

Optyczny Internet terabitowy

KIERUNKI ROZWOJU

Stosunkowo proste obliczenia oraz kierunek postępu technologii w optoelektronice wskazują, że w najbliższej przyszłości można spodziewać się multiterabitowych przepływności w pojedynczym światłowodzie [1]. Obecne optyczne systemy transportowe zapewniają pojedyncze terabity przepływności w jednym włóknie przy efektywności spektralnej wykorzystania pojedynczego światłowodu w granicach: 0,1–0,2 bit/s/Hz. Taka przepływność jest realizowana np. w systemie **DWDM** (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) z 32 kanałami **TDM** (*Time Division Multiplexing*) o szybkości transmisji 40 Gbit/s. Uzasadnione jest założenie podwyższenia wkrótce tych parametrów np. do 20–30 Tbit/włókno przy efektywności spektralnej transmisji optycznej rzędu 0,4 bit/s/Hz. Przewiduje się także wprowadzenie do eksploatacji standardu Ethernet 80 Gbit/s. Teoretycznie graniczne parametry to 50 Tbit/włókno oraz 0,5 bit/s/Hz [2], przy założeniu zastosowania światłowodów ultraniskostratnych (typu *All-Wave*, czyli bez rezonansowych pasm absorpcyjnych) z rozszerzoną charakterystyką małej (lecz niezerowej) dyspersji w pasmach: S, C, L, XL (1250–1700 nm). Kompromisem jest jednak dopuszczenie większych strat transmisji (nawet do 1 dB/km) na brzegach pasma falowego oraz zmian poziomu dyspersji wewnątrz pasma [3].

Znaczne, możliwe do uzyskania, przepływności w sieci transportowej sprzyjają rozwojowi sieci dostępowych oraz ich zróżnicowaniu. W poszczególnych rozwiązaniach sieci dostępowych sięga się po techniki szerokopasmowe. Zwiększa się liczba oferowanych usług komercyjnych. Prowadzone są badania nad nowymi usługami, np. identyfikacją (**RFID** – *Radio Frequency Identification*) czy lokalizacją (www.placelab.org). Obniża się koszty zwielokrotnienia transmisji w sieciach lokalnych przez wprowadzanie nowych standardów i masowej produkcji takich urządzeń, jak **CWDM** (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*). Ośmiokanałowe (8×1 Gbit/s) urządzenia nadawczo-odbiorcze (*transceiver*) CWDM ze źródłami **VCSEL** (*Vertical-Cavity Surface Emitting Laser*) [4] dla światłowodu wielodomowego kosztuje obecnie ok. 30 euro. Jeszcze tańsze *transceiver*y ze źródłami w postaci diod elektroluminescencyjnych są dostępne do szybkości transmisji ok. 1 Gbit/s. Standardowe płyty domowych komputerów PC są wyposażane w interfejsy sieciowe Ethernet 1 Gbit/s z możliwością wykonania reflektometrii diagnostycznej okablowania. W sieciach lokalnych coraz częściej używa się optycznego Ethernetu 10 Gbit/s (OC-192), którego urządzenia znacznie staniały po wprowadzeniu, kilka lat temu, standardu Ethernet 40 Gbit/s. Można przewidywać, że Ethernet 10 Gbit/s stanie się ewolucyjnie standardowym rozwiązaniem w sieciach lokalnych po wprowadzeniu do eksploatacji i upowszechnieniu się standardu Ethernet 80 Gbit/s w sieciach transportowych.

Wprowadzenie tanich rozwiązań CWDM w sieciach lokalnych podwyższa osiągalne w nich przepływności obecnie do poziomu dziesiątków Gbit/s, a wkrótce do setek Gbit/s. Niski koszt

systemu CWDM bierze się ze znacznie zmniejszonych wymagań na rozstęp międzykanałowe. Zamiast gęstego upakowania, jak w systemie **DWDM** (odstęp międzykanałowe od 100 GHz, co odpowiada 0,8 nm, a następnie 50 GHz i 25 GHz), odstęp są rzędu dziesiątków nm. Stosowane obecnie systemy CWDM dysponują 16 kanałami (np. 1 Gbit/s każdy) wzajemnie odseparowanymi co 20 nm i położonymi w paśmie 1310–1610 nm. Układy optyczne są zbudowane w postaci miniaturowych standaryzowanych modułów *transceiver*owych. Standaryzowany rozstęp przestrzenny pomiędzy kanałami w *transceiver*ach CWDM 4-, 8- i 16-kanałowych wynosi odpowiednio 1000, 500 i 250 μm . Jednostkowe ceny urządzeń CWDM są ok. 100-krotnie mniejsze od DWDM. Urządzenia CWDM są łatwo instalowane i nie wymagają żadnej formy justacji optycznej (w odróżnieniu od DWDM [5]). W niektórych przypadkach CWDM jest jedyną metodą zwiększenia przepływności (w sieci szkieletowej), ponieważ zainstalowane światłowody starszego typu o wysokiej dyspersji nie mogą przenosić szybszych sygnałów. Dla transmisji na większe odległości są dostępne tanie *transceiver*y CWDM z rezonatorami **F-P** i laserami **DFB**. W sieci lokalnej tanie zwielokrotnienie CWDM nie wymaga zmiany okablowania strukturalnego. Producentami urządzeń CWDM są firmy: Finisar, DiCon Fiberoptics, Fiber-Dyne Lab, Canoga Perkins, Alliance Fiber Optics Products, Fortel Networks, Fibre-Works. Pierwsze na rynku produkty CWDM dostarczały w 2001 r. firmy Blaze i Cognet [6].

