

Opakowanie cyfrowe jako struktura realizująca funkcje zarządzania w optycznej sieci OTN

Kształt współczesnych sieci telekomunikacyjnych zmienia się w ostatnich latach w sposób niezwykle dynamiczny. Jednym z ważniejszych czynników powodujących zmiany w strukturze sieci „uniwersalnych” operatorów telekomunikacyjnych jest niewątpliwie rozwój Internetu. Jego ilościowy i jakościowy rozwój stanowi przedmiot wielu publikacji omawiających współczesne sieci telekomunikacyjne. Stosunkowo nowym zjawiskiem wpływającym na warunki rozwoju Internetu jest natomiast dynamiczny wzrost ruchu generowanego przez użytkowników rozproszonych aplikacji sieciowych. Aplikacje tego typu są określane jako aplikacje **P2P** (*Peer To Peer*). Powszechnie znanym ich przykładem jest usługa oferowana jeszcze w pierwszej połowie 2001 roku przez słynny serwis Napster. Użytkownicy tej usługi wymieniali się plikami bezpośrednio pomiędzy sobą, z rozproszonego serwera korzystali wyłącznie w celu zdobycia informacji o lokalizacji pożądanego pliku. Usługa oferowana przez serwis Napster nigdy nie była jednakże czystą aplikacją typu P2P, co wynika z konieczności korzystania przez jej użytkowników z serwerów firmy.

Obecnie szybko rozszerza się grono użytkowników typowych aplikacji typu P2P. Najbardziej znanymi i powszechnie już stosowanymi przykładami aplikacji typu P2P są aplikacje KaZaA, Gnutella i wszelkie inne pochodne im programy. Skala zjawiska jest na tyle duża, że część operatorów rozważa zmiany w architekturze swych sieci, niektórzy rozważają również konieczność blokowania usług korzystających z określonych numerów portów. Obawy ich wiążą się przede wszystkim z upowszechnieniem zjawiska wymiany pomiędzy użytkownikami nie tylko plików audio, lecz również plików zawierających fragmenty lub całe filmy wideo oraz kompletne pakiety oprogramowania. Wszystkie te aplikacje charakteryzują się koniecznością realizowania transferu dużych zbiorów, zajmujących przez znaczny czas zasoby sieci Internet.

Równie ważny dla rozwoju sieci telekomunikacyjnych jest postępujący na świecie proces deregulacji rynków. Proces ten może wpłynąć na powstanie nowej struktury organizacyjnej i prawnej rynku telekomunikacyjnego. Rozwijają się firmy świadczące usługi sieciowe na poziomie aplikacji: **ASP** (*Application Service Provider*). Rozwój ten nie jest być może tak dynamiczny, jak prognozowano w czasach powszechnej euforii towarzyszącej „odkryciu” Internetu, postępuje jednak konsekwentnie. Pewne problemy, prawdopodobnie przejściowe, przeżywają firmy oferujące dostęp do sieci Internet: **ISP** (*Internet Service Provider*). W obecnych warunkach największe szanse na przetrwanie mają zapewne firmy ISP posiadające poważne zaplecze finansowo-organizacyjne udziałowców.

Osobną grupą firm na rynku telekomunikacyjnym są operatorzy sieci **NSP** (*Network Service Provider*), operatorzy sieci transportowych (*Carriers*) oraz operatorzy ponadregionalnych lub globalnych sieci transportowych (*Carriers' Carrier*). Specjalizują się oni w budowie sieci transportowych, które są podstawą świadczenia usług innym firmom, operującym na rynku usług telekomunikacyjnych. Firmy tego typu najczęściej nie są zainteresowane zdobywaniem rynku odbiorców indywidualnych. Stanowią one niewątpliwie podstawową grupę przedsiębiorstw będących potencjalnymi odbiorcami i użytkownikami nowych technik sieciowych dla szybkich, optycznych sieci transportowych.

