacja twierdzy z miastem odbywała się za pomocą gońców.



Rys. 5. Telegrafy optyczne. a) holenderski system sześciu dysków [3], b) rosyjski system, który łączył Warszawę z Sankt Petersburgiem, opracowany przez Jacquesa Chataeu [2]

Po upadku Powstania Listopadowego Rosjanie postanowili połączyć linią telegrafu optycznego Warszawę z Sankt Petersburgiem. Za panowania cara Mikołaja I przy ministerstwie wojny utworzono specjalną komisję w celu wyboru systemu telegrafów optycznych w Rosji. Zadanie to powierzono inżynierowi Jacques Chataeu, byłemu pracownikowi Clauada Chappe. W 1835 roku była to najdłuższa linia na świecie, która przebiegała przez Wilno i miała 1200 km długości. Linia liczyła 149 wież o wysokości od 15 do 21,5 m z zamocowanym na nich na trzymetrowym słupie semaforem. Stacje były oddalone od siebie od 8 do 12 kilometrów, a linię obsługiwały łącznie 1904 osoby. „Kurier Warszawski” podał 10 kwietnia 1839 roku wiadomość: „Nowość u nas nader interesująca istnieje od onegdaj, w tym dniu Telegrafy urządzone od Petersburga do Warszawy, pierwszy raz doniosły wiadomości, które będzie można miewać w ciągu kilku godzin”.

W 1839 roku Rosjanie przedłużyli linię o 71 stacji z Sankt Petersburga do Moskwy (rys. 6). Konstrukcja i kod telegrafu Chataeu była znacznie prostsza niż stosowana w rozwiązaniu Chappe'a. Do wizualnego przekazu stosowany tylko jeden semafor, przypominający strzałkę w kształcie litery T – składał się z dwóch belek przegubowo połączonych ze sobą: jednej długiej i drugiej krótkiej, dołączonej do końca długiej belki. W nocy, na wszystkich trzech końcach semafora zapalano latarnie. Zmiana położenia względem siebie belek pozwalała na uzyskanie 196 różnych kształtów. Kombinacje te kodowały poszczególne litery, cyfry, ale także całe frazy. Semaforey były kontrolowane za pomocą systemu lin i kołowrotek przez operatorów od wewnątrz budynków. Operator na swoim semaforze powtarzał ustawienia, które widział w swoim teleskopie. Wieża była wyposażona w dwa teleskopy zamontowane w przeciwległych ścianach, do obserwacji poprzedzającej i następnej wieży [5, 6].

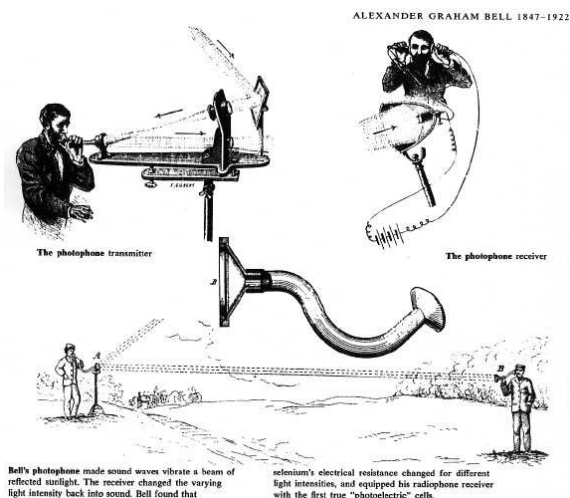
Praca telegrafu optycznego była uzależniona od warunków atmosferycznych. W 1854 roku Warszawa uzyskała połączenie z Sankt Petersburgiem za pomocą telegrafu elektrycznego. Wcześniej, bo w 1852 roku rozpoczęto instalację telegrafu elektrycznego na linii kolei warszawsko-wiedeńskiej. Telegrafy optyczne były więc najszybszą formą przekazywania informacji na odległość przez około 100 lat.



