STUDIA INFORMATICA 2001
Volume 22 Number 2 (44)

Marek PUSZCZAŁO
PWPT WASKO Sp. z o.o., Zakład Systemów Telekomunikacyjnych

NOWOCZESNE SYSTEMY TRANSMISJI OPTYCZNEJ O WYSOKICH PRZEPUSTOWOŚCIACH

Streszczenie. Niniejsza praca opisuje podstawy teoretyczne i praktyczne realizacje dalekosiężnych traktów światłowodowych o wielkich przepustowościach. Poruszona została tematyka ograniczeń, którym podlega zwiększenie prędkości przesyłu informacji w światłowodzie i zwiększanie odległości między regeneratorami i wzmacniaczami. Omówione zostały zagadnienia sieci optycznie przeźroczystych i zwielokrotniania optycznego.

MODERN SYSTEMS OF OPTICAL TRANSMISSION WITH HIGH CAPACITIES

Summary. This paper describes theoretical basics and practical realisations of long distance fiber tracks with grand capacities. There was brought matter of limitation, whom velocity of sending increasing is subjected and increasing of distance between regenerators and amplifiers. There were discussed issues of optical networks and optical multiplexing.

1. Wstęp

Współczesna telekomunikacja nie może się obejść bez długodystansowych traktów o wielkich przepustowościach, zdolnych do transmisji dziesiątek tysięcy rozmów telefonicznych na odległości transoceaniczne. Wykorzystywane są przy tym różne media, które nakładają różnorodne ograniczenia na maksymalne odległości i prędkości transmisji. Największe zastosowanie uzyskały: kabel elektryczny, łącze radiowe i światłowód. Rozważając kombinację tłumienia na jednostkę odległości, szerokość pasma dostępnego transmisji i uwarunkowań ekonomicznych, w wielu zastosowaniach transmisja światłowodowa jest bezkonkurencyjna. Zapewnia bardzo wielką pojemność kanału informacyjnego, jest niewrażliwa (w roz-

sądnych granicach) na zakłócenia zewnętrzne, umożliwia zestawianie bezpiecznych, stabilnych i pojemnych łączy telekomunikacyjnych, transportujących zarówno przekazy audio–wideo, jak i dane teleinformatyczne.

W niniejszej pracy poruszone zostaną zagadnienia metod generacji i modulacji strumienia świetlnego, transmisji w światłowodzie, metod ograniczania wpływu niekorzystnych cech toru światłowodowego.

2. Systemy transmisji światłowodowej z detekcją bezpośrednią

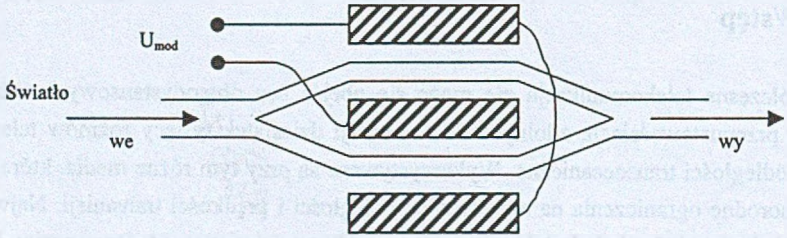
2.1. Modulacja amplitudy

Konwencjonalne metody wprowadzania informacji do światłowodu opierają się na modulacji amplitudy fali nośnej generowanej przez laser półprzewodnikowy. Modulowanie natężenia światła laserowego odbywa się na dwa podstawowe sposoby: modulowanie prądu zasilania lasera oraz modulacja zewnętrzna.

Modulacja prądu lasera pociąga za sobą powstawanie świergotu (ang. *chirp*), tzn. pasożytniczej modulacji częstotliwości. Jest to związane z chwilowymi zmianami współczynnika załamania obszaru aktywnego struktury lasera na skutek skokowych zmian koncentracji swobodnych nośników. Zjawisko to ma wpływ na transmisję jedynie w systemach o dużej przepływności i powoduje ograniczenie częstotliwości granicznej modulacji w praktyce do ok. 10 GHz.

Wśród modulatorów zewnętrznych można wyróżnić modulator interferometryczny typu Y (Mach-Zehnder), półprzewodnikowy modulator elektroabsorpcyjny oraz modulator akustooptyczny.

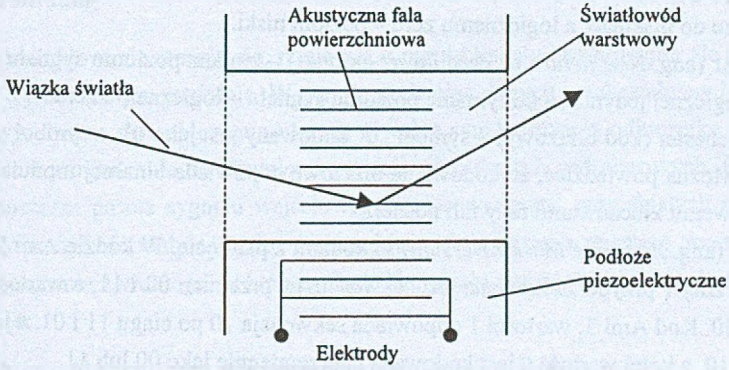
- Zasada działania modulatora interferometrycznego opiera się na efekcie zmiany współczynnika załamania w materiale elektrooptycznym pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego.



Rys. 1. Modulator interferometryczny typu Y (Mach-Zehnder)
Fig. 1. Interferometric modulator Y (Mach-Zehnder)

Powoduje to zmianę fazy fali świetlnej na skutek zmiany jej prędkości grupowej. Sprzęgacz optyczny rozdziela strumień światła na dwie równe części, po czym na jeden z nich oddziałuje falowodowy modulator fazowy. Następnie w drugim sprzęgaczu optycznym następuje złączenie dwóch strumieni w jeden, przy czym jeśli oba strumienie są zgodne w fazie, to amplitudy fali E-M dodają się. Mówimy wtedy, że modulator jest w stanie włączenia. Sytuacja taka następuje, gdy do elektrod modulatora fazowego nie przyłożono napięcia. Jeśli jednak istnieje pewna różnica napięcia na elektrodach, może się okazać, że fala świetlna dochodząca z dwóch różnych ramion sprzęgacza jest w przeciwfazie, co powoduje interferencyjne wygaszenie strumienia. Modulator jest wtedy w stanie wyłączenia. W modulatorach skonstruowanych na bazie $LiNbO_3$ osiągalne są aktualnie częstotliwości graniczne modulacji dochodzące w warunkach laboratoryjnych do 75 GHz.

- Idea modulatora elektroabsorpcyjnego opiera się na relacji między szerokością przerwy energetycznej półprzewodnika a przyłożonym do niego polem elektrycznym. Półprzewodnik absorbuje promieniowanie o energii większej niż wartość jego przerwy energetycznej – stąd wynika możliwość modulowania napięciem strumienia światła przechodzącego przez warstwę absorpcyjną półprzewodnika. Częstotliwości graniczne tego typu modulatorów przekraczają 40 GHz, ponadto dają się dobrze scalać z półprzewodnikowymi strukturami laserów.
- Modulator z efektem akustooptycznym wykorzystuje efekt dyfrakcji fali świetlnej na akustycznej fali powierzchniowej w przeźroczystym ośrodku.



Rys. 2. Modulator akustooptyczny
Fig.2. Acustooptic modulator

Istnienie fali akustycznej wymuszonej zasileniem elementu piezoelektrycznego powoduje pojawienie się wiązki odchylonej, która doprowadzona jest do światłowodu wyjściowego. Zaletą powyższego modulatora jest bardzo wysoki współczynnik eks-

cytancji, tzn. stosunku mocy strumienia świetlnego dla logicznego „1" do mocy odpowiadającej logicznemu „0". Ponieważ akustyczna fala powierzchniowa jest ruchoma, występuje też efekt Dopplera, który może być wykorzystany do modulacji częstotliwości światła

2.2. Kodowanie

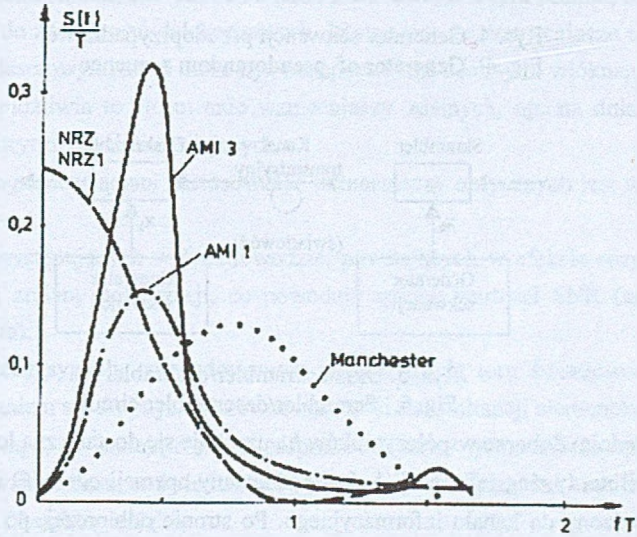
Ma ono m. in. za zadanie zapewnienie minimalizacji pasma zajmowanego przez sygnał, kontrolę wartości średniej sygnału oraz zapewnienie dobrych właściwości synchronizacyjnych sygnału. Można powiedzieć, że powinno ono zapewnić optymalne wprowadzenie sygnału użytecznego do kanału transmisyjnego. Kodowanie musi zapewniać odporność na zakłócenia w czasie transmisji, odpowiednią nadmiarowość informacji pozwalającą na jej rekonstrukcję i/lub detekcję błędów, dopasowanie do pewnych procesów fizycznych charakteryzujących dany kanał transmisyjny oraz umożliwić uzyskanie m. in. odpowiedniej stopy błędów (ang. BER, *Bit Error Rate*) przy założonej prędkości transmisji.