Powyżej zarysowane tendencje prowadzą do rozwoju optycznego Internetu terabitowego (**OIT**) jako sieci użytkowej następnej generacji. Dzięki wykorzystaniu OIT tworzy się funkcjonalności sieci dla obsługi nowych potrzeb społeczeństwa informacyjnego.

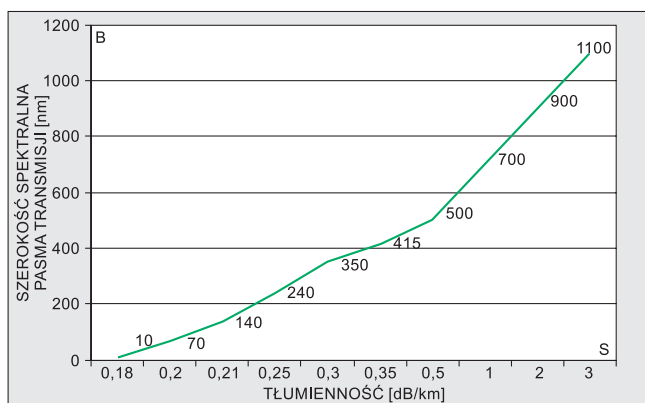
EFEKTYWNOŚĆ WYKORZYSTANIA PASMA ŚWIATŁOWODU

Światłowodowy system transmisji wielkich ilości informacji opiera się na połączeniu dwóch metod zwielokrotnienia – falowego WDM i czasowego TDM. W kanale optycznym sygnał podlega zwielokrotnieniu czasowemu. Kanały optyczne muszą być wzajemnie izolowane. Parametrem jakości izolacji jest przesłuch optyczny. Odstęp międzykanałowe są nieużyteczne pod względem sygnałowym, powinny być więc jak największe. Nie możliwe jest wykorzystanie pełnego pasma optycznego do celów transmisyjnych. Fala optyczna każdego kanału jest modulowana cyfrowo sygnałem zwielokrotnienia czasowego, co powoduje rozszerzenie pasma kanału optycznego. Rozszerzenie to jest proporcjonalne do szybkości sygnału zwielokrotnienia czasowego. Nie może ono przekroczyć szerokości kanału optycznego. Dla ustalonej szerokości optycznej przerwy międzykanałowej można zdefiniować maksymalną możliwą szybkość sygnału TDM. Odwrotnie, dla ustalonej szybkości TDM można zdefiniować maksymalną liczbę kanałów optycznych obsługiwanych przez system.

Pasma transmisyjne idealnego światłowodu telekomunikacyjnego, dla dopuszczalnych strat 0,3 dB/km, obejmuje obszar

* Instytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska
e-mail: rrom@ise.pw.edu.pl, K.Pozniak@ise.pw.edu.pl

1325–1675 nm. Szerokość użytecznego pasma transmisyjnego wynosi 350 nm. Dla strat 0,5 dB/km, szerokość obszaru spektralnego dla transmisji wynosi ok. 500 nm. Dla strat 1 dB/km rozciąga się w zakresie 1000–1700 nm. Dla takiego poziomu strat do podziału jest 700 nm pasma optycznego. Dla tłumienia 2 dB/km szerokość pasma wynosi 900 nm, a dla 3 dB/km przekracza 1000 nm. Zależność szerokości pasma transmisyjnego od poziomu tłumienności w systemie telekomunikacyjnym, obliczoną dla najlepszych światłowodów, przedstawiono na rys. 1.



■ Rys. 1. Zależność szerokości dostępnego falowego pasma transmisyjnego światłowodu B [nm] od wymaganego lub dopuszczalnego w systemie poziomu strat transmisji jednostkowej S [dB/km]. Wykres obliczony z danych producentów najlepszych światłowodów telekomunikacyjnych. Analizowano światłowody komercyjne, np. typu All-Wave lub równoważne

