



Transmisja pakietowa w sieci optycznej

MARIAN WRAŻEŃ, ARTUR BAJDA, MIROSLAW POPIS

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Rozwój usług technik transmisyjnych wyznacza kierunek rozwoju systemu telekomunikacyjnego. Efektywność systemu telekomunikacyjnego w dużej mierze zależy od charakterystyk sieci szkieletowej. Aplikacja standardu Ethernet i protokołu GMPLS w optycznej sieci szkieletowej pozwala na ujednoczenie protokołów w sieciach LAN i WAN i zwiększenie efektywności systemu telekomunikacyjnego w zakresie prędkości transmisji, zmniejszenia ilości transkoderów protokołów, niższych kosztów infrastruktury, obsługi, zarządzania i diagnostyki. Zyskają też na znaczeniu usługi związane z bezpieczeństwem sieci teleinformatycznej i danych.

Słowa kluczowe: sieć optyczna, routing optyczny, QoS, systemy telekomunikacyjne

Symbole UKD: 621.39.037.37

1. Wstęp

Aktualnie sieci rozległe zdominowane są przez ATM, Frame Relay i SONET/SDH. Gigabitowa odmiana Ethernetu zaczęła jednak z powodzeniem penetrować sieci WAN, a standard 10 GbE powinien tendencję tę znacznie nasilić.

Współcześnie ramki ethernetowe i pakiety IP są przesyłane za pośrednictwem systemów SDH. W tym celu wykorzystuje się tzw. transmisję zorientowaną pakietowo w systemach SONET/SDH (*Packet-over-SONET/SDH* — POS), polegającą na mapowaniu ramek w pakietach POS. Stosowane w tym wypadku protokoły to przede wszystkim HDLC i PPP.

W celu uzyskania bezpośredniego sprzężenia z sieciami ethernetowymi, które lepiej wykorzystują dostępną szerokość pasma, IEEE zdefiniował warstwę WAN-PHY, dzięki której przełączniki IP/ethernetowe mogą również korzystać z infrastruktury SONET/SDH. Komponenty Ethernetu 10-gigabitowego nie dają się sprzęgać bez-

pośrednio z infrastrukturą SONET/SDH, a jedynie z aktywnymi komponentami warstwy 1 (*Line Terminal Equipment* — LTE).

Zalety ujednoczenia protokołu w sieciach LAN i WAN są oczywiste — jednolita prędkość transmisji od źródła do przeznaczenia, brak konieczności stosowania kosztownych urządzeń tłumaczących z jednego protokołu na inny, tańsza infrastruktura dzięki wielkoseryjnej produkcji układów scalonych i urządzeń, większa podaż wykwalifikowanej kadry, tańsze oprogramowanie zarządzające i diagnostyczne. Jednak generalną słabością Ethernetu są jego niedostatki w sferze możliwości zagwarantowania pasma (QoS) oraz ciągłości pracy — ogranicza to znacznie jego użyteczność przy transmisji głosu czy obrazu. Projektanci nowych standardów Ethernetu starają się go pod tym względem udoskonalić. Do najbardziej obiecujących należą prace nad protokołem MPLS, umożliwiającym szybsze przekazanie strumienia pakietów i polepszenie gwarantowanego poziomu usług oraz prace nad ulepszeniem procedury *spanning tree*, służącej do przerzucania ruchu w razie awarii na inne łącza (dotychczas zajmowało to nawet do 30 sekund, nowa wersja ma uruchamiać rezerwowe łącze w czasie liczonym w milisekundach i gwarantować niezawodność na poziomie 99,999 proc.).

Ethernet jest protokołem, który nie nawiązuje (w przeciwieństwie do ATM) stałego połączenia nadawcy z odbiorcą. Z drugiej strony potrafi, dzięki swoim mechanizmom rozgłaszania (broadcasting), sprawnie odnaleźć poszukiwany węzeł w dużej sieci, a także swobodnie transmitować dane do wielu odbiorców równocześnie. Powodzenie technologii 10 GbE zależy w dużej mierze od tego, jak wygodnie (i jakim kosztem) uda się tę istniejącą infrastrukturę wykorzystać. W tym celu standard ten został wyposażony w interfejs do współpracy z pierścieniem SONET/SDH (a raczej z jedną z jego odmian — 9,58 Gb/s), tak by transmisja między dwoma portami 10 GbE podłączonymi do urządzeń brzegowych pierścienia mogła odbywać się w sposób „przezroczysty”.

2. Protokoły warstwy fizycznej sieci szkieletowej

Warstwa fizyczna 10 GbE WAN nie jest całkowicie zgodna z SONET/SDH i tylko w minimalnym stopniu implementuje usługi tej technologii — porty 10 GbE można podłączać do urządzeń SONET/SDH, lecz nie bezpośrednio do pierścienia SDH. W 10 GbE nie ma synchronizacji SDH (WAN PHY jest interfejsem asynchronicznym), nie są spełnione wymagania dotyczące typów źródeł światła, brak jest też możliwości współpracy z innymi typami kontenerów SDH niż VC-4-64c. W standardzie opisano 8 typów modułów PMD, obsługujących poszczególne rodzaje fizycznych łączy światłowodowych — po 4 dla LAN i WAN (LAN od WAN różni się praktycznie tylko prędkością transmisji).

Oprócz szeregowej transmisji 10 Gb/s dopuszczono też możliwość równoległej transmisji przez wiele wolniejszych kanałów, które mogą używać oddzielnych kabli bądź oddzielnych długości fal łączonych (multipleksowanych) techniką DWDM.

