

Scharakteryzowano specyficzne właściwości ruchu typowego dla sieci Internet i architekturę przyszłych optycznych sieci transportowych. Przedstawiono korzyści, wynikające z zastosowania komutacji w warstwie optycznej.

Ponadto zaprezentowano koncepcję optycznej transparentnej sieci pakietowej oraz sieci optycznej, wykorzystującej technikę etykietowanej grupowej komutacji pakietów optycznych LOBS.

sieć IP, ruch internetowy, optyczna sieć transportowa, komutacja w warstwie optycznej, optyczna transparentna sieć pakietowa, komutacja grupowa pakietów optycznych, protokół MPLS, etykietowana komutacja grupowa pakietów optycznych

Uwarunkowania sieci telekomunikacyjnych IP

Zapewnienie efektywnej realizacji usług transportowych dla ruchu generowanego przez aplikacje komputerowe, typowego dla sieci Internet, wymaga zasadniczej zmiany w podejściu do problemu architektury telekomunikacyjnej sieci transportowej. Tradycyjne sieci telekomunikacyjne, projektowane pod kątem przenoszenia ruchu głosowego, są głównie sieciami z komutacją połączeń. Nie są one zatem dostosowane do efektywnego transportu ruchu pakietowego, charakterystycznego dla sieci Internet. Jednocześnie ogromny ruch, a także coraz większe wymagania dotyczące pasma i jakości transmisji skłaniają do podejmowania próby szerszego wykorzystania nowoczesnych technik optycznych w telekomunikacji. Powstają koncepcje utworzenia szerokopasmowych optycznych sieci szkieletowych, pełniących funkcje komutacyjne w warstwie optycznej. Kompilacja stosownych protokołów transmisyjnych, funkcjonujących w wyższych warstwach sieci, z technikami, które będą stosowane w optycznej warstwie fizycznej, umożliwi skonstruowanie nowej architektury sieci. W tej architekturze bardzo istotną rolę odgrywa wykorzystanie techniki zwielokrotnienia falowego DWDM, nie tylko jako prostego sposobu poszerzenia pasma transmisyjnego, ale przede wszystkim jako mechanizmu tworzenia równorzędnych dodatkowych zasobów sieciowych, których właściwe wykorzystanie zdecydowanie zwiększa efektywność działania sieci.

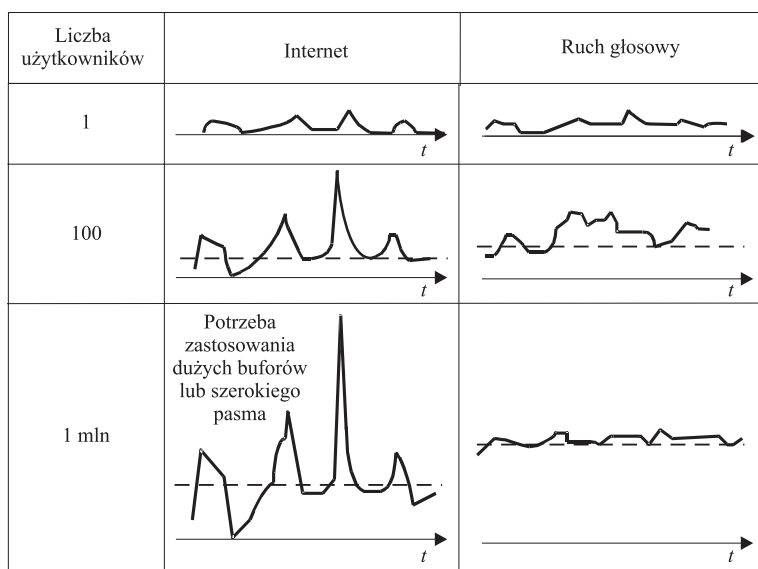
W rozważaniach dotyczących nowej architektury sieci należy uwzględnić szczególnie charakter przenoszonego ruchu, zdecydowanie różny od tego, który jest typowy dla tradycyjnych połączeń głosowych, stąd poznanie natury tego ruchu stanowi kluczowe zagadnienie w projektowaniu przyszłych sieci telekomunikacyjnych.

Można wyróżnić cztery zasadnicze właściwości ruchu internetowego [5], mające największy wpływ na architekturę sieci telekomunikacyjnej, a mianowicie:

- cechę „samopodobieństwa” (*self-similar*) ruchu internetowego,
- asymetrię przepływu danych w sieci,
- ograniczoną szybkość wysyłania danych przez duże serwery,
- dużą zawartość krótkich pakietów w strumieniu danych.

Charakterystyka ruchu internetowego typu *self-similar*

Po przeprowadzeniu wielu pomiarów i prac studialnych [5, 9] stwierdzono występowanie ruchu internetowego typu *self-similar*. Ogólnie termin ten oznacza, że ruch w sieciach internetowych ma te same charakterystyki, niezależnie od liczby jednoczesnych sesji w danym łączy fizycznym. Przykład takiej charakterystyki pokazano na rys. 1, porównując ruch internetowy z ruchem głosowym, pochodzącym od wielu użytkowników. Można zauważyć, że w miarę zwiększania liczby przepływów głosowych charakterystyka zagregowanego ruchu staje się coraz bardziej gładka. Jednocześnie wariancja ruchu głosowego (który może być rozpatrywany jako proces Poissona) gwałtownie zmniejsza się, w miarę zwiększania przepływu zagregowanego. Nie zaobserwowano tego zjawiska w przypadku ruchu internetowego. W rzeczywistości wariancja tego procesu zmniejsza się, lecz o wiele wolniej. Właściwość ta jest określana zazwyczaj terminem *long-range dependence*.



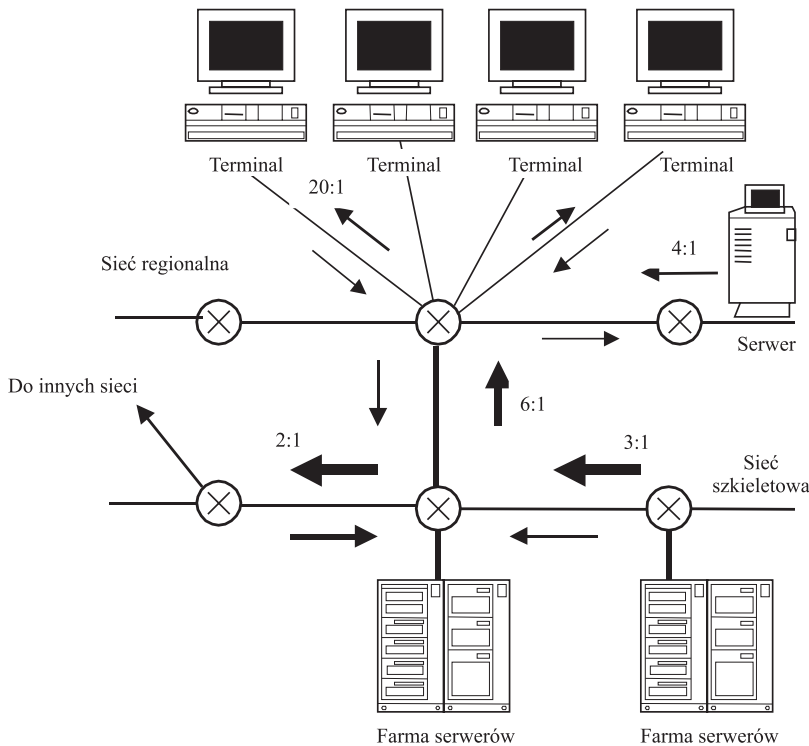
Rys. 1. Charakterystyka ruchu internetowego

Taka natura ruchu internetowego ma bezpośredni wpływ na „wymiarowanie sieci”, stąd rozmiary wykorzystywanych buforów mają kluczowe znaczenie. Z jednej strony rozmiary buforów powinny być wystarczająco duże do zaabsorbowania szczytów ruchu, wprowadzanych przez charakterystyki typu *self-similar*, z drugiej strony zaś rozmiary nie powinny być zbyt duże, aby bufony nie wprowadzały nieakceptowalnych opóźnień.