Obecnie w większości systemów jest używanych zaledwie kilkadziesiąt nm. Do celów praktycznych pasmo optyczne jest podzielone. Podział podlega normie międzynarodowej ITU-T GRID (G.692). Wprowadza ona odstępy międzykanałowe w następującym szeregu 200 GHz, 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz, 12,5 GHz. Odstępy w dziedzinie częstotliwości odpowiadają odstępom optycznym: 1,6 nm, 0,8 nm, 0,4 nm, 0,2 nm, 0,1 nm. Szybkości transmisji TDM są zgodne ze znormalizowanym szeregiem: 2,5 Gbit/s, 10 Gbit/s, 40 Gbit/s. Opracowywany jest system następnej generacji o szybkości 80 Gbit/s. Elektronicznym szybkościom modulacji nośnej fali optycznej można przypisać odpowiednie optyczne szerokości spektralne sygnału zmodulowanego. Problemy związane ze wzrostem szybkości działania elektroniki systemu TDM oraz wzrostem gęstości upakowania kanałów systemu DWDM są następujące: znaczny wzrost kosztów elementów elektronicznych i optoelektronicznych, trudniejsza technologia produkcji elementów i konieczność sprawnego wprowadzania nowych rozwiązań technicznych i technologicznych, gorsze parametry sygnałowe elementów i podzespołów, wzrost dyspersji światłowodu.

Podstawowe parametry systemu terabitowego

Częstotliwość fali optycznej transmitowanej światłowodem wynosi ok. 200 teraherców. Przeliczając częstotliwość fali nośnej oraz szerokości modulacyjnego pasma transmisyjnego dla różnych tłumienności w światłowodzie, otrzymuje się hipotetycznie dla częstotliwości 100 THz szerokość wymaganego pasma spektralnego do transmisji takiego sygnału wynoszącą 800 nm. Jest to pasmo dostępne w światłowodzie na poziomie tłumienności 1,5 dB/km. W szerokopasmowych pasywnych światłowodowych sieciach lokalnych można dopuścić nawet większą tłumienność, aż do 3 dB/km, a w związku z tym do dyspozycji jest pasmo optyczne ponad 1 μm. Cechą idealnego światłowodu do powyższego zastosowania jest całkowita przezroczystość ograniczona rozpraszaniem Rayleigha i rozpraszaniem wielofononowym oraz niewielka, projektowana dla konkretnego poziomu przepływności, wartość dyspersji, jednakowej w całym paśmie transmisji. Zbyt mała wartość dyspersji prowadzi do przestuchów międzykanałowych. Zbyt duża wartość dyspersji, lub jej nierównomierność w paśmie, prowadzi do ograniczenia szybkości transmisji.

Dla szybkości transmisji systemu TDM następnej generacji 80 Gbit/s dyspersja wyrażona przez maksymalne dopuszczalne różnicowe opóźnienie grupowe sygnału nie może przekraczać ok. 5 ps dla zadanych warunków transmisji (szerokość spektralna źródła, odległość międzyregeneratorowa, zadany rodzaj światłowodu, metoda kompensacji dyspersji itp.). Szerokość spektralna takiego sygnału wynosi 1 nm, a łącznie z przerwą międzykanałową w systemie – 50 GHz. Aby sygnał ten mógł być transmitowany na odległość 10 km, dyspersja jednostkowa nie może przekraczać 0,5 ps/nm/km. W klasycznym światłowodzie jest to niemożliwe. Konieczna jest redukcja pasmowa bezwzględnej wartości dyspersji oraz redukcja nachylenia dyspersji. Stosowane jest połączenie włókien typu **NDSF** (*Non-zero Dispersion Shifted Fibre*) oraz **IDF** (*Inverse-Dispersion Fiber*). Taką parę nazywamy **DSMFP** (*Dispersion Slope Managed Fibre Pair*). W połączonej parze światłowodów o dobranych ich długościach dla zadanej przepływności następuje kompensacja dyspersji na końcu połączeniowych odcinków. Lasery stosowane dla tej techniki muszą mieć gwarantowaną stabilność częstotliwości 3 GHz, co w domenie długości fal wynosi 1,8 pm. Obecnie stosowane odległości międzykanałowe 25 GHz, a wkrótce 10 GHz, odpowiadają 200 pm i 60 pm. Zakłada się wymaganą rozdzielczość pomiaru charakterystyk spektralnych takich systemów wielokanałowych – odpowiednio 10–15 pm oraz 6 pm. Stosując szybkość transmisji 40 Gbit/s i w przyszłości 80 Gbit/s w pojedynczym kanale, do pomiarów potrzebny jest sprzęt o paśmie odpowiednio 120 GHz i 240 GHz.