Kody liniowe, tzn. kody transmisyjne, modyfikują widmo sygnału użytecznego, dopasowując je do danego ośrodka – pozwalają np. na zachowanie odpowiedniego poziomu dyspersji w stosunku do nieliniowości światłowodu.

- NRZ (ang. *Non Return to Zero*) jest w zasadzie odwzorowaniem niekodującym, w którym logicznemu „0" przyporządkowana jest niska, a logicznemu „1" – wysoka wartość mocy fali nośnej.
- RZ (ang. *Return to Zero*) – logicznej jedynce odpowiada przejście z wysokiego poziomu do niskiego, a logicznemu zeru – poziom niski.
- NRZI (ang. *Non Return to Zero invert on ones*) – zmiana poziomu sygnału odpowiada logicznej jedynce, a utrzymanie poziomu sygnału – logicznemu zeru.
- Manchester (kod bifazowy) – symbol „0" kodowany jest jako 01, a symbol „1" – jako 10. Można powiedzieć, że kodowanie bifazowe odpowiada binarnej modulacji fazy – fazowemu kluczowaniu fazy fali nośnej.
- Ami (ang. *Alternate Mark Inversion*) są kodami z pamięcią. W kodzie Ami 1 wartości logicznej 1 przyporządkowana jest sekwencja na przemian 00 i 11, a wartości 0 zawsze 10. Kod Ami 3: wartości 1 odpowiada sekwencja 10 po ciągu 11 i 01, a jako 01 po 00 i 10, z kolei wartość 0 jest kodowana naprzemiennie jako 00 lub 11.
- mBnB jest grupą kodów tzw. blokowych, w których sekwencja m bitów jest zastępowana sekwencją n symboli transmisyjnych. Przeważnie n>m, co wprowadza pewną nadmiarowość i obok kontroli widma umożliwia detekcję błędów.

Widma częstotliwościowe różnych kodów przedstawiono na rys. 3. Widać, że te kody, które wymuszają zmianę poziomu sygnału wyjściowego zarówno dla „0", jak i „1", nie mają

składowej stałej i ich widma mają maksima w miejscach niezerowej częstotliwości, przy czym ekstremum widma i pasmo B sygnału jest różne dla różnych sposobów kodowania.



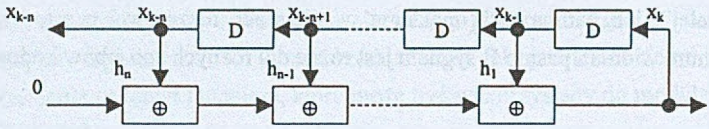
Rys. 3. Widma częstotliwości kodów transmisyjnych
Fig. 3. Spectrum of different transmission codes

2.3. Skrambling

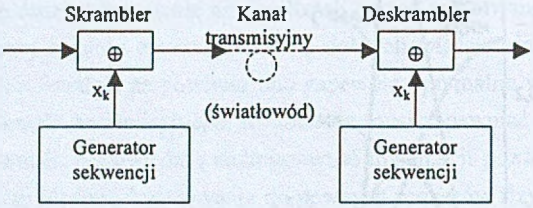
Proces skramblowania stosuje się, ponieważ z reguły kanały transmisyjne źle przenoszą długie ciągi o jednakowym poziomie. W tym procesie ciąg danych przekształcany jest w ciąg pseudolosowy. Proces skramblowania ułatwia również synchronizację odbiornika do zegara nadajnika bez wprowadzania do strumienia wejściowego danych nadmiarowych. Skramblowanie nie poszerza pasma sygnału wejściowego i stosowane jest przy ścisłych ograniczeniach na jego szerokość widma. Budowa skramblera jest oparta na rejestrze przesuwnym z obwodem sprzężenia zwrotnego, w którym wartość sygnału wyjściowego x_k spełnia następującą zależność:

$$x_k = h_1 \cdot x_{k-1} \oplus h_2 \cdot x_{k-2} \oplus \ldots \oplus h_n \cdot x_{k-n} \tag{1}$$

gdzie n jest długością rejestru przesuwnego, $m=1..n$, binarna wartość h_m mówi o istnieniu lub braku odczepu na m-tej komórce elementarnej rejestru, x_{k-m} jest wartością bitu zapamiętaną w komórce elementarnej m, $\oplus$ jest symbolem sumy modulo 2, a k jest indeksem czasowym.



Rys. 4. Generator sekwencji pseudoprzypadkowej
Fig. 4. Generator of pseudorandom sequence



Rys. 5. Układ skrambler/deskrabler
Fig. 5. Scrambler/descrambler circuit

Przy odpowiednim doborze współczynników h_m uzyskuje się dostateczną losowość kolejnych wartości x_k. Binarny ciąg informacji b_k jest poddawany operacji $c_k = b_k \oplus x_k$, a jej wynik zostaje wprowadzony do kanału informacyjnego. Po stronie odbiorczej, po zdemodulowaniu, dokonywana jest operacja na sygnale wejściowym deskramblera: $b_k' = c_k \oplus x_k$, przy czym wykorzystana jest własność operacji sumy modulo 2: $t \oplus w \oplus w = t$, gdzie $w = 1$ lub 0. Ciąg b_k' odpowiada informacji użytecznej.

W idealnym przypadku, tzn. w transmisji bezbłędnej, $b_k' = b_k$. Wymagane jest przy tym idealne zsynchronizowanie generatorów x_k zarówno w nadajniku, jak i w odbiorniku. Sprowadza się to do zapewnienia identycznego stanu początkowego x_{k-m}, konfiguracji sprzężenia zwrotnego h_m oraz identycznego i zsynchronizowanego zegara taktującego rejestry przesuwające. Synchronizację można zapewnić między innymi przez zastosowanie pętli PLL

3. Problemy transmisji na bardzo duże odległości

3.1. Wzmacnianie optyczne

W celu osiągania bardzo dużych zasięgów transmisji optycznej ekonomicznie uzasadnione jest zastąpienie regeneratorów elektronicznych wzmacniaczami optycznymi. Zastosowanie wzmacniaczy pozwala na uniknięcie dwóch konwersji sygnałów: optoelektrycznej i elektrooptycznej. Eliminuje to ograniczenie pasma przenoszenia wnoszone przez konwencjonalne wzmacniacze. Szeregowy układ wielu wzmacniaczy i odcinków światłowodu ma własności bardzo wąskiego filtru pasmowoprzepustowego, co pozwala na rezygnację z dodatkowych

filtrów odcinających zakłócenia i szumy. Wzmacnianie światłowodowe jest szczególnie rozpowszechnione w transmisji w III oknie optycznym, tj. 1,55 μm, z powodu opracowania efektywnych i dostępnych w handlowych ilościach wzmacniaczy typu EDFA pracujących na erbie, oraz z powodu najniższego tłumienia szkła kwarcowego w tym paśmie, co je szczególnie predestynuje do zastosowań dalekosiężnych. Istotne jest, że wzmacniacze optyczne zasilane są światłem laserowym, które może być transportowane osobnymi włóknami kabla światłowodowego. Umożliwia to stosowanie wzmacniaczy zdalnych, np. na dnie oceanu, bez prowadzenia elektrycznych linii zasilających.

Czynnikami ograniczającymi zastosowanie wzmacniaczy optycznych jest m. in. wzmacnianie

- szumów występujących w światłowodzie, powstających w efekcie rozpraszania, samorzutnej zmiany polaryzacji, co powoduje spadek wartości SNR (ang. *Signal to Noise Ratio*),
- zniekształceń sygnału spowodowanych nieliniowością toru światłowodowego oraz kumulowaniem się drobnych nierównomierności transmitancji elementów traktu.

Należy zaznaczyć, że istnieją również półprzewodnikowe wzmacniacze optyczne, które jednak ustępują wzmacniaczom światłowodowych opartym na pierwiastkach ziem rzadkich w wielu cechach. Charakteryzują się

- znacznymi stratami na sprzężeniu ze światłowodami,
- ograniczeniem pasma i wrażliwością na polaryzację strumienia wejściowego,
- niższymi osiągalnymi efektywnymi wzmocnieniami,
- znaczącym wpływem szumów,
- małą dynamiką i niedużą mocą nasycenia.

