

Rozdział 11

Multipleksacja w łączach optycznych

11.1. Wprowadzenie

Multipleksacja, inaczej zwielokrotnianie, to technika korzystania z łącza transmisyjnego przez wielu użytkowników jednocześnie. Jeżeli połączyliśmy użytkowników A i B, aby przesyłać między nimi informacje, i łączymy także użytkowników C i D z tym samym zamiarem, to obie pary mogą w pewnych wypadkach korzystać z tego samego łącza, jeżeli tylko uda nam się rozwiązać problem multipleksacji. W nowoczesnych rozwiązaniach liczba użytkowników jednocześnie transmitujących dane może sięgać dziesiątków milionów.

Terminy multipleksacja i demultipleksacja mają swój rodowód w określeniach angielskich *Multiplexing* i *Demultiplexing*. Techniki multipleksacji rozwinięto najpierw dla łączy wykorzystujących pasma radiowe i mikrofalowe. Rozwój i doskonalenie łączy światłowodowych wraz z wdrożeniem technik transmisji cyfrowej pozwoliły uzyskać nieznaną wcześniej szybkości transmisji. Opanowanie technik multipleksacji umożliwiło wykorzystanie pełnych przepustowości łączy przez miliony użytkowników.

Stosowane są rozmaite techniki zwielokrotniania – multipleksacji – transmisji sygnałów przez łącza optyczne, wymienimy je tutaj pokrótce.

W telekomunikacji elektronicznej przy transmisji sygnałów cyfrowych powszechnie stosuje się zwielokrotnianie z podziałem czasowym TDM (ang. *Time-Division Multiplexing*). Sygnał elektryczny sumujący informacje z wielu kanałów transmitowany jest następnie łącem optycznym. Po transmisji sygnały są rozdzielane i transmitowane dalej do końcowego odbiorcy. Ten typ multipleksacji opiszemy w pierwszej kolejności. Dla łączy optycznych zmodyfikowaną technikę multipleksacji oznaczono jako OTDM (ang. *Optical Time-Division Multiplexing*).

Łączem można także przesyłać jednocześnie kilka sygnałów o różnych częstotliwościach nośnych. Każdy z nich może być zmodulowany i nieść odrębną informację; jest to technika multipleksacji FDM (ang. *Frequency-Division Multiplexing*). W łączach światłowodowych odstęp – liczony w GHz – między nośnymi może być duży, wtedy technika zwielokrotniania nazywana jest WDM. Gdy częstotliwości nośne zbliżają się do siebie, „zagęszczają się”, to w tym przypadku stosujemy oznaczenie DWDM (ang. *Dense Wavelength-Division Multiplexing*).

Wybrane sieci optyczne, np. CATV, wykorzystują jedną nośną częstotliwość optyczną, oraz drugą częstotliwość nośną z pasma mikrofalowego. Ta druga, nazywana czasami podnośną, jest modulowana i niesie informację. W praktyce liczba częstotliwości podnośnych

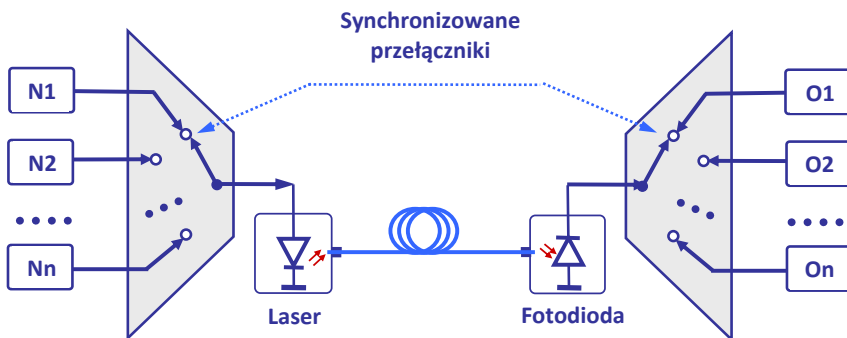
może dochodzić do kilkudziesięciu. Technika ta nazywana jest multipleksacją na podnośnych SCM (ang. *SubCarrier Multiplexing*).

Czytelnik, zapoznając się z materiałem tego rozdziału, zgłębi wiele oryginalnych i niezwykle pomysłowych rozwiązań technicznych. Pozwoliły one wykorzystać przesyłany światłowodem sygnał optyczny do transmisji ogromnych ilości informacji. Okazało się także, że opanowana technika jest przydatna nie tylko przy transmisji transoceanicznej, ale między procesorami w systemie komputerowym, a nawet między obwodami pojedynczego procesora.

11.2. Multipleksacja z podziałem czasu

11.2.1. Multipleksacja z podziałem czasowym TDM

Systemy telekomunikacyjne już wiele lat wcześniej musiały rozwiązać problem korzystania z linii transmisyjnej przez wiele par użytkowników. Zastosowano proste rozwiązanie, które jest używane także obecnie. Na rys. 11.1 pokazano układ wykorzystujący synchronizowane przełączniki do łączenia kolejno nadawców N_1, N_2, \dots, N_n z odbiorcami O_1, O_2, \dots, O_n . Umieszczone w nadajnikach pamięci, gromadzą cały czas informacje, które w określonym przedziale czasowym przesyłane są do odbiorcy. Warunki transmisji, czas jej trwania i kolejność połączeń mogą być dobierane indywidualnie. Istotny w tym przypadku jest czas transmisji sygnału między nadajnikiem a odbiornikiem. Synchronizacja przełączników może być problemem, jeśli czas przepływu sygnału staje się porównywalny z przydzielonym na transmisję przedziałem czasowym. Układy tego typu są wykorzystywane z powodzeniem w sieciach sensorów, przy transmisjach na krótkie odległości: w samochodach, w samolotach, wewnątrz budynków itp.

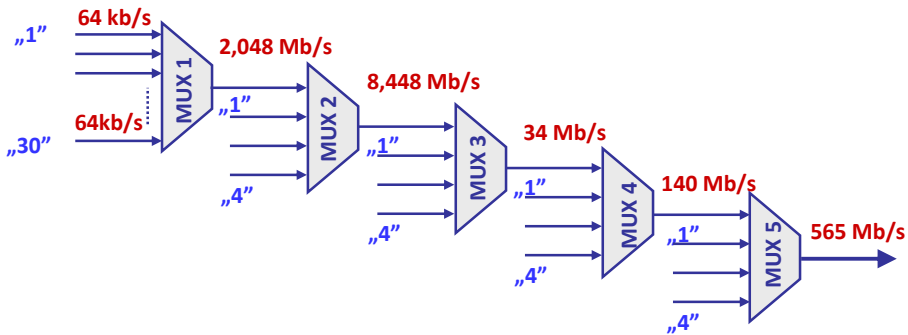


Rys. 11.1. Zasada wykorzystania łącza optycznego do transmisji danych między wieloma użytkownikami w układzie z synchronizowanymi przełącznikami.

Należy zauważyć, że – komplikując układ w niewielkim stopniu – można transmitować informacje w obie strony, wykorzystując do transmisji światłowodowej długości fal z obu okien: 1300 nm i 1550 nm.

Współczesne łącza światłowodowe umożliwiają transmisję informacji z prędkościami przekraczającymi 10^{13} b/s z impulsami krótszymi niż 20 ps. Zgodnie z regułami standaryzacji transmisji głosu ustalono, że dobrą jakość transmisji zapewnia kanał o przepływności 64 kb/s. Próbkowanie sygnału analogowego wykonywane jest z prędkością 8000 na sekundę, wartość sygnału podawana jest liczbą 8-bitową, w rezultacie otrzymujemy 64 kb/s. Przy tej prędkości na transmisję 1 bitu przeznaczona się 15 μ s. Łatwo zauważyć, że w tak długim czasie można przesłać dziesiątki tysięcy bitów.

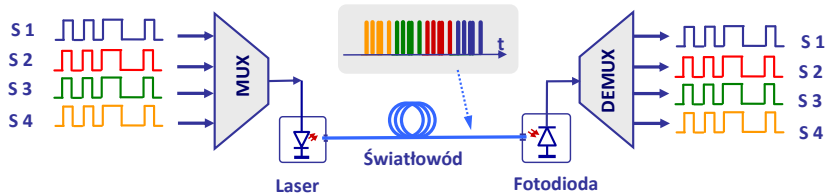
Podstawową zasadę procedury multipleksacji z podziałem czasowym TDM przedstawiono na rys. 11.2. Pokazano na nim sposób gromadzenia informacji przez kolejne warstwy multiplexerów MUX 1, MUX 2, ... Pierwszą warstwę tworzą multiplexery, do których dociera 30 kanałów z transmisją 64 kb/s. Informacje cyfrowe są zapamiętywane, dzielone i kolejno wysyłane w postaci pakietów z szybkością 2,048 Mb/s. Pięta z warstw gromadzi i porządkuje informacje z 7680 kanałów i wysyła je z prędkością 565 Mb/s. Wymienione dane zgodne są ze standardem przyjętym w Europie. Nieco inne standardy przyjęto dla USA i Kanady.



Rys. 11.2. Układ 5 warstw multiplexera pozwalający na transmisję sygnałów cyfrowych z kolejno $30 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4 = 7680$ kanałów.

Gdy prędkość transmisji łącza światłowodowego wynosi np. 40 Gb/s, lub jeszcze więcej, to proces zwielokrotniania trwa i liczba transmitowanych kanałów wielokrotnie przekracza 7680. Na rysunku 11.3 pokazano ideę układu łącza światłowodowego, którym transmitowane są pakiety bitów kolejno milionów nadawców.

Na rysunku struktury łącza wprowadzono w układzie nadajnika laser modulowany bezpośrednio. Fakt ten w procesie multipleksacji nie odgrywa roli. Sygnał zawierający informację może być z układu multiplexera kierowany do modulatora zewnętrznego, realizującego modulację dwustanową bądź wielostanową.



Rys. 11.3. Podstawowa struktura łącza światłowodowego, którym przesyłane są w określonych przedziałach czasowych pakiety bitów pochodzące od różnych nadawców, kierowane do różnych odbiorców.

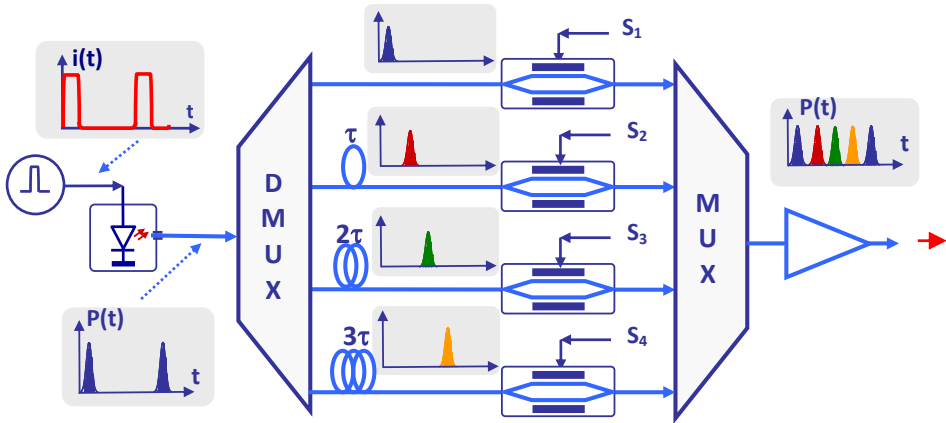
Problem organizacji informacji w przesyłanym pakiecie rozwiązywany jest w rozmaity sposób. Jednym z nich jest zastosowanie protokołu internetowego IP (ang. *Internet Protocol*), używanego powszechnie w Internecie przy korzystaniu z rozległych sieci, a także w przypadku lokalnych sieci komputerowych. IP jest protokołem komunikacyjnym, zawierającym zbiór reguł i kroków postępowania, które są automatycznie wykonywane przez urządzenia włączone do sieci, aby nawiązać połączenie i wymienić dane. Protokół IP jest zawodny, nie gwarantuje, że pakiety dotrą do adresata, nie zostaną podzielone, zachowają właściwą kolejność czy też nie zostaną zdublowane. Protokół sterowania transmisją TCP (ang. *Transmission Control Protocol*), korzystający z protokołu IP, zapewnia wiarygodne połączenia w warunkach korzystania z rozległych sieci komunikacyjnych. Gwarantuje on dostarczenie wszystkich pakietów w całości, z zachowaniem kolejności i bez duplikatów. Zainteresowanego problemem Czytelnika odsyłamy do publikacji poświęconych temu zagadnieniu.

11.2.2. Optyczna multipleksacja z podziałem czasowym OTDM

Opisana w poprzednim punkcie technika TDM multipleksacji z podziałem czasowym realizowana jest przez system elektroniczny, bez udziału systemu optycznego. Układy elektroniczne pracują z powodzeniem przy transmisji do 40 Gb/s. Zwiększenie prędkości działania układów elektronicznych napotyka na istotne trudności. Zastosowanie tzw. optycznej multipleksacji OTDM pozwoliło pokonać opisane trudności. Ideę tego rozwiązania przedstawiono na rys. 11.4.

Sygnal optyczny generowany jest przez laser w postaci rzadkiego szeregu optycznych impulsów o typowej dla transmisji światłowodem częstotliwości i o bardzo krótkim czasie trwania, rzędu kilku pikosekund. Częstotliwość repetycji impulsów mieści się zwykle w granicach $f_R = 2,5\text{--}40$ GHz. Sygnal optyczny z lasera dzielony jest przez dzielnik mocy DMX i kierowany do N gałęzi (na rysunku do czterech). W każdym torze umieszczono modulatory pracujące przy częstotliwości repetycji. Impulsy docierają do modulatorów w różnym czasie, gdyż w każdym torze czas transmisji impulsów jest inny. Opóźnienia w kolejnych torach wynoszą τ , 2τ , 3τ . Dla cyfry „1” impulsy transmitowane są z niewielkim tłumieniem przez modulator, a tłumione są dla cyfry „0”. Po modulacji układ multipleksera kieruje

strumieniu impulsów do portu wyjściowego. Wzmacniacz optyczny kompensuje straty mocy powstałe w procesie modulacji.



Rys. 11.4. Podstawowa konfiguracja układu łącz optycznych wykorzystującego optyczną multipleksację z podziałem czasowym OTDM.

Gęstość wyjściowego strumienia impulsów jest N -krotnie większa w porównaniu do generowanego przez laser. Prędkość transmisji informacji równa jest w tym przypadku $B_0 = Nf_R$. W układzie na rys. 11.4 dla $N = 4$ i dla $f_R = 40$ Gb/s, prędkość transmisji wyniesie $B_0 = 120$ Gb/s.

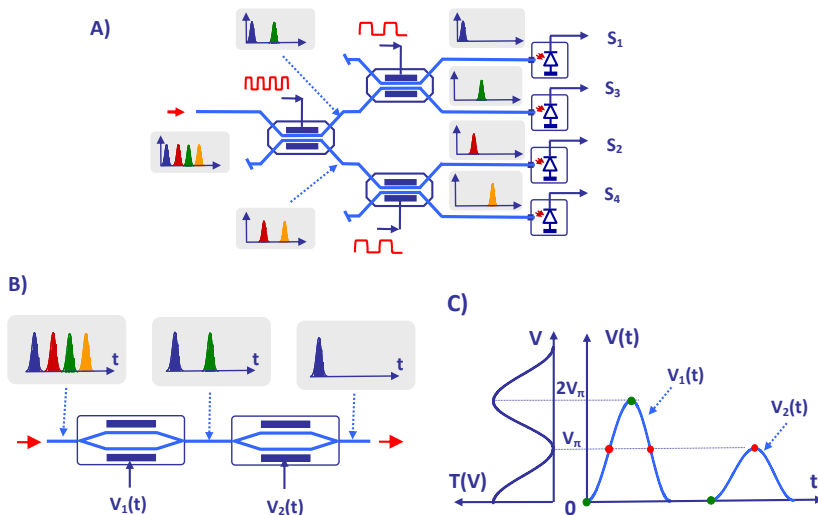
Opóźnienia impulsów ustalane są bardzo starannie przez dobór długości torów transmisyjnych w poszczególnych gałęziach. Zauważmy, że transmisja światłowodem na długości 1 mm trwa około 5 ps. Aby ustalić transmisje impulsów z dokładnością do 0,1 ps, należy długości torów ustalić z dokładnością do 20 mikrometrów. Techniki fotonicznych układów scalonych pozwalają uzyskać takie dokładności.