Rys. 6. Przebieg najdłuższej na świecie linii telegrafu optycznego Warszawa – Sankt Petersburg – Moskwa

Należy wspomnieć także, że w 1880 Aleksander Graham Bell wynalazł fonofon, który pozwalał transmitować głos na odległość przekraczającą 200 m za pomocą promieni świetlnych. W nadajniku wiązka światła padała na drgające pod wpływem głosu lustro. Wiązka ta była następnie nakierowana na zwierciadło parabo-

liczne i detektor selenowy (rys. 7). Rozwiązanie to nie znalazło jednak szerszego zastosowania.

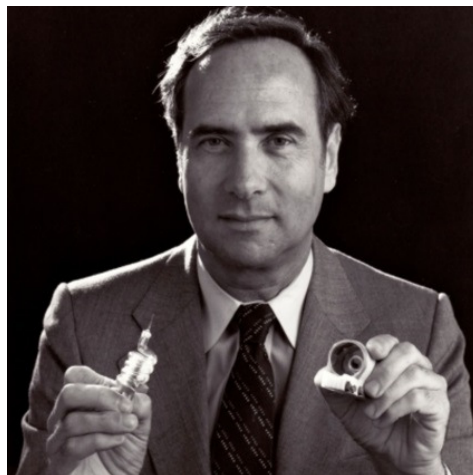


Rys. 7. Fotofon opracowany przez Aleksandra Grahama Bella [7]

3. Światłowody zmieniają telekomunikację

W 1932 roku Norman French z Bell Labs wystąpił o patent systemu telefonii optycznej wykorzystujący pręty kwarcowe. W 1945 roku Ray D. Kell wraz z Georgem Szikalaim wystąpili o patent na przesyłanie sygnałów przez pręty szklane lub kwarcowe, który został przyznany w 1950 r. W 1956 roku Larry Curtiss na Uniwersytecie Michigan zaproponował zastosowanie do transmisji włókien dwuwarstwowych, z płaszczem szklanym lub polimerowym. Do rozwoju telekomunikacji światłowodowej konieczne były włókna o wystarczająco niskim tłumieniu oraz źródła, które mogłyby z nimi współpracować. Problem odpowiedniego źródła znalazł rozwiązanie w 1960 roku, kiedy Theodore Maiman (1927-2007) zademonstrował pierwszy laser w Hughes Research Laboratories w Malibu (rys. 8). W 1962 roku powstały pierwsze lasery półprzewodnikowe.

Równocześnie trwały prace nad opracowaniem odpowiednich dla telekomunikacji światłowodów. W 1961 roku Elias Snitzer opublikował teoretyczny model światłowodu jednomodowego. W 1965 roku Charles Kao i George Hockham stwierdzili, że dla praktycznego wykorzystania światłowodów ich tłumienie powinno być mniejsze od 20 dB/km. Wykazali oni również, że straty w dostępnych wtedy światłowodach sięgające 1000 dB/km pochodziły głównie od zanieczyszczeń, a nie samego szkła krzemionkowego.



Rys. 8. Theodore Maiman demonstruje pierwszy laser [8]