3.2. Minimalizacja dyspersji

Jako że wzmacnianie optyczne stosowane jest przeważnie w systemach dalekosiężnych, występują w nich problemy zaniedbywalne na krótszych dystansach. Głównym zagadnieniem jest kompensacja dyspersji, która jest w tym przypadku dominującym czynnikiem wpływającym na ograniczenie zasięgu transmisji.

Zjawiska opóźnienia zależnego od długości fali w światłowodzie mogą być opisywane przez tzw. współczynnik dyspersji.

$$D = \frac{d\tau_g}{d\lambda}\left[\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}\right] \tag{2}$$

W idealnym przypadku trakt światłowodowy ma zerową dyspersję wypadkową. W światłowodach kwarcowych minimum dyspersji występuje dla długości fali 1310 μm i nie pokrywa się z minimum tłumienia w paśmie 1550 μm. W związku z tym dobiera się odpowied-

nie domieszkowanie (prowadzące do zwiększenia skoku współczynnika załamania w światłowodzie) i/lub modyfikuje geometrię światłowodu w celu przesunięcia minimum dyspersji w kierunku fal dłuższych, czy też zapewnienia w przybliżeniu płaskiej, zbliżonej do zerowej charakterystyki dyspersyjnej w pewnym przedziale częstotliwości. Jednakże konsekwencją niskiej dyspersji jest wysoka skuteczność mieszania czterofalowego, zjawiska nieliniowego występującego między kanałami położonymi blisko siebie, w technologii WDM (zwielokrotnianie z podziałem długości fali, ang. *Wavelength Division Multiplexing*).W związku z tym w praktyce stosuje się światłowody z dyspersją małą, ale niezerową.

Ze wzoru na współczynnik dyspersji można wywnioskować, że zmniejszenie szerokości widma sygnału na wejściu światłowodu zmniejsza jego poszerzenie na końcu traktu. W związku z tym dąży się do minimalizacji szerokości linii widmowej laserów zasilających linię, przy czym istnieją techniczne możliwości uzyskania widma o szerokości około 10 MHz dla laserów z rozłożonym sprzężeniem zwrotnym (ang. *DFB – Distributed Feedback*) i laserów z rozłożonym odbiciem Bragga (ang. *DBR – Distributed Bragg Reflector*). Konstruuje się również systemy wielosekcyjne złożone z kombinacji różnych podstawowych rozwiązań. Są one stabilniejsze i dają się przestrajać w szerszym zakresie niż rozwiązania podstawowe.

Należy zwrócić uwagę, że nie można dowolnie zmniejszać szerokości widmowej sygnału świetlnego w światłowodzie, ponieważ sygnał użyteczny charakteryzuje się pewnym niezerowym widmem, co ogranicza od dołu wartość dyspersji na końcu traktu oraz nakłada teoretyczne ograniczenie na przepływność.

Dyspersję wypadkową systemu światłowodowego można ograniczać na różne sposoby, m. in.:

- stosując odcinki światłowodów o dyspersji przeciwnej do światłowodu głównego, co jednak pociąga za sobą wzrost tłumienia z powodu wydłużenia trasy sygnału, a także wyższego tłumienia światłowodów specjalnych;
- odwracając w środku traktu widmo sygnału użytecznego, wykorzystując w tym celu mieszanie czterofalowe i wydzielanie sygnału lustrzanego;
- poprzez światłowodowe siatki odbiciowe Bragga – wykorzystują one efekt rozłożonego odbicia składowych częstotliwościowych sygnału, co niweluje opóźnienie wywoływane przez dyspersję;
- wykorzystując nieliniowe właściwości światłowodów – transmisja solitonowa.

4. Transmisja koherentna – przemiana częstotliwości

Systemy z detekcją bezpośrednią bazują na modulacji amplitudy sygnału świetlnego, która charakteryzuje się niską wartością stosunku sygnału do szumu (ang. *SNR, Signal to Noise*

Ratio), podobnie jak w zakresie elektrycznym częstotliwości. Poza tym w optycznych systemach wielokanałowych trudno jest zapewnić odpowiednią selektywność pozwalającą na wydzielenie informacji użytecznej.

O wiele lepsze właściwości pod tym względem ma demodulacja koherentna. W tym systemie do detektora doprowadza się oprócz sygnału docierającego z nadajnika światło lokalnego lasera. Mieszanie odbywa się w sprzęgaczu światłowodowym. Dalsza obróbka superpozycji dwóch strumieni światła odbywa się już na drodze elektrycznej.

Prąd diody detekcyjnej jest zależny od mocy strumienia świetlnego padającego na jej strukturę, $I = R|E^2|$, gdzie R jest czułością diody, a $E = E_S + E_{LO}$, tzn. jest sumą składowych elektrycznych pola e-m światła sygnału użytecznego i generatora (lasera) lokalnego.

Niech składowe elektryczne będą wyrażone w następujący sposób:

$$E_S = \sqrt{2P_S}\cos(\omega_S t + \phi_S)$$
$$E_{LO} = \sqrt{2P_{LO}}\cos(\omega_{LO} t + \phi_{LO}) \tag{3}$$

gdzie indeks LO oznacza laser lokalny, S – sygnał użyteczny, P – moc sygnału, ω - pulsację chwilową, ϕ - fazę chwilową.

Wypadkowy prąd diody po zsumowaniu składowych elektrycznych sygnałów ma postać:

$$I = R\left(P_{LO} + P_S + 2\sqrt{P_{LO}P_S}\cos\left[(\omega_{LO} - \omega_S)\cdot t + \phi_{LO} - \phi_S\right]\right) \tag{4}$$

W wyniku zmieszania dwóch częstotliwości powstaje między innymi składowa o pulsacji pośredniej $\omega_{IF} = \omega_{LO} - \omega_S$. Odpowiednio dobierając pulsację ω_{LO} można przesuwać widmo sygnału użytecznego. Jeśli $\omega_{IF} = 0$, mówimy o detekcji homodynowej, gdyż częstotliwość środkowa sygnału użytecznego jest równa częstotliwości generatora lokalnego. Na wyjściu demodulatora otrzymujemy bezpośrednio sygnał użyteczny. Ponieważ utrzymanie ω_{IF} zbliżonego do zerowego jest bardzo trudne technicznie, z reguły przyjmuje się ω_{IF} w zakresie mikrofalowym, gdzie wymagana stabilność generatora lokalnego jest realnie osiągalna. Sygnał o częstotliwości pośredniej może już być przetwarzany elektrycznie, a poza tym osiągalna jest odpowiednia selektywność pozwalająca na pracę w DWDM – tzw. gęstym zwielokrotnieniem (ang. *Dense Wavelength Division Multiplexing*) lub w FDM – zwielokrotnieniem częstotliwościowym (ang. *Frequency Division Multiplexing*). Istnieje też możliwość korekcji charakterystyki dyspersyjnej traktu światłowodowego na drodze elektrycznej.

Sygnał o pośredniej częstotliwości jest następnie poddany działaniu filtru selektywnego odcinającego zakłócenia, szumy i niepożądane produkty mieszania, a następnie demodulowany, w wyniku czego uzyskuje się sygnał użyteczny odpowiadający informacji wejściowej nadajnika.

4.1. Kluczowanie amplitudy (ang. *ASK – Amplitude Shift Keying*)

Laser nadawczy pracuje przy stałym prądzie. Eliminuje to chirp sygnału. Modulacja odbywa się w modulatorze zewnętrznym. Po stronie odbiorczej sygnał liniowy mieszany jest z sygnałem z lokalnego generatora, w wyniku czego w diodzie detekcyjnej uzyskuje się sygnał o postaci:

$$I_S(t)=\begin{cases} I_S \cos\omega_{IF} t & dla \quad 1 \\ 0 & dla \quad 0 \end{cases} \tag{5}$$

Sygnał ten podawany jest na detektor obwiedni, na wyjściu którego otrzymuje się sygnał użyteczny.

4.2. Kluczowanie częstotliwości (ang. *FSK – Frequency Shift Keying*)

Jest ono podobne do kluczowania ASK. Wysoka czułość detekcji fazowej umożliwia w porównaniu z systemami detekcji bezpośredniej uzyskanie znacznie większych odległości między regeneratorami przy zachowaniu założonych parametrów transmisji: prędkości i stopy błędów. Daje też możliwość obniżenia mocy lasera nadawczego, co zapobiega efektom nieliniowym.

Najczęściej spotykana jest konfiguracja z dwoma filtrami równoległymi, z których jeden jest dostrojony do częstotliwości odpowiadającej symbolowi „1", a drugi dostrojony do częstotliwości odpowiadającej symbolowi „0". Dwa sygnały wyjściowe podawane są na wejście układu decyzyjnego, którym może być układ odejmujący. Znak sygnału na jego wyjściu mówi o symbolu nadawanym. Metoda ta jest skuteczna przy dużych dewiacjach, co zapobiega nakładaniu się widm pośredniej częstotliwości symbolów „0" i „1".