Obecne systemy DWDM zapewniają maksymalną przepływność zagregowaną na światłowód ok. 10 Tbit/s. Są to systemy mające 160–320 kanałów × 10 Gbit/s lub 80 kanałów × 40 Gbit/s. W odmienny sposób tak szerokie pasmo przezroczystości światłowodu, ok. 500 nm, wykorzystano w tańszych i prostszych konstrukcyjnie sieciach metropolitalnych o stosunkowo niewielkim rozkładzie przestrzennym – rzędu pojedynczych kilometrów. Sieci typu METRO, ze względu na koszty, są budowane z zastosowaniem techniki biernej dystrybucji użytecznego transmisyjnego sygnału optycznego pomiędzy wszystkie węzły sieci. Nie ma potrzeby stosowania wówczas żadnych optycznych lub optoelektronicznych elementów przetwarzających i wysoce selektywnych. Technika ta nazywana **PON** (*Passive Optical Networks*) w połączeniu z CWDM umożliwia stosunkowo tanie zwielokrotnienie transmisji na trudnym obszarze miejskim, na którym budowa dodatkowych linii jest bardzo kosztowna. Dotychczas systemy METRO nie podlegają tak ścisłej normalizacji, jak systemy dalekosiężne. Wskutek tego rozwiązania firmowe są wzajemnie niekompatybilne. Systemy WDM METRO wykorzystują pasmo światłowodu w sposób znacznie mniej optymalny, niż systemy znormalizowane i w związku z tym techniki tam stosowane są nieodpowiednie dla systemów dalekosiężnych.

Efektywność zarządzania transmisją optyczną próbuje się poprawić, wprowadzając protokoły specjalizowane dla optoelektroniki. Jednym z takich protokołów jest **GMPLS** (*Generalized Multiprotocol Label/Lambda Switching*). Etykieta jest wprowadzana dla włókna optycznego, długości fali, pasma obejmującego grupę lub kilka grup długości fal oraz dla optycznej szczeliny czasowej. Określa ona pasmo medium transmisyjnego rezerwo-

wanego dla danego strumienia transmisyjnego. Etykieta towarzyszy strumieniowi, na przykład pojedynczej długości fali, definiując także ścieżkę optyczną w sieci i usprawniając organizację transmisji. Etykieta może być także długość fali albo sekwencja długości fal.

Porównanie różnych rozwiązań

Rozważmy dwa przypadki kanałów transmisyjnych o przepływności 40 Gbit/s oraz 10 Gbit/s. Kanał 40 Gbit/s ma całkowitą szerokość 0,6 nm dla systemu z separacją 25 GHz. Jeden kanał 10 Gbit/s ma szerokość 0,3 nm. Ma on jedynie dwukrotnie mniejszą szerokość spektralną przy czterokrotnie mniejszej przepływności od kanału 40 Gbit/s. W tej różnicy tkwi jedno ze źródeł różnej sprawności wykorzystania pasma transmisyjnego światłowodu. Można zdefiniować efektywność spektralną (ES) wykorzystania pasma światłowodu przez system DWDM. Jest to szybkość transmisji danych w bit/s, przypadająca na jednostkę szerokości pasma transmisyjnego światłowodu w Hz – ES [bit/s/Hz]. Można obliczyć ES dla przykładowego systemu, np. 160 kanałów po 10 Gbit/s każdy. Przepływność całkowita wynosi 1,6 Tbit/s. Całkowita szerokość jednego kanału dla systemu ITU 50 GHz wynosi 0,4 nm. Całkowita szerokość dyskusowanego systemu transmisyjnego WDM wynosi 64 nm w dziedzinie długości fal i zajmuje całe pasmo C. Całkowita sze-

rokość systemu transmisyjnego WDM wynosi 8 THz w dziedzinie częstotliwości. Otrzymuje się przepływność 1,6 Tbit/s z 8 THz pasma światłowodu. Efektywność spektralna wynosi 0,2 bit/s/Hz. W wyniku takich samych obliczeń dla systemu ITU 25 GHz otrzymuje się 48 nm na szerokości wykorzystywanego pasma optycznego, czyli 6 THz. Efektywność spektralna wynosi ok. 0,25 bit/s/Hz.

W tabeli 1 przedstawiono przeliczenie szerokości pasma optycznego pojedynczego kanału, liczby kanałów, przepływności całego systemu DWDM oraz efektywności spektralnej dla różnych kombinacji systemu TDM/WDM. Efektywności spektralne dla niektórych przypadków z tej tabeli wynoszą: ES (50 GHz, 160 kanałów, 10 Gbit/s) = 0,16 bit/s/Hz; ES (25 GHz, 160 kanałów, 10 Gbit/s) = 0,26 bit/s/Hz; ES (12,5 GHz, 160 kanałów, 10 Gbit/s) = 0,4 bit/s/Hz; ES (25GHz, 40 kanałów, 40 Gbit/s) = 0,5 bit/s/Hz. Stosowane obecnie, przez niektórych operatorów w kraju, systemy DWDM mają np. 80 kanałów po 10 Gbit/s z separacją 200 GHz. Efektywność spektralna wynosi zaledwie ES = 0,05 bit/s/Hz. Wiadomo obecnie, że nie są to systemy przyszłościowe. Tabela zawiera rodzaj diagonali dla stosunku 1:1 pasmo – przerwa. Trudny do realizacji przypadek systemu 10 Gbit/s/12,5 GHz zapewnia 2500 kanałów i przepływność 25 THz. System 40 Gbit/s/50 GHz zapewnia 625 kanałów i również 25 THz. Podobna przepływność dla systemu 160 Gbit/s (obecnie poza możliwościami realizacji) występuje dla nieco ponad 150 kanałów. Dla wszystkich systemów DWDM z diagona-