Przy łączach o długości do 300 metrów można stosować światłowody wielomodowe (z wieloma wiązkami światła „wstrzelowanymi” do kabla pod różnym kątem), ale muszą one być dobrej jakości. Obiecująco wyglądają prace nad laserami VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) dla długości fali 1310 nm (WWDM), oferującymi tanie i niezawodne rozwiązanie dla światłowodów wielomodowych. Przy większych odległościach konieczne są (wymagające odpowiednich diod laserowych) światłowody jednomodowe. W praktyce umożliwiają one transmisję na odległości ok. 100 km — wartości te osiągnęli już niektórzy producenci urządzeń dla gigabitowego Ethernetu (np. Cisco), chociaż standard zakładał maksymalnie 5 km.

Najbardziej obiecującym polem zastosowań 10 GbE są jednak sieci metropolitalne (MAN) i rozległe (WAN). Wraz z pojawieniem się gigabitowego Ethernetu możliwa stała się realizacja sieci metropolitalnych i rozległych z użyciem Ethernetu „end to end”.

Dziesięciogigabitowy Ethernet to większa przepustowość i oszczędności związane z wyeliminowaniem warstw ATM i SDH — przełączniki ATM są znacznie droższe od ethernetowych, urządzenia SDH również. Operator dysponujący siecią szkieletową 10 GbE może oferować tańsze łącza 10/100/1000 Mb/s — ponosi on znacznie mniejsze koszty zarządzania i utrzymania sieci. Zastosowanie łączy DWDM, mogących transportować pakiety 10 GbE równocześnie na każdej z 16 do 128 długości fal, powinno doprowadzić do dalszego obniżenia kosztów.

3. Przenoszenie ruchu TCP/IP w sieciach optycznych

Największe zainteresowanie sieciami optycznymi jest spowodowane korzyściami wynikającymi ze stosowania spójnej transmisji optycznej, która pozwala na przenoszenie w sieciach DWDM setek wiązek światła o różnych długościach fali w tym samym włóknie i przetwarzanie ich w pasywnych lub aktywnych elementach optycznych. Całkowita pojemność sieci i możliwość zestawiania połączeń zwiększa się wówczas o jeden lub dwa rzędy wielkości. Zintegrowane elementy optyczne sprawiają, że implementacja aktywnych komponentów sieciowych, takich jak przełączniki i multipleksery, staje się coraz bardziej realna.

Rozwój rozwiązań powinien doprowadzić do tzw. przezroczystych sieci optycznych, w których sygnały przesyłane są od początku do końca w formie optycznej. Dotychczasowe wykorzystywane technologie wymagały przekształcania sygnałów optycznych do postaci elektrycznej w każdym węźle sieci.

Taki sposób postępowania wynika z:

- konieczności przeprowadzenia regeneracji sygnału, czyli wzmocnienia i odtworzenia kształtu impulsów sygnału oraz odtworzenia sygnału zegarowego sekwencji bitowej;
- przetwarzania i sterowania przepływem, które to czynności mają gwarantować określoną jakość transmisji danych w kanale (odpowiadają na przykład za sprawdzanie błędów);
- konieczności zmiany długości fali, wymaganej przy odbiorze danych z jednego łącza na określonej długości fali i wprowadzaniu danych do drugiego łącza na innej długości fali;
- przełączania pakietów i rozkładania obciążenia ruchu, będących podstawowymi zadaniami komutatorów, umożliwiającymi przenoszenie danych z jednego portu wejściowego na określony port wyjściowy przy statystycznej multipleksacji dostępnych zasobów.

Konwersja sygnału optycznego do postaci elektrycznej stanowi „wąskie gardło” systemu, ograniczając całkowitą przepustowość sieci i czyniąc jej elementy bardziej skomplikowanymi. Obecnie dzięki rozwojowi technologii optycznych wspomniane funkcje można realizować bez przekształcania sygnału.

Jedno z rozwiązań, mających na celu wprowadzenie protokołu IP do sieci DWDM, zakłada bezpośrednie wprowadzenie dotychczasowych protokołów (ATM, FR) do infrastruktury transmisyjnej sieci DWDM. Do wad omawianej propozycji trzeba zaliczyć niższą wydajność i zwiększone koszty zarządzania siecią. W praktyce wiele funkcji zarządzania jest umieszczonych w różnych warstwach stosu protokołów, co wiąże się również ze znacznym narzutem bitowym.

Prowadzone są prace nad przesyłaniem danych IP bezpośrednio w sieciach DWDM, bez dodatkowych warstw pośrednich, przy zachowaniu niezbędnych cech funkcjonalnych lub wręcz wyższej wydajności. Przykładem mogą tu być propozycje przenoszenia ruchu IP bezpośrednio w sieciach SONET lub wyeliminowania warstwy SONET przez zastosowanie ramkowania PPP/HDLC w łączach optycznych (tzw. otoczki cyfrowej).

Inne rozwiązanie zakłada wykorzystanie nowej warstwy optycznej, umieszczonej poniżej dotychczasowych warstw protokołów i dostępnej za pomocą optycznego interfejsu użytkownika (OUNI — ang. *Optical User Network Interface*). Zadaniem wspomnianej warstwy jest udostępnianie łączy optycznych dla połączeń generowanych przez wyższe warstwy stosu i oddzielanie zasobów DWDM od protokołów wyższych warstw.

Proponowana metoda wymaga zdefiniowania protokołu warstwy optycznej, co wiąże się ze zwiększeniem złożoności mechanizmów zarządzania siecią i wymiany danych z innymi sieciami. Kolejna wada wynika z połączeniowej natury warstwy optycznej, która może ograniczać elastyczne współdzielenie pasma i może

utrudniać wprowadzanie nowych technologii, takich jak optyczne przełączanie pakietów.

We wszystkich wspomnianych rozwiązaniach dotychczasowy protokół IP znajduje się na szczycie standardów sieciowych, związanych z poszczególnymi protokołami (zasada pozostaje niezmienna, niezależnie od tego, czy zastosuje się rozwiązanie typu SONET, czy optyczną warstwę ITU), zarządzanych w sposób niezależny.