Opisywana multipleksacja OTDM wymaga użycia formatu *return-to-zero*. Wprowadza to warunek, który może być ograniczeniem w niektórych zastosowaniach.

Problem rozdzielenia strumieni informacji po stronie odbiorczej rozwiązywany jest różnie. Dwa popularne układy demultiplexerów pokazano na rys. 11.5.

Działanie układu z rys. 11.5A oparte jest na wykorzystaniu właściwości elektrooptycznych przełączanych sprzęgaczy kierunkowych. Pokazany na rysunku pierwszy sprzęgacz sterowany jest napięciem o częstotliwości Nf_R . Kieruje on impulsy nieparzyste do jednego portu wyjściowego, a impulsy parzyste do drugiego. Kolejna para przełączanych sprzęgaczy sterowana jest napięciami o częstotliwości dwukrotnie mniejszej. Sprzęgacze te kierują kolejne docierające impulsy na przemian do portów wyjściowych. W rezultacie do czterech fotodetektorów docierają strumienie odseparowanych impulsów, na rysunku oznaczone różnymi kolorami, na których modulatory nadajnika zapisały informacje.

Częstotliwość sygnałów sterujących sprzęgaczami przełączanymi musi być dokładnie wielokrotnością częstotliwości repetycji impulsów. Odpowiedni układ zegara po stronie odbiornika synchronizowany jest częstotliwością docierających impulsów. Wzrost częstotliwości repetycji f_R powyżej 10 GHz praktycznie uniemożliwia pracę pierwszego z przełączników, który sterowany jest sygnałem o częstotliwości wielokrotnie większej.



Rys. 11.5. Zasady działania demultiplekserów w przypadku multipleksacji OTDM. A) Jedno z możliwych rozwiązań układu demultipleksacji, w którym przełączane sprzęgacze dzielą strumień impulsów i kierują do fotodetektorów. B) Układ, w którym szeregowo połączone modulatory M-Z pełnią rolę zaworów sterowanych napięciem o częstotliwości f_R repetycji impulsów.

Inaczej problem selekcji wybranego strumienia impulsów rozwiązano w układzie z rys. 11.5B. Dwa szeregowo włączone modulatory M-Z pełnią rolę sterowanych przełączników. Oba modulatory sterowane są sygnałem sinusoidalnym o pulsacji repetycji impulsów f_R . Zasadę działania wyjaśnia rys. 11.5.C. Pierwszy z modulatorów M-Z sterowany jest napięciem $V_1(t)$, które zmienia się sinusoidalnie w granicach $0-2V_\pi$. W czasie okresu napięcie $V_1(t)$ dwukrotnie osiąga wartości, przy których transmisja jest maksymalna. Punkty te oznaczono kolorem zielonym. Impulsy, które w tych momentach dotrą do modulatora, będą transmitowane do portu wyjściowego. Dwukrotnie też napięcie $V_1(t)$ osiągnie wartości, przy których wartości współczynnika transmisji będą równe zero. Punkty te oznaczono kolorem czerwonym. Impulsy, które dotrą do modulatora w tych momentach, zostaną stłumione. Łatwo zaważyć, że modulator M-Z sterowany w opisany sposób selekcjonuje impulsy, pozwalając na transmisję nieparzystych, a tłumiąc parzyste. Zmiana fazy napięcia $V_1(t)$ o π odwróci sytuację, pozwalając na transmisję parzystych.

Kolejny modulator sterowany jest napięciem $V_2(t)$ zmieniającym się w granicach $0-V_\pi$. Także ten modulator pozwala na transmisję co drugiemu impulsowi (kolory czerwony i zielony). W rezultacie z czterech strumieni impulsów zostanie wyselekcjonowany tylko jeden. Pozostałe zostaną wytłumione. Zmieniając fazę sygnałów sterujących $V_1(t)$ i $V_2(t)$, dokonujemy wyboru strumienia. Jeśli przed opisaną parą modulatorów umieścić jeszcze jeden, sterowany napięciem sinusoidalnym zmieniającym się w granicach $0-4V_\pi$, można w opisany sposób wybrać jeden z ośmiu strumieni impulsów.

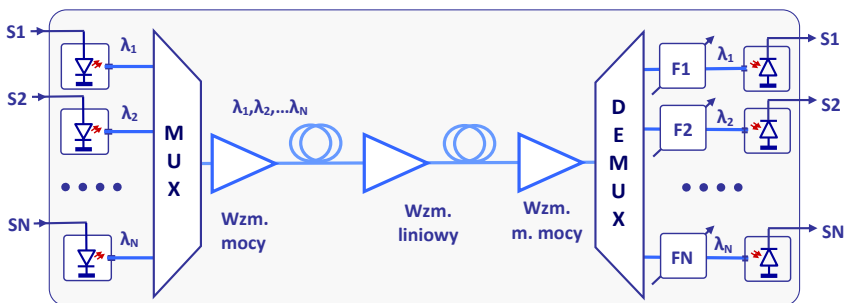
Opisana multipleksacja OTDM to jedno z kilku owocnych rozwiązań, prowadzących do zwiększenia szybkości transmisji optycznych łączy światłowodowych. Bibliografia tej techniki jest obszerna i zainteresowany Czytelnik znajdzie wiele bardzo ciekawych i pomysłowych rozwiązań układowych.

11.3. Multipleksacja WDM z podziałem długości fali

11.3.1. Podstawowe zasady multipleksacji WDM

Szybkość transmisji informacji łączem światłowodowym ograniczona jest kilkoma czynnikami, z których dwa grają główną rolę. Poważnym ograniczeniem jest szybkość przetwarzania danych przez system elektroniki obsługującej łącze, zarówno po stronie nadawczej, jak odbiorczej. Drugim czynnikiem ograniczającym jest dyspersja światłowodu. Ważnymi parametrami procesu transmisji są także, jak wiemy, pasmo pracy modulatora sygnału optycznego i pasmo detekcji fotodiody odbiornika. Jednakże pasma pracy obu tych układów mogą być na tyle duże, że nie powodują ograniczeń.

Uniwersalnym i radykalnym sposobem powiększenia przepływności B_0 [b/s] transmisji informacji okazała się niejednokrotnie wspomniana już technika multipleksacji WDM z podziałem długości fali. Ideę tego rozwiązania przedstawia układ pokazany na rys. 11.6. Układ jest systemem transmisyjnym umożliwiającym jednoczesne przesyłanie N strumieni informacji oznaczonych tutaj jako S_1, S_2, \dots, S_N .



Rys. 11.6. Podstawowa struktura łącza optycznego z multipleksacją WDM. S_1, S_2, \dots, S_N – strumień informacji. F_1, F_2, \dots, F_N – filtry optyczne.

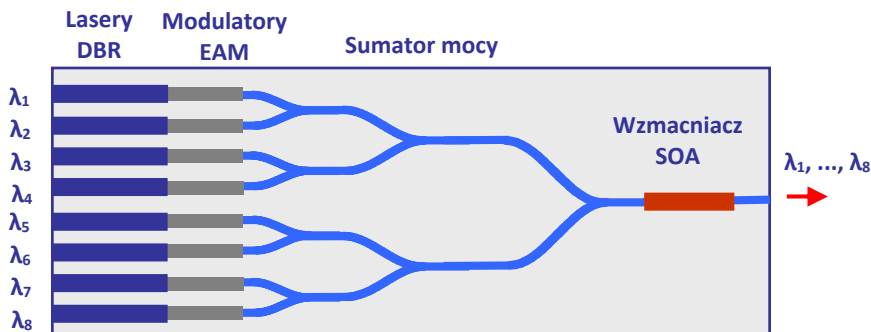
W układzie łączy pracuje kilka, a często kilkadziesiąt nadajników optycznych, na rysunku przedstawionych jako lasery modulowane bezpośrednio. Użycie modulatorów zewnętrznych nie zmienia zasady działania systemu. Każdy z nadajników drogą modulacji nanosi strumień bitów na sygnał optyczny. Moce sygnałów optycznych sumowane są przez multiplekser MUX i po wzmocnieniu kierowane do światłowodu. W najprostszym przypadku transmitowane sygnały optyczne wzmacniane są kilkakrotnie przez wzmacniacze liniowe zanim dotrą do systemu odbiorczego. Układ demultiplekserski DEMUX rozdziela sygnał optyczny do odbiorników. Umieszczone filtry optyczne F_1, F_2, \dots, F_N usuwają zbędne w danym torze składniki, ułatwiając proces fotodetekcji i usunięcie fali nośnej. Opisany w rozdziale 10 proces odzyskiwania przesyłanego strumienia impulsów pozwala na odtworzenie w porcie wyjściowym – z niewielkimi błędami – sygnału skierowanego do nadajnika.

Prędkość transmisji B_0 informacji całego systemu jest sumą prędkości transmisji informacji dla kolejnych długości fal, co pokazuje zależność (11-1).

$$B_0 = B_{01}(\lambda_1) + B_{02}(\lambda_2) + \dots + B_{0N}(\lambda_N); \quad (11-1)$$

Częstotliwości sygnałów optycznych generowanych przez lasery nadajnika nie są przypadkowe, ale ich wartości tworzą ciąg opisany odpowiednimi uregulowaniami. Wartości generowanych częstotliwości są kontrolowane i stabilizowane w czasie pracy.

Struktura systemu nadawczego może być różnaita, od bardzo prostych do bardzo złożonych. Na rys. 11.7 pokazano prostą strukturę i układ elementów nadajnika optycznego, w którym pracuje równolegle osiem laserów DBR (ang. *Distributed Bragg Reflector*). Lasery generują różne długości fali i dlatego wykonano je z mechanizmem przestrajania. Dwusekcyjne lasery tego rodzaju opisano w rozdziale 3, punkt 3.4.6, rys. 3.17B.



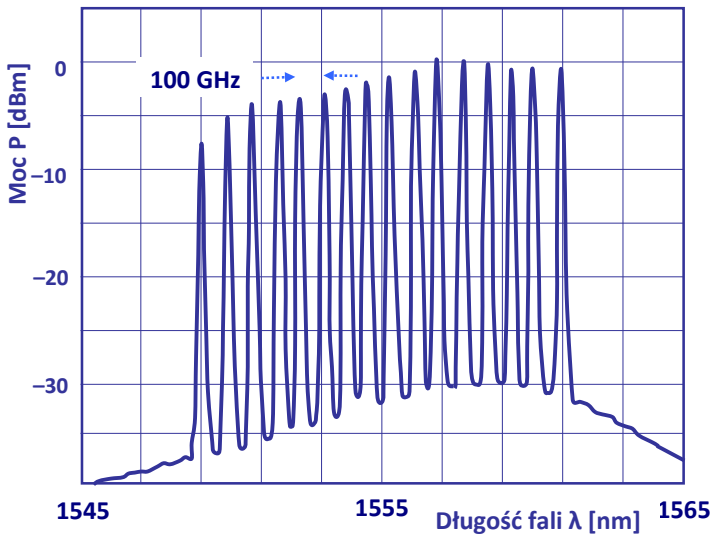
Rys. 11.7. Struktura układu scalonego nadajnika optycznego z 8 laserami, modulatorami elektroabsorpcyjnymi, z sumatorem mocy w roli multiplekserski i wzmacniaczem SOA.

W układzie z rys. 11.7 generowane sygnały optyczne są modulowane przez zewnętrzne modulatory elektroabsorpcyjne. Możliwe jest także prostsze rozwiązanie, z bezpośrednią

modulacją mocy lasera przez modulację jego prądu. Po modulacji sygnały sumowane są w sumatorze mocy skonstruowanym tutaj z rozgałęzień Y światłowodów.

Opisywany układ scalony jest rozwiązaniem tanim, prostym w użyciu, jednakże obarczonym istotną wadą. Rozgałęzienie Y jest trójwrotnikiem odwracalnym i dlatego poziom mocy lasera po transmisji przez kolejne rozgałęzienie maleje dwukrotnie. Do światłowodu wyjściowego doptywa jedynie 1/8 z mocy na wyjściu modulatora. Dlatego w układzie wprowadzono półprzewodnikowy wzmacniacz optyczny SOA, który zapewnia pożądany poziom mocy przed transmisją światłowodem. Inne rozwiązania przedstawione zostaną w kolejnym punkcie.

Na rys. 11.8 pokazano charakterystykę widmową grzebienia 16 laserów pracujących w nadajniku wykorzystującym multipleksację WDM. Częstotliwości kolejnych, sąsiednich laserów oddalone są od siebie o 100 GHz. Lasery nadajników systemów WDM winny umożliwić dostrojenie do żądanej częstotliwości. W konstrukcjach układów scalonych stosuje się zwykle wspomniane wyżej dwu- lub trójsekcyjne lasery DBR o paśmie przestrajania 2–6 nm. Charakterystyka z rys. 11.8 wskazuje stosunkowo duże różnice między poziomami mocy, dochodzące do 4 : 1, co w skali logarytmicznej odpowiada 6 dB. W takich przypadkach kształtowane są charakterystyki wzmocnienia wzmacniaczy w taki sposób, aby skorygować i wyrównać poziomy mocy.



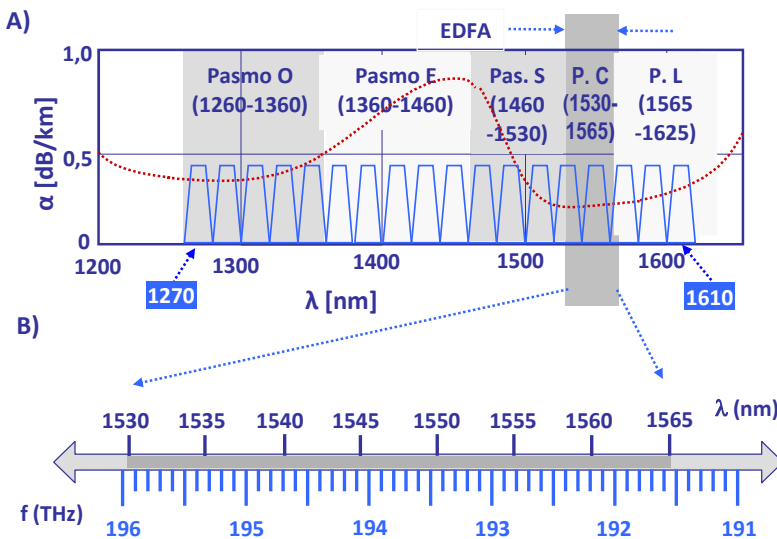
Rys. 11.8. Charakterystyki widmowe grzebienia 16 laserów pracujących w nadajniku łącza optycznego z multipleksacją WDM, z odstępem 100 GHz.

Na rys. 11.9A pokazano fragment charakterystyki współczynnika tłumienia α [dB/km] dla światłowodu w obu oknach transmisji dla zakresu długości fal $\lambda = 1200\text{--}1650$ nm. Zakres ten podzielono na pasma: O, S, E, C i L. Pasma wykorzystywane w technice WDM to ponad

50 THz, w zakresie od 1260 do 1625 nm. Na rysunku pokazano, jak podzielono ten zakres na 18 podpasów o szerokości 20 nm każde.

Technika WDM rozwijała się w ostatnich 25 latach bardzo intensywnie. Umożliwiło to zwiększenie liczby kanałów przez zmniejszenie ich szerokości. Przyjęto kolejno szerokości kanałów – idąc od najszerszych – od 3,2 nm/400 GHz, poprzez 1,6 nm/200 GHz, następnie 0,8 nm/100 GHz i dalej 0,4 nm/50 GHz oraz 0,2 nm/25 GHz.

Na rys. 11.9.B pokazano osie długości fali i częstotliwości dla pasma C (1530–1565 nm), odpowiadającego szerokością pasmu wzmocnienia wzmacniacza EDFA. Z tego względu pasmo to jest bardzo chętnie wykorzystywane w rozmaitych systemach łączy światłowodowych. Pasma to podzielono na podpasma oddalone o 100 GHz/0,8 nm. Technika multipleksacji dla odległości częstotliwości nośnych nieprzekraczających 200 GHz oznaczana jest jako DWDM.