4.3. Kluczowanie częstotliwości z ciągłą fazą (ang. *CPFSK – Continous Phase Frequency Shift Keying*)

Metoda jest stosowana dla małych dewiacji, a dodatkową jej zaletą jest zwarte widmo (brak nieciągłości amplitudy w sygnale) pozwalające na ograniczenie niezbędnego pasma filtru pośredniej częstotliwości. Detekcja sygnału CPFSK opiera się na zmieszaniu go z tym samym sygnałem opóźnionym o czas τ. Układ zachowuje się jak dyskryminator częstotliwości. Opóźnienie linii τ jest proporcjonalne do czasu trwania jednego bitu T oraz odwrotnie proporcjonalne do indeksu modulacji m. Ważną zaletą metody jest BER o 3 dB lepsza od BER dla FSK.

4.4. Różnicowa modulacja fazy (ang. *DPSK, Differential Phase Shift Keying*)

Jedyną różnicą w stosunku do modulacji CPFSK jest zastosowanie innego τ linii opóźniającej, który jest równy czasowi trwania jednego bitu. Również elementarna stopa błędów jest taka sama.

4.5. Rozproszony odbiór fazowy (ang. *PDR, Phase Diversity Receivers*)

Pewną wadą odbioru heterodynowego z częstotliwością pośrednią jest zajmowanie przez sygnał podwójnego pasma w odbiorniku (dwie wstęgi). Poza tym przetwarzanie sygnału po przemianie odbywa się w paśmie mikrofalowym. Demodulacja PDR zachowuje czułość odbiornika heterodynowego, wymagając pasma takiego, jakie na sygnał użyteczny.

Najistotniejszym elementem, umożliwiającym działanie tego demodulatora, jest sprzęgacz optyczny, na wejście którego podane są sygnał wejściowy oraz światło lasera lokalnego, a z wyjść sprzęgacza pobierane jest n sygnałów wyjściowych o równych amplitudach i fazach przesuniętych o $2\pi/n$. Po odfiltrowaniu filtrami FDP i detekcji sygnały są sumowane, a wynik jest zależny tylko od wartości bitu informacji.

4.6. Perspektywy wykorzystania detekcji koherentnej

Czynnikami wpływającymi na trudności w zastosowaniu detekcji koherentnej są:

- powolne zmiany polaryzacji sygnału wejściowego, powodujące zanik użytecznego produktu przemiany przy stałej polaryzacji generatora lokalnego,
- problemy ze stabilizacją częstotliwościową emisji laserowej i dostatecznie małą szerokością widma,
- skomplikowana aparatura nadawczo–odbiorcza,
- szumy fazowe lasera lokalnego i sygnału użytecznego, które prowadzą do zmian pulsacji chwilowej fal świetlnych i poszerzenia ich widma.

Wydaje się, że wobec nie rozwiązanych do końca trudności technicznych oraz postępu w innych metodach zwiększania odległości między regeneratorami i zwiększania przepływności kanałów, transmisja koherentna nie zdominuje systemów telekomunikacji optycznej zapełniając nisze technologiczne, jak np. systemy rozsiewcze – telewizyjne.

5. Transmisja solitonowa

5.1. Zagadnienia związane z propagacją solitonów

Rozmywanie się impulsów optycznych w światłowodzie pod wpływem dyspersji jest jedną z głównych przeszkód w osiąganiu wysokich przepływności w traktach światłowodowych. Czoło symbolu kodującego informację w światłowodzie rozchodzi się z większą prędkością niż jego koniec, co związane jest z tym, że wąskie impulsy mają szerokie widmo, którego składowe są propagowane z różną prędkością. Stąd dążenie do ograniczenia widma transmisji optycznej.

Nie można jednak dowolnie ograniczać widma ze względu na ograniczenie przepływności informacyjnej, która jest wprost proporcjonalna do dostępnego pasma B. Wskazane jest zatem opracowanie takiej metody, która pozwalając na zachowanie kształtu impulsu świetlnego z jego względnie szerokim widmem umożliwi transmisję na duże odległości.

Światłowód kwarcowy charakteryzuje się szczątkową nieliniowością. Sumaryczny współczynnik załamania światła jest zależny od natężenia światła:

$$n = n_0 + n_2 i \tag{6}$$

gdzie n_0 jest współczynnikiem załamania przy natężeniu światła bliskim zero, zaś n_2 jest nieliniowym współczynnikiem załamania światła równym $3{,}18 \cdot 10^{-20}\ m^2/W$.

Interpretacja powyższego wzoru jest taka, że dla małych natężeń światła współczynnik załamania szkła jest mniejszy, czyli światło porusza się szybciej, niż gdyby miało wysokie natężenie. Stąd wynika, że krańce czasowe impulsu świetlnego mają widmo przesunięte ku czerwieni, a środek impulsu ma widmo przesunięte w kierunku fal niebieskich. Aby skompensować rozszerzenie widma, należy zastosować światłowód o dyspersji anomalnej. Występuje ona w światłowodach niemodyfikowanych[1] dla fal o długości powyżej 1310 nm.

Analiza matematyczna dowodzi, że impulsy o kształcie secansa hiperbolicznego – funkcji zbliżonej kształtem do krzywej Gaussa – oraz o odpowiedniej mocy, wprowadzone do światłowodu bezstratnego o określonej dyspersji i nieliniowości, są przenoszone na dowolną odległość bez zmiany kształtu. Fale te nazwano solitonami. Ponieważ rzeczywiste światłowody tłumią sygnał, konieczne jest stosowanie wzmacniaczy optycznych, które przywracają poziom mocy sygnału niezbędny do utrzymania optymalnego kształtu solitonu. Dla przyjętego czasu trwania impulsu moc solitonu jest ściśle określona i zmniejszenie jej powoduje, że sygnał traci właściwości solitonowe (spadek znaczenia czynnika nieliniowego we współczynniku załamania światłowodu), a zwiększenie mocy skutkuje generacją solitonów wyższego rzędu, co powoduje, że mniejsza moc zostaje dostarczona solitonowi podstawowemu,

[1] To znaczy światłowodów bez przesuniętej czy skompensowanej dyspersji.

poza tym solitony pasożytnicze oddziałują z solitonem zasadniczym zakłócając jego propagację.

Ważnym zagadnieniem jest generacja impulsów o odpowiednim kształcie. Jeśli kształt ten odbiega od solitonowego, część mocy zostaje rozproszona w postaci fal dyspersyjnych zwiększających szum w światłowodzie, a poza tym one też mogą oddziaływać z solitonem zakłócając jego propagację.

Wymóg odpowiedniego poziomu mocy powoduje, że sygnał solitonowy musi być dość często wzmacniany, częściej niż w systemach liniowych. Każde zastosowanie wzmacniacza optycznego powoduje wniesienie dodatkowego szumu spowodowanego wzmocnieniem emisji spontanicznej (ang. *ASE, Amplified Spontaneous Emission)*, co pogarsza SNR sygnału oraz powoduje fluktuację jego amplitudy, a przede wszystkim fazy, co przekłada się na chwilowe zmiany częstotliwości i w wyniku tego zmiany prędkości poruszania się solitonu, czyli skutkuje powstaniem jittera. Poszerzenie pasma można korygować pasywnymi filtrami pasmowoprzepustowymi, które dodatkowo filtrują szum ASE, co jednak może na dłuższych dystansach niedopuszczalnie zawęzić wypadkowe pasmo przepustowe traktu. Jitter może być redukowany przez okresową synchronizację ciągu impulsów solitonowych przez odtworzenie zegara transmisji i odpowiednie nim sterowanie dodatkowego modulatora włączonego w tor transmisyjny.

5.2. Perspektywy wykorzystania transmisji solitonowej

Obecnie łączność solitonowa jest jedną z intensywniej badanych możliwości przesyłania danych na wielkie odległości. Eksperymenty laboratoryjne dowodzą, że teoretycznie transmisja może się odbywać na nieograniczone odległości przy zastosowaniu jednakże niepraktycznego oprzyrządowania. Wymaga ona okresowego wzmacniania i synchronizowania impulsów świetlnych oraz utrzymywania ich optymalnego kształtu. Z tego powodu bardzo ograniczone są możliwości wielokanałowej transmisji WDM, opisanej w następnym rozdziale.

Cechą charakterystyczną systemu jest użycie bardzo krótkich, pikosekundowych impulsów o ściśle określonym, niełatwym do osiągnięcia kształcie oraz mocy, która dla solitonów podstawowych musi być utrzymana w zakresie 0,5 P_S – 1,5 P_S, gdzie P_S jest mocą optymalną. Charakter impulsowy transmisji (czas trwania impulsu jest ułamkiem czasu trwania bitu) szczególnie predestynuje technikę solitonową do transportu wielokanałowego z podziałem czasowym TDM, a w szczególności z optycznym podziałem czasowym OTDM.