■ Tabela 1. Zestawienie obliczonych parametrów światłowodowych systemów transmisyjnych WDM/TDM. Oznaczenia: OM – odstęp międzykanałowy WDM według standardu ITU-T wyrażony w GHz lub nm, OPC – optyczne pasmo całkowite światłowodu systemu transmisyjnego – tutaj zakłada się 500 nm dla maksymalnego tłumienia światłowodu ok. 0,5 dB/km, PO – pasmo optyczne jednego kanału WDM łącznie z pojedynczą przerwą międzykanałową; K – liczba kanałów transmisyjnych dla OPC = 500 nm; P – zagregowane pasmo transmisyjne całego systemu w Tbit/s; ES – efektywność spektralna systemu transmisyjnego WDM/TDM w bit/s/Hz. Diagonalę tabeli wyznacza przybliżony warunek równości przerwy międzykanałowej do szerokości kanału WDM. Obliczenia w tabeli przeprowadzono według prostych zależności: $K = \text{OPC}/\text{PO}$; $P = K \cdot \text{TDM}$; $ES = P/62,5$

TDM WDM	2,5 Gbit/s (ok. 0,02 nm)	10 Gbit/s (ok. 0,1 nm)	40 Gbit/s (ok. 0,3 nm)	160 Gbit/s (ok.1,3 nm)	320 Gbit/s (ok.2,5 nm)
OM = 200 GHz OM = 1,6 nm OPC = 500 nm OPC = 62,5 THz	PO = 1,6 nm K = 312 P = 0,8 Tbit/s ES = 0,013 [bit/s/Hz]	PO = 1,7 nm K = 294 P = 2,94 Tbit/s ES = 0,05 [bit/s/Hz]	PO = 1,9 nm K = 263 P = 10,5 Tbit/s ES = 0,17 [bit/s/Hz]	PO=2,9 nm K=172 P=27,6 Tbit/s ES=0,44 [bit/s/Hz] diagonala 1:1	PO=4,1 nm K=122 P=39 Tbit/s ES=0,62 [bit/s/Hz]
100 GHz (0,8 nm)	PO=0,8 nm K=625 P=1,6 Tbit/s ES=0,025 [bit/s/Hz]	PO = 0,9 nm K = 555 P = 5,55 Tbit/s ES = 0,09 [bit/s/Hz]	PO = 1,1 nm K = 455 P = 18,2 Tbit/s ES = 0,29 [bit/s/Hz]	PO=2,1 nm K = 238 P = 38,1 Tbit/s ES = 0,61 [bit/s/Hz]	PO = 3,3 nm K=152 P = 48 Tbit/s ES = 0,78 [bit/s/Hz]
50 GHz (0,4 nm)	PO=0,4 nm K = 1250 P = 3,2 Tbit/s ES = 0,05 [bit/s/Hz]	PO = 0,5nm K = 1000 P = 10Tb/s ES = 0,16 [bit/s/Hz]	PO = 0,7 nm K = 715 P = 28,6 Tbit/s ES = 0,46 diagonalna 1:1	PO=1,7 nm K = 294 P = 47,1 Tbit/s ES = 0,75 [bit/s/Hz]	PO = 2,9 nm K = 172 P = 55Tbit/s ES = 0,88
25 GHz (0,2 nm)	PO=0,2 nm K = 2500 P = 6,4 Tbit/s ES = 0,1 [bit/s/Hz]	PO=0,3 nm K = 1660 P = 17 Tbit/s ES = 0,26 [bit/s/Hz]	PO=0,5 nm K=1000 P=40 Tbit/s ES=0,64 [bit/s/Hz]	PO=1,5 nm K = 333 P = 53 Tbit/s ES = 0,85 [bit/s/Hz]	PO = 2,7nm K = 185 P = 59Tbit/s ES = 0,95 [bit/s/Hz]
12,5 GHz (0,1 nm)	PO = 0,12 nm K = 4167 P = 10,4Tbit/s ES = 0,17 [bit/s/Hz]	PO = 0,2 nm K = 2500 P = 25 Tbit/s ES = 0,4 diagonala 1:1	PO=0,4nm K=1250 P=50Tbit/s ES=0,8 [b/s/Hz]	PO=1,4 nm K = 357 P = 57Tbit/s ES = 0,9 [bit/s/Hz]	PO = 2,6 nm K = 192 P = 61 Tbit/s ES = 0,98 [bit/s/Hz]
10 GHz (0,08 nm)	PO = 0,1nm K = 5000 P = 12,5 Tbit/s ES = 0,2 [bit/s/Hz]	PO = 0,2 nm K = 2780 P = 27,8Tbit/s ES = 0,44 [bit/s/Hz]	PO= 0,4 nm K = 1316 P = 53 Tbit/s ES = 0,84 [bit/s/Hz]	PO=1,4 nm K = 362 P = 58 Tbit/s ES = 0,92 [bit/s/Hz]	PO =2,6 nm K = 194 P = 62 Tbit/s ES = 0,99 [bit/s/Hz]
2,5 GHz (0,02 nm)	PO = 0,04 K = 12500 P = 31,3 Tbit/s ES = 0,5 diagonala 1:1	-	-	-	-