W ostatnim czasie powstały liczne sieci transportowe, zarówno na świecie, jak i w Polsce. Wdrożono powszechnie sieci **SDH**. Zaproponowano, intensywnie rozwijano i rozbudowano wszechstronnie standard **ATM** – jak się wydawało uniwersalny protokół dla realizacji każdej usługi sieciowej. Ostatnio pojawiła się idea budowy sieci o ograniczonej liczbie warstw protokołów – sieci „optymalizowanej”. Protokołem przewidywanym do powszechnego użycia w przyszłej sieci transportowej jest protokół **IP** w wersji rozszerzonej o mechanizmy sterowania jakością (**QoS**). Duże nadzieje są także związane z nowym standardem komutacji – **MPLS**. W najniższej natomiast warstwie sieci transportowych, warstwie fizycznej, widać wyraźny postęp w zakresie technologii światłowodowych. Obecny stan rozwoju techniki zwielokrotnienia z podziałem długości fali **DWDM** (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) doprowadził do sytuacji, w której przepływność w sieci przestała być problemem. Sieć transportowa korzysta w warstwie fizycznej z techniki zwielokrotnienia falowego DWDM, uzupełnionej o standardy ramkowania (czy też „opakowania”) cyfrowego (**DW** – *Digital Wrapper*) i jest określana terminem **OTN** (*Optical Transport Network*).

Tematem niniejszego artykułu jest właśnie najniższa warstwa przyszłej sieci transportowej, warstwa optyczna. Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom metod udostępnienia cyfrowych usług transportowych, usług bezpośrednio związanych z koncepcją wprowadzenia **techniki cyfrowego opakowania** w sieciach telekomunikacyjnych.

TELEKOMUNIKACYJNE SIECI TRANSPORTOWE

Podstawową techniką używaną do transmisji w nowoczesnych sieciach optycznych jest technika zwielokrotnienia falowego z gęstym podziałem długości fali optycznej, DWDM. Technika ta jest w zasadzie analogiczna do znanych już wcześniej systemów multipleksacji z podziałem w dziedzinie częstotliwości: **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*). Można powiedzieć, że w systemie transmisyjnym DWDM tworzy się zespół równo-

* Katedra Telekomunikacji, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, e-mail: <nazwisko>@kt.agh.edu.pl

ległych kanałów optycznych (tzw. „kolorów”), z których każdy używa nieco odmiennie długości fali świetlnej, wszystkie kanały dzielą to samo medium transmisyjne. Przepływność jednego kanału optycznego wynosi najczęściej 2,5 Gbit/s, co odpowiada strumieniowi STM-16 (*Synchronous Transport Module 16*) w synchronicznej hierarchii cyfrowej SDH. Używa się także przepływności 10 Gbit/s (STM-64) lub 40 Gbit/s (STM-256).

Aktualnie wykorzystywane systemy DWDM tworzą 8, 16 bądź 32 kanały optyczne w jednym włóknie światłowodowym. Możliwe jest również zastosowanie większej liczby częstotliwości fali świetlnej, obecnie spotyka się systemy DWDM o krotności 160 λ . Urządzenia przełączające, które pracują w systemach DWDM umożliwiają ograniczenie konwersji optyczno-elektrycznych. Jest to niewątpliwą zaletą systemu, gdyż zwiększa szybkość transmisji. Przykładem wspomnianych urządzeń są optyczne przelotowe krotnice transferowe, czyli multiplexery **OADM** (*Optical Add-Drop Multiplexer*). Ich zadaniem jest wydzielenie z toru transmisyjnego dowolnego kanału optycznego i zastąpienie go innym o tej samej lub odmiennie długości fali. Są urządzenia niezbędne przy tworzeniu rozbudowanej sieci. Kolejnym przykładem są optyczne węzły komutujące, **OXC** (*Optical Cross Connect*), które działają jako przełączniki w szkieletach sieci transportowej.

Dodatkowo jest możliwe zastosowanie w systemie DWDM optycznych wzmacniaczy wykorzystujących światłowody domieszkowane erbem, **EDFA** (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), co likwiduje problem konwersji optyczno-elektrycznej w procesie wzmocnienia sygnału. Dzięki temu uzyskuje się istotne zmniejszenie kosztów budowy systemu.