Obecnie osiągane są przepływności ok. 100 Gb/s przy odległościach rzędu 2000 km, a z wykorzystaniem zwielokrotniania czasowego ok. 500 Gb/s.

6. Zwielokrotnianie optyczne w systemach transmisji światłowodowej

Zwielokrotnianie w sieciach optycznych pozwala znacznie zwiększyć przepływność zarówno dotychczas istniejącej infrastruktury optycznej, jak i nowych traktów w gwałtownie rozwijających się sieciach telekomunikacyjnych. Spowodowane to jest tym, że w klasycznej technice światłowodowej do transmisji danych wykorzystywany jest jeden kanał o pewnej szerokości widmowej. Aby zwiększyć liczbę kanałów w światłowodzie, stosuje się zwielokrotnianie w dziedzinie czasowej, częstotliwościowej lub mieszanej. Warto zwrócić uwagę, że teoretycznie możliwe jest wykorzystanie do 100 nm szerokości widma we współczesnych światłowodach o płaskiej charakterystyce dyspersyjnej. Z kolei na minimalną szerokość czasową impulsów ma wpływ znaczne poszerzenie jego widma[2] i zjawisko to udaje się kompensować dla impulsów o szerokości od rzędu 100 fs.

6.1. Zwielokrotnienie czasowe (ang. *TDM, Time Division Multiplexing*)

Transmisja ze zwielokrotnieniem w dziedzinie czasu jest szeroko stosowana w telekomunikacji od dawna, odkąd wprowadzono systemy typu PCM (ang. *Pulse Code Modulation*). Umożliwiły one jednoczesną transmisję wielu rozmów telefonicznych jedną parą przewodów na drodze elektrycznej. Odkąd jednak zaistniała potrzeba transmisji wielkich przepływności w sieciach szkieletowych czy też wielu programów telewizyjnych, szczególnie w standardzie HDTV (ang. *High Definition Television*), technicznie uzasadnione stało się zastosowanie zwielokrotnienia czasowego w traktach światłowodowych. Sygnały wejściowe mające ulec zmultipleksowaniu są formowane w ciąg impulsów znacznie krótszych niż czas trwania jednego bitu, a następnie każdy z nich jest wprowadzany do właściwej szczeliny czasowej sygnału świetlnego.

Ze względu na wykorzystanie jednego lub wielu generatorów impulsów świetlnych można wyróżnić dwie podstawowe konfiguracje multiplekserów optycznych. Ich działanie opiera się na wykorzystaniu generatora zegarowego o częstotliwości równej łącznej przepływności kanału.

- Zegar steruje generatorem impulsów optycznych, zbudowanym najczęściej na laserze impulsowym. Wyjście generatora dołączone jest do pasywnego rozdzielacza optycznego, którego n wyjść jest dołączonych do n optycznych linii opóźniających, każda o czasie opóźnienia $t_m = m\tau$, gdzie τ jest równe czasowi trwania jednej szczeliny czasowej, a m = 0...n-1. Wyjścia linii opóźniających dołączone są do n modulatorów

[2] Przypomnijmy, że idealny impuls o zerowej szerokości i nieskończonej amplitudzie (impuls Diraca) ma nieograniczone, płaskie widmo.

optycznych, z których każdy jest sterowany ciągiem danych odpowiedniego kanału wejściowego. Wyjścia modulatorów dołączone są do sprzęgacza optycznego, który zsumowane strumienie danych wprowadza do jednego toru światłowodowego. Przesłuchy między kanałami nie istnieją, jeśli szerokość impulsów jest kilkakrotnie mniejsza niż odstępy między nimi oraz nie ma jitteru między kanałami.

- Sygnał zegarowy jest podany na elektryczną linię opóźniającą z odczepami. Impulsy zegarowe są opóźniane o t_m na odczepie m. Szereg impulsów steruje n generatorów impulsów laserowych, które po poddaniu działania modulatorów optycznych, za pomocą sprzęgacza optycznego wprowadzane są do światłowodu. Oczywiście, istnieje możliwość modyfikacji polegająca na tym, że szereg generatorów optycznych jest synchronizowanych jednocześnie, a dopiero impulsy optyczne są opóźniane przed wprowadzeniem do modulatorów.

Konfiguracja z jednym generatorem impulsów optycznych ma podstawową zaletę polegającą na tym, że eliminuje problemy z utrzymaniem jednakowej długości fali wielu laserów i co za tym idzie - różnej prędkości impulsów należących do różnych kanałów na skutek istnienia dyspersji.

Newralgicznym elementem traktu OTDM jest demultiplekser. Wydzielenie pojedynczej szczeliny czasowej wiąże się z synchronizacją ze strumieniem o przepływności do wielu setek Gb/s. Istnieje wiele metod odzyskiwania strumieni danych z poszczególnych szczelin czasowych.

Generator impulsowy pracuje z częstotliwością odpowiadającą przepływności binarnej każdego z kanałów (względnie niską).

Demultipleksacja strumienia OTDM może się odbywać na drodze elektrycznej lub optycznej. Duże prędkości demultipleksacji można jednak uzyskać za pomocą demultiplekserów optycznych, w których wyróżnia się dwie klasy: sterowane elektrycznie i sterowane optycznie.

6.1.1. Sterowanie elektryczne

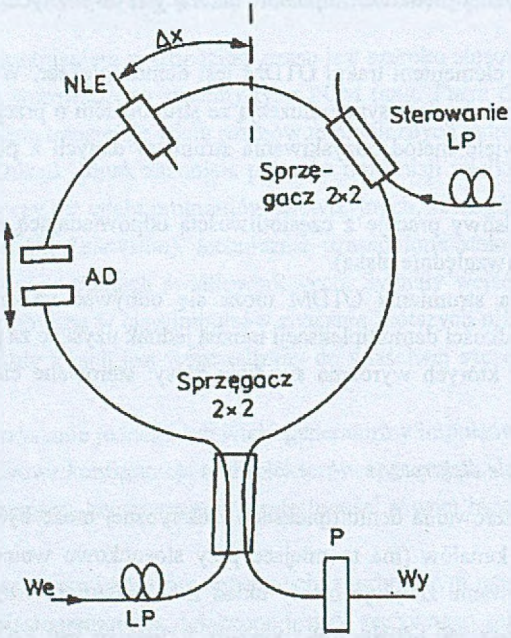
Jeśli prędkość sterowania demultipleksacji elektrycznej może być równa przepływności łącznej wszystkich kanałów (ma to miejsce przy stosunkowo wolnej multipleksacji elektrycznej), to zastosowanie znajduje prosty układ z modulatorem włączonym tylko na czas trwania szczeliny czasowej kanału, który chcemy wydzielić. Dla większych przepustowości stosuje się układy wielomodulatorowe. W tym typie zwielokrotnienia stosuje się liczbę kanałów będącą potęgą 2. Wejściowy sygnał OTDM podawany jest na wejście rozdzielacza, który wytwarza dwa identyczne strumienie świetlne. Oba są doprowadzone do modulatorów optycznych sterowanych sygnałem elektrycznym o częstotliwości podstawowej kanału B i napięciu $2V\pi$, gdzie $V\pi$ jest napięciem przełączającym dany modulator. Sygnały te są w

przeciwfazie. Wybór napięcia przełączania na poziomie dwa razy większym niż wymagane powoduje, że czas włączenia efektywnie redukuje się dwukrotnie, toteż w czasie włączenia modulator transmituje dwa kanały. Do wyjść modulatorów pierwszej pary podłączone są wejścia modulatorów pary drugiej, przełączanych również z częstotliwością B, ale napięciem Vπ z takim przesunięciem fazowym w stosunku do napięcia sterującego pierwszą parą przełączników, że pierwsza szczelina czasowa jest przenoszona na jedno z wyjść modulatora, gdy jest on włączony, a następna szczelina przenoszona jest na drugie wyjście, gdy modulator jest wyłączony.

6.1.2. Sterowanie optyczne

Największe prędkości demodulacji uzyskuje się przy zastosowaniu metod optyczno-mechanicznych oraz wykorzystujących zjawiska nieliniowe.

Jedną z metod optycznej demultipleksacji jest zastosowanie pętli światłowodowej z regulowanym opóźnieniem i elementem nieliniowym.



Rys. 6. Demodulator z elementem nieliniowym
Fig. 6. Demodulator with non-linear component

Strumień OTDM wprowadzony jest do pętli przez rozdzielacz w postaci dwóch strumieni świetlnych rozchodzących się naprzeciw siebie. Do pętli doprowadzony jest też ciąg sterujących impulsów świetlnych, które zmieniają właściwości elementu nieliniowego tak, że prze-

ciwbieżne strumienie użyteczne doznają różnego przesunięcia fazowego i tłumienia, co powoduje, że opuszczają demultiplekser portem wyjściowym. Wszystkie impulsy odpowiadające pozostałym szczelinom czasowym opuszczają demultiplekser drugim portem wejściowym. Regulacja opóźnienia pozwala na wybór demultipleksowanej szczeliny czasowej.