Wyznaczane w ten sposób trasy nazywa się trasami przełączania etykiet (LSP — ang. *Label Switched Paths*). Do ich identyfikacji stosowane są dodatkowe etykiety, dołączane do datagramów IP.

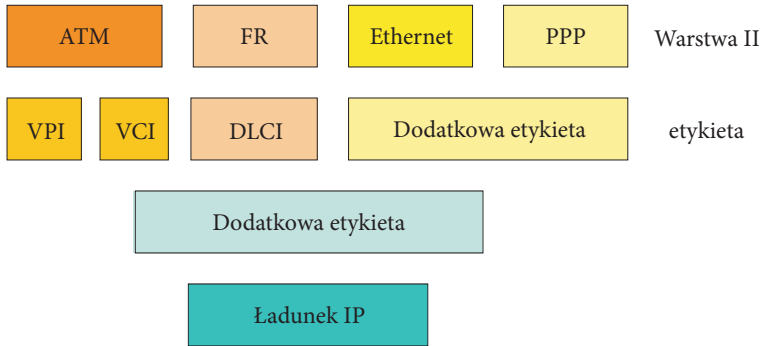
Definicja standardu MPLS ma na celu wydzielenie dwóch podstawowych funkcji warstwy sieciowej — funkcji sterującej i funkcji przekazywania danych. Element sterujący jest odpowiedzialny za routing. Jego działanie bazuje na wykorzystaniu standardowych protokołów routingu, takich jak OSPF czy BGP. Dzięki tym protokołom możliwa jest wymiana informacji z innymi routerami i utrzymanie tablicy przekazywania danych zależnej od algorytmu routingu. Tablica przekazywania danych bazuje na koncepcji klas jednakowych tras przekazywania danych (FEC). Do jednej klasy FEC mogą należeć pakiety o różnych nagłówkach IP. Klasa FEC jest w routerze charakteryzowana przez adres kolejnego routera na drodze pakietów, który to adres jest zapisany w tablicy routingu. Za wyznaczanie klas FEC i odpowiadających im routerów kolejnego skoku jest odpowiedzialny komponent sterujący.

Etykieta może zostać zakodowana w nagłówku protokołu przekazywania danych — jak ma to miejsce w przypadku sieci ATM — lub dodatkowych etykiet dodawanych do pakietów IP przed sformowaniem ramki warstwy drugiej. Na rysunku 1 przedstawiono przykład dodatkowego nagłówka dołączonego do ramki PPP przenoszonej w sieci SONET/SDH oraz odwzorowania etykiety MPLS na wartości VPI/VCI nagłówka ATM.

Stosowanie mechanizmów MPLS nie wpływa na inżynierię ruchu IP. Rozwiązanie MPLS w bardzo istotny sposób wpływa na możliwość zintegrowania mechanizmu MPLS z całkowicie optycznymi sieciami, zawierającymi routowalne fale określonej długości. Standard zakłada wykorzystanie długości fali jako jednostki pojemności sieci optycznej. Zgodnie z tym założeniem połączenia kompleksowe są udostępniane przez sieć jako zbiór fal o różnych długościach, przesyłanych w poszczególnych włóknach światłowodowych.

Mechanizm MPLS odwzorowuje trasy LSP na określone długości fal. Dzięki temu możliwe jest zaprojektowanie elementów sterujących dla przełącznic optycznych (OXC — ang. *Optical Cross-connect*) zależnych od sposobu obsługi ruchu MPLS, co z kolei pozwala na dodanie do routerów IP funkcji multipleksacji DWDM.

Mechanizm MPLS tworzy kanały optyczne typu punkt-punkt między punktami dostępowymi optycznej sieci transportowej, wykorzystując do tego celu te same protokoły sygnalizacyjne, jakie są stosowane w rozwiązaniu MPLS.



Rys. 1. Przykład włączenia dodatkowej etykiety MPLS do ramki ethernetowej oraz odwzorowania etykiety MPLS na wartości VPI/VCI nagłówka ATM

Istnieją jednak pewne istotne różnice między systemami MPŁS bazującymi na przełącznicach OXC a routerami sygnałów elektrycznych MPLS. W systemach MPŁS nie ma możliwości łączenia etykiet, gdyż nie jest możliwa operacja łączenia kilku długości fali. Ponadto urządzenia OXC oferują mniejszą liczbę poziomów alokacji zasobów, gdy wykorzystana może być jedynie niewielka liczba kanałów optycznych o określonej szerokości pasma. Routery elektryczne w zasadzie nie ograniczają liczby tras, a tym samym liczby poziomów alokacji zasobów.

4. Przełączanie strumieni danych

Koncepcja przełączania strumieni danych polega na ustanawianiu tras na określonej długości fali w czasie rzeczywistym, po wyodrębnieniu znacznej ilości danych (strumienia).

Strumień jest przekazywany określoną trasą, a po zakończeniu transmisji kanał zostaje usunięty. Celem jest zwiększenie współczynnika wykorzystania określonej długości fali, przy jednoczesnym ograniczeniu sterowania jedynie do zestawienia połączenia i jego zakończenia.

Pakiet sterujący poprzedza blok danych o określonej wartości czasu i przynosi informacje niezbędne do przekazania samych danych. Jedynym regulowanym parametrem w tego rodzaju sieciach jest wartość czasu przerwy. W praktyce czas przerwy może mieć dodatkowe znaczenie, gdy pozwala na wyznaczenie efektywności transmisji danych różnych klas i przydzielanie im różnych priorytetów.