Asymetria przepływu danych

Zjawisko asymetrii przepływu danych IP [9] jest obserwowane zarówno w łącach krajowych, jak i w międzynarodowych. Taka asymetria ruchu jest charakterystyczna dla dużych farm serwerów, wysyłających bardzo dużą liczbę danych w odpowiedzi na żądania, stanowiące niewielkie strumienie

danych. Dotyczy również użytkowników, ściągających np. strony WWW. Farmy serwerów stron WWW zgrupowano w dużych punktach dystrybucji usług internetowych, natomiast użytkownicy są zazwyczaj przypadkowo rozmieszczeni na brzegu sieci. W rezultacie, w pobliskim dużym węźle pośredniczącym, w którym są ulokowane serwery stron WWW, występuje znaczna asymetria liczby przepływających danych w kierunkach T_x/R_x (nadawczym i odbiorczym), z uprzywilejowaniem ścieżki T_x , którą dane opuszczają serwer. Schemat przepływu danych w sieci internetowej pokazano na rys. 2. Główną konsekwencją tej asymetrii jest niewykorzystanie znacznej części pasma w jednym kierunku (czasami nawet 50%), podczas gdy w kierunku przeciwnym może występować przeciążenie.



Rys. 2. Asymetria przepływu danych w sieci Internet

Ograniczona szybkość wysyłania danych przez duże serwery

W większości przypadków przepływy ruchu w sieci Internet są w większym stopniu ograniczane przez serwery dostarczające dane do użytkowników w odpowiedzi na ich żądania niż przez właściwości tej sieci [5]. W sytuacji gdy sieć dysponuje ogromnym pasmem, wzrasta prawdopodobieństwo, że to mechanizmy sterowania przepływem danych z serwerów będą głównymi elementami sterującymi

w procesie przenoszenia ruchu, a nie sieciowe mechanizmy sterowania ruchem w warunkach przeciążenia.

Przewaga krótkich pakietów w strumieniu danych

Analiza ruchu w łączu, które przenosi informacje generowane przez ruch internetowy, prowadzi do interesujących wniosków, potwierdzonych przez pomiary ruchu w rzeczywistych łączach [9]. Dzięki monitorowaniu ruchu pod kątem długości pakietów wiadomo, że prawie połowę całkowitej liczby przesyłanych pakietów stanowią krótkie pakiety długości 40 i 44 bajtów. Są to pakiety związane z protokołem TCP, przesyłające informacje potwierdzenia oraz segmenty sterujące, takie jak: SYN, FIN i RST. Pomijając problem nadmiarowości informacyjnej, wynikający ze stosunku liczby bitów nagłówka do faktycznej liczby bitów przesyłających informację w tego typu pakietach, trzeba podkreślić ogromny wpływ tych pakietów na przepustowość węzłów sieci. Decydującym czynnikiem jest tutaj czas potrzebny na przetworzenie informacji nagłówka, który jest taki sam, niezależnie od długości transmitowanych pakietów. Długość pakietów ma jedynie wpływ na stopień wykorzystania buforów. Przy dużych szybkościach transmisji może wystąpić zatem przeciążenie węzła, wynikające z konieczności przetworzenia zbyt dużej liczby pakietów w jednostce czasu, pomimo iż – pod względem wykorzystania pasma transmisyjnego – węzeł dysponuje jeszcze wolnymi zasobami.

Architektura sieci z komutacją pakietów w warstwie optycznej

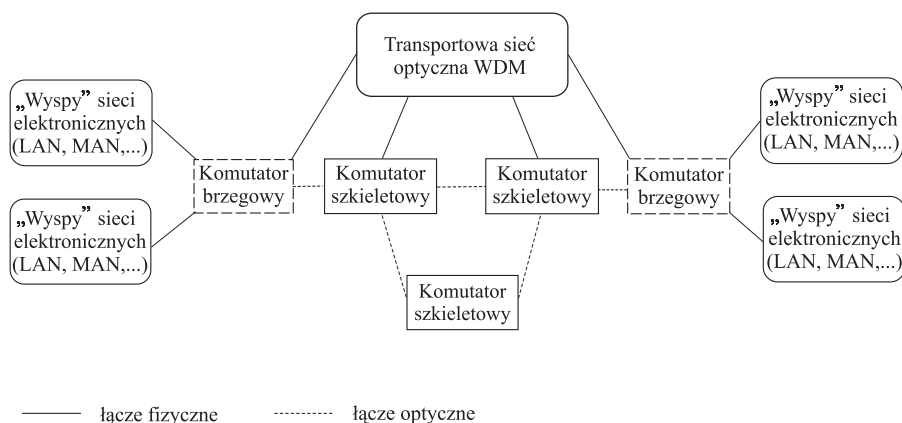
Przez długi czas konstruktorzy zakładali, że przyszłe optyczne sieci telekomunikacyjne pozostaną sieciami z komutacją połączeń. Zastosowania WDM skupiały się więc na statycznym wykorzystaniu pojedynczych kanałów, co spowodowało nieefektywne wykorzystanie dostępnego pasma optycznego. Zmiana tego podejścia, wynikająca z pokonania pewnych barier technicznych, miała wpływ na powstanie koncepcji komutacji pakietów optycznych, umożliwiającej szybkie przydzielanie kanałów WDM oraz ich wykorzystanie jako współdzielonych zasobów sieciowych, w zależności od potrzeb i z bardzo dobrą rozdzielczością. Znacznie wzrosło zwielokrotnienie statystyczne w porównaniu z routerami, które traktują łącznik WDM jako zbiór niezależnych kanałów transmisyjnych, wymagających dużej liczby fizycznych interfejsów, koniecznych do zakończenia pojedynczego włókna. Poza większą efektywnością, innym czynnikiem powodującym wzrost zainteresowania komutacją pakietów optycznych jest możliwość uzyskania przezroczystości przepływności bitowej, a zatem obniżenie kosztów transmisji cyfrowej w łączach transmisyjnych. Umożliwia to sukcesywne i planowe podnoszenie pojemności warstwy transmisyjnej, bez konieczności dokonywania znaczących modyfikacji węzłów komutacyjnych.

Obecnie wyzwaniem dla konstruktorów jest znalezienie odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób połączyć zalety relatywnie ziarnistej techniki WDM z potencjalnymi możliwościami, właściwymi dla komutacji optycznej, aby zbudować platformę transmisyjną o dużej przepustowości, zdolną do efektywnego obsługiwanie ruchu IP.

Obiecującym kierunkiem przewidywanej ewolucji sieci jest przenoszenie większości zadań komutacyjnych do domen optycznych, w celu lepszego wykorzystania możliwości transmisyjnych łączy WDM. Można to osiągnąć przez efektywne rozdzielanie funkcji transmisyjnych/komutacyjnych i wyboru trasy/selektywnego kierowania. Funkcje transmisyjne/komutacyjne powinny być wykonywane w domenie optycznej, aby wykorzystać bardzo szerokie pasmo, oferowane przez włókno. Natomiast funkcje wyboru trasy/selektywnego kierowania powinny być przeniesione do domeny elektronicznej,

w której – po przetworzeniu informacji zawartych w nagłówkach pakietów – będą realizowane funkcje ich kierowania.

Struktura sieci z komutacją w warstwie optycznej (rys. 3) składa się z dwóch warstw funkcjonalnych: zewnętrznej i wewnętrznej. Warstwa zewnętrzna jest warstwą elektroniczną, wykonującą agregację ruchu i główne funkcje związane z routinguem pakietów. Natomiast warstwa wewnętrzna, nazywana komutowaną siecią optyczną SON (*Switched Optical Network*), oparta na technologii optycznej, realizuje transmisję oraz funkcje komutacyjne warstwy niższej.



Rys. 3. Struktura sieci z komutacją w warstwie optycznej [5]

Komutatory brzegowe ES (*edge switches*) są umieszczone na granicy między dwiema warstwami. Ruch IP, wprowadzany do komutatorów ES, pochodzi od standardowych sieci elektronicznych, np. LAN, MAN itp. Komutatory ES realizują agregację ruchu i podstawowe funkcje routingu, tzn. określają, do którego ES muszą zostać skierowane przychodzące pakiety IP. Komutator ES gromadzi wchodzące pakiety IP, skierowane do określonego docelowego komutatora, w wspólny pakiet optyczny. Krytycznym parametrem jest czas oczekiwania pakietów IP, potrzebny w procesie gromadzenia (*assembly*).