Rekordowe prędkości multipleksacji uzyskano do tej pory dzięki zastosowaniu mieszania czterofalowego - kolejnego zjawiska nieliniowego. Do sprzęgacza WDM doprowadza się wejściowy strumień OTDM o długości fali l_1 oraz ciąg impulsów świetlnych o długości l_2 z generatora odpowiadających ekstrahowanej szczelinie czasowej. Następnie wprowadza się sygnał zespolony do odcinka światłowodowego o efektywnym mieszaniu czterofalowym, po czym filtrem optycznym o częstotliwości środkowej odpowiadającej długości fali $2l_2$-$l_1$wydziela się użyteczne efekty mieszania. Odfiltrowany sygnał jest wzmacniany optycznie, po czym doprowadzany jest do detektora.

6.2. Zwielokrotnienie częstotliwościowe (*ang. WDM, Wavelength Division Multiplexing, FDM, Frequency Division Multiplexing*)

Pośród systemów z podziałem widma wyróżnia się zwielokrotnianie długości fali, tzw. gęste zwielokrotnianie długości fali oraz zwielokrotnianie częstotliwości. Mimo że pod względem koncepcyjnym są to systemy identyczne, zwykło się je jednak rozróżniać ze względu na rozwiązania techniczne stosowane w każdym z przypadków. Inne są też odległości między poszczególnymi kanałami informacyjnymi i o ile dla zwielokrotnienia WDM wyraża się je w długości fali i wynoszą około 0.8-1.6 nm, o tyle w przypadku DWDM i FDM odstępy między kanałami wyraża się częstotliwością i wynoszą typowo ok. kilkadziesiąt-kilkaset GHz i odpowiednio ok. kilka-kilkanaście GHz.

Różnie też odbywa się wprowadzanie mocy optycznej do światłowodu w zależności od odstępu między kanałami. W systemie WDM często stosuje się światło o szerokim widmie, które jest rozdzielane na pewną liczbę wycinków oddzielnie modulowanych zewnętrznie i następnie wprowadzane do traktu światłowodowego. Uzyskuje się je np. poprzez wprowadzenie do odcinka światłowodu długości rzędu kilku kilometrów o dużej dyspersji bardzo wąskich impulsów świetlnych o mocach rzędu 1 W, co na wyjściu daje widmo płaskie o szerokości ok. 200 nm. Można też modulować całe widmo, np. diody LED, a następnie wynik modulacji filtrować do odpowiedniego kanału transmisyjnego. Inną metodą jest użycie szeregu laserów, przy czym każdy z nich jest stabilizowany na częstotliwości odpowiadającego mu kanału. Strumienie generowane przez lasery są modulowane osobno, a następnie multipleksowane szeroko- lub wąskopasmowo, od czego zależą poziomy mocy poszczególnych strumieni na wyjściach demultipleksera.

Cechą charakterystyczną systemów z podziałem widma jest niezależność każdego z kanałów co do rodzaju modulacji i formatu sygnału. Daje to możliwość transmisji wielu różnych

typów danych jednym włóknem światłowodowym, np. sygnał telewizyjny razem z sygnałem SDH.

Podstawowym zagadnieniem jest tu odpowiednie przystosowanie tych sygnałów i wysterowanie nimi modulatorów kanałowych. Oczywiście, odstęp międzykanałowy musi być większy niż szerokość widma sygnału w kanale. W związku z tym modulacje szerokopasmowe ograniczają liczbę dostępnych kanałów. Również ograniczenie przesłuchów międzykanałowych wymaga zwiększenia między nimi odstępu.

Czynnikami ograniczającymi liczbę kanałów transmisyjnych są:

- zniekształcenia liniowe - występują, gdy filtry optyczne przepuszczają do kanału transmisyjnego część mocy optycznej do sąsiednich kanałów. Dodatkowo na zniekształcenia liniowe składa się odchylenie częstotliwości środkowej widma źródła światła;
- zniekształcenia nieliniowe - spowodowane są one nieliniowością i niedoskonałością toru transmisyjnego. Składają się na nie między innymi: rozpraszanie Ramana, wymuszone rozpraszanie Brillouina, skrośna modulacja fazy, mieszanie czterofalowe i in.;
- szerokość płaskiego odcinka dyspersyjnego światłowodów w trakcie;
- dostępność laserów o stabilizowanej i bardzo wąskiej charakterystyce widmowej.

6.3. Zwielokrotnienie kodowe (ang. *CDM, Code Division Multiplexing*)

Charakterystyczną cechą zwielokrotnienia kodowego jest zastępowanie każdego bitu informacji ciągiem impulsów (ang. chip) jednoznacznie charakteryzującym kanał, do którego informacja należy. Oznacza to, że ciąg wyjściowy po zakodowaniu ma bardzo szerokie widmo, stąd mówi się o multipleksacji CDM, że jest to zwielokrotnianie z rozproszonym widmem. Demultipleksacja możliwa jest dzięki ortogonalności wszystkich kodów w zbiorze słów kodowych. Powoduje to, że na wyjściu odbiornika dostrojonego do danego kanału pojawia się wyraźne maksimum odpowiadające bitowi informacyjnemu, podczas gdy odbiór sekwencji kodowej nie odpowiadającej kanałowi odbiornika generuje szum odcinany przez układ decyzyjny.

Zalety systemu CDM to między innymi:

- asynchroniczność kanałów składowych; jeśli sekwencje kodowe zastosowane w trakcie światłowodowym mają wyraźne maksima autokorelacji oraz zbliżone do zera współczynniki korelacji skrośnej (wzajemnej), odbiornik reaguje jedynie na sekwencję kodową przeznaczoną wyłącznie dla niego, a wszystkie przebiegi nie odpowiadające wybranemu kanałowi są zamieniane na pseudoprzypadkowy szum,
- ponieważ sygnał liniowy doprowadzany jest poprzez rozdzielacz do wszystkich odbiorników, które pełnią rolę demultipleksera, tzn. każdy z nich wydziela ten kanał, do

którego jest dostrojony, istnieje łatwość implementacji wielodostępu (ang. CDMA - *Code Division Multiple Access*),

- odporność na zakłócenia dzięki szerokopasmowemu charakterowi sygnału, oraz utrudniony podsłuch transmisji, szczególnie jeśli zastosuje się pseudoprzypadkową sekwencję kodującą, identyczną w nadajniku i odbiorniku - odpowiada to szyfrowaniu transmisji przez tzw. frequency hopping w systemach FDM,
- odporność na wielotorowość rozchodzenia się sygnału, która akurat w łączności optycznej ma mniejsze znaczenie, ale jest bardzo ważna w łączności radiowej, szczególnie komórkowej,

System CDM obarczony jest również wadami, do których można zaliczyć:

- szerokopasmowość powodującą konieczność użycia szerokopasmowych elementów toru światłowodowego, co skutkuje znaczącym wpływem szumów,
- tzw. "problem daleki-bliski" spowodowany tym, że nadajniki położone blisko odbiornika zakłócają sygnały pochodzące od nadajników dalekich; problem nie występuje w połączeniu punkt-punkt, ważny jest w systemach wielodostępnych,
- konieczność stosowania źródeł ultrakrótkich impulsów świetlnych, koniecznych do uformowania serii impulsów w słowach kodowych,
- trudność w konstrukcji zmiennych masek kodowych koniecznych do przestrajania odbiorników,
- problemy konstrukcji układów decyzyjnych czułych na femtosekundowe impulsy,
- konieczność zapewnienia jednakowej dyspersji światłowodowej w całym paśmie, w którym odbywa się transmisja CDM,

Należy wspomnieć o tym, że formowanie zestawu impulsów kodowych odpowiadających bitom informacyjnych może się odbywać w dziedzinie czasu, jak również w dziedzinie częstotliwości:

- formowanie w dziedzinie czasu opiera się na użyciu linii opóźniającej z odczepami, elektrycznej lub optycznej (przy wysokich przepływnościach), podobnych do instalacji używanych w zwielokrotnianiu czasowym;
- formowanie w dziedzinie częstotliwości - do tej kategorii zalicza się zastępowanie bitów informacji sekwencją pseudoprzypadkową o szerokim widmie.

Istnieje też metoda oparta na dekompozycji widma ultrakrótkich impulsów. Impulsy piko- lub femtosekundowe są modulowane informacją użyteczną, a następnie doprowadzone do układu zwierciadło - siatka dyfrakcyjna - soczewka - filtr - soczewka - siatka dyfrakcyjna - zwierciadło. Pierwsza siatka dyfrakcyjna dekomponuje światło impulsów do postaci rozbieżnej wiązki światła o rozszczepionym widmie. Soczewka tworzy obraz widma na filtrze, przy czym z reguły stosuje się filtrację fazową, która zachowuje energię światła. Filtr modyfikuje widmo sygnału w sposób charakterystyczny dla użytego kanału.