Zastosowanie urządzeń typu EDFA, OXC oraz OADM daje szansę na stworzenie w przyszłości sieci, w której sygnał będzie przenoszony jedynie w dziedzinie optycznej, bez przetwarzania go do postaci elektronicznej (poza elementami końcowymi), co w dużym stopniu przyspieszy działanie sieci.

OPTYCZNA SIĘĆ TRANSPORTOWA OTN

Optyczna sieć transportowa **OTN** (*Optical Transport Network*) jest to sieć oparta na systemie WDM, dostarczająca usług transportowych przez tworzenie stałych lub komutowanych kanałów optycznych. Wymaga się od niej prawidłowego zestawienia i zwielokrotnienia kanałów optycznych, trasowania kanałów oraz pozbawionego błędów przeniesienia informacji wygenerowanej przez klienta (którym w przypadku sieci OTN jest najczęściej operator jakiejś mniejszej sieci). Podstawowymi elementami budowy OTN są pełniące rolę węzłów wspomniane wcześniej przełącznice optyczne OXC oraz krotnice transferowe OADM. Elementy sieci pracują pod nadzorem systemu zarządzania, który dzięki funkcjom kontrolnym nadzoruje proces łączenia oraz rozdzielania kanałów optycznych, odpowiada za działanie urządzeń optycznych w sieci (wzmacniacze, odbiorniki itp.), a także przywraca sieć do stanu poprawnego działania w przypadku awarii (dzięki procedurom protekcji oraz tzw. restoracji, czyli odtwarzania).

Koncepcja OTN od początku była związana z zapewnieniem przezroczystości (czasem nazywanej transparentnością) sieci dla sygnałów klienta. Zastosowanie jako warstwy fizycznej omówionej wcześniej techniki WDM ogranicza liczbę konwersji optyczno-elektrycznych, co dodatkowo zmniejsza prawdopodobieństwo błędów w transmisji danych klienta. Użycie cyfrowego opakowania DW umożliwia przetwarzanie danych nagłówka DW bez ingerencji w dane użytkownika, co zapewnia przesyłanie praktycznie dowolnego formatu danych. Dlatego cyfrowe opakowanie może być uznane jako jeden z podstawowych mechanizmów zapewniających przezroczystość transportowej sieci optycznej. Dzięki temu sieć OTN może przysyłać sygnały tak różnych technik, jak synchroniczna hierarchia cyfrowa SDH,

asynchroniczny przekaz danych ATM czy dla protokołu Internetu IP (*Internet Protocol*).

W miarę rozwoju różnych technik sieciowych pojawiła się potrzeba opracowania metod współpracy pomiędzy tzw. domenami. Z reguły przez odrębną domenę rozumie się podsieć innego operatora (lub zespół takich sieci). Domeny poszczególnych operatorów wyodrębnia się ze względu na to, że mogą być w nich używane różne techniki transmisji informacji. Wiąże się to z korzystaniem z odmiennych protokołów transmisji, stosowaniem innej podstawy czasu synchronizacji zegara, a także z różnorodnym podejściem do świadczenia usług. W sieciach OTN zdefiniowano dwa rodzaje optycznych interfejsów międzysieciowych **ONNI** (*Optical Network Node Interface*).

- Styk międzydomenowy **IrDI** (*Inter-Domain Interface*). Jest to fizyczny interfejs, który reprezentuje granicę między dwiema domenami.

- Styk wewnątrzdomenowy **IaDI** (*Intra-Domain Interface*). Jest to fizyczny interfejs wewnątrz domeny; służy on do komunikacji pomiędzy elementami sieci należącymi do jednej domeny.

W związku z tym podziałem można patrzeć na optyczną sieć transportową jako na strukturę składającą się z wielu sieci, które łączą się interfejsami IrDI. Każdy operator wewnątrz swojej domeny również może posiadać heterogeniczne sieci. Takie sieci mogą być połączone przez oba rodzaje styków (zarówno IaDI, jak i IrDI).