Skompletowany pakiet optyczny zostaje dostarczony do sieci komutowanej optycznie SON. Sieć SON transportuje pakiety optyczne od źródłowego do docelowego komutatora brzegowego ES. W docelowym komutatorze ES ruch jest rozkładany i dostarczany do docelowej sieci elektronicznej. Komutatory, stanowiące węzły sieci SON, nazywane komutatorami szkieletowymi CS (*core switches*), są połączone ze sobą przez optyczną sieć transportową WDM. W komutatorach CS następuje selektywne kierowanie pakietów optycznych w domenie optycznej, a także realizowanie zwielokrotnienia statystycznego w łączach WDM.

W dostępnej literaturze wymienia się dwa możliwe sposoby transferu pakietów, które mogą być wprowadzone w sieci SON [5]. Różnią się one zasadniczo ze względu na przyjętą strukturę pakietów oraz sposób działania węzła sieciowego. Pierwszy sposób przekazania pakietu, nazywany optyczną transparentną siecią pakietową OTPN, zakłada wykorzystywanie pakietów o ustalonej długości i synchroniczne działanie węzłów sieci. Natomiast w drugim sposobie, zwanym komutacją grupową

pakietów optycznych OBS (*Optical Burst Switching*), pakiety przesyłające informacje – określane terminem *burst* przy asynchronicznej pracy węzłów – mają zmienną długość.

Optyczna transparentna sieć pakietowa OTPN

Pakiety optyczne, wykorzystywane w OTPN (*Optical Transparent Packet Network*), są umieszczane w szczelinie czasowej T o ustalonym czasie trwania, co umożliwia założoną synchroniczną pracę węzłów sieci. Ogólny format pakietu OTPN [5] przedstawiono na rys. 4.



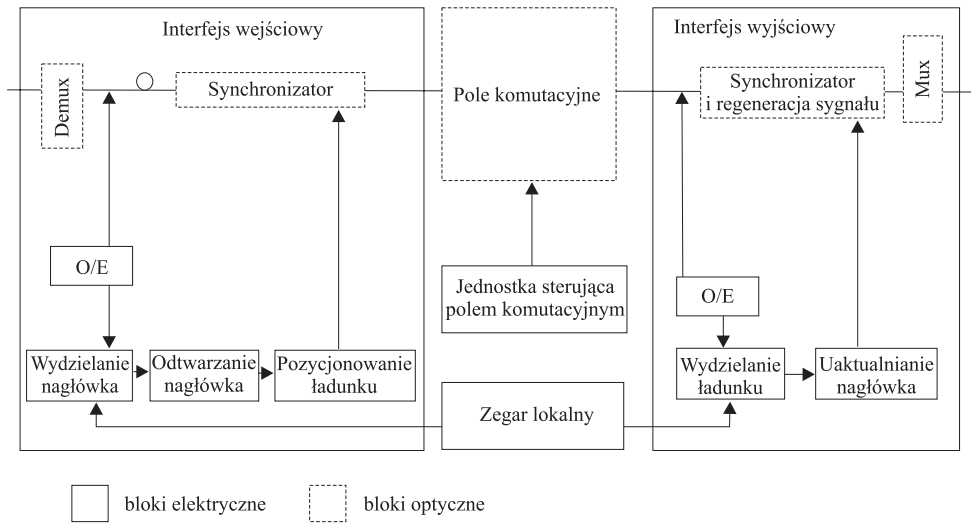
Rys. 4. Ogólny format pakietu OTPN

W obszarze pakietu można wyróżnić:

- obszar nagłówka o ustalonej przepływności bitowej, który jest elektronicznie przetwarzany w węźle;
- obszar ładunku, o ustalonym czasie trwania i zmiennej przepływności bitowej;
- obszary czasów ochronnych, wprowadzonych w celu zmniejszenia wpływu czasów przełączania urządzeń, fluktuacji fazowego ładunku w węźle i nieidealnej charakterystyki zespołów synchronizacji w interfejsach wejścia/wyjścia węzła.

Struktura komutatora OTPN [5], pokazana na rys. 5, składa się z trzech głównych bloków:

- interfejsów wejściowych, realizujących delinearację pakietów i funkcje synchronizacyjne, w celu dopasowania pakietów przybywających z różnych portów wejściowych; jest to wykonywane za pomocą synchronizatora optycznego, umożliwiającego utrzymanie przezroczystości ładunku;
- optycznej matrycy komutacyjnej, której zadaniem jest odpowiednie bezkolizyjne kierowanie pakietów do portów wyjściowych;
- interfejsów wyjściowych, wykonujących operacje synchronizacyjne w celu zmniejszenia fluktuacji fazy, spowodowanych przejściem pakietów przez komutator po różnych ścieżkach; ponadto w bloku jest wykonywana operacja przepisania nagłówka oraz optyczna regeneracja sygnału, wymagana dla skompensowania pogorszenia zarówno współczynnika głębokości modulacji optycznej (*extinction ratio*), jak i stosunku sygnału optycznego do szumu, wprowadzonych przez matrycę przełączającą.



Rys. 5. Struktura komutatora OTPN

Zasadniczym problemem jest konieczność wprowadzenia synchronizacji pakietów w domenie optycznej, w celu zagwarantowania przezroczystego pod względem przepływności bitowej funkcjonowania komutatora. Jak wspomniano wcześniej, konieczne są dwa synchronizatory:

- synchronizator wejściowy, używany w celu kompensacji powolnych fluktuacji fazy pakietów docierających do tego samego wejścia; ta zmienność opóźnienia jest spowodowana zarówno zmianami temperaturowymi, jak i dyspersją chromatyczną, dającą w efekcie różną szybkość propagacji dla różnych długości fal optycznych;
- synchronizator wyjściowy, używany w celu kompensacji zmienności opóźnień pakietów wewnątrz matrycy przełączającej; w rzeczywistości pakiety mogą być kierowane różnymi ścieżkami, o różnej długości wewnątrz elementu przełączającego, co powoduje szybkie fluktuacje fazy pakietów kierowanych do tego samego portu wyjściowego.

Obydwa synchronizatory wykonano z wykorzystaniem światłowodowych linii opóźniających i elementów przełączających, realizowanych różnymi technikami, zatem stopień złożoności sprzętowej komutatora wzrasta. Ponadto rosną przeniki w sygnale i tłumienność wtrąceniowa, co ma bezpośredni wpływ na obniżenie jakości sygnału wraz ze wzrostem liczby połączonych kaskadowo węzłów. Biorąc pod uwagę fakt, że fluktuacje fazowe pakietów mogą być jedynie częściowo skompensowane przez zespoły synchronizujące, jest konieczne wprowadzenie czasów ochronnych w pakietach optycznych zarówno przed, jak i za obszarem ładunku, w celu uniknięcia naruszenia integralności ładunku podczas wykonywania operacji wydzielania bądź wstawiania nagłówka.

Statyczna nieefektywność wykorzystania dostępnego pasma, wynikająca z wstawienia czasów ochronnych, może zostać zredukowana przez powiększenie czasu trwania pakietów optycznych. Może to jednak spowodować nieefektywność dynamiczną, jeśli w przekazywaniu pakietów między węzłami ES występują okresy małej intensywności ruchu. W tym przypadku liczba pakietów IP może być niewystarczająca do wypełnienia całego pakietu optycznego, którego długość jest stała.

Jednym z kluczowych problemów komplikujących wprowadzenie techniki komutacji pakietów w domenie optycznej jest obsługa kolizji pakietów w sytuacji, gdy jeden lub więcej pakietów zostaje skierowanych w tym samym czasie do tej samej linii wyjściowej. W literaturze [5, 11] są rozważane różne możliwe sposoby uniknięcia kolizji pakietów, takie jak:

- buforowanie,
- translacja długości fali,
- ruting odchylony (*deflection routing*),
- *wavelength dimension*.

Zastosowanie klasycznej techniki buforowania zbliża strukturę komutatora pakietów optycznych do struktury tradycyjnego, elektronicznego komutatora pakietów. Z tego powodu rozwiązanie to podlegało jako pierwsze intensywnym studiom. Niestety, przynajmniej wg bieżącego stanu techniki, buforowanie może być zrealizowane jedynie za pomocą wiązki światłowodowych linii opóźniających FDL (*Fiber Delay Line*), o czasach opóźnienia będących wielokrotnością czasu trwania pakietu. Z tego powodu pojemność bufora komutatora pakietów optycznych nie przekracza kilku jednostek. Ponadto liczba linii FDL jest krytycznym parametrem w projektowaniu, ponieważ ma ona wpływ na objętość sprzętowej części optycznej, rozmiary fizyczne komutatora i poziom szumów, spowodowany przejściem sygnału optycznego przez linie FDL.