Algorytm wyznaczania strumieni danych optycznych jest procesem decyzyjnym, mającym na celu ustalenie, czy należy zestawić trasę optyczną między dwoma punktami dla strumienia danych o określonym charakterze. Uwzględniając czas potrzebny na utworzenie połączenia oraz opóźnienie związane z przekazaniem

informacji do punktu docelowego i z powrotem, rozwiązanie znajduje zastosowanie jedynie w przypadku przesyłania strumieni danych o znacznych rozmiarach.

Po podjęciu decyzji o zestawieniu połączenia niezbędne jest przeprowadzenie operacji opisanych algorytmem routingu, które mają na celu wyznaczenie optymalnej trasy związanej z właściwym przydziałem określonych długości fal na poszczególnych etapach drogi do urządzenia końcowego. Konieczne jest więc zastosowanie wielu mechanizmów przydzielania zasobów i zarządzania nimi. Wspomniane zasoby muszą zostać zarezerwowane na wszystkich odcinkach trasy, co wymaga zestawienia kompleksowego połączenia.

W wewnętrznych węzłach sieci nie jest realizowana konwersja optyczno-elektryczno-optyczna, dlatego informacje sterujące muszą być przekazywane na falach o ustalonej długości, gdyż mogą być przetwarzane jedynie w sposób elektroniczny. Dzięki temu możliwe jest efektywne sterowanie za pomocą warstwy sterowania MPLS. Zatem informacje kontrolne, takie jak etykiety, muszą być przesyłane zarezerwowanymi trasami. W sieciach wykorzystujących mechanizm przełączania strumieni danych takie zasoby, jak pasmo, są rezerwowane za pomocą algorytmów jednokierunkowych. Zwiększa to stopień wykorzystania zasobów sieci, ale jednocześnie wprowadza ryzyko zablokowania bloku danych w nieokreślonym punkcie drogi do stacji docelowej.

Zaimplementowanie mechanizmu MPLS pozwala na przydzielenie odbieranym danym etykiety, zapisywanej w pakiecie kontrolnym i określającej, długość fali wykorzystywanej do ich transmisji. Podczas tworzenia wartości LSP warstwa sterująca kojarzy zdefiniowaną wcześniej etykietę wyjściową (tj. określoną długość fali) z etykietą wejściową. Inne rozwiązanie polega na zastosowaniu algorytmu optycznego przełączania etykietowanych strumieni danych (LOBS — ang. *Labeled Optical Burst Switching*). W praktyce zablokowanie strumienia danych może wówczas wystąpić jedynie w przypadku zajęcia wszystkich długości fali w danym włóknie światłowodowym.

Trasy do urządzeń docelowych mogą być wyznaczane na podstawie bezpośredniego routingu (ang. *explicit routing*) oraz zawężonego routingu (ang. *constraint-based routing*). Mechanizmy sygnalizacji i zarządzania kompleksowymi połączeniami mogą być realizowane dzięki przekazywaniu etykiet lub wykorzystaniu protokołów rezerwacji zasobów. Węzły brzegowe są wyposażane w urządzenia elektroniczne, mogą więc wykonywać zadania charakterystyczne dla klasycznych routerów IP.

5. Optyczne przełączanie pakietów

Ostatecznym celem procesu elastycznego zarządzania pasmem i multipleksacją strumieni danych jest uzyskanie systemu optycznego przełączania pakietów. Przełączanie pakietów prowadzi do optymalnego wykorzystania kanałów DWDM. Wynika to z dynamicznej alokacji zasobów, pozbawionej wad niskiej efektywności,

charakterystycznych dla typowych połączeniowych trybów pracy. Pakietowa transmisja danych jest z założenia bardziej elastyczna z punktu widzenia wykorzystania pasma. Pojemność łącza jest bowiem dzielona w czasie między poszczególne pakiety, dzięki czemu wszystkie łącza sieciowe są efektywniej wykorzystywane.

Celem działań jest uzyskanie przezroczystych routerów optycznych, zdolnych do przenoszenia ruchu TCP/IP. Największy problem, z jakim trzeba się zmierzyć, to ograniczenia wnoszone przez stosowaną technologię — brak pamięci optycznych — oraz sama charakterystyka urządzeń optycznych.

Przetwarzanie nagłówków IP jest procesem wymagającym wykonania setek linii kodu programu. Obniża to oczywiście całkowitą szybkość przekazywania pakietów. Głównym celem jest ograniczenie liczby konwersji elektryczno-optycznych i uzyskanie efektywniejszego interfejsu dla systemów transmisyjnych DWDM.

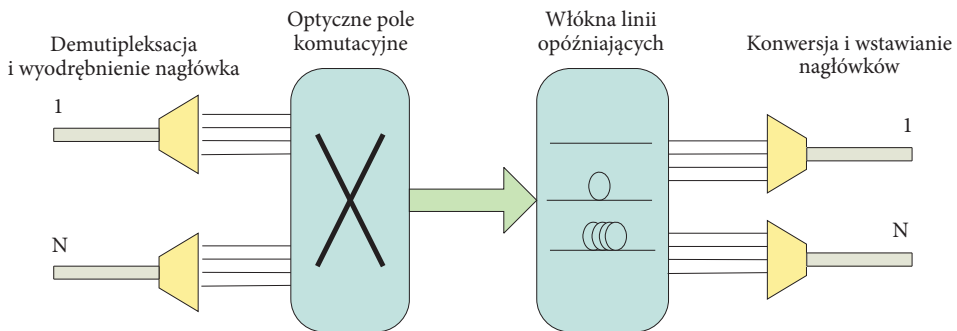
Ładunek datagramu jest przełączany optycznie i nie wymaga przekształcania do postaci elektrycznej.