Przefiltrowane światło po przejściu przez drugą soczewkę pada na drugą siatkę dyfrakcyjną, która formuje równoległą wiązkę odpowiadającą impulsowi wejściowemu, ale z widmem zmodyfikowanym zgodnie z kodem kanału. Wiązka ta wprowadzana jest do sprzęgacza gwiazdowego, skąd łącznie z sygnałami pochodzącymi od innych nadajników wprowadzana jest do traktu światłowodowego. Po stronie odbiorczej znajduje się identyczny układ, przy czym filtr odbiorczy ma właściwości komplementarne do filtru nadawczego. Odbiornik o dopasowanym kodzie uzyskuje na wyjściu ostre impulsy odpowiadające bitom informacyjnym, podczas gdy odbiorniki nie dostrojone do nadajnika dadzą na wyjściu jedynie przebieg szumowy o niskiej mocy.

Panuje przekonanie, że ostatnia metoda pozwoli na demultipleksację danych ze strumieni o przepływnościach rzędu setek Gb/s.

Oddzielną kwestią jest prędkość przestrajania filtru w układach uniwersalnych, pozwalających na wybór dowolnego kanału informacyjnego.

Stosowane są tu panele ciekłokrystaliczne o czasie przełączania rzędu milisekund. Rozwiązaniem problemu prędkości przełączania może być użycie modulatorów elektrooptycznych i innych.

7. Sieci światłowodowe

Obecnie najszerzej stosuje się praktycznie łączność światłowodową o wielkich przepustowościach w relacji punkt-punkt. Związane jest to wysokimi cenami osprzętu technicznego, takiego jak: multipleksery/demultipleksery, przełącznice, lasery, modulatory itp. Ekonomicznie uzasadnione jest np. stworzenie traktu transoceanicznego, którego oba końce umieszczone są w centrach transmisyjnych, do których doprowadzone są strumienie danych tradycyjnymi technologiami (ATM, SDH, czy FDDI). Tam są one multipleksowane, wprowadzane do traktów WDM czy TDM, przesyłane na dalekie dystanse i na drugim końcu trasy demultipleksowane i dystrybuowane z powrotem do właściwych sobie warstw fizycznych. Użycie traktu WDM polega na wydzierżawieniu kanału przez operatora telekomunikacyjnego od właściciela linii. Operator dowolnie dysponuje przydzielonym kanałem mogąc połączyć np. dwa rejony sieci korporacyjnej, oddalone fizycznie nawet wiele tysięcy kilometrów.

Jednakże ograniczeniem przepływności takich linii są procesy konwersji elektrooptycznych, które zawsze mają miejsce przy korzystaniu z różnych mediów teleinformacyjnych, a w szczególności połączeniem wielu traktów gigabitowych. W związku z tym powstała koncepcja sieci optycznie przeźroczystych. Mają one bardzo szerokie pasmo przepustowe i transmisja przez nie może się odbywać z pełną prędkością typową dla optycznych traktów

punkt-punkt. W sieciach takich pojawia się zagadnienie wielodostępu, który wymaga rozwiązania problemów dotyczących

- unikania kolizji,
- odpowiedniej sygnalizacji automatyzującej procesy przełączania i rutingu,
- przełączania optycznego.

Komutatory optyczne, które są sercem przełączników w sieciach optycznie przeźroczystych, mogą przełączać w dziedzinach:

- czasu,
- częstotliwości (długości fali),
- przestrzeni (komutacja obwodów).

Wprowadza to wiele możliwości bardzo elastycznego wykorzystania pasma przepustowego sieci, komplikując jednocześnie ich budowę i sterowanie. W związku z tym odpowiedni sposób zwielokrotniania przetwarzany jest w blokach autonomicznych.

Np. komutacja czasowa, polegająca na zmianie szczeliny czasowej, zajmowanej przez dany kanał odbywa się w komutatorach opartych na rejestrach przesuwnych lub – w przypadku toru świetlnego – światłowodowych linii opóźniających.

Komutacja falowa, w celu uniknięcia konwersji elektrycznych, przeprowadzana jest m. in. przez przesuwanie widma z wykorzystaniem np. mieszania czterofalowego.

Przełączanie przestrzenne aktualnie wykonywane jest za pomocą modulatorów elektroabsorpcyjnych, matryc bramek optycznych, między innymi ciekłokrystalicznych, oraz elementów mechanicznych, takich jak ruchome pryzmaty lub lustra.

7.1. Architektura sieci

Powszechnie panującym trendem w projektowaniu współczesnych sieci optycznych jest ograniczanie rozmiaru stosu protokołów. Obecnie w sieciach szkieletowych często spotyka się kombinację: IP – ATM – SDH – światłowód. Wprowadza to dużą nadmiarowość w transmisji, dublowanie się mechanizmów detekcji i korekcji błędów, skomplikowane zarządzanie i sterowanie takiej sieci. Zwiększa też prawdopodobieństwo powstawania błędów i przyczynia się do wzrostu opóźnień. W każdej z tych warstw może istnieć odrębny mechanizm automatycznego wykrywania topologii sieci i wyboru tras. Powoduje to znaczne obciążenie urządzeń węzłowych oraz komplikację sprzętu i oprogramowania. W związku z tym istnieją tendencje do upraszczania stosu protokołów do IP – światłowód. Oczywiście, nakłada to na warstwę optyczną większość wymagań spełnianych przez dotychczas istniejące zestawy protokołów łącza danych.

Warstwa optyczna przejmie prawdopodobnie następujące funkcje:

- szybkie zestawianie dróg optycznych,
- zarządzanie pasmem,

- komutacja fal optycznych,
- protekcja i odtwarzanie w dziedzinie optycznej.

Przewiduje się, że sieć optyczna składać się będzie z zestawu systemów optycznie przeźroczystych, połączonych ze sobą optycznie oraz mediami optoelektrycznymi. Będą one odpowiednikami systemów autonomicznych, do których dostęp będzie zapewniony przez ściśle określoną liczbę bram, które umożliwią rozliczenia międzyoperatorskie oraz kontrolę poziomu jakości usług.

Konieczne jest zastosowanie tzw. opakowania cyfrowego (ang. *digital wrapper*) danych warstwy IP w systemie optycznym, co umożliwia monitorowanie sieci i zarządzanie nią, adresowanie strumieni danych, pomiar elementarnej stopy błędów oraz korekcję błędów na poziomie optycznym. Przewiduje się, że format ramki kanału optycznego będzie podobny do modułu transportowego STM-n w systemie SDH. W tym kierunku podążają prace standaryzacyjne ITU-T.

7.2. Topologia sieci

Obecnie najbardziej rozpowszechnione są łącza punkt-punkt. Stanowią one bazę rozwoju sieci optycznych. Przewiduje się, że dalszy rozwój topologii odbywać się będzie w następującym kierunku:

- wprowadzenie ograniczonej elastyczności sieci przez zastosowanie nieprzestrajalnych krotnic transferowych (OADM, ang. *Optical Add-Drop Multiplexers*) i przełącznic optycznych (OXC, ang. *Optical Crossconnectors*), a następnie użycie krotnic i przełącznic przestrajalnych,
- ewolucja liniowych łączy punkt-punkt w stronę systemów pierścieniowych (odpowiednik istniejący: FDDI),
- połączenia typu: pełna krata lub pełna krata między pierścieniami.

Topologia warstwy IP będzie w dużym stopniu odzwierciedlała topologię optyczną, przy czym węzły OADM i OXC będą z reguły tożsame z węzłami IP, jednak architektura sieci pozwalać będzie na rozdzielenie funkcji urządzeń obu warstw.

7.3. Sterowanie

Sterowanie jest niezbędnym procesem, umożliwiającym m. in. automatyczną reakcję na uszkodzenie sieci, zmianę topologii na skutek np. włączenia nowego węzła do systemu, zestawiania obwodów wirtualnych. Sprawne zarządzanie siecią wymaga istnienia systemu sygnalizacji podobnej do protokołów rutingu w sieciach IP. W przypadku wielkich przepływności występujących w mediach optycznych konieczna jest natychmiastowa reakcja na zdarzenia zachodzące w sieci. Ruch pakietowy, a szczególnie komórkowy np. wymaga czasów

przełączeń rzędu nanosekund (odpowiednik istniejący: ATM), co stawia wysokie wymagania elementom przełączającym toru optycznego.

Ograniczenie architektury sieci do dwóch warstw umożliwia zastosowanie sterowania opartego na przełączaniu opartym na etykietach (MPLS, ang. *MultiProtocol Label Switching*). Zastosowanie MPLS zwiększa elastyczność sieci dzięki istnieniu w nim mechanizmów równoważenia ruchu, poziomu jakości usług, ścieżek wirtualnych itp.