Rys. 11.9. Ilustracja podziału pasma transmisji światłowodem na podpasma w multipleksacji WDM. A) Podział pasm O, E, S, C i L na 18 podpasów o szerokości 20 nm. B) Pasma C (1530–1625 nm) odpowiadające pasmu wzmocnienia wzmacniacza EDFA, podzielone na grzebień częstotliwości oddalonych o 100 GHz/0,8 nm.

Zestawienie wybranych parametrów dla obu technik multipleksacji: WDM i DWDM pokazano w tabeli 11.1.

Jest oczywiste, że zwiększanie liczby kanałów zmusza konstruktorów do komplikowania układów łączy. Jeżeli wybrano kanały poza pasmem C, to pojawiają się problemy z równomiernym wzmacnianiem wszystkich składników transmitowanego sygnału. W niektórych rozwiązaniach transmitowane sygnały rozdziela się na dwie grupy: dolną i górną połowę pasma. Obie grupy wzmacniane są oddzielnie i następnie łączone.

Zwiększanie liczby kanałów skutkuje wzrostem transmitowanej mocy. Grozi to pojawieniem się efektów nieliniowych, między innymi modulacji skrośnej powodującej przesłuchy między kanałami.

Tabela 11.1. Zestawienie niektórych właściwości multipleksacji WDM i DWDM

| Parametr | WDM | DWDM |
|--------------------------------|--|--|
| Odległość między kanałami | Od 1550 nm do 1300 nm, od 20 nm do 1,6 nm | 1,6 nm/200 GHz i mniej |
| Liczba możliwych kanałów | Od 2 do 18 | Kilkaset |
| Wykorzystanie pasma | Niewielkie | Intensywne |
| Filtry | Filtry szerokopasmowe | Filtry wąskopasmowe |
| Kontrola częstotliwości lasera | Bez stabilizacji temperatury | Stabilizacja temperatury i częstotliwości |
| Zastosowanie | Transmisja krótkodystansowa | Transmisja na średnie i duże odległości |

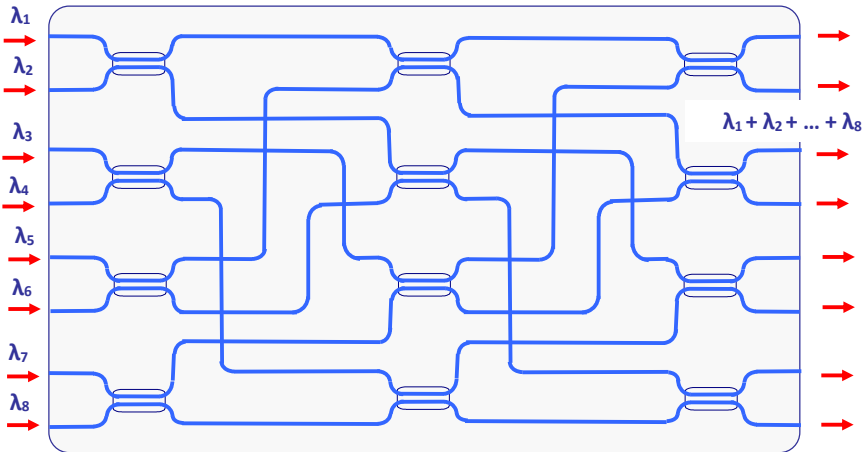
W wielu publikacjach szacuje się granicę przepływności transmisyjnego systemu WDM. Szacunki dają rozmaite rezultaty, a obliczona granica przesuwana się w miarę rozwoju techniki. Kilka lat temu dokonano takiego oszacowania. Przyjęto mianowicie, że w paśmie 300 nm można zmieścić 1500 kanałów przy odstępach między kanałami 0,2 nm, co odpowiada pasmu około 25 GHz. Stosując modulację wielostanową i detekcję koherentną, można uzyskać prędkość transmisji pojedynczego kanału równą 100 Gb/s. Otrzymuje się wtedy wartość całkowitej przepływności systemu transmisyjnego równą 150 Tb/s. Jest to oczywiście oszacowanie przybliżone. Praktyka wykazała, że tradycyjna technika multipleksacji DWDM ma swoje naturalne ograniczenia.

11.3.2. Układy multipleksacji i demultipleksacji

Układy multipleksacji i demultipleksacji w systemach WDM konstruowane są w rozmaity, często bardzo pomysłowy sposób. Bardzo często stosowane są w nich sprzęgacze kierunkowe i światłowodowe filtry Bragga. Kilka interesujących rozwiązań przedstawimy w tym punkcie. W oddzielnym punkcie zostaną opisane falowodowe siatki dyfrakcyjne.

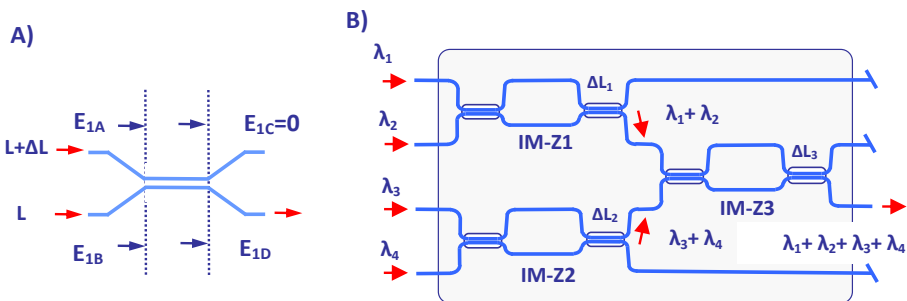
Na rys. 11.10 pokazano prosty układ multipleksera wykonany z 12 identycznych sprzęgaczy kierunkowych. Sygnał z każdego nadajnika optycznego dzielony jest przez kolejne sprzęgacze na dwie, następnie cztery i osiem równych części. Sprzęgacze wykonują, obok dzielenia, funkcje sumowania mocy sąsiednich nadajników, następnie sąsiednich par, a w końcu sąsiednich czwórek. W rezultacie w ośmiu portach wyjściowych pojawia

się równo podzielony sygnał z ośmiu nadajników optycznych. Opisana struktura nazywana jest multiplexerem w układzie gwiazdy. W praktycznie realizowanych układach moc dzielona jest równomiernie, a wnoszone straty są niewielkie. Układ gwiazdy stosowany jest w wielu strukturach sieciowych.



Rys. 11.10. Multiplexer w układzie gwiazdy, ze sprzęgaczami sumującymi sygnały z 8 nadajników i dzielący je między 8 torów wyjściowych.

Układ przedstawiony na rys. 11.11 jest także multiplexerem wykorzystującym sprzęgacze kierunkowe, ale o strukturach interferometrów Macha-Zehndera. Jego zadaniem jest zsumowanie mocy czterech nadajników i skierowanie do jednego portu wyjściowego.



Rys. 11.11. Zasada działania multiplexera z interferometrami Macha-Zehndera IM-Z. A) Ilustracja sumowania sygnałów w pojedynczym sprzęgaczu kierunkowym. B) Układ sumujący sygnały z czterech nadajników optycznych o długościach fal λ_1 , λ_2 , λ_3 i λ_4 .

Dokładny opis interferometru Macha-Zehndera wykorzystujący macierze transmisyjne przedstawiono w punkcie 8.4.3. Ważne zastosowania tego przyrządu opisano w rozdziale 9. Aby wyjaśnić działanie interferometru M-Z w układzie multiplexera, trzeba wrócić do równania (9-7), zapisanego teraz w formie (11-2). Sprzęgacz pokazano na rys. 11.11A z nieco zmienionymi oznaczeniami. Równanie opisujące transmisję sygnału można teraz napisać:

$$\begin{bmatrix} E_{1C} \\ E_{1D} \end{bmatrix} = \Gamma \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1A} \\ E_{1B} \end{bmatrix}; \quad (11-2)$$

Dla sprzęgacza przyjęto warunki pełnej symetrii i równego podziału mocy. Współczynnik zespolony Γ uwzględnia tłumienie i przesunięcie fazy sygnałów propagowanych w torze sprzęgacza. W portach A i B pojawił się sygnał pochodzący z tego samego źródła o długości fal λ_1 , o amplitudach natężenia pola elektrycznego E_{1A} i E_{1B} . Przyjmujemy, że moduły obu amplitud są sobie równe.

Z równania (11-2) można obliczyć amplitudy E_{1C} i E_{1D} sygnałów w portach wyjściowych sprzęgacza i zapisać w postaci zależności (11-3).

$$E_{1C} = \Gamma(E_{1A} + jE_{1B}); \quad (11-3)$$

$$E_{1D} = j\Gamma(E_{1A} - jE_{1B});$$

$$|E_{1A}| = |E_{1B}|.$$

Jeśli argumenty amplitud E_{1A} i E_{1B} są sobie równe, to w portach wyjściowych $|E_{1C}| = |E_{1D}|$ i moce wyjściowe są także równe sobie. Aby skierować sygnał do jednego tylko portu, należy zróżnicować argumenty, różnicując długości L i $L+\Delta L$ obu ramion interferometru. Efektem tego zróżnicowania jest różnica faz $\Delta\varphi$ obu amplitud E_{1A} i E_{1B} obliczona dla długości fali λ_1 (n jest tutaj współczynnikiem załamania ośrodka wypełniającego światłowód).

$$\Delta\varphi_{\lambda_1} = \frac{2\pi n}{\lambda_1}(L + \Delta L) - \frac{2\pi n}{\lambda_1}L = \frac{2\pi n\Delta L}{\lambda_1}; \quad (11-4)$$

Dobierając wartość różnicy ΔL można skierować moc sygnału optycznego do jednego albo drugiego ramienia. Okresowość funkcji trygonometrycznych powoduje, że rozwiązań jest wiele. Różnica faz $\Delta\varphi$ zmienia się z długością fali. I tak, zmieniając długość fali z λ_1 na λ_2 zgodnie z (11-5),

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \delta; \quad \delta \ll \lambda_1, \quad (11-5)$$

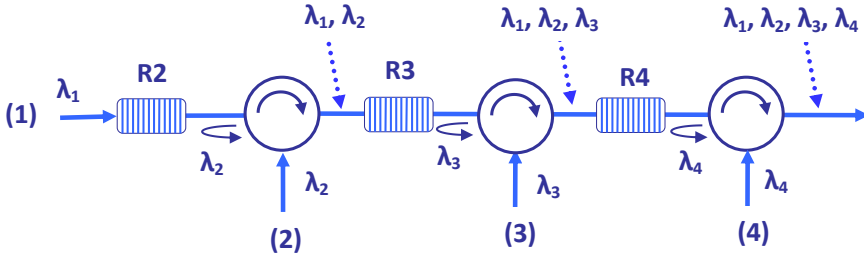
zmienimy różnice między fazami sygnałów obu długości fal:

$$\Delta\varphi_{\lambda_1} - \Delta\varphi_{\lambda_2} \approx \frac{2\pi n\Delta L}{\lambda_1} \frac{\delta}{\lambda_1}; \quad (11-6)$$

Jak widać z powyższego równania, w obecności dwóch sygnałów optycznych o długościach fal różnych o δ można tak dobrać ΔL , aby oba sygnały skierować do jednego z ramion bądź je rozdzielić między porty wyjściowe. Układ multiplexera z rys. 11.11B, wykorzystując trzy

interferometry M-Z o dobranych wartościach ΔL , sumuje z niewielkimi stratami sygnały z czterech nadajników o czterech długościach fal.

Multiplexer o innej zasadzie działania pokazano na rys. 11.12. W układzie wykorzystano właściwości cyrkulatorów optycznych i światłowodowych siatek Bragga FBG.



Rys. 11.12 Układ multiplexera z filtrami wykonanymi z wykorzystaniem siatek Bragga i cyrkulatorów. R2, R3 i R4 rezonansowe filtry zaporowe dla długości fal: λ_2 , λ_3 i λ_4 .

Właściwości siatek Bragga opisano w rozdziale 2 w punkcie 2.5.3. Siatka Bragga jest elementem zbudowanym na bazie światłowodu, w którym wywołano okresowe zmiany współczynnika załamania rdzenia. Zmiany współczynnika załamania n wokół średniej wartości n_0 powodują powstanie niewielkich odbić sygnału optycznego. Dla pewnych długości fali niewielkie odbicia sumują się, ponieważ ich fazy są zgodne, a wtedy światłowód odbija cały, albo prawie cały, sygnał optyczny o tej długości fali. Przyjmując, że okres perturbacji współczynnika załamania rdzenia równy jest Λ [nm], to pełne odbicie wystąpi dla długości fali λ_R opisanej wyrażeniem (11-7):

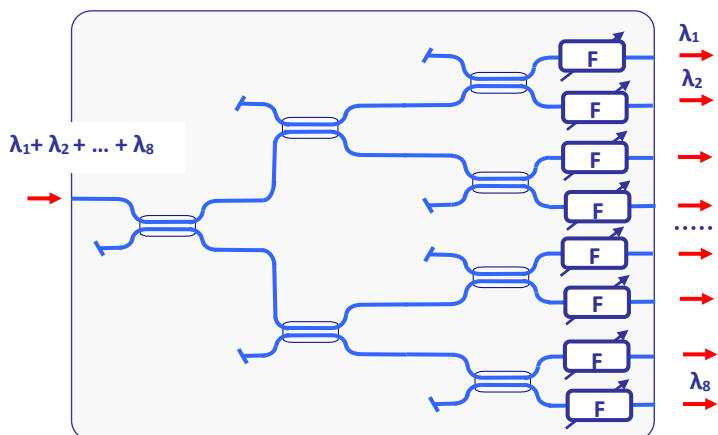
$$\lambda_R = 2n_0\Lambda. \quad (11-7)$$

Dla długości fali λ_R siatka Bragga zachowuje się jak wąskopasmowy, rezonansowy filtr zaporowy. Transmisja dla innych długości fali odbywa się bez zakłóceń. Okres Λ [nm] perturbacji współczynnika załamania można w procesie wytwarzania dokładnie kontrolować. Oznacza to, że można zbudować filtry na długości fali potrzebne w procesie multipleksji.

W układzie przedstawionym na rys. 11.12 do czterech portów wejściowych (1)–(4) doprowadzono sygnały optyczne o długościach fal $\lambda_1 - \lambda_4$. Przed cyrkulatorami umieszczono rezonansowe filtry FBG: R2, R3 i R4. Sygnał o długości fali λ_1 doprowadzony do portu (1) płynie bez zakłóceń do portu wyjściowego. Sygnał o długości fali λ_2 doprowadzony do portu (2) płynie początkowo do portu (1), by po odbiciu od filtra R2 zawrócić do portu wyjściowego. Podobnie sygnały doprowadzone do portów (3) i (4) odbijane są przez filtry R3 i R4, by trafić do portu wyjściowego. W rezultacie sygnały optyczne sumowane są z niewielkimi stratami.

Zaletą opisywanego układu może być możliwość umieszczenia kolejnego portu wejściowego wraz z cyrkulatorem i filtrem FBG w różnych miejscach toru transmisyjnego.

Zadaniem układu demultipleksera jest rozdzielenie transmitowanych światłowodem strumieni informacji naniesionych na optyczne fale nośne o różnych długościach fal. Prosty układ demultipleksera przedstawiono na rys. 11.13. Do portu wejściowego dopłynął sygnał będący sumą ośmiu optycznych fal nośnych od λ_1 do λ_8 . Sygnał ten zostanie następnie podzielony na osiem strumieni przez układ dzielników częstotliwości utworzony przez system sprzęgaczy kierunkowych. Sprzęgacze są tak skonstruowane, by dzielić sygnał na dwie równe części. W portach wyjściowych drugiej kolumny sprzęgaczy wypłyne 1/4 mocy, a w portach trzeciej kolumny 1/8 mocy wejściowej. Podział mocy realizowany jest w przybliżeniu jednakowo dla każdej długości fali.