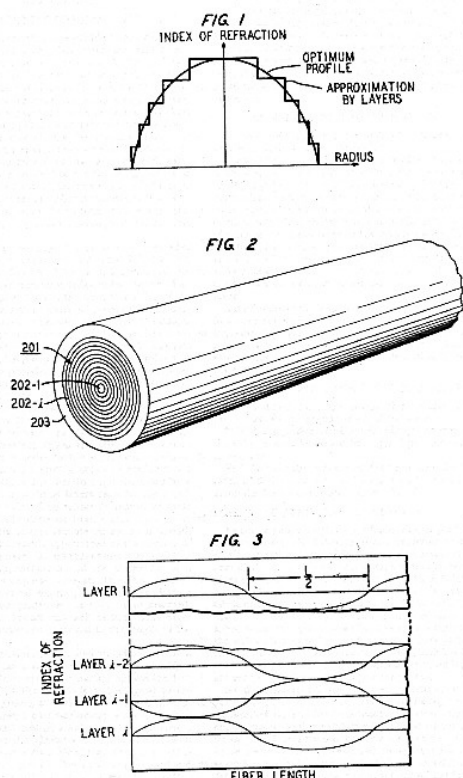
Na możliwości transmisyjne światłowodu oprócz tłumienia duży wpływ ma również dyspersja, która powoduje rozmycie prowadzonych impulsów. Energia fali optycznej w światłowodzie transmituje się w postaci modów, które są monochromatyczną wiązką rozprzestrzeniającą się wzdłuż falowodu z charakterystyczną dla siebie prędkością fazową, o charakterystycznym rozkładzie poprzecznym pola, niezmiennym się wzdłuż kierunku propagacji. Mod przenosi więc część energii wiązki świetlnej, rozprzestrzenia się własnym torem i z własną prędkością. W światłowodach wielomodowych różne mody propagując się po innych drogach docierają w efekcie na koniec toru optycznego w innym czasie. Powoduje to powstanie dyspersji międzymodowej.

Ograniczenie liczby modów oraz zwiększenie prędkości propagacji modów biegnących po najdłuższych drogach można uzyskać w światłowodach gradientowych. Jest to możliwe ponieważ prędkość światła jest większa w ośrodku o mniejszej wartości współczynnika załamania. Wyeliminowanie występowania dyspersji międzymodowej zapewnia dopiero zastosowanie światłowodów jednomodowych. W 1965 roku Stewart Miller (1919-1990) z Bell Labs wystąpił o patenty na światłowody wielowarstwowe i gradientowe w celu obniżenia dyspersji międzymodowej (rys. 9).

U.S. Patent

Oct. 11, 1977

4,053,205



Rys. 9. Światłowody gradientowe opatentowane przez Stewarta Millera [9]

Światłowody wytwarzane w tym czasie charakteryzowały się tłumieniem rzędu 1000 dB/km. W 1970 roku firma Corning Glass Company wyprodukowała światłowód o stratności 17 dB/km dla fali o długości 633 nm. Był to przełom w zastosowaniach światłowodów w telekomunikacji. W 1972 roku w laboratoriach Bell Labs opracowano światłowód o tłumieniu 5,5 dB/km, w 1974 roku 4 dB/km (900 nm) i około 2 dB (1060 nm). W 1975 roku firma Bell zbudowała instalację o długości 14 km (New Jersey) z użyciem włókna o średnicy 1 milimetra.

Fale o długościach, dla których równocześnie dyspersja oraz tłumienie osiągały najmniejsze wartości zostały wybrane do transmisji w telekomunikacji światłowodowej i nazwane oknami transmisyjnymi. W światłowodach jednomodowych występowanie zjawiska dyspersji wynika w głównej mierze z zależności wartości współczynnika załamania światła od długości fali. W 1975 roku Dave Payne i Alex Gambling z Uniwersytetu w Southampton zaproponowali (wyliczyli) długość fali przy minimalnej dys-

persji na 1270 nm. Określiło to położenie 2 okna transmisyjnego, które jest używane do dzisiaj.

W 1976 roku Masahara Horiguchi i Hiroshi Osanai wytworzyli światłowód ze stratami 0,47 dB/km (dla fali o długości 1200 nm) oraz zaproponowali umieszczenie 3 okna transmisyjnego przy fali o długości 1550 nm.

Musiało minąć od odejścia ze służby telegrafów optycznych około 120 lat, aby światło na nowo zdominowało telekomunikację.