Podobnie jak w przypadku komutatorów elektronicznych mogą być rozpatrywane różne techniki buforowania [5]:

- bufor współdzielony (*shared buffer*),
- kolejkowanie na wyjściu (*output queuing*),
- bufor współdzielony częściowo.

W komutatorze pakietów optycznych adaptującym technikę współdzielonego buforowania, w sytuacji gdy więcej niż jeden pakiet zostaje skierowany do tego samego wyjścia, wszystkie pakiety z wyjątkiem jednego zostają zawrócone do wejścia przez pętlę recykulacyjną. W celu wyeliminowania tłumienia sygnału, wprowadzonego w obszarze komutatora skutkiem recykulacji pakietów, są stosowane wzmacniacze optyczne. Jeśli ruch jest intensywny i nieregularny (*bursty*), jest wymagana wielokrotna recykulacja, która może powodować akumulację szumów wywołanych spontaniczną emisją wzmacniaczy (ASE) w pętlach. Można jednak temu zapobiec – wystarczy, że pakiety, które muszą zostać opóźnione, w różnym stopniu, są poddawane recykulacji w światłowodowych liniach opóźniających o różnej długości.

Komutator pakietów optycznych, wykorzystujący technikę kolejkowania na wyjściu, składa się z przestrzennego komutatora z buforem na każdym wyjściu. Bufor jest złożony z linii opóźniających o różnych długościach. Taka struktura nie jest ograniczana szumami ASE, ale może wymagać większej całkowitej długości zastosowanych linii opóźniających niż w przypadku architektury opartej na technice buforowania recykulacyjnego.

Technika buforowania współdzielonego częściowo dedykuje bufor optyczny dla każdego wyjścia i uwzględnia dodatkowy, wspólny bufor, dzielony przez wszystkie linie wyjściowe. W komutatorze adoptującym tę technikę, pakiet, który natrafia na zapełniony bufor wyjściowy, zostaje skierowany do bufora współdzielonego, gdzie jest czasowo przechowany. Później, pakiety przechowywane w buforze

współdzielonym mogą recykulować z powrotem do portu wejściowego, aby być poddane próbie powtórnego skierowania do pożądanego wyjścia.

Ponieważ liczba koniecznych linii opóźniających gwałtownie wzrasta przy wzroście obciążenia ruchem i przy krytycznym profilu ruchu (*burst*), zostało zaproponowane inne rozwiązanie. Problem kolizyjności pakietów rozwiązano dzięki zastosowaniu rozróżnienia długości fal optycznych, przenosząc pakiety adresowane do tej samej linii wyjściowej na fale optyczne o różnych długościach. Uzyskuje się to przy użyciu strojonych konwerterów fal optycznych TOWC (*Tunable Optical Wavelength Converters*).

Kierowanie odchylone (*deflection routing*) jest po prostu techniką wielościeżkowego doboru trasy, która umożliwia rozwiązanie problemu kolizyjności, a ponadto liczba buforów i bramek optycznych może być znacząco zmniejszona, dając duże oszczędności w sprzęcie i kosztach. Efektywność tej techniki krytycznie zależy od topologii sieci, przykładowo w sieciach kratowych, z dużą liczbą międzypołączeń, zastosowanie kierowania odchylonego może dać dużo większe korzyści niż w przypadku sieci o prostszej topologii.

Technika *wavelength dimension* korzysta ze zbioru dostępnych długości fal, tak jak z logicznego bufora w warstwie optycznej WDM. W literaturze jest proponowane rozwiązanie sieciowe, które eliminuje konieczność zastosowania buforów optycznych za pomocą rozdzielania obciążającego ruchu między poszczególne kanały falowe z użyciem TOWC.

Komutacja grupowa pakietów optycznych OBS

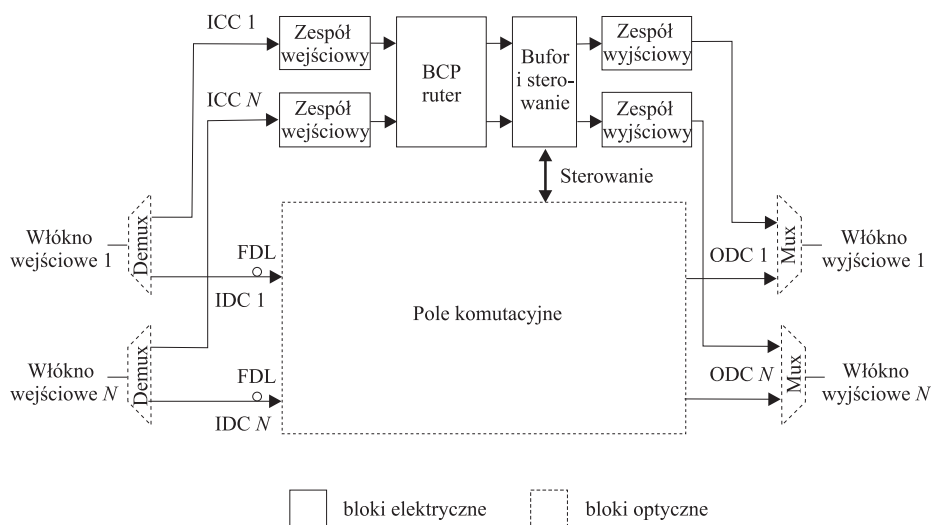
Ogólna koncepcja komutacji grupowej pakietów *burst*, zaproponowana na początku lat osiemdziesiątych, była przewidywana pierwotnie do zastosowań w komunikacji głosowej. Warto wymienić trzy główne różnice [6] między komutacją grupową pakietów *burst* a innymi technikami (np. komutacją połączeń i komutacją pakietów), a mianowicie:

- grupa pakietów *burst* ma pośrednią ziarnistość w porównaniu z podstawowymi jednostkami komutowanymi (lub przesyłanymi) w przypadku komutacji połączeń lub pakietów, którymi są odpowiednio wywołania (bądź sesje) i pakiety;
- w przypadku komutacji grupowej pakietów pasmo jest rezerwowane w jednostronnym procesie, tzn. że grupa pakietów może być wysłana do sieci bez potwierdzenia pomyślnej rezerwacji zasobów, natomiast w przypadku komutacji połączeń pasmo dla połączenia jest rezerwowane w procesie dwustronnym; dane mogą zostać wysłane dopiero po ustanowieniu i potwierdzeniu połączenia (co zwiększa opóźnienia);
- podczas komutacji grupowej pakietów, pakiety danych będą przechodzić (*cut-through*) przez węzły pośredniczące bez poddawania procesowi buforowania, inaczej niż w typowej komutacji pakietów, gdzie pakiet jest magazynowany i kierowany w każdym węzle pośredniczącym, co powoduje wzrost złożoności sprzętowej węzłów.

Zastosowanie komutacji grupowej pakietów optycznych tworzy nowy model komutacji, oparty na następujących zasadach [6, 11]:

- informacja jest przekazywana w postaci dużych pakietów o zmiennej długości, określanych nazwą grupy pakietów *burst*;
- węzeł działa w sposób asynchroniczny;
- ładunek jest oddzielony od nagłówka, który jest przesyłany na innej długości fali optycznej niż ładunek.

Zgodnie z tym modelem, gdy komutator brzegowy ES ma do wysłania grupę pakietów, emituje najpierw pakiet sterujący BCP (*burst control packet*) w uprzednio ustalonym kanale falowym sterowania, a następnie pakiet danych, wysłany w jednym z dostępnych kanałów falowych przeznaczonych dla danych. Pakiet sterujący BCP jest przetwarzany elektronicznie wzdłuż ścieżki od źródłowego do docelowego komutatora brzegowego ES. Na podstawie przenoszonych w nim informacji jest wykonywana rezerwacja odpowiednich zasobów dla ścieżki danych, w celu przeniesienia pakietu danych. Na rys. 6 pokazano architekturę OBS CS [5], z widocznym węzłem z N wejściowymi i wyjściowymi włóknami światłowodowymi (każde włókno dysponuje W długościami fal dla kanałów danych i jedną dla kanału sterującego). Podstawowym elementem komutatora OBS jest demultiplekser, którego rolą jest rozdzielenie wejściowego kanału sterującego ICC, używanego przez pakiet BCP i wejściowych kanałów danych IDC, wykorzystywanych przez pakiet danych. Gdy pakiet sterujący BCP osiąga węzeł CS, zostaje niezwłocznie przetworzony w domenie elektronicznej przez moduł wejściowy IM. Następnie zostaje skierowany do rutera BCP, określającego na które włókno wyjściowe trzeba wysłać pakiet sterujący BCP i odpowiadający mu pakiet danych. W celu umożliwienia przetworzenia BCP, do opóźnienia pakietu danych jest wykorzystywana światłowodowa linia opóźniająca. Gdy tylko pakiet BCP zostanie przetworzony, jest on transmitowany do wyjściowego modułu transmisyjnego (OM/TX), który uaktualnia pola sterujące (znajdujące się w BCP) i wysyła pakiet danych w stosownym kanale falowym, przydzielonym zgodnie z odpowiednim planem trasowania. Na końcu, multiplekser wstawia kanał sterujący w wyjściowe włókno światłowodowe.