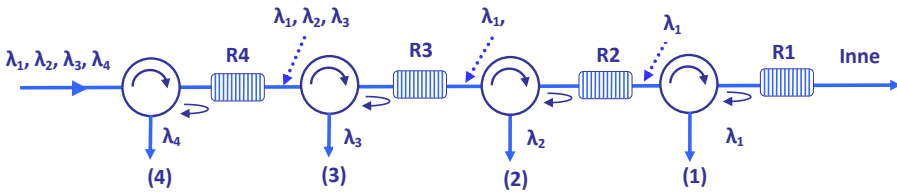
Rys. 11.13. Prosty układ demultipleksera ze sprzęgaczami, dzielący równomiernie sygnał między 8 odbiorników poprzedzonych filtrami *F*.

Kolumna filtrów transmisyjnych nastrojonych na kolejne długości fal dokonuje selekcji sygnałów wybranych kanałów, usuwając zbędne długości fal. Sygnały portów wyjściowych kierowane są do fotodetektorów.

Zaletą opisywanego układu jest prostota, wadą strata około 10 dB mocy, która w wybranym kanale dotarła do portu wyjściowego. Zauważmy, że w układzie dzielnika mocy można z powodzeniem zastosować rozgałęzienia Y , odwracając na przykład układ sumatora z rys. 11.7.

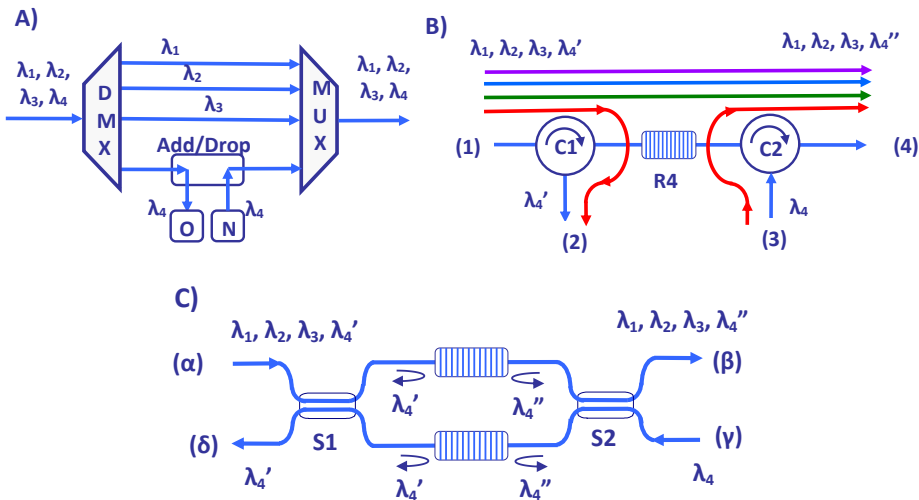
Demultipleksler pokazany na rys. 11.14 podobny jest w swej zasadzie działania do układu z rys. 11.12. Także w tym układzie wykorzystano pary: cyrkulator optyczny i filtr FBG.

Celem układu demultipleksera z rys. 11.14 jest wyprowadzenie z toru transmisyjnego czterech strumieni sygnału o długościach fali λ_1 , λ_2 , λ_3 i λ_4 do portów od (1) do (4). W tym celu w torze transmisyjnym umieszczono cztery filtry FBG odbijające kolejno sygnały o długościach fali od λ_4 do λ_1 . Odbite składniki kierowane są następnie przez cyrkulatory do portów wyjściowych, co pokazano na rysunku. Pozostałe składniki sygnału transmitowane są dalej torem jako „Inne”.



Rys. 11.14. Układ demultiplexera wykorzystujący filtry FBG: R1, R2, R3 i R4, odbijające kolejno transmitowane sygnały optyczne o długościach fal λ_4 , λ_3 , λ_2 , λ_1 i kierujący je przez cyrkulatory do portów: (4), (3), (2) i (1).

Bardzo ważnym elementem torów światłowodowych transmitujących grupę kanałów o różnych długościach fali jest układ „odbierz/dodaj”, zwany w języku angielskim układem *add/drop*. Układ ten skierowuje sygnał o wybranej długości fali do lokalnego odbiornika. Jednocześnie dodaje do toru transmisyjnego nowy strumień informacji naniesiony na nośną o tej samej długości fali.



Rys. 11.15. Zasada działania i rozwiązanie układu „odbierz/dodaj”. A) Idea układu *add/drop*. B) Układ *add/drop* złożony z dwóch cyrkulatorów i filtra FBG. C) Układ *add/drop* z interferometrem M-Z i filtrami FBG na falę o długości λ_4 .

Na rys. 11.15A pokazano zasadę działania układu *add/drop*. Torom transmisyjnym przesyłane są 4 kanały o długościach fali $\lambda_1, \dots, \lambda_4$. Demultiplexer DMX rozdziela transmitowane kanały i sygnał o długości fali oznaczonej jako λ_4' kierowany jest do lokalnego odbiornika O.

Jednocześnie lokalny nadajnik N kieruje w jego miejsce nowy strumień informacji na fali o tej samej długości oznaczonej jako λ_4' .

Jedną z możliwych realizacji układu *add/drop* pokazano na rys. 11.15B. Umieszczony w światłowodzie za cyrkulatorem C1 filtr FBG, oznaczony jako R4, zawraca sygnał o długości fali λ_4' , a cyrkulator C1 kieruje go do portu (2). Do portu (3) cyrkulatora C2 doprowadzony jest inny strumień informacji naniesiony na falę nośną o tej samej długości fali λ_4'' . Po odbiciu od filtru FBG sygnał ten dodaje się do strumienia transmitowanych danych.

Inne rozwiązanie układu *add/drop* pokazano na rys. 11.15C. Torem między portami (α) i (β) transmitowana jest grupa sygnałów o różnych długościach fali. Z grupy tej należy wybrać składnik o długości fali λ_4' . Użyto do tego celu opisany wcześniej interferometr M-Z. Transmitowany sygnał dzielony jest przez pierwszy sprzęgacz S1 do obu torów, w których umieszczono filtry FBG odbijające sygnał o długości fali λ_4' . Fazy odbitego składnika są tak dobrane, że sprzęgacz S1 kieruje je do portu (δ). Pozostałe składniki sumuje sprzęgacz S2, kierując je do portu (β). Do portu (γ) doprowadzono sygnał o długości fali λ_4'' . Sprzęgacz S2 dzieli doprowadzony sygnał równomiernie do obu ramion. Po odbiciu od filtrów FBG sygnały wracają do sprzęgacza, który kieruje je – wraz z innymi – do portu (β).

Filtry optyczne, sprzęgacze kierunkowe, cyrkulatory i rozgałęzienia Y to typowe elementy układów multiplekserów, demultiplekserów i *add/drop*. Same układy funkcjonują w różnych konfiguracjach. Kilka z nich opisano w tym punkcie.

Oddzielną, często stosowaną grupą przyrządów wykorzystywanych jako multipleksery i demultipleksery są falowodowe siatki dyfrakcyjne AWG (ang. *Arrayed Waveguide Gratings*). Ich działanie zostanie przedstawione w punkcie 11.3.4.

11.3.3. Filtry optyczne

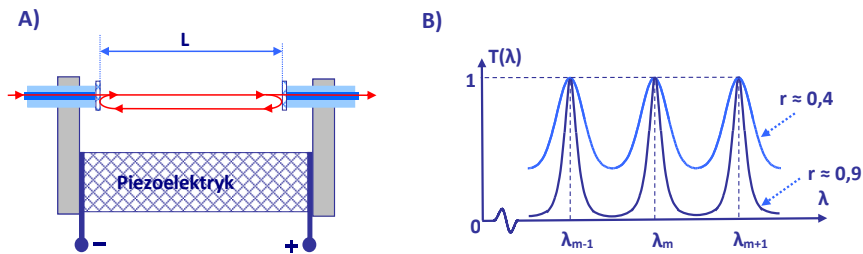
W układach multiplekserów i demultiplekserów bardzo często stosuje się filtry optyczne. Ich zadaniem może być selekcja wybranego składnika sygnału o określonej długości fali połączona z wytłumieniem pozostałych składników. Tak jest w układzie demultipleksera pokazanego na rys. 11.13. Innym zadaniem może być oddzielenie sygnału o wybranej długości fali bez tłumienia składników pozostałych. Tak działa układ *add/drop* z rys. 11.15B.

W wielu układach opisywanych w tym punkcie zastosowano filtry FBG bazujące na wykorzystaniu siatek Bragga. W najprostszym wykonaniu filtry FBG pracują jako tzw. filtry środkowo-zaporowe, jeśli użyjemy nazewnictwa mikrofalowego. Filtry FBG odbijają w torze transmisyjnym sygnał o określonej długości fali, nie zakłócając istotnie transmisji sygnałów o innych długościach fali. Zasadę ich działania opisano w rozdziale 2, punkt 2.5.3.

Popularnym filtrem transmisyjnym jest rezonator Fabry'ego-Perota (F-P). Jego właściwości opisano w rozdziale 3, w punkcie 3.2.3. Rezonator tego typu stosowany jest w strukturach laserów, w których obszar aktywny umieszczony jest między zwierciadłami rezonatora F-P.

W rozdziale 8 w punkcie 8.4.2 dokładnie opisano – wykorzystując formalizm macierzy rozproszenia – rezonator F-P utworzony przez warstwy dielektryka, na granicach których występuje odbicie propagowanego sygnału optycznego. Opisana struktura jest wielorezonansowa, a szerokość krzywej rezonansowej można zmieniać, dobierając wartość współczynnika odbicia r , będącego dla zwierciadła amplitudową miarą stosunku sygnału odbitego do padającego, co opisano równaniem (8-70).

Filtr F-P można zastosować do filtrowania sygnału o wybranej długości fali w układach demultiplekserów, jaki pokazano na rys. 11.13.



Rys. 11.16. Transmisyjny filtr Fabry'ego-Perota. A) Uproszczona struktura filtra F-P wprowadzonego do toru światłowodowego i przestrajanego napięciem przyłożonym do materiału piezoelektrycznego zmieniającego swoją długość pod wpływem zmian napięcia. B) Charakterystyka transmisji $T(\lambda)$ filtra F-P.

Na rys. 11.16A pokazano uproszczoną strukturę filtra F-P wtrąconego do toru światłowodowego. Rezonator tworzą dwa zwierciadła umieszczone na końcach światłowodów, którymi doprowadzany jest i odprowadzany sygnał optyczny. W rezonansie liczba połówek fali na długości L między zwierciadłami jest całkowita i oznaczona tutaj przez m . Długość fali λ_m , dla której wystąpi rezonans wyrazi się zależnością (11-8):

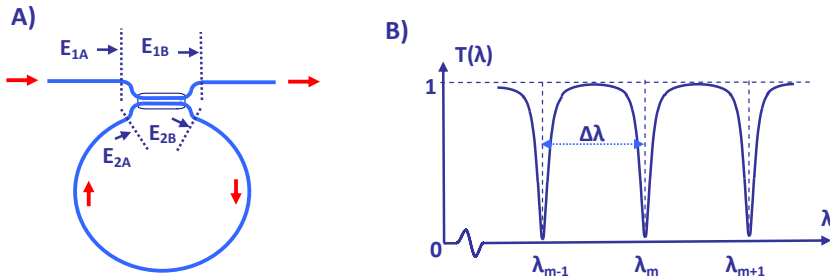
$$\lambda_m = L \frac{2n_0}{m}; \quad (11-8)$$

Liczba częstotliwości rezonansowych jest dla rezonatora F-P bardzo duża.

Na rys. 11.16A pokazano uproszczony mechanizm przestrajania rezonatora F-P. Odległość L zwierciadeł ustalana jest przez wprowadzony materiał piezoelektryczny. Pod wpływem pola elektrycznego wymiary elementu piezoelektrycznego zmieniają się, zmienia się odległość L zwierciadeł i – zgodnie z zależnością (11-8) – długość fali rezonansowej λ_m . Mechanizm dostrajania rezonatorów pracujących w układach demultiplekserów jest bardzo przydatny.

Na rys. 11.16B przedstawiono charakterystyki transmisji $T(\lambda)$ sygnału przez rezonator F-P dla kilku częstotliwości rezonansowych i dla dwóch wartości współczynnika odbicia r .

Popularną strukturą obwodów filtrujących jest rezonator pierścieniowy. Wykorzystywany jest chętnie w układach scalonych, ze względu na małe wymiary i możliwość regulacji parametrów. Strukturę rezonatora pierścieniowego pokazano na rys. 11.17A.



Rys. 11.17. Rezonator pierścieniowy. A) Rezonator pierścieniowy sprzężony z torom przez sprzęgacz kierunkowy. B) Charakterystyki transmisji mocy optycznej w funkcji długości fali λ .

Do toru światłowodu włączony jest sprzęgacz kierunkowy, który kieruje część mocy sygnału optycznego do sprzężonego z nim światłowodu uformowanego w kształt pętli. Działanie sprzęgacza opisano w rozdziale 2, w punkcie 2.5.2. W rozdziale 8, w punkcie 8.4.3, przedstawiono interferometr Macha-Zehndera, w którym zastosowano sprzęgacz kierunkowy. Wykorzystamy tutaj ten opis.

Aby objaśnić działanie rezonatora pierścieniowego, oznaczono na rys. 11.17A płaszczyzny w portach sprzęgacza i amplitudy E_{1A} , E_{2A} , E_{1B} i E_{2B} pola elektrycznego, zgodnie z założeniami rozdziału 8. Amplitudy te związane są ze sobą i parametrami sprzęgacza równaniem (11-9), które jest powtórzeniem równania (8-72).

$$\begin{bmatrix} E_{1B} \\ E_{2B} \end{bmatrix} = e^{-j\varphi_{AB}} \begin{bmatrix} \sqrt{1-K} & j\sqrt{K} \\ j\sqrt{K} & \sqrt{1-K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1A} \\ E_{2A} \end{bmatrix}; \quad (11-9)$$

W zależności powyższej kąt φ_{AB} jest opóźnieniem fazowym związanym z czasem propagacji sygnału optycznego wzdłuż długości sprzęgacza. K jest współczynnikiem sprzężenia sprzęgacza $0 < K < 1$ zdefiniowanym w rozdziale 2. Sygnał z portu 2B kierowany jest pętlą światłowodu o długości L do portu 2A. Amplitudy E_{2A} , i E_{2B} związane są prostą zależnością (11-10).

$$E_{2A} = \sqrt{\alpha_{AB}} e^{-j\theta} E_{2B}; \quad (11-10)$$

Występujący we wzorze współczynnik $\alpha_{AB} \leq 1$ określa tłumienie mocy sygnału przy transmisji przez obwód pętli. W powyższym równaniu kąt θ jest opóźnieniem fazowym sygnału o długości fali równej λ , płynącego między portami od 2B do 2A. Oznaczając efektywny współczynnik załamania dla światłowodu tworzącego pętlę przez n_{eff} , można wartość θ opisać zależnością (11-11):

$$\theta = \frac{2\pi L n_{\text{eff}}}{\lambda}; \quad (11-11)$$

W rezonansie na długości obwodu pętli powinna odłożyć się całkowita liczba długości fali. Warunek rezonansu i długość rezonansowej fali λ_m można zapisać prostymi równaniami (11-12), w których m jest liczbą całkowitą:

$$\theta + \varphi_{AB} = 2\pi m;$$

$$\lambda_m = \frac{Ln_{\text{eff}}}{m};$$
(11-12)

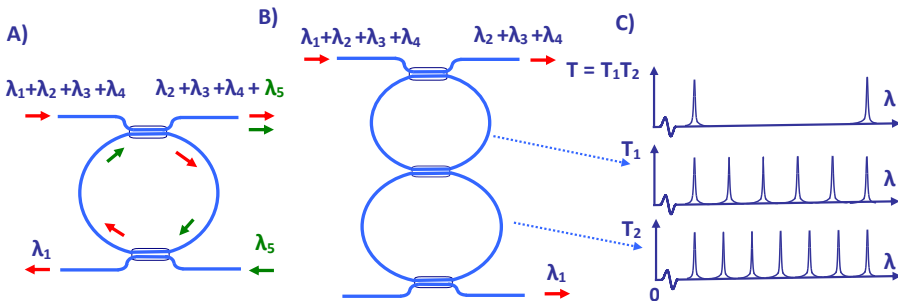
Na rys. 11.17B pokazano charakterystykę transmisji mocy sygnału optycznego torem głównym. Dla kolejnych częstotliwości rezonansowych obserwowane są minima transmisji mocy. Dokładna analiza kształtu charakterystyki transmisji oparta jest o szczegółowe wyprowadzenia, które można znaleźć w literaturze. Fizyczną interpretację efektu rezonansu można oprzeć o równanie (11-13), po wykorzystaniu zależności (11-9).

$$E_{1B} = \frac{e^{-j\varphi_{AB}}}{2} (E_{1A} + jE_{2A});$$
(11-13)

Wynika z niej, że sygnał w porcie wyjściowym 1B jest sumą dwóch składników. W warunkach rezonansu rezultatem interferencji tych składników może być ostre minimum transmisji mocy w torze głównym. Minimum transmisji powtarza się dla każdej kolejnej rezonansowej długości fali. Charakterystyka transmisji przypomina grzebień. Ważnym parametrem tej charakterystyki jest mierzona długością fali odległość $\Delta\lambda$ dwóch kolejnych minimów. Odległość ta zależy od wartości m , co pokazuje zależność (11-14).

$$\Delta\lambda \cong \frac{\lambda_m}{m};$$
(11-14)

Na rys. 11.18 pokazano wybrane zastosowania rezonatora pierścieniowego.