Zatem efektywna implementacja routerów optycznych wymaga stosowania całkowicie optycznych komutatorów oraz algorytmu przekazywania danych zdolnego do pracy z prędkością charakterystyczną dla elementów optycznych. Spełnienie założenia nie stanowi problemu, wykorzystuje się w nich jako bramki optyczne półprzewodnikowe wzmacniacze optyczne (SOA — ang. *Semiconductor Optical Amplifier*).

Stosowane w sieci szkieletowej optyczne urządzenia brzegowe (OED — ang. *Optical Edge Devices*) są odpowiedzialne za wyznaczanie trasy LSP, wprowadzanie pakietów IP do jednego lub większej liczby pakietów optycznych, wstawianie odpowiednich etykiet do nagłówków pakietów optycznych i przekazanie danych do kolejnego przełącznika MPLS.

Technologie optyczne są wykorzystywane do realizacji zadań przełączania i przesyłania danych, zapewniając wysoką szybkość transmisji danych i przepustowość.

Ogólna struktura optycznego routera pakietów DWDM została przedstawiona na rysunku 2.



Rys. 2. Architektura funkcjonalna optycznego routera pakietów

Optyczne pole komutacyjne — zbiór pól komutacyjnych, mających na celu fizyczne połączenie portów wejściowych z odpowiednimi portami wyjściowymi.

Bufor linii opóźniającej — wykorzystywane do rozwiązywania ewentualnych problemów z dopasowaniem czasowym.

Sterowanie elektroniczne — realizuje zadania przetwarzania etykiet i analizowania tabel przekazywania danych; poprzedza działanie urządzeń optycznych ustawiając odpowiednio parametry komutatora.

Kluczowym elementem w poprawnym przełączaniu pakietów optycznych jest zachowanie formatu. Format ten powinien uwzględniać wymagania technologii optycznych. Przykładem może tu być właściwy odstęp czasowy (zwany pasmem ochronnym) między nagłówkiem pakietu a jego polem danych, gwarantujący odpowiednią przerwę, niezbędną do wyznaczenia trasy przez komutator. Czas przełączania w urządzeniu może mieć wartość dziesiątek nanosekund, ale przy bardzo wysokich szybkościach transmisji danych nie jest to czas, który można pominąć (jedna nanosekunda odpowiada dziesięciu bitom w łączu o przepływności 10 Gb/s). Zadaniem pasm ochronnych jest zabezpieczenie układu przed utratą danych.

Pakiety są tworzone w routerach brzegowych przez dodanie do datagramów IP pasma ochronnego i etykiety. Jeśli zachodzi taka potrzeba, można w nich równie przeprowadzać agregacje i (lub) segmentację pakietów. Wyróżniamy dwa rodzaje formatów pakietów:

- pakiety o stałej długości przesyłane w określonych szczelinach czasowych;
- pakiety o zmiennej długości przesyłane w sieciach asynchronicznych.

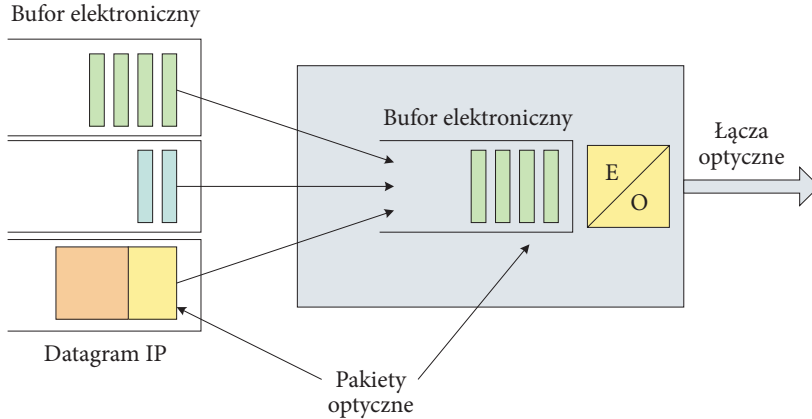
Pierwsze rozwiązanie wydaje się korzystniejsze przy założeniu implementowania optycznych komutatorów. Jego wadą jest konieczność optycznej synchronizacji i nie najlepsze efekty pracy w przypadku przenoszenia informacji o niestalej długości.

Drugie rozwiązanie nie wymaga synchronizacji i jest korzystniejsze w przypadku łączenia go z sieciami TCP/IP. Przełączniki optyczne mają wówczas znacznie bardziej skomplikowaną budowę i nie cechują się taką wydajnością pracy, jaka jest charakterystyczna dla elementów poprzedniego rozwiązania.

Niezależnie od analizowanego przypadku routery brzegowe muszą być wyposażone w odpowiedni interfejs dostępowy. Przykład implementacji takiego interfejsu został przedstawiony na rysunku 3.

Algorytm formowania pakietów musi uwzględniać problemy efektywności przesyłania, nie dopuszczając do przekroczenia maksymalnego czasu pakietyzacji optycznego pola danych. Ze względu na konieczność zachowania wspomnianego parametru niezbędne jest wyznaczenie odrębnych sposobów postępowania w przypadku pakietów o stałej i zmiennej długości. W obydwu przypadkach koncepcja jest relatywnie prosta — przed przesłaniem pakietu optycznego należy zgromadzić

możliwie największą liczbę pakietów przychodzących, ale jednocześnie trzeba określić dopuszczalny czas przechowywania datagramu w buforze interfejsu.



Rys. 3. Przykład optycznego urządzenia brzegowego (OED)

6. Obsługa przeciążeń w sieciach optycznych

Przeciążenie może wystąpić w przypadku czasowego przeładowania danego portu wyjściowego. Rozwiązanie problemu wymaga podjęcia działań w dziedzinie czasu — kolejkowanie — oraz w dziedzinie długości fal — właściwe multipleksowanie długości fal.