W 1977 roku były już opracowane wszystkie elementy konieczne do budowy światłowodowych systemów telekomunikacyjnych. Pierwsza komercyjna linia światłowodowa powstała jeszcze w tym samym roku w Stanach Zjednoczonych w Chicago (rys. 10). W 1978 roku firmy AT&T, British Post Office i Standart Telephones and Cables postanowiły zbudować transatlantyckie łącze światłowodowe pracujące na fali 1300 nm.

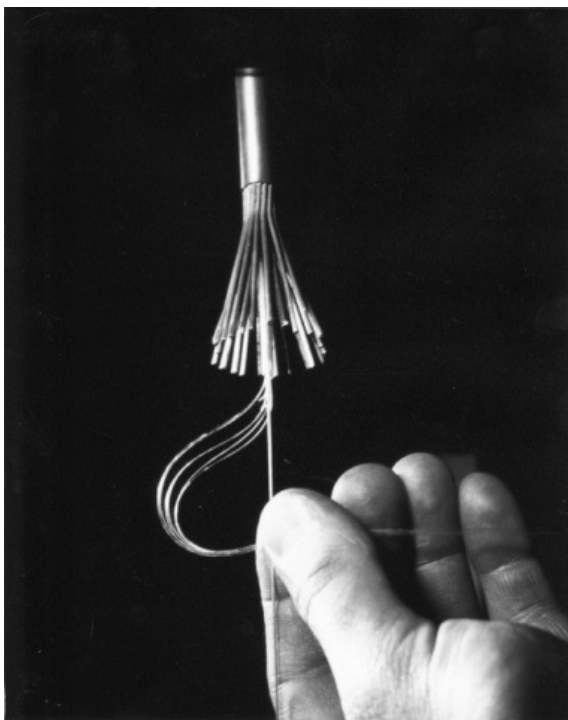


Rys. 10. Budowa pierwszego komercyjnego światłowodowego systemu komunikacyjnego przez firmę At&T w 1977 roku w Chicago [10]

W 1978 roku w laboratoriach NTT wytworzono włókna jednomodowe z tłumieniem 0,2 dB/km przy 1550 nm.

W 1980 roku w STL i British Post położyły na Szkockim wybrzeżu 9,5 kilometrowy kabel podmorski, zawierający włókna jednomodowe i włókna gradientowe. W tym samym roku system oparty na światłowodach gradientowych został wykorzystany w transmisji z Zimowych Igrzysk Olimpijskich na trasie Lake Placid – New York z użyciem fali 850 nm. W 1988 roku został oddany do użytku pierwszy światłowodowy, telekomunikacyjny kabel transatlantycki TAT-8 (jednomodowy z użyciem fali 1300 nm), który był użytkowany do 2002 roku (rys. 11). Od tego momentu wszystkie kolejne pod-

morskie kable telekomunikacyjne były wykonywane w technice światłowodowej [1, 8].



Rys. 11. Podmorski kabel telefoniczny z 1970 r. oraz pierwszy transatlantycki, telekomunikacyjny kabel światłowodowy TAT-8 z 1980 r. [11]

W Polsce badania nad technologią światłowodów rozpoczęto w Zakładzie Chemii Fizycznej UMCS w 1975 roku. Pierwszą doświadczalną linię światłowodową przekazano do eksploata-

cji w marcu 1979 r w Lublinie. Była to też pierwsza taka linia w państwach bloku RWPG. Ciągłe są opracowywane nowe konstrukcje światłowodów jak: wielordzeniowe, z kształtowanym rdzeniem, dwójłomne, domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich, foniczne,... Znaczący udział w rozwoju technologii światłowodów, w tym w szczególności światłowodów specjalnych wniosły: Laboratorium Technologii Światłowodów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej oraz Pracownia Technologii Światłowodów na Wydziale Chemii UMCS w Lublinie.

Długości linii światłowodowych głównych operatorów zainstalowane w Polsce na rok 2014 wynosiły: 82 000 km firmy Orange (dawniej TP S.A.), 28 000 km firmy TK Telekom, 20 000 km firmy Exatel, 17 000 km firm grupy GTS, 6 490 km sieci PIONIER, 5 000 km Netii. Obecnie światłowody coraz częściej obsługują nie tylko linie międzymiastowe, ale również docierają do końcowego odbiorcy.