Rys. 11.18. Rezonator pierścieniowy w połączeniu add/drop. A) Rezonator pierścieniowy wybiera ze strumienia kanał o długości fali λ_1 , a dodaje na innej częstotliwości rezonansowej λ_5 . B) Układ ze sprzężonymi transmisyjnie dwoma rezonatorami pierścieniowymi. C) Różne ciągi częstotliwości rezonansowych dają przy połączeniu łańcuchowym rozrzedzony grzebień częstotliwości.

Na rys. 11.18A przedstawiono układ rezonatora pierścieniowego, który może być wykorzystany w połączeniu add/drop. Pętla rezonatora sprzężona jest symetrycznie z dwoma światłowodami. W torze głównym transmitowana jest suma sygnałów o długościach fali $\lambda_1 - \lambda_4$. Aby oddzielić selektywnie jeden ze składników sygnału, na przykład o długości fali λ_1 , dobrano parametry rezonatora tak, aby jedna z częstotliwości rezonansowych odpowiadała

tej właśnie długości fali. W światłowodzie tworzącym pętlę zostanie wzbudzony sygnał o tej właśnie długości. Sygnał ten z pomocą drugiego sprzęgacza pobudzi drugi światłowod i zostanie nim wyprowadzony – funkcja *drop*.

Tym samym światłowodem można wprowadzić do toru głównego sygnał na przykład o długości fali λ_5 , odpowiadającej innej rezonansowej częstotliwości pętli rezonatora. W tym przypadku kierunek pobudzenia sygnału, oznaczonego na rys. 11.18A kolorem zielonym, zachodzi w przeciwnym kierunku: od drugiego światłowodu przez pętlę rezonatora do toru głównego – funkcja *add*.

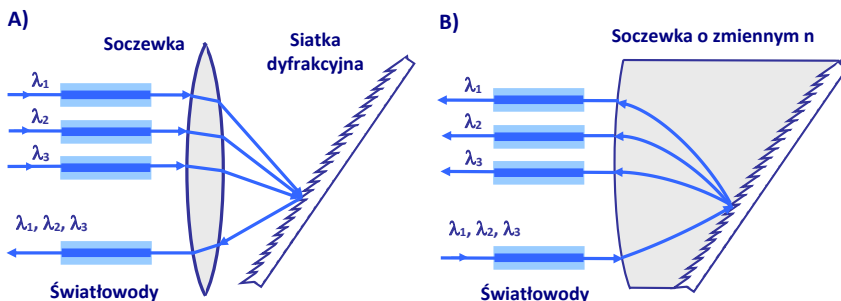
W wielu przypadkach korzystnym jest zastosowanie pary sprzężonych ze sobą rezonatorów pierścieniowych. Układ taki pokazano na rys. 11.18B. Między dwoma światłowodami wprowadzono parę rezonatorów sprzężonych symetrycznie za pomocą sprzęgaczy kierunkowych. Pętle rezonatorów mają różne długości i dlatego różne częstotliwości rezonansowe, co pokazano na rys. 11.18C.

Transmisja mocy z jednego światłowodu do drugiego jest możliwa dla długości fali, dla której oba rezonatory są w rezonansie. Można tak dobrać rozmiary rezonatorów i odległości „zębów grzebienia”, by wspólne częstotliwości rezonansowe występowały odpowiednio rzadko. W rezultacie charakterystyka $T(\lambda)$ transmisji obu połączonych rezonatorów jest iloczynem ich transmisji $T_1(\lambda)T_2(\lambda)$ i także przypomina grzebień, jednakże odległości między kolejnymi rezonansami mogą być kilkakrotnie większe, co ilustruje rys. 11.18C.

Z powyższego opisu wynika, że rezonatory pierścieniowe można z powodzeniem stosować jako elementy filtrów optycznych w rozmaitych systemach transmisyjnych.

11.3.4. Falowodowe siatki dyfrakcyjne

Przy konstrukcji multiplekserów i demultiplekserów wykorzystywane są często właściwości siatek dyfrakcyjnych. Ideę takich rozwiązań pokazano na rys. 11.19.



Rys. 11.19. Siatki dyfrakcyjne w układach multipleksera i demultipleksera. A) Zasada działania multipleksera wykorzystującego soczewkę i siatkę dyfrakcyjną. B) Zasada działania demultipleksera z siatką dyfrakcyjną i soczewką ze zmiennym n .

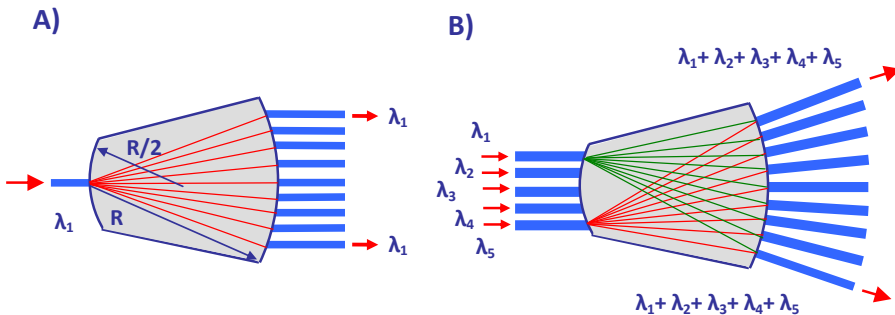
Na rysunku 11.19A przedstawiono zasadę działania multipleksera. N planarnych światłowodów prowadzących sygnały o różnej długości fali oświetla poprzez soczewkę siatkę dyfrakcyjną. Kąt odbicia od siatki dyfrakcyjnej zależy od długości fali padającego promieniowania. Struktura jest tak dobrana, aby wszystkie sygnały po odbiciu trafiły do wspólnego wyjściowego światłowodu.

Układ jest odwracalny. Jego działanie jako demultipleksera pokazano na rys. 11.19B. Sygnał optyczny zawierający składniki o różnych długościach fali skierowano na siatkę dyfrakcyjną. Kolejne składniki o różnych λ odbijają się pod różnym kątem i trafiają do różnych światłowodów. Zastosowano tutaj specjalny typ planarnej soczewki ze stopniowaniem współczynnika załamania n , co skutkuje zakrzywieniem torów promieniowania.

Wykorzystując efekt dyfrakcji opracowano całą rodzinę przyrządów zwanych falowodowymi siatkami dyfrakcyjnymi AWG. Przyrządy AWG mają strukturę planarną i są stosowane w fotonicznych układach scalonych. Dwa z nich, najprostsze w działaniu, przedstawiono na rys. 11.20.

Na rys. 11.20A pokazano prostą strukturę planarnego dzielnika mocy. Sygnał optyczny wprowadzony jest światłowodem planarnym do dwuwymiarowej struktury falowodu planarnego, którego linie graniczne mają kształt okręgów o specjalnie dobranych promieniach R i $R/2$. Sygnał optyczny „oświetla” porty wejściowe kilku, a często kilkunastu światłowodów. W tej konfiguracji układ pracuje jako dzielnik mocy.

Inną funkcję pełni układ z rys. 11.20B. Do dwuwymiarowej planarnej struktury propagacyjnej doprowadzono sygnały optyczne o różnych długościach fali $\lambda_1, \dots, \lambda_5$ z pięciu światłowodów. Sygnały pobudzone w światłowodach wyprowadzających sygnał po drugiej stronie przyrządu są sumą składników pochodzących ze wszystkich światłowodów wprowadzających. Na rysunku zilustrowano propagację sygnałów z dwóch skrajnych światłowodów. Tak więc przyrząd w tej konfiguracji pełni funkcje multipleksera i dzielnika mocy jednocześnie.



Rys. 11.20. Dwa planarne układy optycznych dzielników mocy. A) Układ dzielnika mocy, w którym sygnał ze światłowodu wejściowego „oświetla” poprzez dwuwymiarowy światłowód planarny porty wejściowe kilku/kilkunastu światłowodów. B) Układ sumujący sygnały z kilku światłowodów i dzielący je między kilka/kilkanaście światłowodów wyjściowych (ang. combiner and divider).

Struktura z dwuwymiarowym obszarem propagacyjnym pozwala skonstruować przyrząd rozdzielający sygnały o różnych długościach fali, czyli pełniący funkcję demultipleksera. Jego działanie przedstawiono na rys. 11.21. Na rys. 11.21A pokazano strukturę światłowodów planarnych utworzoną między dwoma bokami trójkąta. Najdłuższy odcinek ma długość L , długości kolejnych odcinków tworzą ciąg malejący:

$$L_N = L, L - \Delta L, L - 2\Delta L, \dots, L - (N - 1)L; \quad (11-15)$$

Światłowodami propagowany jest sygnał optyczny pochodzący z tego samego źródła, tej samej mocy i częstotliwości f . W portach wejściowych światłowodów amplituda pola elektrycznego E_0 jest taka sama. Pomijając tłumienie, amplitudy E_{LN} w portach wyjściowych można zapisać zależnością (11-16).

$$E_{LN} = E_0 e^{-j\beta L_N} = E_0 e^{-j\varphi_N}; \quad (11-16)$$

przy czym przesunięcie fazy φ_N zależy od długości światłowodu L_N , wartości współczynnika załamania n_{eff} i częstotliwości f , zgodnie z zależnością (11-17).

$$\varphi_N(L_N, f) = 2\pi n_{\text{eff}} \frac{L_N f}{c}; \quad (11-17)$$

Przesunięcie fazy φ_N jest funkcją dwóch zmiennych: długości światłowodu L i częstotliwości f . Wykorzystując zależność na różniczkę zupełną, możemy napisać:

$$\Delta\varphi(\Delta L, \Delta f) = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{c} (f\Delta L + L\Delta f); \quad (11-18)$$

Dla danej częstotliwości wartości przesunięć fazy w kolejnych portach wyjściowych tworzą ciąg arytmetyczny z krokiem $\Delta\varphi$. Wtedy czoło fali propagowanej w falowodzie dwuwymiarowym nachylone jest w stosunku do linii zakończenia światłowodów pod kątem θ opisanym zależnością (11-19).

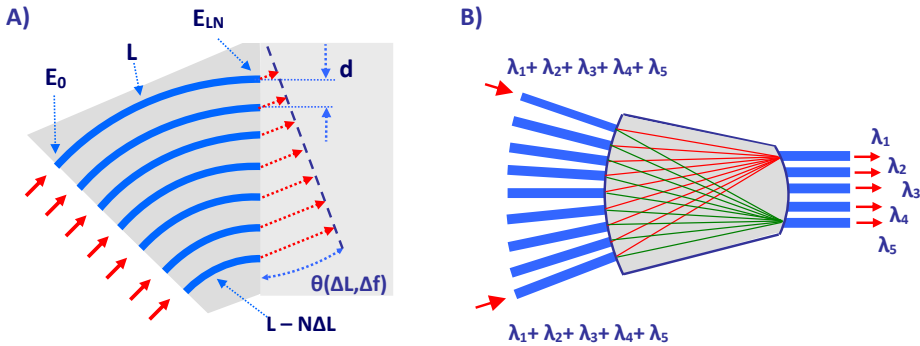
$$\sin\theta = \frac{\lambda}{2\pi d} \Delta\varphi; \quad (11-19)$$

Kluczową dla działania opisywanego szyku światłowodów właściwością jest fakt, że zgodnie z powyższą zależnością kąt θ jest zależny od częstotliwości, gdyż zmiany kąta $\Delta\varphi$ są, zgodnie z zależnością (11-18), funkcją częstotliwości. Oznacza to, że propagowane szykiem światłowodów sygnały optyczne o różnych częstotliwościach/długościach fali będą w falowodzie dwuwymiarowym propagowane w różnych kierunkach.

Na tej zasadzie oparto działanie struktury pokazanej na rys. 11.21B. W układzie porty wyjściowe światłowodów doprowadzających sygnały podlegające rozdzieleniu umieszczono na okręgu o odpowiednio dobranym promieniu¹. W rezultacie sygnały o długościach

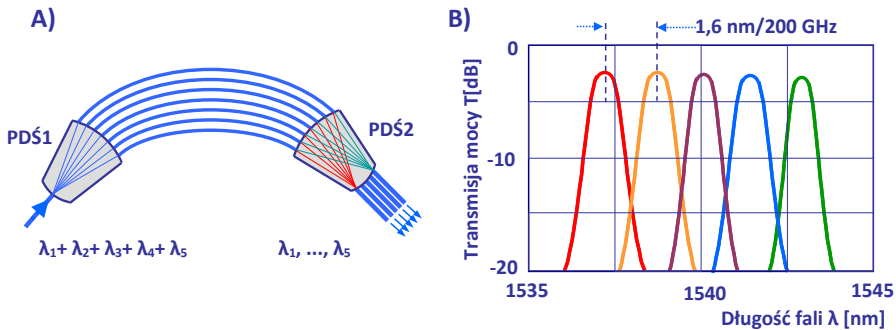
¹ Porty wyjściowe szyku światłowodów wprowadzających sygnały do dwuwymiarowego sprzęgacza umieszczone są na okręgu o promieniu R . Natomiast porty wyjściowych światłowodów umieszczone są po przeciwnej stronie na okręgu o średnicy $R/2$. Charakterystyczne okręgi nazywane są okręgami Rowlanda. Ich wymiary i proporcje pokazano na rys. 11.20A.

fali od λ_1 do λ_5 skupiane są w różnych punktach przeciwległego krańca obszaru propagacji, gdzie umieszczono porty światłowodów wyjściowych.



Rys. 11.21. Falowodowa siatka dyfrakcyjna AWG w układzie demultipleksera. A) Ilustracja działania szyku światłowodów planarnych. B) Ilustracja działania układu rozdzielającego sygnały o różnych długościach fali do różnych światłowodów.

Pełną strukturę demultipleksera pokazano na rys. 11.22A.



Rys. 11.22. Demultiplekser z falowodową siatką dyfrakcyjną. A) Struktura przyrządu z dwoma planarnymi dwuwymiarowymi światłowodami PDŚ1 i PDŚ2. B) Charakterystyki transmisji mocy dla pięciu długości fali sygnałów rozdzielanych przez demultiplekser.

Wejściowy sygnał optyczny jest – w opisywanym przypadku – sumą pięciu składników o długościach fali od λ_1 do λ_5 . Pierwszy dwuwymiarowy falowód PDŚ1 pełni funkcję dzielnika mocy i kieruje sygnał do siedmiu światłowodów. Długości światłowodów szyku są tak dobrane, aby w obszarze drugiego dwuwymiarowego światłowodu PDŚ2 sygnały o różnych długościach fal były ogniskowane w odpowiednich portach pięciu światłowodów wyjściowych.