Efekt kolejkowania jest osiągnięty przez zastosowanie linii opóźniających (zwojów włókna), które opóźniają transmisję pakietów w taki sam sposób, jak umieszczenie ich na pewien czas w pamięci, a następnie pobranie i wysłanie. Bufor linii opóźniającej jest podobny do standardowej kolejki, choć nie jest identyczny.

Najważniejsza różnica polega na tym, że w pamięci elektronicznej pakiet może być przechowywany przez dowolnie długi czas. W buforze optycznym pakiet może być przechowywany jedynie przez pewien maksymalny, wstępnie określony czas (czas potrzebny na „przejście” przez najdłuższe włókno linii opóźniającej). Zapewnienie jakości transmisji danych wyrażonej przez współczynnik utraty pakietów na poziomie niższym niż 10^{-3} (akceptowalny dla aplikacji internetowych) wymaga zastosowania kilkuset linii opóźniających.

Kolejkowanie nie jest jedyną metodą unikania przeciążeń. Znaczną poprawę wydajności systemu można uzyskać dzięki połączeniu kolejkowania z multipleksowaniem długości fali. Pojęcie multipleksacja długości fali odpowiada strategii przypisywania poszczególnych długości fali pakietom przesyłanym w łączach DWDM. Wyróżnia się dwa rozwiązania tego typu:

1. Łącze o określonej długości fali (WC — ang. *Wavelength Circuit*). Poszczególne trasy wiodące przez sieć, odwzorowywane za pomocą wartości LSP, są wyznaczone przez długości fali. Wynika z tego, że pakiety należące do jednego połączenia MPLS są przesyłane na jednej długości fali.
2. Pakiet o określonej długości fali (WP — ang. *Wavelength Packet*). Długości fal są wykorzystywane jako współdzielony zasób sieci. Obciążenie jest więc rozkładane na całym zbiorze długości fal, zależnie od ich dostępności. Pakiety jednego połączenia MPLS mogą być przekazywane za pomocą fal o różnych długościach.

W sieciach zorientowanych na połączenie, przenoszenie pakietów należących do jednej trasy LSP na różne długości fali powoduje często nieskuteczne dostarczanie pakietów oraz uaktualnień tablicy przekazywania danych.

Problem wymaga zastosowania bardziej złożonych interfejsów na obrzeżach sieci optycznej, odpowiedzialnych za odtwarzanie sekwencji i wiąże się z ewentualnym przeciążeniem funkcji nadzorowania optycznych przełączników pakietów. Konieczne jest więc wyznaczenie pewnego rozwiązania pośredniego między ograniczeniem przeciążeń za pomocą zmian długości fal oraz przesyłaniem pakietów o tych samych wartościach LSP na jednej długości fali.

W sieciach DWDM zawierających przełączniki pakietów — mimo ograniczeń nakładanych na pojemności buforów — można opracować architekturę węzłów i techniki multipleksacji długości fal, które zapewnią bardzo niskie prawdopodobieństwo utraty pakietu optycznego. Uzasadnione jest więc założenie, że przeciążenie sieci optycznej występuje bardzo rzadko. W konsekwencji najważniejszym parametrem wpływającym na wydajność transmisji TCP/IP staje się kompleksowe opóźnienie.

Cechą charakterystyczną sieci optycznych jest to, że w każdym jej węźle pakiety są opóźniane o pewną wartość czasu. Dodatkowe opóźnienia występują w urządzeniach brzegowych, które są odpowiedzialne za budowę pakietu. Z architektury sieci wynika, że kompleksowe opóźnienie jest przede wszystkim funkcją trzech następujących czynników:

1. Opóźnienia w interfejsach dostępowych (wejściowych i wyjściowych).
2. Opóźnienia w węzłach sieci.
3. Opóźnienia propagacyjnego w włóknach światłowodowych łączących węzły.

Interfejs brzegowy można podzielić na dwa bloki logiczne. Pierwszy z nich gromadzi datagramy IP zgodnie z wartościami FEC przypisanymi do poszczególnych pakietów optycznych. Drugi z nich odpowiada za kolejkovanie pakietów przeznaczonych do wysłania za pomocą łącza optycznego.

Z tego względu opóźnienia wnoszone przez interfejsy dostępowe można podzielić na dwie grupy — opóźnienia pakietyzacji oraz opóźnienia transmisyjne.

Pierwsze z nich odpowiada czasowi potrzebnemu na sformowanie pakietu optycznego po pojawieniu się datagramu w interfejsie. Drugi z parametrów jest związany z czasem kolejgowania danych w kolejce FIFO oraz z czasem przekazania danych przez łącze wyjściowe.

Opóźnienie paketyzacji określa się jako czas między odbiorem całego datagramu (tj. odbioru ostatniego bitu datagramu) a przesłaniem datagramu do kolejki nadawczej.

Opóźnienia pakietów podczas przesyłania ich przez sieć optyczną wynikają z konieczności przetwarzania nagłówków, ustawiania komutatorów i opóźnienia pakietów we włóknach światłowodowych linii opóźniających. W przypadku zastosowania mechanizmów przekazywania danych MPLS i szybko rekonfigurowalnych przełączników (takich jak półprzewodnikowe wzmacniacze optyczne SOA) przetwarzanie nagłówków może zostać pominięte. Opóźnienie z nimi związane nie przekracza jednej mikrosekundy.

Opóźnienie propagacyjne nie jest zależne od architektury sieci, ale od jej fizycznej topologii, mediów transmisyjnych oraz całkowitej odległości między węzłami. Typowe wartości tego parametru są określane na poziomie od 4 do 5 mikrosekund na kilometr. Także te współczynniki zostały przyjęte podczas omawiania odwzorowania pakietów TCP/IP w sieci szkieletowej.