4. Podsumowanie

Światło zawsze towarzyszyło człowiekowi. Od zawsze było też używane w komunikacji na duże odległości. Rozwiązania stosowane przez tysiące lat wykorzystywały transmisję w otwartej przestrzeni. Układy heliografów i latarni pozwalały na przesyłanie sygnałów świetlnych na odległości sięgające kilkudziesięciu kilometrów. Praca ich uzależniona była jednak od warunków atmosferycznych. Mgła, opady deszczu, śniegu potrafiły przerwać transmisję. Problem ten obecnie nie występuje, ponieważ sygnały optyczne są uwięzione we włóknach światłowodowych.

Technika światłowodowa zdominowała obecnie telekomunikację. Kable światłowodowe oplatają całą kulę ziemską. Linie transoceaniczne mają długości od kilkunastu tysięcy kilometrów do prawie 40 000 km. Światłowody otaczają wszystkie kontynenty oraz zapewniają przesyłanie olbrzymich ilości informacji, szczególnie na potrzeby globalnej sieci WWW.

Technika przesyłania sygnałów optycznych torami światłowodowymi spowodowała również zmianę naszego sposobu życia, doprowadzając do powstania współczesnego społeczeństwa informacyjnego.

Praca została wykonana na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej w ramach S/WE/4/2013.

5. Bibliografia

- [1]. Southwest Museum of Engineering, Communications and Computation. Dostęp 24.05.2016.
- [2]. „Heliograph - Signaling By The Sun, Manual Of Instruction In Army Signaling 1886” http://www.smecc.org/heliograph_-_signaling_by_the_sun.htm.
- [3]. Louis Figuier, *Les merveilles de la science .ou- description populaire des inventions modernes, Télégraphe Aérien*, , Paris 1868.” s 1-84 .
- [4]. Royal Signals Contact Site Dostęp 24.05.2016.
- [5]. „Royal Signals datasheet signalling with telegraph” <http://royal-signals.org.uk/Datasheets/Telegraph.php>.
- [6]. Amitabha Gupta Dostęp 24.05.2016.
- [7]. „Optical telegraph in india: the forgotten saga” <https://amitabhagupta.wordpress.com/2013/07/15/optical-telegraph-in-india-the-forgotten-saga/>.
- [8]. Rafał Jabłoński, „Wieża z żelaznymi ramionami, czyli telegraf optyczny” *Życie Warszawy*, 13.01.2011.
- [9]. Lopacinski.com Dostęp 24.05.2016.
- [10]. „Telegraf optyczny Warszawa – Petersburg – Moskwa”. http://lopacinski.com/wordpress/?page_id=39.
- [11]. Sound Choice Assistive Listening, Inc. Dostęp 24.05.2016.
- [12]. „Information about assistive listening technologies”. http://www.assistivelisting.net/sc_assistivetech_info/sc_assistivetech_info.html
- [13]. Biography.com. Dostęp 24.05.2016.
- [14]. „Theodore H. Maiman Biography” <http://www.biography.com/people/theodore-h-maiman-9395793>.
- [15]. Stewart Miller, Optical fiber having reduced dispersion, US Patent No 4,053,205; 11.10.1977.
- [16]. Jeff Hecht, *City of Light: The Story of Fiber Optics*, Oxford University Press, New York, 1999
- [17]. <http://gadgets.boingboing.net/> Dostęp 24.05.2016.
- [18]. Joel Johnson, An illustrated history of the transoceanic cable, <http://gadgets.boingboing.net/2009/04/17/gallery-an-illustrat.html>.

Autor

dr inż. Jacek Kuszniér
Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny
ul. Wiejska 45D, e-mail: j.kusznier@pb.edu.pl