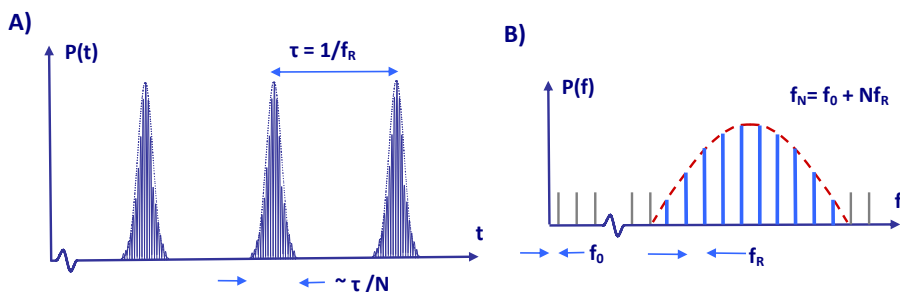
Na rysunku 11.22B pokazano charakterystyki transmisyjne między portem wejściowym a kolejnymi światłowodami wyjściowymi. Starannie i z dużą dokładnością wykonane

konstrukcje pozwalają uzyskać dużą selektywność urządzenia. Dla poszczególnych składników sygnału minimalne tłumienie jest na poziomie 3–5 dB, a różnice tłumień między sąsiednimi kanałami są zwykle większe od 20 dB.

Przyrządy należące do grupy AWG wykorzystywane są chętnie w strukturach nadajników i odbiorników pracujących w systemach WDM wykonywanych w technologii fotonicznych układów scalonych.

11.3.5. Systemy z laserem generującym grzebień częstotliwości

Opisane do tej pory w rozdziale 11 układy i systemy z multipleksacją WDM wykorzystywały zespół samodzielnych źródeł promieniowania optycznego, zwykle laserów półprzewodnikowych. Typowym przedstawicielem tej rodziny był układ z rys. 11.7, w którym osiem laserów pracowało równolegle, by po zmodulowaniu ich sygnałów połączyć je do wspólnej transmisji światłowodem. W układach z wieloma laserami stabilizacja temperatury pracy, a często stabilizacja częstotliwości jest koniecznością. W tej sytuacji, poszukując innych rozwiązań, zwrócono uwagę na lasery generujące grzebień częstotliwości. Od wielu lat trwały prace nad opracowaniem laserów generujących bardzo krótkie impulsy. Lasery takie konstruowano dla potrzeb miernictwa i innych zastosowań dalekich od telekomunikacji. Specyficzne właściwości generatorów ultrakrótkich impulsów skłoniły konstruktorów do wykorzystania ich w systemach telekomunikacyjnych. Właściwości generowanego ciągu impulsów pokazano na rys. 11.23.



Rys. 11.23. Ilustracja własności widma grzebieniowego. A) Ciąg impulsów w czasie. B) Widmo sygnału. Czas repetycji τ określa odległość między prążkami widma. Szerokość impulsów określa liczbę prążków N .

Na rysunku 11.23A pokazano ciąg mocy $P(t)$ impulsów sygnału optycznego generowanego przez laser. Zwykle przyjmuje się, że impulsy mają kształt zbliżony do impulsu Gaussa. Jeśli rozłożyć taki przebieg na szereg Fouriera otrzymujemy ciąg składników widma w kształcie grzebienia, a ich częstotliwość f_N opisana jest zależnością (11-20):

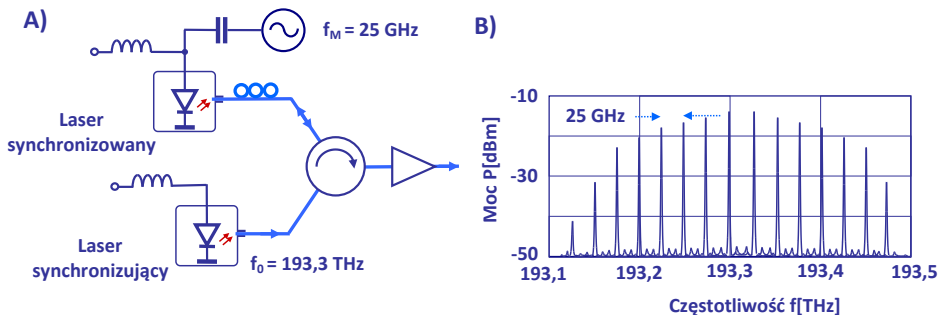
$$f_N = f_0 + Nf_R; \quad (11-20)$$

Odległość między prążkami równa jest częstotliwości repetycji $f_R = 1/\tau$ impulsów i może być dokładnie kontrolowana przez układ zasilania lasera. We wzorze N jest liczbą naturalną, a f_0 stałym dla danego przyrządu przesunięciem całego grzebienia. Im krótszy jest czas trwania impulsu, tym większa jest liczba prążków w rzeczywistym widmie. W widmie generatora impulsów liczba prążków jest skończona. Są one ułożone wokół częstotliwości centralnej, określonej mechanizmem powstawania oscylacji.

Generator widma grzebieniowego, aby mógł być użyty w systemach transmisji światłowodowej, powinien spełniać specyficzne wymagania. Poza małymi wymiarami i małym poborem mocy zasilania jego prążki oscylacji powinny mieścić się w paśmie C (1530–1565 nm). Jak wiemy, jest to pasmo pracy wzmacniaczy EDFA.

W praktyce telekomunikacji światłowodowej wykorzystywane są trzy typy generatorów widma grzebieniowego. Pierwszą grupę tworzą lasery półprzewodnikowe z synchronizacją modów. Są to zwykle lasery typu Fabry'ego-Perota, które opisano w rozdziale 3. Po przeprowadzeniu zabiegów synchronizujących widmo tych laserów staje się regularne i stabilne. Ich zaletą jest mały pobór mocy oraz szerokie pasmo zajmowane przez prążki, często przekraczające 1000 MHz. Wadą natomiast jest stosunkowo wysoki poziom szumów fazowych poszczególnych prążków.

Drugą grupę tworzą generatory widma grzebieniowego wykorzystujące efekty nieliniowe trzeciego rzędu, zwane też efektami Kerra. W niektórych rozwiązaniach stosowane są mikrorezonatory pierścieniowe, aby wykorzystać efekt rezonansu do podniesienia poziomu mocy. Prace nad poprawieniem parametrów tego typu generatorów trwają i należy oczekiwać kolejnych rozwiązań.



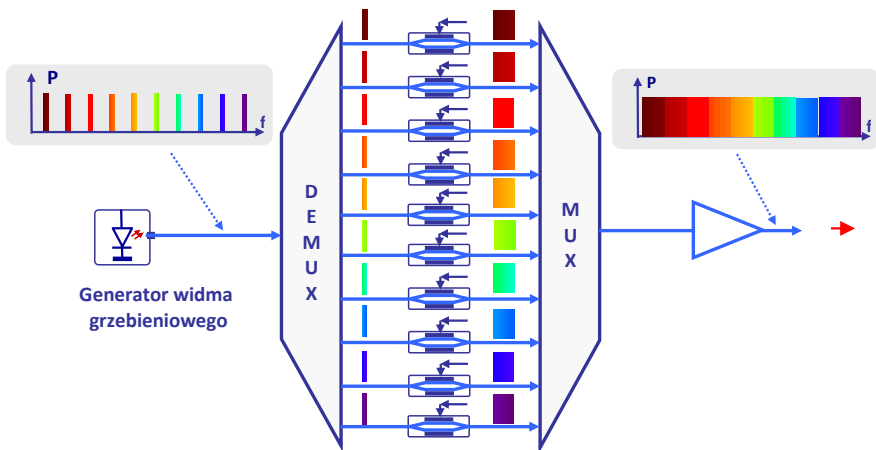
Rys. 11.24. Układ generujący widmo grzebieniowe. A) Układ z laserem synchronizującym (ang. master laser) i laserem synchronizowanym (ang. slave laser) połączonych cyrkulatorem. B) Widmo generowanego sygnału z prążkami odległymi o 25 GHz.

Trzecim rodzajem generatora widma grzebieniowego jest pokazany na rys. 11.24 układ z parą laserów półprzewodnikowych. Są to zwykle lasery typu DBR lub DFB. Jeden z nich jest laserem synchronizującym, stabilizowanym, określającym centralną częstotliwość nadajnika. Sygnał lasera synchronizującego podawany jest przez cyrkulator do drugiego

z laserów, synchronizowanego. Drugi z laserów polaryzowany jest prądem zwykle czterokrotnie większym od progowego i w stanie swobodnych oscylacji generuje sygnał o częstotliwości bliskiej sygnałowi synchronizującemu. W stanie pobudzenia sygnałem synchronizującym sterowany jest sinusoidalnym, silnym sygnałem o częstotliwości mikrofalowej (na rysunku 25 GHz). Sygnał wytworzony w laserze synchronizowanym poprzez cyrkulator podawany jest do portu wyjściowego.

Przykład widma sygnału wyjściowego pokazuje rys. 11.24B. Prążki są w odległościach precyzyjnie określonych przez generator mikrofalowy. Z rozkładu można ocenić, że 10 z nich, o największej mocy, można wykorzystać i po zmodulowaniu wprowadzić do światłowodowego systemu transmisyjnego.

Na rys. 11.25 pokazano strukturę układu nadajnika, w którym źródłem sygnału optycznego jest generator widma grzebieniowego.



Rys. 11.25. Układ idealny nadajnika pracującego z generatorem widma grzebieniowego. Z widma generatora wykorzystano 10 prążków, z których po rozdzieleniu przez DEMUX każdy osobno został zmodulowany. Zmodulowane sygnały po połączeniu przez MUX i wzmocnieniu zostają skierowane do światłowodowego systemu transmisyjnego.

Z sygnału generatora wybrano 10 prążków, odległych zwykle od siebie w granicach 10–60 GHz. Obwód demultipleksera DMUX dzieli sygnał, kierując jego składniki do kolejnych kanałów. W kanałach umieszczono w opisywanym układzie modulatory M-Z, które w procesie modulacji nanoszą na kolejne składniki strumienia informacji. Następnie zmodulowane składniki widma sumowane są przez obwód multipleksera. Po wzmocnieniu przez wzmacniacz wyjściowy suma zmodulowanych składników kierowana jest do toru transmisyjnego. Każdy składnik widma generatora grzebieniowego po zmodulowaniu zajmuje ze swoimi wstęgami bocznymi znacznie szersze pasmo. Na rysunku ilustrują to składniki widma przed generacją i po generacji.

Jeśli w nadajniku wykorzystano modulację wielostanową, będącą połączeniem modulacji amplitudy i fazy, to w układzie odbiornika niezbędne jest – po rozdzieleniu składników – zastosowanie detekcji heterodynowej. Oznacza to konieczność użycia w układzie odbiornika lasera jako heterodyny, lub kilku laserów, a także kontroli i stabilizacji ich częstotliwości.

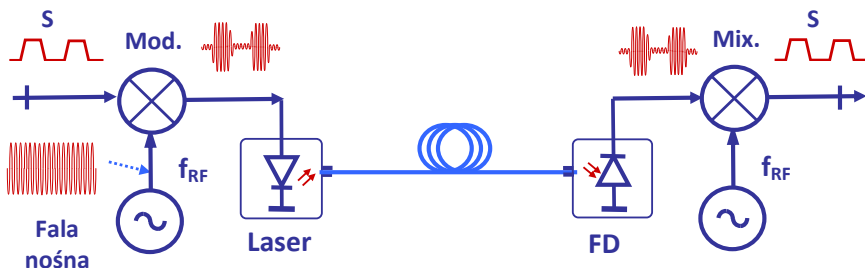
Interesującym rozwiązaniem jest wykorzystanie w procesie detekcji sygnału generowanego przez generator widma grzebieniowego nadajnika. W tym rozwiązaniu w nadajniku składniki widma dzieli się na pary, w których tylko jeden składnik jest modulowany, a drugi transmitowany jest do odbiornika i pełni w procesie fotodetekcji rolę homodyny. Zaletą takiego rozwiązania jest istotne uproszczenie układu odbiornika, gdyż znika konieczność użycia lasera heterodyny wraz z układem stabilizacji jego częstotliwości. Poza tym maleje rola szumów fazowych generatora widma grzebieniowego, co pozwala zwiększyć czułość odbiornika.

Zastosowanie generatora widma grzebieniowego w układzie nadajnika jest użytecznym i – w wielu przypadkach – korzystnym, gdyż upraszczającym jego funkcjonowanie rozwiązaniem. Różnice częstotliwości między kolejnymi składnikami widma są doskonale ustalone mechanizmem generacji. Pozwala to dobrze wykorzystać całe pasmo do transmisji informacji, bez konieczności pozostawiania dużych marginesów bezpieczeństwa.

11.4. Multipleksacja SCM na podnośnych

11.4.1. Idea i właściwości multipleksacji na podnośnych

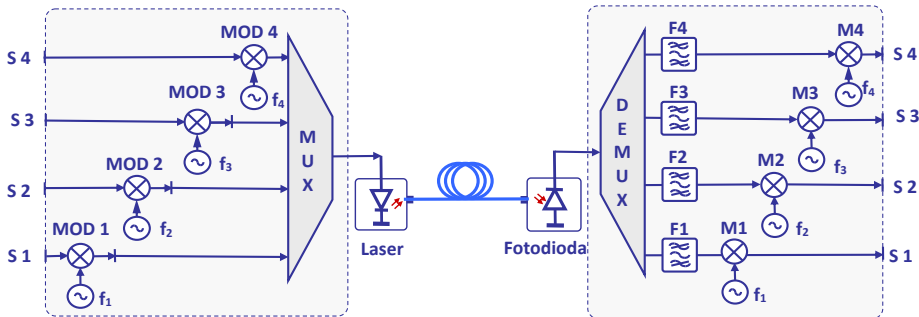
Opisywane w kolejnych rozdziałach łącza optyczne i systemy transmisyjne wykorzystują sygnał wytwarzany przez laser jako falę nośną. W procesie modulacji na optyczną falę nośną nanoszony jest sygnał zawierający informację. Po stronie odbiornika informacja jest odzyskiwana w procesie demodulacji.



Rys. 11.26. Układ ideowy łącza optycznego, w którym wykorzystano – obok fali nośnej z pasma optycznego – drugą falę nośną z pasma mikrofalowego.

Na rysunku 11.26 pokazano inne rozwiązanie – optyczny układ transmisyjny, w którym obok fali nośnej o częstotliwości optycznej wykorzystano drugą falę nośną o częstotliwości f_{RF} z pasma mikrofalowego, nazwaną tutaj podnośną. Sygnał S do transmisji łączem optycznym przygotowywany jest przez układ elektroniczny i użyty do bezpośredniej modulacji mocy lasera. Proces modulacji można także zrealizować modulatorem zewnętrznym. Po transmisji światłowodem sygnał jest poddany fotodetekcji, która usuwa falę nośną o częstotliwości optycznej. Usunięcie drugiej fali nośnej dokonywane jest w procesie przemiany częstotliwości przez mieszacz Mix. W opisanym układzie wykorzystuje się w łączu optycznym, które jest łączem analogowym, najprostszą modulację amplitudy. Natomiast sygnał modulujący doprowadzony do modulatora mikrofalowego może mieć wyszukany format wielostanowej amplitudowo-fazowej modulacji QAM. Sygnał ten zostanie wiernie odzyskany po stronie odbiorczej.

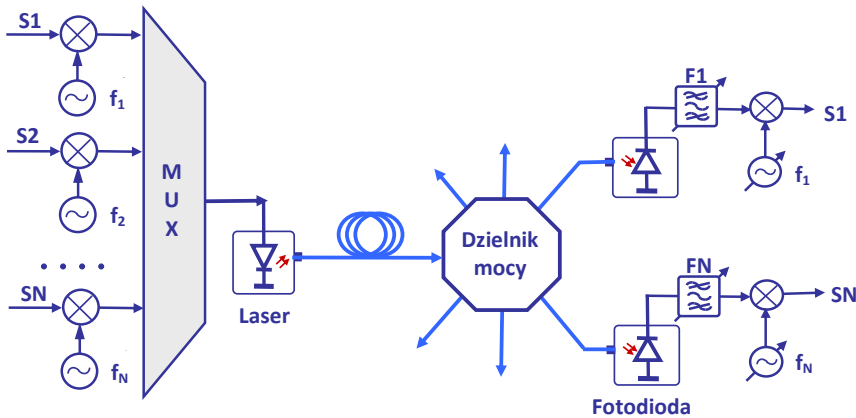
Technika stosowania podwójnych fal nośnych wykazuje swoje zalety przy przesyłaniu wielu strumieni informacji. Działanie łącza można opisać na podstawie układu pokazanego na rys. 11.27.