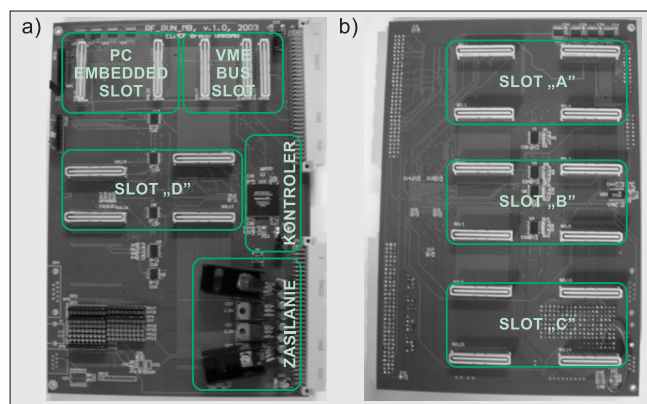
li efektywność spektralna jest jednakowa i wynosi ok. 0,4 bit/s/Hz. Jest to obecnie cel, do którego zdążają systemy komercyjne.

System DWDM jest złożony i kosztowny. Przypuszcza się powszechnie, że zanim rozpocznie się jego szerokie stosowanie poza telekomunikacją, np. w tanich, terabitowych sieciach komputerowych, musi upłynąć co najmniej dziesięć lat. Elementy i układy składowe systemu WDM to: wzmacniacze i tłumiki, multipleksery i demultipleksery – bezpośrednie, przeplatające, dostępowe; monitoring, wzmacniacze, przełączniki, połączenia optyczne, kompensacja dyspersji, filtracja oraz odbiorniki. Najważniejsze z tych elementów to filtry optyczne i aktywne tłumiki, decydujące o selektywności gęsto ułożonych pasm falowych oraz elementy optoelektroniczne, stanowiące oba końce kanałów elektronicznych i mające wpływ na szybkość systemu transmisyjnego. Pasma ITU-GRID są wydzielane za pomocą filtrów: cienkowarstwowych, światłowodów Bragga oraz filtrów aktywnych zbudowanych ze światłowodów kształtowanych, pobudzanych sygnałem zewnętrznym. Typowa charakterystyka filtru Bragga wystarcza do dobrej separacji międzykanałowej dla systemu 50 GHz. Szerokość spektralna filtru wynosi wówczas 0,25 nm (na szczycie charakterystyki) i 0,4 nm (u podstawy charakterystyki) a wysokość ponad 30 dB. Dla systemu WDM 25 GHz charakterystyki filtru są następujące: zarezerwowane pasmo kanałowe – 160 pm, odstęp kanałowy 40 pm, czułość polaryzacyjna mniejsza od 10 pm.

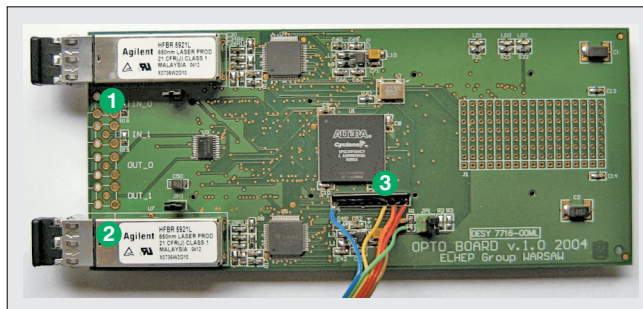
PRZYKŁAD REALIZACJI SZEROKOPASMOWYCH SIECI DOSTĘPOWYCH

Zrealizowano multigigabitowy węzeł dostępowy sieci telemetrycznej. Podstawą sieci dostępowej jest płyta bazowa przedstawiona na rys. 2. Stanowi ona uniwersalną, modułarną i rekonfigurowaną platformę dla specjalizowanych modułów pomiarowych i wykonawczych oraz transmisyjnych (rys. 3) opartych na matrycach FPGA. Obecnie opracowano następujące moduły specjalizowane, oparte na bardzo szybkich układach programalnych:

- moduł komunikacji VME w trybie *slave* oparty na układzie Acex,
- moduł PC-EMBEDDED wyposażony w jednostkę ETRAX oraz układ Acex,
- moduł szybkiej transmisji optycznej (2,5 Gbit/s) przeznaczony do koncentracji strumieni danych (zawiera układ Cyclone i dwa układy typu Serdes TLK2501) (rys. 3),
- moduł sterowania pracą węzła sieci telemetrycznej (zawierający układ Virtex II V40000 z blokami DSP, 8 kanałów A/D i 4 kanały D/A) przeznaczony do sterowania w sieci telemetrycznej.