Aby uniknąć skutków upływu maksymalnego czasu (oznaczających rozpoczęcie procedury powolnego startu), nie mogą zaginać więcej niż trzy segmenty z danego okna.

Interfejsy brzegowe są wyposażane w elementy sterujące, odpowiedzialne za zarządzanie etykietami i przydzielanie etykiet zgodnie z wartościami FEC. Wynika z tego, że podczas formowania pakietów optycznych w urządzeniu brzegowym konieczne jest umieszczanie w nich segmentów o jednakowym priorytecie i adresowanych do tego samego zdalnego urządzenia brzegowego. Jeśli więc jest to możliwe, dwa następujące po sobie segmenty tego samego strumienia powinny być zapisywane w oddzielnych pakietach optycznych o tej samej wartości FEC.

Ostatnim zagadnieniem wartym szczególnej uwagi jest związenie z działaniem protokołu TCP w fazie powolnego startu (ang. *slow-start phase*). W jej trakcie rozmiar wysyłanych po sobie segmentów rośnie w sposób wykładniczy. Z kolei ze względu na mechanizm unikania przeciążeń są one wysyłane w równomiernych odstępach czasu.

W przypadku tradycyjnych routerów procedura taka może prowadzić do przeciążeń, gdy całkowita ilość danych adresowanych do łącza wyjściowego może czasowo przekroczyć jego pojemność. Konieczne jest więc określenie właściwych rozmiarów buforów wyjściowych. Z drugiej strony interfejsy brzegowe współdziałają z bardzo szybkimi łączami wyjściowymi, które zwykle nie są przeciążone. Zatem opisywany problem nie dotyczy interfejsów sieci optycznych.

7. Wnioski

Wykonanie zarówno sieci transportowej, jak i dostępowej w standardzie Ethernetu (z zastosowaniem inteligentnych switch-routerów) umożliwia stworzenie infrastruktury łatwej w zarządzaniu i utrzymaniu oraz bardzo wydajnej. Możliwe stałoby się pełne wykorzystanie prędkości łączy na wszystkich interfejsach przy możliwości stosowania zarówno okablowania miedzianego (10/100/1000 Mb/s), jak i optycznego (10/100/1000/10 000 Mb/s, ośmiokrotny CDWM).

Istotna jest też możliwość wykorzystania istniejących sieci SDH i ATM. Infrastruktura oparta na Ethernetie musiałaby, więc współpracować z istniejącymi urządzeniami transportowymi (SDH, PDH), szkieletowymi (STM-1, STM-4, STM-16) oraz dostępowymi (T1, E1, E3, T3). Rozwiązanie powinno być na tyle uniwersalne, by umożliwić dostęp abonencki po kablach optycznych i miedzianych (w tym łączami VDSL 10+10 Mb/s) oraz po kablach telefonicznych kategorii 1, 2, 3. Infrastruktura sieciowa powinna też umożliwiać dostęp bezprzewodowy — radiowy (CDMA) lub na podczerwień. Warunkiem konkurencyjności z SDH i ATM jest zapewnienie w całej sieci (end-to-end) wymaganego poziomu jakościowego usług (QoS).

Współczesny Ethernet pozwala świadczyć usługi dostępu szerokopasmowego (od 200 Kb/s do 1 Gb/s) z gwarantowaną jakością, znajduje zastosowanie w sieciach miejskich, regionalnych i krajowych. Praca bezkolizyjna (w pełnym duplexie), z niespotykaną w konkurencyjnych technologiach wydajnością możliwa jest również w pierścieniach kabli optycznych, przeznaczonych pierwotnie dla systemów SDH i ATM.

Nie bez znaczenia jest także możliwość migracji z istniejących rozwiązań wykorzystujących SDH i ATM. Technicznym rozwiązaniem jest zastosowanie w przełącznikach emulacji strumieni SDH i uruchomienie w nich protokołu Packet over SONET.

Na korzyść Ethernetu przemawiają: znajomość protokołu i urządzeń przez wielu administratorów sieci, korzystny stosunek wydajności do ceny, a także dobra współpraca z protokołem IP.

Źródłem rosnącej popularności i ekspansji Ethernetu do coraz większych sieci jest to, że jest on najbardziej uniwersalnym i efektywnym protokołem tworzącym podkład dla IP — dotyczy to zarówno sieci LAN, jak i sieci miejskich oraz rozległych.

Budowanie dużych sieci wymaga używania protokołów routingu, np. OSPF lub BGP4. Nie kłóci się to jednak z koncepcją „Ethernet end-to-end”, gdyż funkcje routingu są realizowane w sposób sprzętowy (z prędkością łącza) przez ethernetowe przełączniki routujące L3-L7, które tworzą sieć. Nie ma potrzeby stosowania w sieci tradycyjnych routerów wieloprotokołowych sterowanych programowo, będących źródłem opóźnień, barier wydajności i dodatkowych kosztów, a w przypadku korzystania także i z innych protokołów sieciowych — niweczących przezroczystość sieci.

Istniejące, wbudowane w sprzęt ethernetowy urządzenia transmisyjne pozwalają dziś na budowę sieci o porównywalnej do innych urządzeń odległości przeseł: 130 km i więcej.

Standardowe urządzenia DWDM oferują takie same parametry, niezależnie od tego, jaki protokół sieciowy zostaje nałożony na poszczególne fale.

Sieci SDH zapewniały wymaganą przepływność dla tradycyjnych sieci głosowych. W systemie NEC, podstawową formą komunikacji są transmisje pakietowe. Separacja poszczególnych szczelin czasowych TDM w paśmie transmisyjnym SDH jest barierą jego efektywnego użycia. Wykorzystywanie przepływności w istniejących sieciach szkieletowych SDH do przesyłania pakietów IP jest rozsądnym zabiegiem tylko dopóty, dopóki:

- dotyczy wolnych przepływności w istniejących urządzeniach, a nie nowych inwestycji;
- nie spodziewamy się dużych wahań zapotrzebowania na pasmo (jak w usługach „pasma na żądanie”);
- zapotrzebowanie na pasmo jest ograniczone i nie ma potrzeby rozbudowy systemu o kolejne fale, każda o przepływności 10 Gb/s.