Rys. 11.27. Podstawowa struktura łącza światłowodowego z multipleksacją na podnośnych. Cztery strumienie informacji $S1-S4$ nanoszone są na cztery fale podnośne o częstotliwościach f_1-f_4 . Po zsumowaniu przez układ MUX sygnał moduluje bezpośrednio moc lasera. Po stronie odbiorczej po detekcji sygnały są filtrowane przez filtry F_1-F_4 i odzyskiwane po przemianie częstotliwości przez mieszacze $M1-M4$.

Opisywane łącze służy do jednoczesnego przesyłania czterech strumieni informacji $S1-S4$, w zapisie analogowym albo cyfrowym. Sygnały elektryczne tych strumieni modulują (modulatory $MOD1-MOD4$) cztery fale nośne o częstotliwościach mikrofalowych f_1-f_4 . Układowi modulatorów towarzyszą oczywiście wzmacniacze i filtry, których nie pokazano ze względu na przejrzystość rysunku. Multiplexer sumuje sygnały i przesyła do modulatora sygnału optycznego. W układzie na rysunku zastosowano bezpośrednią modulację mocy optycznej lasera. Można oczywiście zastosować zewnętrzny modulator, na przykład modulator M-Z.

Od lasera zaczyna się działanie optycznej części łącza. Po transmisji światłowodem zmodulowany sygnał dociera do fotodiody. W obwodzie fotodiody odzyskujemy sygnał elektryczny. Funkcja łącza ogranicza się więc do transmisji sygnału. Poszczególne składniki zostają wydzielone przez filtry F1–F4 i poddane wzmacnieniu i demodulacji z użyciem mieszaczy i detektorów. Modulacja na mikrofalowych częstotliwościach podnośnych SCM (ang. *SubCarrier Multiplexing*) jest modulacją analogową.



Rys. 11.28. Odmiana łącza światłowodowego z multipleksacją SCM i transmisją do rozproszonych odbiorców.

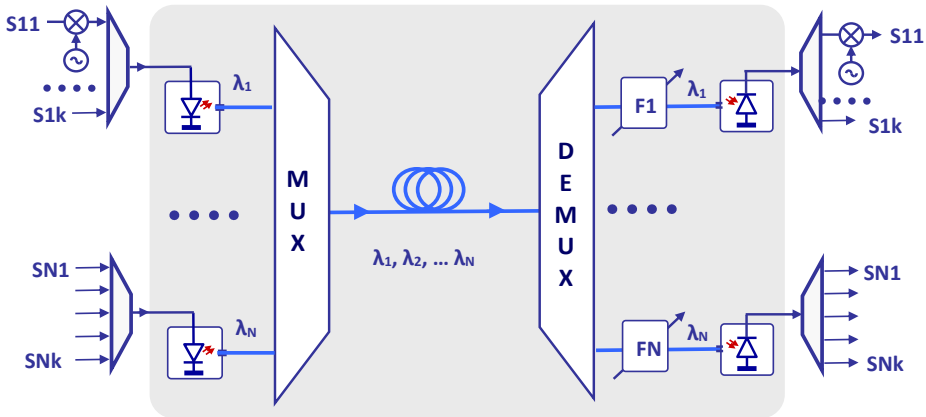
Systemy z multipleksacją na podnośnych SCM mają wiele zalet. Liczba strumieni informacji może wynosić kilkadziesiąt. Wymagania w stosunku do łącza światłowodowego są niewielkie. Najczęściej wykorzystywana jest amplitudowa, bezpośrednia modulacja mocy lasera i bezpośrednia detekcja. Przy transmisji w sieciach metropolitalnych na niewielkie odległości problemy dyspersji nie dają o sobie znać.

Układ przedstawiony na rys. 11.28 ilustruje jedną z ważniejszych zalet multipleksacji SCM. Strumień informacji można kierować do rozproszonych odbiorców, wykorzystując prosty dzielnik mocy, bez złożonych układów *add/drop*. W układach odbiorników na wyjściach fotodiód pojawią się sygnały z wszystkich transmitowanych kanałów. Wykorzystując przestrajany filtr oraz przestrajany lokalny oscylator, można nastroić odbiornik na odbiór wybranego strumienia informacji.

11.4.2. Systemy z multipleksacją SCM i WDM

Wśród różnorodnych technik stosowanych w światłowodowych systemach transmisyjnych często spotyka się systemy wykorzystujące multipleksację WDM oraz multipleksację SCM. Ideę takiego systemu przedstawia rys. 11.29.

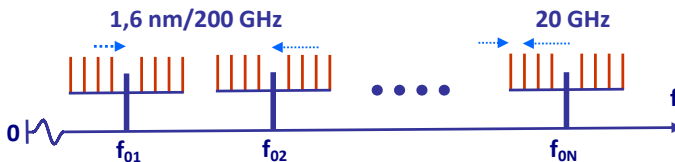
W systemie światłowodowym przedstawionym na rys. 11.27 widzimy wyodrębniony port wejściowy wprowadzający sygnał do modulatora i drugi port wyjściowy odbierający sygnał z fotodetektora. Światłowodem transmitowany jest zmodulowany sygnał optyczny wytworzony przez jeden laser. Układ z rys. 11.29 może pracować z wieloma laserami generującymi różne długości fali i transmitującymi wygenerowany sygnał wspólnym światłowodem. Rozdzielanie sygnałów po stronie odbiorczej dokonuje się w jeden z opisanych wcześniej sposobów.



Rys. 11.29. Idea organizacji światłowodowego systemu transmisyjnego wykorzystującego multipleksację WDM i SCM.

Wykorzystując obie techniki multipleksacji, można zaprojektować system, którym można transmitować więcej niż 500 kanałów o przepustowości 2,5 Gb/s każdy.

Na rys. 11.30 pokazano fragment osi częstotliwości odpowiadający wybranemu pasmu transmisyjnemu. Częstotliwości $f_{01}, f_{02}, \dots, f_{0N}$ laserów pracujących w systemie rozmieszczono w paśmie w odstępach 200 GHz/1,6 nm. Każdy z sygnałów optycznych można wykorzystać do transmisji kilku/kilkunastu podnośnych, co jest reprezentowane przez kolejne grzebienie.



Rys. 11.30. Podział częstotliwości w paśmie transmisji. Częstotliwości $f_{01}, f_{02}, \dots, f_{0N}$ są kolejnymi, w odstępach 200 GHz, częstotliwościami laserów pracujących w systemie. Częstotliwości grzebienie oddległe o 20 GHz odpowiadają podnośnym transmitowanym danym kanałem optycznym.

W systemach wykorzystujących multipleksację WDM można stosować techniki mieszane. Niektóre z kanałów optycznych można użyć, tak jak to opisano wyżej, do transmisji analogowej podnośnych. Inne mogą być zastosowane do transmisji sygnałów cyfrowych. Różnorodność opracowanych technik pozwoliła istotnie uelastyczyć systemy transmisyjne przy zachowaniu ogromnej przepustowości.

11.5. Multipleksacja przestrzenna SDM

Powiększanie prędkości transmisji, określanej liczbą bitów na sekundę, odbywało się wielotorowo. Zmniejszono wymiary światłowodu, aby, zapewniając pracę jednomodową, zmniejszyć efekty dyspersji. Zwiększano jednocześnie częstotliwość modulacji praktycznie do granicy możliwości układów elektronicznych. Wykorzystanie możliwości, jakie daje detekcja koherentna, pozwoliło zwiększyć stosunek sygnału do szumu i zastosować wielostanową modulację amplitudy i fazy. Wykorzystano także oba stany polaryzacji sygnału optycznego. Zastosowanie opisanej w tym rozdziale multipleksacji WDM z podziałem długości fali umożliwia znaczne poszerzenie pasma transmisji. Multipleksacja WDM jest obecnie powszechnie stosowana w łączach światłowodowych, jeżeli tylko istnieje potrzeba zwiększenia przepływności łączy optycznych.

Poszukiwania możliwości dalszego zwiększenia prędkości transmisji łączy optycznych poszły w dwóch kierunkach pozwalających:

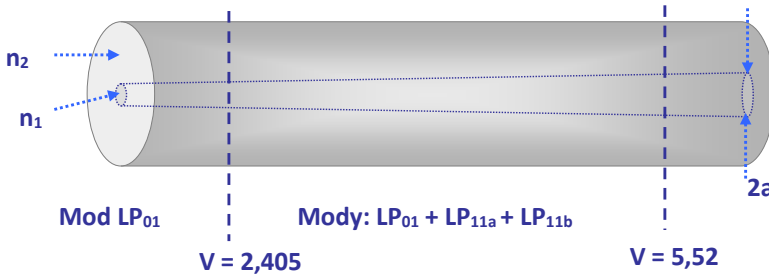
- zwiększyć liczbę transmitowanych światłowodem modów i zmodulować niezależnie pole elektryczne każdego z modów, aby zwielokrotnić liczbę transmitowanych bitów. Ten rodzaj multipleksacji liczby modów określany jest w publikacjach jako MMF (ang. *MultiMode Fibre*);
- opanować produkcję i zastosować światłowody z wieloma rdzeniami. Jest to multipleksacja liczby rdzeni światłowodu, określana w publikacjach jak MCF (ang. *MultiCore Fibre*).

Obie te techniki tworzą grupę zwaną multipleksacją przestrzenną nazywaną jako SDM (ang. *Space Division Multiplexing*). Poniżej kolejno je opisujemy.

W rozdziale 2 wiele miejsc poświęcono problemom dyspersji modowej występującej wtedy, gdy światłowodem propagowany jest sygnał optyczny jako suma składników w różnych konfiguracjach polowych, czyli modów. Prędkości fazowe modów są różne, w rezultacie następuje deformacja impulsów (efekt dyspersji). Aby tego uniknąć, należało zmniejszać średnicę rdzenia i zmniejszać różnicę wartości współczynników załamania rdzenia n_1 i płaszczu n_2 . Gdy opisany zależnością (11-21) [powtarzamy tutaj zależność (2-6)] współczynnik V jest odpowiednio mały, $V < 2,405$, w rdzeniu może być propagowany tylko jeden mod.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}; \quad (11-21)$$

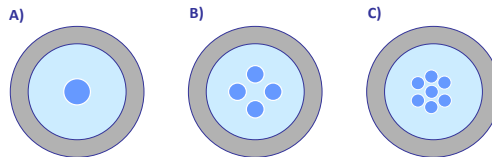
Na rysunku 11.31 pokazano światłowód, w którym rośnie liniowo średnica rdzenia. Gdy $V > 2,405$, to obok modu podstawowego, oznaczonego tu jako LP_{01} , mogą być wzbudzone dwa kolejne mody LP_{11a} i LP_{11b} . Tak więc w przedziale $2,404 < V < 5,52$ w rdzeniu mogą być propagowane trzy mody. Przy dalszym wzroście średnicy $2a$ liczba propagowanych modów rośnie.



Rys. 11.31. Ilustracja wpływu średnicy rdzenia $2a$ na liczbę propagowanych światłowodem modów.

Opublikowane wyniki prac i eksperymentów wykazały, że każdy z kilku modów może być osobno modulowany, transmitowany i detekowany. Oczywiście liczba modów musi być limitowana.

Multipleksacja MMF jest technicznie możliwa i pozwala istotnie zwiększyć szybkość transmisji informacji. Zainteresowani tą rozwijającą się technologią znajdują publikacje na ten temat.



Rys. 11.32. Światłowody wykorzystywane w łączach, w których stosowana jest multipleksacja przestrzenna SDM. A) Światłowód z rdzeniem o powiększonej średnicy do transmisji wielomodowej. B) i C) Światłowody z czterema i z siedmioma rdzeniami dla transmisji wielomodowej.

Aby stworzyć warunki do wprowadzenia multipleksacji przestrzennej SDM, należy zmodyfikować konstrukcję światłowodów. W przypadku multipleksacji wielomodowej należy zwiększyć średnicę światłowodu, rys. 11.32A, co jest technologicznie stosunkowo proste. Trudniejszym problemem jest konstrukcja światłowodu wielordzeniowego – rys. 11.32B i C. Zwiększaniu liczby rdzeni towarzyszy zwiększanie średnicy zewnętrznej płaszczka. Inne względy każą ograniczyć tę średnicę do $200 \mu\text{m}$. W tej sytuacji koniecznością staje się zbliżenie rdzeni do siebie. Zmniejszenie grubości warstwy płaszczka oddzielającej rdzenie od

siebie powoduje efekt przenikania sygnału z rdzenia do rdzenia, pojawiają się przesłuchy. Gdyby zmniejszyć wartość współczynnika załamania n_2 płaszczka, to pole transmitowanego sygnału będzie bardziej skoncentrowane w rdzeniu. Jednakże wtedy wzrośnie wartość współczynnika V , opisanego równaniem (11-21), i zmieni się liczba modów. Prowadzone są eksperymenty nad użyciem kilkuwarstwowego płaszczka, aby tą drogą zmniejszyć przesłuchy między rdzeniami.

W ostatnich latach prace nad technikami multipleksacji przestrzennej SDM nabrały intensywności. Należy oczekiwać, że owoce tej pracy wkrótce będą widoczne.

11.6. Podstawowe struktury sieci

Większość opisywanych w ostatnich trzech rozdziałach łączy optycznych służyła transmisji sygnału z punktu do punktu. Długość łącza może być bardzo różna, od dziesiątek metrów w przypadku połączenia dwóch komputerów pracujących w tym samym budynku, do tysięcy kilometrów w przypadku łącza transoceanicznego. W pierwszym przypadku łącze światłowodowe zapewnia dużą szybkość transmisji i niewrażliwość na zakłócenia polem elektromagnetycznym. W drugim – poza dużą prędkością transmisji istotną rolę odgrywają małe straty, choć – o czym mówiliśmy w rozdziale 10 – konieczne staje się użycie wzmacniaczy w celu kompensacji strat, a także regeneratorów.

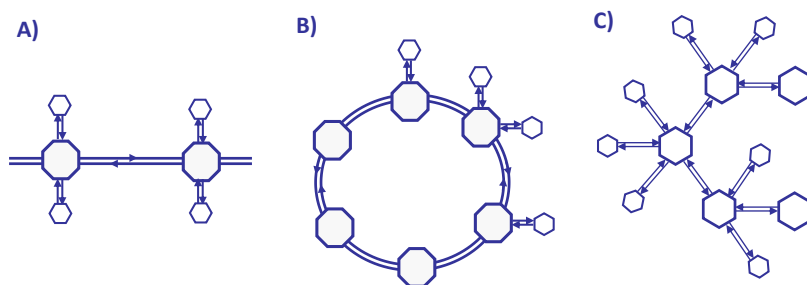
Sieć połączeń światłowodowych współczesnego świata jest niezwykle złożoną, różnorodną i skomplikowaną strukturą. Prawdopodobnie nikt do tej pory nie podjął trudu jej szczegółowego opisanie. Sieć ta powstała w wyniku realizacji tysięcy inwestycji: niewielkich o wymiarze budynku mieszczącego biura, jak i globalnych w przypadku budowy łącza transoceanicznego. Dwa ważne czynniki zaważyły o ich obecnym kształcie. Pierwszy czynnik jest zrozumiały: nigdy – z wielu powodów – nie powstał całościowy plan takiej sieci. Drugi czynnik jest skutkiem bardzo szybkiego rozwoju techniki transmisji światłowodowej. Wiele dużych i długoterminowych inwestycji było w momencie powstawania projektu opartych na technologii, która w chwili ich ukończenia mogła by już być bardziej zaawansowana.

Sieć telekomunikacyjna służyła pierwotnie do transmisji rozmów i tekstów. Wykładniczy wzrost szybkości transmisji łączy światłowodowymi połączony z cyfryzacją ogromnie zwiększył funkcjonalność systemu. Obecnie siecią światłowodową można przesyłać każdy rodzaj informacji. Sieci telewizyjnej kablowej zostały włączone do wspólnego systemu, transmitowane są nimi rozmowy telefoniczne, połączenia internetowe i telewizja na żądanie. Systemy telekomunikacji ruchomej, wykorzystujące transmisję radiową w pasmach mikrofalowych, zostały zintegrowane z systemami światłowodowymi i stały się ważnym składnikiem sieci globalnej. Problemy pracy systemów RoF, zwanych *Radio-over-Fiber*, opisane zostaną w następnym rozdziale.