Rys. 6. Schemat komutatora wykonanego techniką OBS (oznaczenia w tekście)

Efektywne wykorzystanie zasobów komutatora jest możliwe, jeśli analizowanie pakietu BCP nie jest wykonywane dokładnie w momencie dotarcia pakietu BCP do węzła, lecz na krótko przed przybyciem odpowiadającego mu pakietu danych. Do opóźnienia przetwarzania pakietu BCP jest wykorzystywany bufor porządkujący, którego kolejka jest ustawiona zgodnie z czasami przybycia kolejnych pakietów danych i który dostarcza pakiety BCP do *schedulera* Δs przed przybyciem pakietu danych, gdzie Δ jest sumą czasów kierowania (*scheduling*) i czasów ustawienia komutatora

optycznego. *Scheduler* przetwarza pakiety BCP i rezerwuje zasoby konieczne do przesłania pakietu danych, a ponadto wykrywa przypadki kolizji pakietów w wyjściowych kanałach falowych.

Należy zauważyć, że mimo iż technika OBS jest względnie prostą koncepcją, to nie rozwiązuje wszystkich problemów występujących w technice OTPN: zagadnienie kolizji pakietów stanowi wciąż otwarty problem. Spodziewane jest także pewne pogorszenie jakości działania, mierzone prawdopodobieństwem utraty pakietów. Wynika to z dwóch głównych powodów:

- może tu wystąpić więcej przypadków kolizji pakietów wyjściowych ze względu na bardziej przypadkową i mniej ziarnistą statystykę pakietów;
- linie opóźniające nie są wykorzystane wystarczająco efektywnie i między pakietami mogą występować puste miejsca.

W projektowaniu buforów głównym problemem jest zwymiarowanie podstawowej jednostki skali czasowej D , która będzie stosowana w liniach opóźniających FDL. Jeśli bufor FDL jest zaprojektowany z wykorzystaniem włókien wprowadzających opóźnienia, które są kolejnymi wielokrotnościami D , to mała wartość D powoduje wysoką rozdzielczość czasową i niewielką pojemność buforowania, natomiast duża wartość – dużą pojemność bufora, lecz małą rozdzielczość czasową. Żaden przypadek nie jest optymalny i należy znaleźć kompromis między nimi, aby zapewnić akceptowalne prawdopodobieństwo utraty pakietów optycznych.

W celu wyeliminowania niezapełnionych przerw między pakietami jest proponowany odpowiednio zmodyfikowany algorytm kierowania, lecz rozwiązuje on problem jedynie częściowo, za cenę wzrostu złożoności sterowania komutatora optycznego. W literaturze opisuje się architekturę komutatora wyposażonego w wielostopniowe linie opóźniające FDL, tworzące bufor o dobrej rozdzielczości, umożliwiającą uzyskanie dużego opóźnienia, ale zatem o większej złożoności sprzętowej komutatora.

Techniki komutacji grupowej pakietów (burst)

W ramach ogólnej koncepcji komutacji grupowej pakietów są rozważane specyficzne techniki, które mogłyby zostać wykorzystane w sieciach z komutacją pakietów w warstwie optycznej [6]. Techniki te różnią się między sobą przede wszystkim sposobem rezerwacji zasobów sieciowych, a także sposobem wykorzystania tych zasobów.

Jedną z nich jest technika „rezerwacji na czas określony” RFD (*reserve-a-fixed-duration*), działająca z rezerwacją zasobów „z zamkniętym zakończeniem” (*close-ended*) i z rozdzielonym sterowaniem.

Bierze się pod uwagę także technikę TAG (*tell-and-go*) oraz technikę IBT (*in-band-terminator*). Obie te techniki nadają się do wykorzystania zasady rozdzielonego sterowania, ale opierają się na rezerwacji zasobów „z otwartym zakończeniem” (*open-ended*).

W sieciach IP/WDM grupy pakietów formowane w komutatorach/ruterach brzegowych mogą składać się z dużej liczby pakietów IP i zawierać nawet kilka megabajtów danych (np. obrazy o dużej rozdzielczości lub krótkie wideoklipy). We wszystkich trzech technikach komutacji grupowej, wcześniej wspomnianych, pasmo transmisyjne jest rezerwowane na poziomie grup pakietów, z wykorzystaniem jednostronnego procesu, więc grupa może „tunelować” (*cut-through*) węzły pośredniczące. Te trzy schematy różnią się między sobą sposobem uwalniania zarezerwowanych zasobów pasma.

Komutacja grupowa oparta na IBT działa w następujący sposób: informacja sterująca (np. adres źródłowy i docelowy) jest wysyłana albo jako nagłówek pakietu (sterowanie w pasmie), albo jako pakiet sterujący (sterowanie pozapasmowe), po którym następuje grupa pakietów informacyjnych,

zawierająca IBT (terminator wewnętrzny), służący do wskazania końca grupy. Pasma zostaje zarezerwowane (i komutatory zostają skonfigurowane), gdy tylko zostanie przetworzona informacja sterująca, a zwolnione – natychmiast po wykryciu w transmitowanym sygnale terminatora. Zasadnicza różnica między komutacją grupową IBT a dobrze znaną techniką komutacji wiadomości polega na tym, że dla ostatniej wiadomości wchodząca musi być buforowana w każdym węźle, zanim zostanie przełączona, natomiast w przypadku techniki IBT kilka pierwszych bitów określonej grupy pakietów może opuszczać węzeł, podczas gdy pozostałe bity należące do tej grupy wciąż jeszcze docierają do węzła (tunelowanie). Spośród wielu problemów utrudniających implementację komutacji grupowej IBT w sieciach optycznych należy wspomnieć o trudnościach w optycznym rozpoznawaniu terminatora IBT. Należy zauważyć, że komutacja wiadomości jest również trudno wykonalna i nieefektywna, ponieważ każda wiadomość musi być buforowana (dokładniej mówiąc, opóźniana) w każdym węźle przynajmniej na czas równy czasowi trwania wiadomości.

Komutacja grupowa oparta na technice TAG, która jest podobna do szybkiej komutacji połączeń, funkcjonuje w następujący sposób: węzeł źródłowy najpierw wysyła pakiet sterujący (lub zestawiający) w celu zarezerwowania pasma (zestawienia połączenia wirtualnego), a następnie odpowiadająca mu grupa pakietów informacyjnych jest wysyłana bez oczekiwania na potwierdzenie, że pasmo dla połączenia wejściowego zostało zarezerwowane. Potem węzeł źródłowy może wysłać pakiet zwalniający (który jest także rodzajem pakietu sterującego) w celu wskazania możliwości zwolnienia zarezerwowanego pasma. Zamiast wysyłania pakietu zwalniającego (którego dostarczenie powinno być zagwarantowane przez użycie specjalnego „bezstratnego” protokołu), alternatywnie można to zrealizować za pomocą wysyłania przez źródło – w ustalonych momentach czasowych – „pakietów odświeżających” (*refresh packets*), informujących o konieczności podtrzymania połączenia. Pasma zostanie zwolnione automatycznie, jeśli pakiet odświeżający nie zostanie odebrany przed upływem odpowiedniego czasu.

W przypadku komutacji grupowej opartej na RFD rezerwacja pasma w każdym komutatorze jest dokonywana na czas określony każdorazowo przez pakiet sterujący. Dzięki temu zostaje wyeliminowany nie tylko nagłówek sygnalizacyjny (związany z uwolnieniem pasma), konieczny przy rezerwacji pasma typu otwarte zakończenie (*open-ended*), lecz również jest możliwe inteligentne przydzielanie i bardziej efektywne wykorzystanie zasobów oraz buforów, niż w przypadku schematów komutacji grupowej opartej na technikach TAG i IBT.