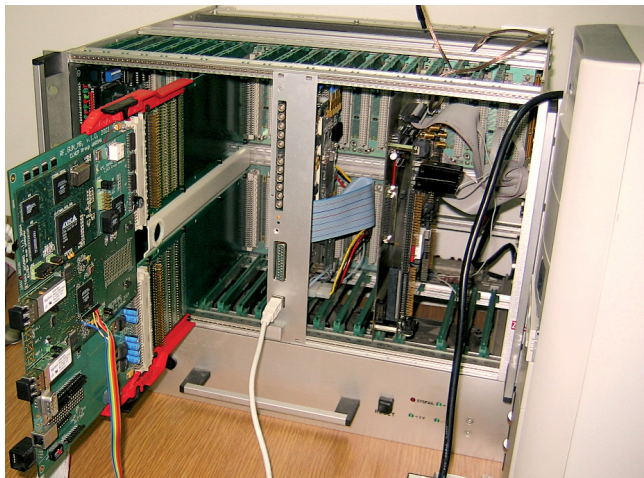
■ Rys. 2. Fotografia płyty drukowanej dla centralnego węzła dostępowego sieci telemetrycznej zrealizowanej jako wielowarstwowa płyta PCB: a) strona przednia, b) strona tylna



■ Rys. 3. Fotografia płyty nakładkowej transceiver'a optycznego 2,5 Gbit/s. 1 – układ Agilent HFB5921L 850 nm transceiver optyczny; 2 – układ TLK2501 Serializer/deserializer i transceiver'y z 1,5 na 2,5 Gbit/s; 3 – układ FPGA Cyclone EP1C20F324

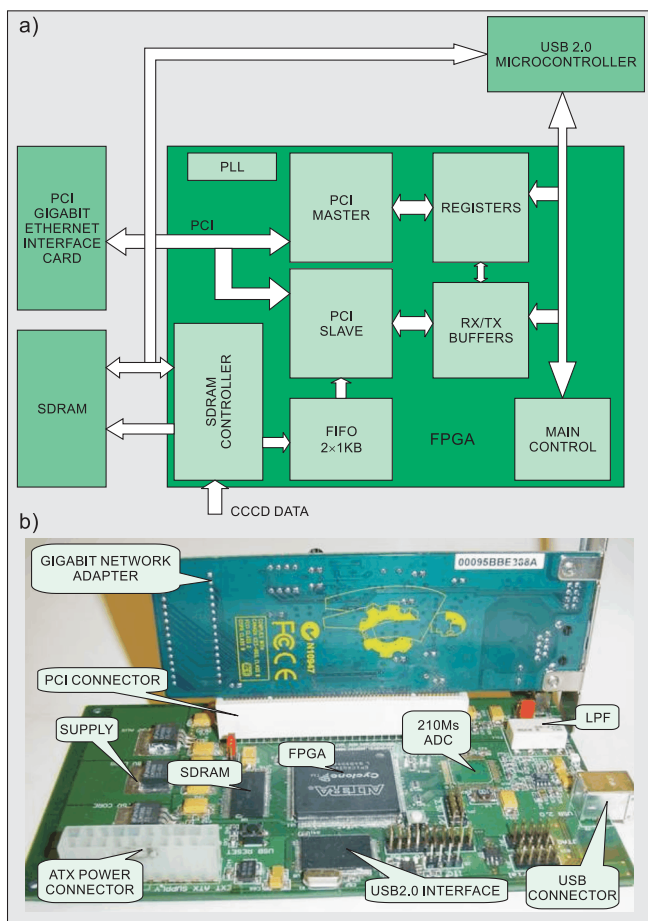
Omawiane rozwiązanie umożliwia wyodrębnienie wspólnych elementów sieci kontrolno-pomiarowej, bez konieczności ich wielokrotnego powielania w każdym osobnym module wykonawczym. Prowadzi to do znacznego uproszczenia sprzętowego tych modułów oraz ujednoczenia sterowania z poziomu oprogramowania. Dzięki temu proces projektowania obejmuje mniejszy zakres wymagań funkcjonalnych i umożliwia skrócenie czasu oraz obniżenie kosztów projektu.