Szczególnie ważne jest ujednolicenie sterowania w przyszłych sieciach optycznych w związku z dużą liczbą producentów, z których każdy, jak wskazuje na to praktyka, stara się wprowadzać do systemu specyficzne, sobie właściwe standardy i rozszerzenia akceptowane przez urządzenia własnej produkcji. Jednakże oczekiwać należy, że poszczególne fragmenty sieci optycznej tworzone będą za pomocą infrastruktury jednego wytwórcy osiągając pełną elastyczność i wydajność. Łącza międzysieciowe będą wtedy realizowane za pomocą interfejsów o ograniczonej funkcjonalności, będącej niezbędnym minimum wynikającym z części wspólnej implementacji standardów.

Źródła wymieniają trzy modele sterowania przyszłych sieci optycznych:

- Model partnerski, gdzie obie warstwy: optyczna i IP są traktowane jak jedna wspólnie zarządzana i sterowana sieć. W tym przypadku rutery IP muszą posiadać wiedzę specyficzną dla sieci optycznych oraz musi istnieć protokół rutingu dynamicznego wspólnego dla obu warstw.
- Model nakładkowy – przykładem jest IP over ATM, zachowujący względną autonomię warstw łącznie z utrzymaniem zestawów protokołów rutingu i sygnalizacji.
- Model międzydomenowy będący hybrydą powyższych rozwiązań, gdzie informacje sterujące jednej z warstw mogą być przesyłane za pomocą mechanizmów warstwy komplementarnej. Wymiana informacji o trasach może być realizowana poprzez odpowiednio zaadaptowany istniejący protokół rutingu międzydomenowego, taki jak BGP (ang. *Border Gateway Protocol*).

8. Istniejące i planowane instalacje dalekosiężnych linii światłowodowych

Obecnie praktycznie wszystkie systemy o ekstremalnie dużych przepustowościach są realizowane w oparciu o medium światłowodowe. Decyduje o tym dostępne wielkie pasmo, 2000 razy większe niż całe pasmo radiowe, a także duża odporność na zakłócenia i stabilność wymagana w łączach profesjonalnych. Systemy transmisji optycznej zapewniają też wysokie bezpieczeństwo danych i niską stopę błędów. Kolejne projekty tzw. infostrad, jak np. projekt Internet 2, z założenia opierają się na łączach światłowodowych.

W konkretnych realizacjach łączy i sieci optycznych stosuje się różne systemy zwielokrotnień i modulacji w zależności od planowanego zasięgu i/lub przepustowości. Na wybór technologii ma również wpływ rodzaj użytkownika podłączonego do końca traktu lub węzła sieci.

Przykładem łącza optycznego wykorzystującego transmisję WDM jest komercyjny system podmorski TAT-12. Przepływność 5 Gb/s uzyskano na odległości 4200 km przy użyciu wzmacniaczy optycznych EDFA rozmieszczonych na kablu w odległościach rzędu kilkudziesięciu kilometrów.

Obecnie szereg właścicieli sieci szkieletowych, również w Polsce, modernizuje je poprzez zastępowanie urządzeń węzłowych elementami pracującymi w zwielokrotnieniu WDM. Jest to metoda ekonomiczna, gdyż większość korespondencji światłowodowych pozostaje niemodyfikowana. W ten sposób uzyskuje się skokowy przyrost przepływności sieci przy wykorzystaniu istniejących instalacji światłowodowych. Modyfikację sieci przeprowadza m. in. Telekomunikacja Polska SA za pomocą sprzętu firm Lucent Technologies i Alcatel. Firma Lucent dostarcza urządzenia węzłowe Wavestar OLS 400G realizujące warstwę sieciową na bazie SONET/SDH, co zapewnia automatyczną regenerację sieci po uszkodzeniu i wybór alternatywnych ścieżek wobec braku obecnie implementacji tej funkcji w warstwie DWDM. Przypuszcza się, wobec braku oficjalnych informacji ze strony TP SA, że zmodernizowanych będzie ok. 20 węzłów sieci szkieletowej. Nie wiadomo też, jaka część osiemdziesięciokrotnie zwiększonej w ten sposób przepływności zostanie przeznaczona na transmisję teleinformatyczną.

Istnieje też w Polsce inicjatywa „Polskiego Internetu Optycznego PIONIER", w której ramach ma nastąpić modernizacja sieci naukowo-akademickiej.

Inwestycje w postaci nowych traktów DWDM w Polsce zapowiedziały także konsorcja europejskie, takie jak Global One (właściciel: France Telecom), szwedzka Telia International Carrier, Infigate (dominujący udziałowiec: Deutsche Bank). Te inicjatywy powodują, że wielkie przepływności stają się coraz tańsze, przez co istnieje realna szansa na stopniowe obniżanie cen podstawowych usług telekomunikacyjnych, do których już obecnie należy szeroko pojęty dostęp do Internetu. Szacuje się (źródło: KMI), że w roku 1998 zainstalowano na świecie 46 mln km włókien światłowodowych, w 1999 r. – 63 mln km, a w 2000 – prawie 90 mln km. Część z nich będzie tworzyła ogólnoświatową sieć światłowodową ogólnie dostępną użytkownikom Internetu, a pozostałe włókna będą wydzierżawiane w formie między innymi tzw. ciemnych włókien.

W Europie istnieje projekt, częściowo zrealizowany, sieci optycznej opartej na głównym pierścieniu, do którego węzłów umiejscowionych w stolicach państw europejskich dołączane mają być pierścienie poboczne. Przepływności w gałęziach sieci mają dochodzić do 150 Gb/s (relacja Paryż – Bruksela – Amsterdam – Berlin). W traktach ma być stosowane zwielokrot-

nienie WDM, komutacja przestrzenno–falowa w węzłach, umożliwiająca dołączanie ruchu lokalnego oraz jego dynamiczną rekonfigurację. W światłowodach pierścieni transmitowane są cztery kanały optyczne odległe od siebie o 4 nm. Węzły rozdzielają każdy kanał optyczny do osobnego komutatora przestrzennego, a wynik komutacji formowany jest z powrotem w czterokanałową wiązkę. Straty mocy na rozdzielenie, komutację i sprzęgnięcie kompensowane są przez wzmacniacze optyczne.

9. Podsumowanie

Współczesna technika światłowodowa charakteryzuje się bardzo dużą dynamiką zmian, osiągane są kolejne, zdawałoby się, nieprzekraczalne granice wydajności, przepustowości i zasięgu. Istniejące aplikacje multimedialne potrafią jednakże nasycić każde łącze telekomunikacyjne, istnieje więc potrzeba przełamywania kolejnych barier technologicznych w celu wykorzystania teoretycznej przepustowości włókna kwarcowego wynoszącego wg twierdzenia Shannona ok. 350 Tbit/s. Obecnie trwające badania nad transmisją solitonową, zagęszczaniem kanałów w technologii DWDM, transmisji koherentnej oraz zastosowanie zaawansowanych sposobów modulacji jak QAM dają prawo przypuszczać, że ekstremalnie wysokie przepływności staną się dostępne w niedalekiej przyszłości. Podstawowym czynnikiem to umożliwiającym są badania podstawowe z zakresu fizyki materiałowej i kwantowej.

Poza tym istnieją koncepcje wykorzystania zjawisk obecnie uznawanych za szkodliwe, np. transmisja wspomagana dyspersją (ang. *dispersion supported transmission*) czy zagadnienia tzw. ściśniętych stanów kwantowych (ang. *squeezed state generation*).

Medium światłowodowe będzie coraz powszechniej wykorzystywanym nośnikiem informacji, przejmując w zastosowaniu przewody miedziane w zakresie od pętli abonenckich do największych łączy tranzytowych.

LITERATURA

1. Einarsson G.: Podstawy telekomunikacji światłowodowej. WKiŁ, Warszawa 1998.
2. Siuzdak J.: Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej. WKiŁ, Warszawa 1999.
3. Marciniak M.: Łączność światłowodowa. WKiŁ, Warszawa 1998.
4. Kaczor R.: http://www.technologie.pl/fiber.html.
5. Jajszczyk A.: Ewolucja sieci stacjonarnych. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 1/2001.

6. Perlicki K.: Rozwój telekomunikacyjnych sieci optycznych. Przegląd Telekomunikacyjny, nr 1/2001.
7. Pawełczyk P.: Szkielet coraz zdrowszy. PCKurier, nr 25/2000.

Recenzent: Dr inż. Rafał Cupek

Wpłynęło do Redakcji 15 marca 2001 r.

Abstract

There are most recent grand capacity optical systems described in this article. Light technology gives multiple growth of bit rate and range of data transmission. For that reason continuous quantum and material research is necessary. Growing telecommunication traffic forces working out new technologies permitting to overcome range and flow restrictions of telecommunication links.

In this paper basic techniques of light stream modulation and amplification are pointed and also minimization phenomenons which reducing link performance. Modern trends are described: coherent and soliton transmission. There are fundamental methods of multiplexation introduced. Issues of optical networks are summarized and also practical realization are presented.