Efektywność techniki OBS

W sieciach ze zwielokrotnieniem falowym WDM, wykorzystujących technikę OBS, grupy pakietów są wysyłane na długościach fal przeznaczonych dla danych, które nie są zakończone (tzn. nie podlegają konwersji O/E/O) w żadnym węźle pośredniczącym. Natomiast pakiety sterujące, wysyłane na jednej lub więcej długości fali przydzielonej do sterowania, podlegają konwersji na sygnał elektroniczny, aby umożliwić przetwarzanie sygnału w każdym węźle pośredniczącym. Dzięki temu jest możliwe wprowadzenie efektywnego sterowania elektronicznego (np. przez plan sterowania MPLS), z zachowaniem większości zalet całkowicie optycznej komunikacji, a także zapewnienie przezroczystości pod względem przepływności bitowej, formatów kodowania oraz wykorzystywanych protokołów warstw wyższych.

Analiza zależności czasowych [6, 11, 12], występujących w przypadku stosowania technik opartych na rezerwacji zasobów na czas ustalony RFD, w porównaniu z technikami wykorzystującymi rezerwację z otwartym zakończeniem, potwierdza, że dzięki technice OBS opartej na RFD jest możliwe bardziej efektywne gospodarowanie zasobami sieciowymi.

Ponadto, jak wcześniej wspomniano, technika OBS wykorzystująca RFD nie wymusza obecności linii opóźniających FDL w węzłach pośredniczących, ponieważ może być użyty wystarczająco duży czas *offset time*, w połączeniu z parametrem opóźnienia rezerwacji DR, bez powodowania straty dużej części pasma [12]. Jeśli jednak w pewnych węzłach pośredniczących są dostępne linie FDL, służące do usunięcia problemu kolizji grup pakietów, technika OBS oparta na RFD może je również wykorzystywać, co w rezultacie umożliwi uzyskanie znacznie lepszego wykorzystania zasobów i niższego prawdopodobieństwa utraty pakietów. Precyzując, w każdym węźle technika OBS oparta na RFD będzie wykorzystywać całą pojemność linii FDL do rozwiązywania problemu kolizji grup pakietów, podczas gdy w technice OBS stosującej IBT i TAG część pojemności linii FDL musi zostać zużyta do opóźnienia grup pakietów na czas konieczny do przetworzenia ich pakietów sterujących. Ponadto, nawet jeśli w każdym węźle jest dostępna taka sama sumaryczna pojemność linii FDL, technika OBS oparta na RFD będzie wykorzystywała tę pojemność bardziej efektywnie. Odpowiednie zastosowanie opóźnionej rezerwacji DR może spowodować zatem zwiększenie stopnia wykorzystania linii FDL i dostępnego pasma, dzięki możliwości inteligentnego planowania ruchu grup pakietów.

Etykietowana komutacja grupowa pakietów optycznych LOBS

W celu uproszczenia procesu kierowania pakietów w węzłach optycznych w komutatorach CS i ES może zostać zastosowana technika MPLS (*Multiprotocol Label Switching*). Jest to technika selektywnego kierowania pakietów, funkcjonująca na poziomie łącza danych, umożliwiająca prostsze i szybsze kierowanie pakietów niż według tradycyjnych schematów, wykorzystywanych w sieciach IP. Przykładowo, kierowanie realizowane w warstwie IP wymaga analizowania relatywnie obszernego nagłówka i wykonywania długiego algorytmu w celu określenia wyjścia, do którego pakiet musi być skierowany.

W protokole MPLS kierowanie pakietów z wymianą etykiet odbywa się z wykorzystaniem prostego zestawu krótkich etykiet, co w efekcie upraszcza i skraca proces kierowania. Zgodnie z MPLS, całość kierowanego ruchu wchodzącego jest rozdzielona na klasy FEC (*forwarding equivalency classes*) i wszystkie pakiety należące do kierowanego podobszaru, odpowiadającego danej klasie FEC, są kierowane w ten sam sposób.

Proces ten jest realizowany następująco. Krótki, o ustalonej długości, mający lokalne znaczenie identyfikator (nazywany etykietą) zostaje przypisany do każdej klasy FEC. Pakiet jest etykietowany albo przez zakodowanie etykiety w dostępnym miejscu na poziomie warstwy łącza danych, albo w nagłówku warstwy sieciowej, albo przez enkapsulację pakietu, wraz ze specjalnie do tego celu przeznaczonym nagłówkiem.

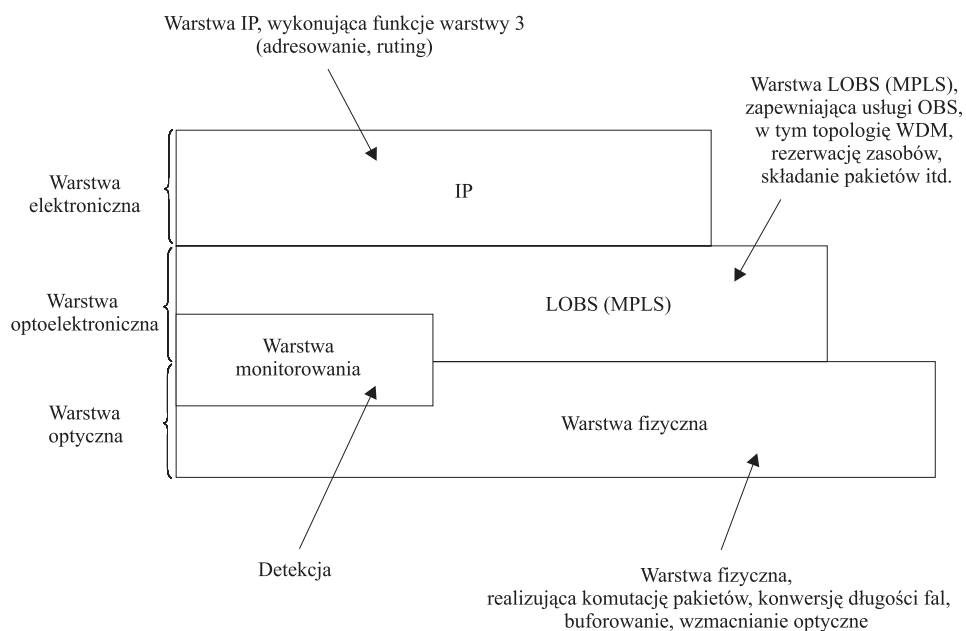
W przypadku sieci z komutacją w warstwie optycznej SON [2, 4] pakiety IP, przybywające do źródłowego komutatora brzegowego ES i kierowane do tego samego docelowego komutatora ES, są gromadzone w pakiecie optycznym, do którego zostaje przydzielona określona etykieta. Komutatory umieszczone na drugim końcu przęsła wykorzystują etykietę jako indeks w tabeli, która specyfikuje następną etykietę i następne przęsło. Stara etykieta zostaje zastąpiona nową i pakiet zostaje skierowany do następnego przęsła. Dzięki temu nie jest konieczne sprawdzanie nagłówków w warstwie sieciowej we wszystkich węzłach, a jedynie w pierwszym węźle ścieżki określonej od źródłowego ES do docelowego ES.

Wykorzystując rozszerzenie pojęcia etykiety, do zastosowania w przyszłych sieciach optycznych została zaproponowana technika wieloprotokołowej komutacji długości falowych (MPL(λ)S), która traktuje optyczne połączenia (ruting długości fal) jako LSR, a dostępne długości fal – jako etykiety do kreowania kierowanych falowo ścieżek. Technika etykietowania może być zastosowana

także w połączeniu z techniką grupowej komutacji pakietów OBS, można wtedy mówić o bardziej ogólnej koncepcji, zwanej LOBS (*Labeled Optical Burst Switching*).