Zarządzanie ruchem we współczesnej sieci telekomunikacyjnej jest zadaniem bardzo trudnym, ale pomyślnie rozwiązany. Jego opis nie mieści się jednak w strukturze tej

książki. W tym punkcie przedstawione zostaną jedynie wybrane, proste elementy bardzo złożonej wiedzy. Zachęcam Czytelnika do podjęcia studiów tego problemu, gdyż opracowane i wdrożone systemy należą do najwyższego poziomu współczesnej sztuki inżynierskiej.

Funkcjonująca sieć światłowodowa zawiera składniki z różnych poziomów technologicznych. Sieć żyje w tym sensie, że sukcesywnie wyłączane są z eksploatacji elementy najstarsze, a rozpoczynają pracę elementy o aktualnej technologii. Jej zdolności transmisyjne nieustannie rosną. Niemniej można znaleźć w sieci wiele regularności i fragmentów dużej struktury, które powstały w oparciu o przemyślany plan. Na rys. 11.33 pokazano trzy ważne i często spotykane elementy w strukturach sieci.

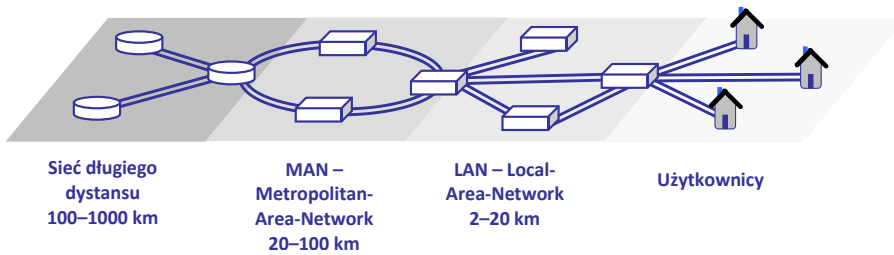


Rys. 11.33. Topologie sieci światłowodowej. A) Sieć liniowa łącząca kolejne węzły, wyróżniająca się dużą przepustowością, kolejni użytkownicy podłączeni są do węzłów. B) Sieć tworząca ring i sprzężone z nią węzły *add/drop*. C) Sieć w układzie gwiazdy, nieregularna, rozbudowana przez kolejne węzły.

Na rys. 11.33A pokazano fragment sieci tworzący strukturę liniową. Łąca światłowodowe o dużej przepustowości łączą ze sobą kolejne węzły. Tak tworzone łącze może mieć długość kilkuset kilometrów i więcej. W węzłach, często o strukturze *add/drop*, strumienie informacji kierowane są do użytkowników lokalnych, którzy jednocześnie przekazują do łącza swoje strumienie informacji.

Bardzo popularne są łącza światłowodowe w połączeniu pierścieniowym. Łącza światłowodowe o dużej przepustowości łączą ze sobą szereg węzłów, tworząc zamkniętą drogę – rys. 11.33B. Transmisja informacji prowadzona jest w obie strony. Stosowana jest multipleksacja WDM, a liczba kanałów mieści się zwykle w przedziale 20–100. Umieszczone w węzłach układy *add/drop* wyprowadzają strumienie informacji, dodając jednocześnie nowe.

Sieci transmisyjne wykorzystujące strukturę gwiazdy są, ze względu na swą prostotę, bardzo często stosowane. Ideę takich połączeń pokazuje rys. 11.33C. Podstawowym elementem struktury są węzły/gwiazdy pełniące rolę dzielników sygnału. Bardzo często gwiazdy są dzielnikami pasywnymi. W konstruowanych układach stosowane są sprzęgacze (patrz rys. 11.13), dzielniki typu Y czy też układy planarne wykorzystujące falowodowe siatki dyfrakcyjne (patrz rys. 11.20A). W gwiazdach aktywnych wykorzystywane są zwykle – poza dzielnikami – wzmacniacze. Ważną zaletą tej struktury jest łatwość jej rozbudowy w zależności od potrzeb.



Rys. 11.34. Hierarchizacja sieci telekomunikacyjnej.

W złożonej strukturalnie sieci telekomunikacyjnej można wyróżnić trzy warstwy/poziomy różniące się rozmiarami i szybkością transmisji tworzących je łącza. Pokazano je na rys. 11.34.

Najważniejszymi składnikami systemu są łącza optyczne dalekiego dystansu, łączące ze sobą kraje i kontynenty. Ich przepustowość decyduje o wydajności całego systemu. Są to zwykle struktury liniowe, w których długość niektórych odcinków może przekraczać 1000 km. Zaliczamy do nich łącza transoceaniczne i podmorskie.

Kolejnym poziomem w tej hierarchii są sieci metropolitalne MAN (ang. *Metropolitan Area Network*). Sieci MAN tworzone są w dużych miastach, regionach. Wśród nich popularną strukturą są sieci pierścieniowe, pokazano je na rys. 11.33B.

Wreszcie trzeci poziom stanowią sieci lokalne LAN (ang. *Local Area Network*). Na tym poziomie najczęściej spotykamy strukturę gwiazdy.

Cały ten złożony system obsługuje bardzo liczną grupę użytkowników. Należy odnotować, że liczba użytkowników zbliża się na naszym globie do liczby ludności.

11.7. Podsumowanie

Opanowanie i udoskonalenie techniki multipleksacji WDM, a w szczególności DWDM, zwiększyło znacznie mierzone w Gb/s prędkości transmisji informacji. Była to i jest w swych skutkach kolejna, rewolucyjna zmiana systemów teletransmisyjnych. Od prądowej modulacji mocy optycznej lasera i bezpośredniej detekcji, w ciągu kilku dekad łącza światłowodowe przebyło ewolucyjnie długą drogę. Długość tej drogi daje porównanie z nadajnikiem pracującym z generatorem widma grzebieniowego, przedstawionym na rys. 11.25, albo z łączem z multipleksacją na podnośnych, przedstawionym na rys. 11.27. W obu przypadkach łącza światłowodowe przesyłają wiele strumieni informacji.

W czasopiśmie naukowym pojawiają się krótkie publikacje o kolejnym optycznym systemie transmisyjnym, który pozwolił na transmisję rekordowej liczby bitów na sekundę. I tak 27 października 2014 roku pojawiła się informacja, którą zatytułowano następująco: *255Tbps: World's fastest network could carry all of the internet's traffic on a single fiber*. Uzyskanie 255 Tb/s to wspaniały rezultat, należy go odnotować z najwyższym uznaniem.

Nie czekaliśmy długo: 11 lutego 2016 roku ukazała się kolejna informacja/publikacja: *Increasing the information rates of optical communications via coded modulation: a study of transceiver performance* (<https://www.nature.com/articles/srep21278>). Autorzy zbudowali system, w którym uzyskali kolejny rekordowy wynik prędkości transmisji pojedynczym światłowodem: 1125 Tb/s. To są rezultaty uzyskane w łącach eksperymentalnych. Rozwiązania komercyjne są o rząd wielkości wolniejsze. Praktyka wskazuje, że wkrótce osiągną parametry dzisiejszych laboratoryjnych.

Zestawione w tabeli 11.2 dane ilustrują tempo rozwoju możliwości transmisyjnych na przykładzie wybranych transoceanicznych łączy światłowodowych.

Tabela 11.2. Zestawienie parametrów wybranych transoceanicznych łączy światłowodowych ilustrujące rozwój technologii

| System | Rok | Prędkość transmisji | Długość [km] | Technologia |
|---------------|--------|---------------------|--------------|-----------------------------------|
| TAT-8 | 1988 | 280 Mb/s | 13 000 | $\lambda=1300$ nm, Trans. cyfrowa |
| TAT-10 | 1991/2 | 560 Mb/s | - | Światłowód DSF, $\lambda=1500$ nm |
| Tat-12 | 1995 | 5 Gb/s | - | Wzmacniacz EDFA |
| AC-1 | 1998 | 80 Gb/s | - | $\lambda=1500$ nm, WDM |
| TAT-14 | 2001 | 640 Gb/s | 15 430 | $\lambda=1500$ nm, DWDM |
| AC-2 | 2001 | 1280 Gb/s | 6000 | $\lambda=1500$ nm, DWDM |
| 360Atlantic-1 | 2001 | 1920 Gb/s | - | $\lambda=1500$ nm, DWDM |
| FLAG | 2001 | 4800 Gb/s | 28 000 | 60 WDM Channels |
| Apollo | 2003 | 3200 Gb/s | 13 000 | 80 WDM Channels |
| India-ME-WE | 2009 | 3840 Gb/s | 13 000 | 96 WDM Channels |

Kolejne generacje łączy pokazują wpływ udoskonalenia parametrów światłowodów, przejścia do pasma 1500 nm, wprowadzenia wzmacniaczy optycznych, użycia techniki multipleksacji WDM, a następnie gęstej WDM. Zestawienie ma znaczenie historyczne, ale pokazuje także ogromny wysiłek włożony w rozwój telekomunikacyjnej infrastruktury światłowodowej naszego globu.

Bibliografia rozdziału 11

- 11.1 S. Vogel, "Back to basics: DWDM components, configurations, and test equipment OGEL", *Lightwave*, 2000, <https://www.lightwaveonline.com/articles/print/volume-17/issue-5/features/back-to-basics-dw-dm-components-configurations-and-test-equipment-53462192.html>.
- 11.2 J.-P. Laude, *DWDM Fundamentals, Components, and Applications*, Artech House, 2002.
- 11.3 J. Dawidczyk, B.A. Galwas et al., "Optical-microwave transmission system with subcarrier multiplexing for industrial measurement systems", *Journal of Telecommunications and Information Technology*, No. 1, 2002.
- 11.4 H. Toda et al., "Demultiplexing Using an Arrayed-Waveguide Grating for Frequency-Interleaved DWDM Millimeter-Wave Radio-on-Fiber Systems", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 21, No. 8, 2003.
- 11.5 *Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation, and Applications*, (eds.) J. Ye, S.T. Cundiff, Kluwer Academic Publishers / Springer, 2004.
- 11.6 X.J.M. Leijtens, B. Kuhlow, M.K. Smit, *Arrayed waveguide gratings, w: Wavelength filters in fiber optics*, (ed.) H. Venghaus, Springer, 2006.
- 11.7 P. Del'Haye et al., "Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator", *Nature*, Vol. 450, 2007.
- 11.8 X. Li, X. Chen, et al., "Electronic post- compensation of WDM transmission impairments using coherent detection and digital signal processing", *Optics Express*, Vol. 16, No. 2, 2008.
- 11.9 W. Shieh, H. Bao, Y. Tang, "Coherent optical OFDM: theory and design", *Optics Express*, Vol. 16, No. 2, 2008.
- 11.10 T. Pfau, S. Hoffmann, R. Noe, "Hardware-efficient coherent digital receiver concept with feedforward carrier recovery for M-QAM constellations", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 8, 2009.
- 11.11 T. Wang et al., "Enhanced fast light in microfiber ring resonator with a Sagnac loop reflector", *Optics Express*, Vol. 18, No. 15, 2010.
- 11.12 R.-J. Essiambre et al., "Capacity Limits of Optical Fiber Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 28, No. 4, 2010.
- 11.13 W. Shieh, "OFDM for Flexible High-Speed Optical Networks", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 10, 2011.
- 11.14 T.J. Kippenberg, R. Holzwarth, S. Diddam, "Microresonator-based optical frequency combs", *Science*, Vol. 332, 2011.
- 11.15 G. Bosco et al., "On the performance of Nyquist-WDM terabits uper channels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM subcarriers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 1, 2011.
- 11.16 *Introduction to DWDM Technology*, Cisco Report, Cisco Systems, Inc., https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf.
- 11.17 R. Antil, S. Beniwal, "An Overview of DWDM Technology & Network", *International Journal of Scientific & Technology Research*, Vol. 1, No. 11, 2012.
- 11.18 H.-M. Bae et al., "Fast Power Transient Management for OC-192 WDM Add/Drop Networks", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 43, No. 12, 2008.
- 11.19 D.J. Richardson, J.M. Fini, L.E. Nelson, *Space Division Multiplexing in Optical Fibres*, Cornell University Library, 2013, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.3908.pdf>.
- 11.20 R. Ryf et al., "Mode-Division Multiplexing Over 96 km of Few-Mode Fiber Using Coherent 6 × 6 MIMO Processing", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 30, No. 4, 2012.
- 11.21 J.M. Kahn, K.P. Ho, "Mode coupling effects in mode-division-multiplexed systems", *Proceedings of 2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting*, 2012.
- 11.22 J. Zhang et al., "Nonlinear compensation and crosstalk suppression for 4_160.8Gb/s WDM PDM-QPSK signal with heterodyne detection", *Optics Express*, Vol. 21, No. 8, 2013.

- 11.23 A. Klee et al., "Characterization of Semiconductor-Based Optical Frequency Comb Sources Using Generalized Multiheterodyne Detection", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 19, No. 4, 2013.
- 11.24 A. Johnson et al., "Microresonator-based comb generation without an external laser source", *Optics Express*, Vol. 22, No. 2, 2014.
- 11.25 D. Meena et al., "A Geometrical Model for Arrayed Waveguide Grating based Optical Multiplexer/De-multiplexer", *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 35, 2014.
- 11.26 R. Zhou, *Optical Frequency Comb Source for Next Generation Access Networks*, Dissertation, Dublin City University, Faculty of Engineering and Computing, 2014.
- 11.27 J. Lin et al., "High-quality frequency-locked optical frequency comb source for terabits optical communication system", *Optical Engineering*, Vol. 53, No. 12, 2014.
- 11.28 G. Li et al., "Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication", *Advances in Optics and Photonics*, No. 6, 2014.
- 11.29 T. Fehenberger et al., "On achievable rates for long-haul fiber-optic communications", *Optical Express*, Vol. 23, No. 7, 2015.
- 11.30 D.S. Millar et al., "Transceiver-limited high spectral efficiency Nyquist-WDM systems", Paper pres. in Optical Fiber Communications (OFC) Conference, Los Angeles, 2015.
- 11.31 J. Pfeifle et al., "Coherent terabit communications using a quantum-dash mode-locked laser and self-homodyne detection", Paper pres. in Optical Fiber Communication (OFC) Conference, Los Angeles 2015.
- 11.32 C. Shahriar et al., "PHY-Layer Resiliency in OFDM Communications: A Tutorial", *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 17, No. 1, 2015.
- 11.33 G.M. Saridis et al., "Survey and Evaluation of Space Division Multiplexing: From Technologies to Optical Networks", *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 17, No. 4, 2015.
- 11.34 J. Pfeifle, *Terabit-Rate Transmission Using Optical Frequency Comb Sources*, Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Dissertation, 2016.
- 11.35 K. Takeshima et al., "51.1-Tbit/s MCF Transmission Over 2520 km Using Cladding-Pumped Seven-Core EDFAs", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 2, 2016.
- 11.36 D.S. Millar et al., "Design of a 1 Tb/s Superchannel Coherent Receiver", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 6, 2016.
- 11.37 R. Maher et al., "Increasing the information rates of optical communications via coded modulation: a study of transceiver performance", *Scientific Reports* 6, 2016, <https://www.nature.com/articles/srep21278>.
- 11.38 T. Mizuno et al., "Dense Space-Division Multiplexed Transmission Systems Using Multi-Core and Multi-Mode Fiber", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 34, No. 2, 2016.
- 11.39 Yusuke Sasaki et al., "Few-mode multicore fibers for long-haul transmission line", *Optical Fiber Technology*, Vol. 35, 2017.
- 11.40 J. Li et al., "Recent progress in mode-division multiplexed passive optical networks with low modal crosstalk", *Optical Fiber Technology*, Vol. 35, 2017.
- 11.41 Y. Weng et al., "Space division multiplexing optical communication using few-mode fibers", *Optical Fiber Technology*, Vol. 36, 2017.
- 11.42 Z. Yao, M. Lu, "Signal Multiplexing Techniques for Global Navigation Satellite Systems. The principle, progress, and challenges within a uniform framework", *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 34, No. 5, Sept. 2017.
- 11.43 T. Zami, "Multiflow Application for WDM Networks With Multicarrier Transponders Serving Superchannels in Contentionless OXCs", *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 9, No. 1, 2017.