Mankamentem koncepcji PoS (Packet over SONET/SDH) jest to, że (z wyjątkiem nowych typów łączy 9,7-10 Gb/s,) kanały SDH, którymi posługują się komputery i urządzenia w sieci LAN, nie pasują do hierarchii Ethernetu.

Współczesne przełączniki Ethernet pracują zarówno w relacji punkt-punkt, jak też w sieciach z rozptyłem ruchu pakietów. Posiadają ponadto zaimplementowane, dedykowane mechanizmy uodporniające transmisję na awarię łącza. Zapewniają nieprzerwaną transmisję w pętli światłowodowej, tradycyjnej topologii sieci MAN i WAN.

Zarówno w urządzeniach dostępowych, jak i szkieletowych obserwujemy zahamowanie rozwoju przełączników ATM i zapotrzebowanie na ten sprzęt spada.

Nie sprawdziły się nadzieje na dotarcie protokołu ATM jako protokołu sieci dostępowych dla stacji końcowych. Rozwiały się także nadzieje na efektywne wykorzystanie tego protokołu w kanałach urządzeń DWDM, ponieważ wypełnienie wolnymi strumieniami ATM kanału 10 Gb/s wymaga dodatkowej multipleksacji sygnałów ATM.

Mechanizmy sieci wirtualnych, a także protokołów DiffServ należą do kanonu narzędzi wykorzystywanych przez projektantów i administratorów sieci dla gwarantowania jakości usług w operatorskich sieciach miejskich i rozległych. Funkcje te są realizowane sprzętowo w układach interfejsowych ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*) przełączników routujących warstw L3-L7, co eliminuje konieczność wprowadzania sterowanych programowo routerów, które, obok dodatkowego kosztu, tworzą wąskie gardła w sieci.

Z punktu widzenia NEC najbardziej obiecującymi protokołami sieci szkieletowych są Ethernet w warstwie 2 oraz IP w warstwie 3. Kolejne wersje rozwojowe

Ethernetu z biegiem lat opanowały nie tylko sieci lokalne i kampusowe, ale pozwalają już na transmisję danych z prędkościami 1 Gb/s (Gigabit Ethernet), a nawet 10 Gb/s na odległość do kilkudziesięciu kilometrów. Teoretycznie jest więc dziś możliwe zbudowanie sieci rozległej (WAN), bazującej wyłącznie na Ethernetie.

Technologie ethernetowe mają jednak mniejszą gradację dostępnych prędkości transmisji niż SDH, nie są też tak efektywne przy detekcji awarii łącza, przez co w mniejszym stopniu przystają do zastosowań w sieciach rozległych.

Techniki optyczne zostały opracowane z myślą o wykorzystaniu ich w sieciach szkieletowych internetu o bardzo dużej przepustowości. Algorytmy przenoszenia ruchu TCP/IP w sieciach optycznych odnoszą się zarówno do technik optycznego przełączania etykiet, jak i optycznego przełączania pakietów. W przypadku transmisji danych trasami wyznaczonymi za pomocą przełączania etykiet, trasa o określonej długości fali jest ustalana na cały czas trwania sesji TCP. Niektóre parametry projektowe, takie jak rozmiar pakietu optycznego i dopuszczalny czas formowania pakietów, muszą podlegać optymalizacji, gdy mogą negatywnie wpływać na wydajność transmisji TCP w sieciach optycznych.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.07.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2008 r.

LITERATURA

- [1] ITU-T G.707/Y.1322, Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH).
- [2] ITU-T G.7042/Y.1305, Link capacity adjustment scheme (LCAS) for virtual concatenated signals.
- [3] ITU-T G.7041/Y.1303, Generic framing procedure (GFP).
- [4] RFC 3508 — H.323 Uniform Resource Locator (URL) Scheme Registration RFC 3261 — SIP: Session Initiation Protocol.
- [5] A. DĄBROWSKI, S. KULA, *Systemy i sieci SDH*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1996.
- [6] R. J. CHAPUIS, A. E. JOEL Jr., *Electronics, computers and telephone switching: a book of technological history*, North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [7] A. JAJSZCZYK, *Wstęp do telekomutacji*, WNT, Warszawa, 2000.
- [8] H. J. CHAO, C. H. LAM, E. OKI, *Broadband packet switching technologies: a practical guide to ATM switches and IP routers*, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [9] A. JAJSZCZYK, *Photonic Switching*, in: F. E. Froehlich (ed.), *Encyclopedia of Telecommunications*, vol. 14, Marcel Dekker, Inc., New York, 1997.
- [10] A. JAJSZCZYK, *Przełącznice a komutacja optyczna*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, r. 75, nr 1, 2002.

M. WRAŻEŃ, A. BAJDA, M. POPIS

Packet transmission in optical networks

Abstract. Development of services and transmission methods points a way of telecommunication system evolution. Telecommunication systems' efficiency is dependent mainly on core network

characteristics. Application of Ethernet standard and GMPLS protocol in core optical network allows to unify LAN and WAN protocols and to increase telecommunication system efficiency in the range of throughput. It is also possible to decrease the number of protocols' transcoders, reduce costs of infrastructure, maintenance, management and diagnostics. Furthermore, more consideration is taken on services connected with data and network security.

Keywords: optical network, optical routing, QoS, telecommunication systems

Universal Decimal Classification: 621.39.037.37