Zasadnicze różnice między tymi dwiema technikami polegają na tym, że według koncepcji MPL(ambda)S, każda etykieta jest odrębną długością fali lub, inaczej mówiąc, każda ścieżka LSP jest ścieżką złożoną ze zbioru długości fal. Wymiana etykiet w MPL(ambda)S jest możliwa w ruterze LSR, jeśli jest on (całkowicie optycznie) zdolny do konwersji długości fal, lecz wtedy ścieżki falowe LSP nie mogą być agregowane z powodu braku dostępnych technik łączenia długości fal. W celu porządkowania albo agregowania ruchu danych przenoszonych w jednej lub więcej ścieżkach falowych, każda ścieżka falowa musi być zakończana w węźle sieci. Natomiast według proponowanej koncepcji LOBS, grupy pakietów należące do dwóch lub więcej LSP (ścieżek LOBS) mogą być agregowane bez konieczności podlegania konwersjom O/E/O. Wynika to stąd, że faktyczna informacja etykiety jest przenoszona przez pakiety sterujące, które są z założenia przetwarzane elektronicznie w każdym węźle LOBS. Z tych samych powodów wymiana etykiet może być wykonana w każdym węźle LOBS, nawet jeśli nie jest on zdolny do wykonywania konwersji długości fal całkowicie optycznie.

Węzeł LOBS ma też specyficzne ograniczenia [6], które nie występują w elektronicznym ruterze LSR. Przykładowo, każdy pakiet sterujący w technice LOBS musi być przetwarzany w inny sposób niż pakiet danych, przenoszący informację etykiety w elektronicznym LSR z wykorzystaniem MPLS. Nie tylko więc informacja etykiety w pakiecie sterującym, lecz także informacja o długości fali, na której przybędzie odpowiadająca jej grupa pakietów i czas *offset time* między grupą oraz jej pakietem sterującym, muszą zostać przetworzone w każdym węźle LOBS. Ponadto, pakiety danych będą komutowane (kierowane) optycznie, co powoduje, że agregacje ścieżek LSP, mimo iż są możliwe, jak wcześniej wspomniano, pod pewnym względem są bardziej ograniczone. Przykładowo, w węźle LOBS,



Rys. 7. Integracja protokołu IP z techniką WDM z wykorzystaniem techniki LOBS

który nie jest zdolny do konwersji (całkowicie optycznej) długości fal, grupy pakietów przychodzące po dwóch ścieżkach LSP, lecz na tej samej długości fali mogą być lokowane na zagregowanej ścieżce LSP, na tej samej długości fali tylko pod warunkiem, że nie dojdzie między nimi do kolizji pasma (tzn. istnieje konieczność wykorzystania tej samej długości fali w tym samym czasie). Jeśli dwie grupy pakietów chciałyby zająć to samo pasmo, jedna z nich musi zostać opóźniona (za pomocą FDL) lub – jeśli nie jest to możliwe – stracona. Oczywiście, można przekierować kolidującą grupę za pomocą innej długości fali przez konwersję O/E/O lub wykorzystać inny port wyjściowy węzła LOBS, tak jak w rutingu odchylonym. Jednak w obu przypadkach zostaje zaangażowana nowa ścieżka LSP, stąd takie rozwiązanie nie może być uważane za łączenie dwóch ścieżek LSP. Należy jednak podkreślić, że grupy pakietów należące do różnych ścieżek LSP mogą być przeplatane na tej samej długości fali, dopuszczając przydzielanie wymaganego pasma każdej LSP. Dzięki temu można uzyskać większą elastyczność i lepsze wykorzystanie pasma, będące rezultatem lokalnego (tylko w każdym węźle LOBS) oraz czasowego związku między długością fali i aktualną etykietą grupy pakietów.

Na rys. 7 pokazano, w jaki sposób wykorzystanie techniki LOBS umożliwia integrację protokołu IP (funkcjonującego w warstwie sieciowej wg modelu OSI) z techniką WDM (działającą w warstwie fizycznej).

Porównanie omówionych typów komutacji optycznej

Zbudowanie sieci przystosowanej do obsługi dużego ruchu danych, gwarantującej dobrą jakość zróżnicowanych usług, wymaga zastosowania efektywnego sposobu komutacji w warstwie optycznej. W tabelicy 1 porównano trzy typy komutacji optycznej [6].

Tabl. 1. Parametry trzech typów komutacji optycznej

Rodzaj komutacji optycznej	Wykorzystanie pasma	Opóźnienie (łącznie z ustawianiem komutacji)	Trudność implementacji	Zdolność adaptacyjna (do ruchu i stanów awaryjnych)
Komutacja ścieżek falowych	Niskie	Duże	Mała	Mała
Komutacja pakietów/komórek	Wysokie	Małe	Duża	Duża
Komutacja grupowa OBS	Wysokie	Małe	Średnia	Duża

Zestawienie z tabl. 1 świadczy o tym, że w porównaniu z optyczną komutacją obwodów (taką, jak rutiny falowy, gdzie ścieżki falowe są ustanawiane za pomocą dwutorowego procesu), zastosowanie techniki OBS umożliwi lepsze wykorzystanie pasma, ponieważ następuje statystyczne współdzielenie każdej długości falowej między grupami pakietów. Ponadto, w przypadku zastosowania techniki OBS transmisja grupy pakietów będzie charakteryzowała się krótszym opóźnieniem liczonym od końca do końca, ponieważ wykorzystywany czas *offset time* jest zazwyczaj dużo mniejszy niż czas potrzebny do zestawienia ścieżki falowej w sieciach z rutynami falowym.

W porównaniu z komutacją pojedynczych pakietów optycznych o ustalonej długości technika OBS wymaga proporcjonalnie mniejszego nagłówka sterującego, ponieważ grupa pakietów może mieć zmienną długość i zazwyczaj większą niż pojedynczy pakiet. Warto również podkreślić, że w komutacji grup pakietów OBS pakiet sterujący i odpowiadająca mu grupa są bardziej swobodnie związane

zarówno przestrzennie (przez wykorzystanie oddzielnych długości fal do sterowania i danych), jak i czasowo (przez wykorzystanie niezerowego parametru *offset time*), niż w przypadku komutacji pakietów optycznych. Wymagania dotyczące przetwarzania pakietów sterujących oraz synchronizacji między grupami pakietów (jak też między grupą pakietów i jej pakietem sterującym) w OBS mogą być zatem znacznie mniej surowe niż te, które są konieczne do przetwarzania nagłówków pakietów oraz synchronizacji między pakietami (a także między danymi i ich nagłówkiem w przypadku komutacji optycznej).

Należy jednakże zauważyć, że różnice między komutacją pojedynczych pakietów optycznych a komutacją grupową OBS (zwłaszcza dla technik OBS opartych na IBT i TAG) zaczynają się zacierać, bowiem każdy pakiet może mieć zmienną długość, być komutowany asynchronicznie, tunelować węzły i wykorzystywać oddzielne długości fal (lub zwielokrotnione podnośne) do przenoszenia swojego nagłówka.

Technika OBS (oparta na RFD) może też efektywnie służyć różnorodnym usługom, w zależności od zróżnicowanych klas grup pakietów w warstwie WDM, nawet bez konieczności wykorzystywania linii opóźniających FDL, podczas gdy większość obecnie stosowanych schematów zapewnienia jakości usług (QoS) wymaga zastosowania buforów. W proponowanych rozwiązaniach jest najważniejsza zasada przydzielenia czasu *extra offset time* dla grup pakietów (i ich pakietów sterujących) o wysokim priorytecie, bowiem dłuższy czas *extra offset time* przydzielony do pakietów ułatwia skuteczne zarezerwowanie pasma przez odpowiedni pakiet sterujący. Na podstawie badań [12] stwierdzono, że klasa grup pakietów o wysokim priorytecie będzie obsługiwana efektywniej (przy mniejszym prawdopodobieństwie utraty pakietów), bez znaczącego opóźnienia. Wynika to stąd, że czas *extra offset time*, w tym przypadku wymagany, jest co najwyżej kilkakrotną długością grupy pakietów klasy o niższym priorytecie. Zakładając, że długość grupy pakietów, zawierającej kilka megabajtów danych ma tylko kilka milisekund przy przepływności 10 Gbit/s, dodatkowy czas *extra offset time*, potrzebny do efektywnego rozdzielania różnych klas grup pakietów, zazwyczaj wynosi co najwyżej kilka milisekund, a więc mniej niż opóźnienie propagacji od końca do końca w sieci szkieletowej na dystansie równym rozległości Stanów Zjednoczonych [11]. Ponadto pakiety o wysokim priorytecie nie wprowadzają żadnego innego opóźnienia poza opóźnieniem propagacji podczas przenoszenia w sieciach WDM bez linii FDL, co umożliwia łatwiejsze sterowanie opóźnieniem od końca do końca i fluktuacjami opóźnienia (*jitter*) grup pakietów. Nawet w sieciach WDM, które wykorzystują linie FDL do rozwiązania problemu kolizji pakietów o wysokim priorytecie, będzie wprowadzone tylko ograniczone dodatkowe opóźnienie, spowodowane użyciem linii FDL. Jest bowiem mało prawdopodobne, aby grupy pakietów o wysokim priorytecie były blokowane, a zatem wymagały częstego wykorzystywania linii FDL.