Platforma dla węzła sieci telemetrycznej została zrealizowana jako wielowarstwowa płyta PCB w standardzie mechanicznym EURO-6HE dostosowanym do współpracy z magistralą komunikacyjną VME-BUS (rys. 4). Na rys. 2 przedstawiono widok od strony przedniej i tylnej. Struktura funkcjonalna składa się z następujących elementów:



■ Rys. 4. Fotografia stanowiska pomiarowego multigigabitowego węzła sieci telemetrycznej. Opracowanie własne

- centralnej części stanowiącej kontroler, którego zadaniem jest zapewnienie:
 - komunikacji ze standardowymi zewnętrznymi interfejsami komunikacyjnymi,
 - wewnętrznej komunikacji z poszczególnymi modułami,
 - dystrybucji szybkich sygnałów sterujących i synchronizujących pracę poszczególnych modułów i systemu jako całości,
- poszczególnych złączy A-D mających bezpośrednio szybkie połączenia wzajemne; takie rozwiązanie zapewnia realizację synchronicznej pracy poszczególnych modułów oraz szybką wymianę danych, sygnałów kontrolnych i sterujących.
- wspólnego systemu zasilania dostarczającego do poszczególnych złączy typowe napięcia wymagane w pracy współczesnych układów FPGA, buforów, konwerterów, a także elementów analogowych.



■ Rys. 5. Schemat blokowy (a) i fotografia (b) gigabitowego interfejsu internetowego dla kamery CCD [7]

Innym przykładem realizacji fragmentu multigigabitowej sieci dostępowej jest gigabitowy interfejs wideo dla kamery CCD. Interfejs, którego płyty systemowe przedstawiono na rys. 5, służy do budowy sieci kamer wideo przeznaczonych do badań naukowych w astronomii [7]. Interfejs ethernetowy (rys. 5b) nie ma wad rozwiązań USB. Umożliwia podłączenie zdalnej kamery zarówno kablem UTP, jak i światłowodem. Gigabitowa przepływność zapewnia akwizycję znacznej liczby danych telemetrycznych. Szansa bezpośredniego podłączenia do Internetu otwiera przed takim interfejsem wiele nowych możliwości i zastosowań w pełni samodzielnego systemu pomiarowego.

W przypadku używanych obecnie w praktyce najlepszych komercyjnych systemów dalekosiężnych DWDM, będących siecią szkieletową dla optycznego Internetu terabitowego, wartość efektywności spektralnej wynosi najwyżej: $ES = 0,2 \text{ bit/s/Hz}$, a wykorzystywane pasmo osiąga kilka THz. W dalekosiężnych systemach DWDM będzie się dążyć, przypuszczalnie w ciągu najbliższej dekady, do wartości ponad dwukrotnie większej – $ES = 0,5 \text{ bit/s/Hz}$. Przy tej efektywności spektralnej, osiągniętej w wyniku zrównoważonego wyboru opcji i zwiększania szybkości kanałów TDM oraz gęstszego upakowania kanałów WDM – tabela 1, wykorzystywane pasmo może być ponad dziesięciokrotnie szersze i osiągać kilkadziesiąt THz.

Oprócz telekomunikacji dalekosiężnej, obejmującej dzisiaj także sieć szkieletową Internetu, systemy WDM, a szczególnie CWDM, mają wielki potencjał zastosowania w lokalnych multigigabitowych sieciach komputerowych. Nadal jednak znaczne koszty tych systemów, o wysokiej efektywności spektralnej, skutecznie ograniczają takie zastosowania. Stosuje się więc systemy ze zwielokrotnieniem falowym o znacznie mniejszej, nawet stukrotnie i tysiąckrotnie, efektywności spektralnej. Parametr efektywności spektralnej ES systemów DWDM jest podstawowym czynnikiem ekonomicznym.

Korzystając ze znacznego pasma sieci OIT, buduje się nowe rozwiązania internetowych szerokopasmowych sieci dostępowych. Obejmują one zastosowania profesjonalne i badawcze, jak: monitoring, diagnostykę systemów infrastruktury technicznej, lokalizację i identyfikację, telemetrię oraz nowe formy multimedialnej komunikacji społecznej.

LITERATURA

- [1] Romaniuk R.: *Optyczny Internet terabitowy*, PAN, KELTEL, Warszawa 2001
- [2] Romaniuk R.: *Transmisja światłowodowa ze zwielokrotnieniem falowym – gęściej czy szybciej?*, Elektronika, vol. XLV, nr 5/2004
- [3] Wójcik J.: *Rozwój technologii światłowodów telekomunikacyjnych w początku XXI wieku*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 3/2002
- [4] Mroziejewicz B.: *Lasery półprzewodnikowe o przestrajalnej długości fali: perspektywy aplikacji w sieciach optycznych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 3/2002
- [5] Jędrzejewski K.: *Siatki Bragga – nowy element w technice światłowodowej*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 3/2002
- [6] Materiały firmowe z witryn internetowych: Finisar, DiCon, Fiberoptics, Fiber-Dyne, Canoga, AFO, Fortel, Fibre-Works, Optics.org, Fibers.org
- [7] Kasprovicz G.: *Interfejs Gigabit Ethernet do kamery CCD*, Materiały PERG/ELHEP ISE 01.2005

**Zapraszamy na stronę internetową
Przeglądu Telekomunikacyjnego
i
Wiadomości Telekomunikacyjnych
www.ptiwtel.neostrada.pl**

**Większość informacji jest zamieszczona
również w angielskiej wersji językowej**