Możliwości realizacji przedstawionych koncepcji

Postęp w zakresie podzespołów optycznych, umożliwiających realizację rozwiązań sieciowych opartych na komutacji w warstwie optycznej, jest bardzo szybki. Omówienie bieżącego stanu techniki, dotyczącego ważniejszych aktywnych elementów sieci optycznych – takich, jak przestrzajane źródła laserowe (*tuneable sources*), lasery DFB (*distributed feed back*), wzmacniacze optyczne, czy optyczne elementy komutacyjne wykorzystujące, np. techniki holograficzne – wymagałoby napisania odrębnego artykułu. Nie można także zapominać o całej gamie elementów pasywnych (np. multiplekserach i demultiplekserach optycznych, cyrkulatorach, cyrkulatorach *add/drop*, wielokanałowych siatkach Bragga, czy sprzęgaczach światłowodowych), niezbędnych do realizacji sieci optycznej. Niektóre z proponowanych rozwiązań są już dojrzałe technicznie, inne zaś nie wyszły jeszcze poza fazę badań

laboratoryjnych. Można jednak stwierdzić, że dzisiejszy stan techniki w tej dziedzinie umożliwia realizację sieci z komutacją w warstwie optycznej, o zadowalającej funkcjonalności. W zasadzie głównym ograniczeniem są koszty związane z implementacją wybranego rozwiązania.

Przykładem produktu rynkowego [1] może być proponowana przez firmę Lucent Technologies przełącznica optyczna WaveStar LambdaRouter oraz związany z nią system zarządzania ONNS (*Optical Network Navigator System*). Przełącznica LambdaRouter jest optycznym urządzeniem, przełączającym kanały optyczne bez konwersji na sygnały elektryczne. Przy współpracy z systemem zarządzania ONNS umożliwia ona zbudowanie inteligentnej szkieletowej sieci optycznej z rozproszonym sterowaniem, uwzględniającym wymagania dotyczące dostarczania i protekcji kanałów optycznych oraz integracji z sieciami transmisji danych. Na system ONNS składają się jednostki rozproszonej logiki sterującej, umiejscowione w sieci przełącznic LambdaRouter, protokół sygnalizacyjny ONSP (*Optical Network Signalling Protocol*), zapewniający koordynację tych jednostek, a także styk optyczny OUNI (*Optical User Network Interface*), umożliwiający urządzeniom brzegowym bezpośrednią wymianę informacji z przełącznicami LambdaRouter. Rozwiązanie to jest wspomagane przez system zarządzania usługami optycznymi OSM (*Optical Services Manager*), który obsługuje m.in. sieci VPN, zarządzanie przepływnością, zarządzanie elementami sieci optycznej, topologią sieci, awariami i połączeniami, ponadto stosuje interfejs, umożliwiający automatyczne dostarczanie usług.

Należy podkreślić istotną różnicę w stopniu trudności realizacji między przezroczystą optyczną siecią z komutacją pakietów OTPN a siecią z komutacją grupową pakietów OBS. W sieci przezroczystej OTPN stosunkowo mała szybkość przełączania dostępnych optycznych pól komutacyjnych nie stanowi istotnego ograniczenia. Wynika to stąd, że zmian połączeń dokonuje głównie system zarządzania. Odbywa się to względnie rzadko, w odpowiedzi na zmiany w rozplywie ruchu bądź w razie awarii. Dużo większe ograniczenia czasowe występują w przypadku systemów komutacyjnych, pracujących w czasie rzeczywistym, do których należą systemy wykorzystujące technikę komutacji grupowej pakietów OBS. Na praktyczną realizację dojrzałych technicznie tego typu rozwiązań należy więc jeszcze poczekać.

Podsumowanie

Obecnie stan wiedzy dotyczący wykorzystania sieci optycznych bardzo szybko zmienia się, co wynika z postępu zarówno w technikach warstwy fizycznej, jak i w stosowanych protokołach warstw wyższych, zwłaszcza tych, które wchodzi w skład zestawu protokołów IP. Ta ewolucja oznacza zapowiedź nowej ery: inteligentnych sieci optycznych, szeroko wykorzystujących komutację w warstwie optycznej. Coraz większa dominacja ruchu internetowego powoduje, że rosną wymagania dotyczące pasma i jakości usług stawiane sieciom telekomunikacyjnym przez użytkowników. Jednocześnie rosnąca konkurencja w tym obszarze rynku telekomunikacyjnego skłania firmy do szybkiego poszukiwania optymalnych, pod względem techniczno-ekonomicznym, rozwiązań. Przedstawiona, interesująca koncepcja grupowej komutacji pakietów optycznych stanowi pewien kompromis między optyczną komutacją pakietów a komutacją łączy. Ułatwia ona integrację tak odległych od siebie technik, jak IP i DWDM. Ponadto, wykorzystanie etykietowanej komutacji grupowej umożliwia połączenie przetwarzania elektronicznego z technikami czysto optycznymi, co może w przyszłości przyspieszyć implementację dojrzałych rozwiązań praktycznych w struktury sieci telekomunikacyjnych, a tym samym przybliżyć urzeczywistnienie wizji zbudowania optycznej sieci Internet nowej generacji.

Bibliografia

- [1] Epstein H., Corum S., Graber H.: *Zarządzanie sieciami optycznymi*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 2002, nr 1
- [2] Ghanwani A., Jamoussi B., Fedyk D., Ashwood-Smith P., Li L., Feldman N.: *Traffic engineering standards in IP network using MPLS*. IEEE Communications Magazine, 1999, vol. 37, no. 12
- [3] Hunter D. K., Andonovic I.: *Approaches to optical Internet packet switching*. IEEE Communications Magazine, 2000, vol. 38, no. 9
- [4] Li T.: *MPLS and the evolving Internet architecture*. IEEE Communications Magazine, 1999, vol. 37, no. 12
- [5] Listanti M., Eramo V., Sabella R.: *Architectural and technological issues for future optical Internet networks*. IEEE Communications Magazine, 2000, vol. 38, no. 9
- [6] Qiao Ch.: *Labeled optical burst switching for IP-over-WDM integration*. IEEE Communications Magazine, 2000, vol. 38, no. 9
- [7] Rajagopalan B., Pendarakis D., Saha D., Ramamoorthy R. S., Bala K.: *IP over optical networks: architectural aspects*. IEEE Communications Magazine, 2000, vol. 38, no. 9
- [8] Swallow G.: *MPLS advantages for traffic engineering*. IEEE Communications Magazine, 1999, vol. 37, no. 12
- [9] Thompson K., Miller G. J., Wilder R.: *Wide-area Internet traffic patterns and characteristics*. IEEE Network, 1997, vol. 11, no. 6
- [10] Viswanathan A., Feldman N., Wang Z., Callon R.: *Evolution of multiprotocol label switching*. IEEE Communications Magazine, 1998, vol. 36, no. 5
- [11] Yao S, Mukherjee B.: *Advances in photonic packet switching: an overview*. IEEE Communications Magazine, 2000, vol. 38, no. 2
- [12] Yoo M., Qiao Ch.: *Optical burst switching for service differentiation in the next-generation optical Internet*. IEEE Communications Magazine, 2001, vol. 39, no. 2

Jerzy Sadowski



Inż. Jerzy Sadowski (1952) – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej (1978); pracownik Instytutu Łączności w Warszawie (1973–1980, od 1996), kierownik Pracowni Cyfrowych Systemów Teletransmisyjnych (od 2001); współautor (1986) i autor (1988) dwóch opatentowanych rozwiązań konstrukcyjnych z dziedziny układów elektronicznych; zainteresowania naukowe: szerokopasmowe sieci szkieletowe, techniki teletransmisyjne w sieciach optycznych, SDH, ATM, pakietowe sieci transportowe z protokołem IPv6.

e-mail: J.Sadowski@itl.waw.pl