Optyczna sieć transportowa musi realizować funkcje tzw. utrzymaniowe, zarządzające i kontrolne (**OA&M**), w celu zapewnienia niezawodności transmisji i sprawnej obsługi zgłoszeń pochodzących od różnych klientów. Część z tych funkcji jest zaimplementowana w sieci OTN dzięki cyfrowemu opakowaniu, część za pomocą informacji wymienianych w optycznym kanale

■ Tabela 1. Funkcje zarządzania w optycznej sieci transportowej [1]

Funkcja zarządzania	Proces	Warstwa sieci OTN		
		OCh	OMS	OTS
Nadzorowanie ciągłości	Wykrywanie utraty ciągłości (<i>Loss of continuity detection</i>)	WY	WY	WY
Nadzorowanie połączenia	Identyfikacja ścieżki (<i>Trail Trace Identification</i>)	WY	WY	WY
Informacje utrzymaniowe	Wskaźnik uszkodzenia w warstwie optycznej (<i>Forward Defect Indication</i>)	WY	WY	WY
	Wskaźnik uszkodzenia (<i>Backward Defect Indication</i>)	WY	WY	WY
	Wskaźnik jakości (<i>Backward Quality Indication</i>)	DO	DO	DO
Nadzorowanie jakości sygnału	Monitorowanie wydajności (<i>Performance Monitoring</i>)	WY	DO	WY
Zarządzanie adaptacją	Identyfikator sygnału klienta (<i>Payload Type Indication</i>)	WY	DO	NS
Sterowanie protekcją	Protokół automatycznego przełączenia na protekcję (<i>Automatic protection switching protocol</i>)	DO	DO	NW
Zarządzanie połączeniami tandemowymi w podsieciach	Nadzorowanie połączeń (<i>Connection supervision</i>)	DO	DO	DO
Komunikacja zarządzająca	Kanał do przesyłania informacji zarządczej	NW	DO	WY
	Kanał komunikacji głosowej	NW	NW	OP
Inne funkcje	Do wykorzystania przez operatora	NW	NW	WY

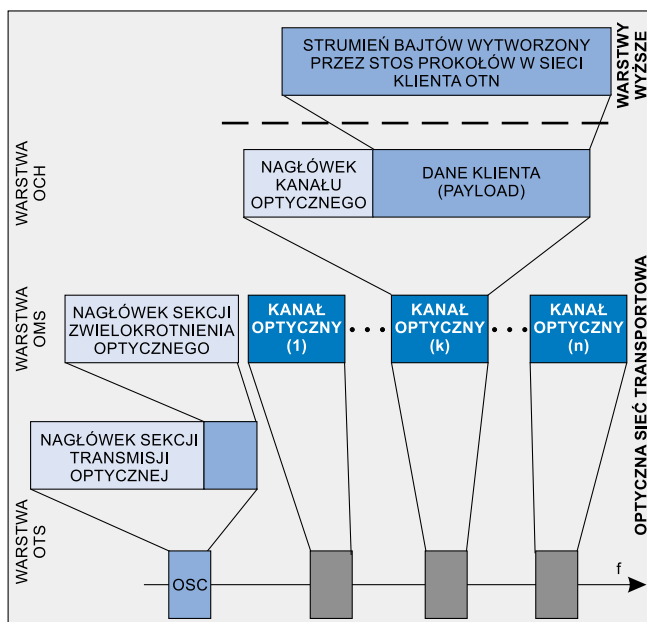
Oznaczenia: WY – jest wymagane, NW – nie jest wymagane, DO – do późniejszego opracowania, OP – opcjonalnie, NS – nie stosuje się

nadzorczym **OSC** (*Optical Supervisory Channel*). Do podstawowych zagadnień związanych z zarządzaniem, sygnalizacją i utrzymaniem sieci należą mechanizmy wykrywania i korekcy błędów powstałych podczas transmisji, pomiary wydajności sieci, kontrola konfiguracji, jak również nadzorowanie trwających połączeń i wykrywanie połączeń nieudanych. Optyczna sieć transportowa musi więc sprawdzić przede wszystkim kompatybilność swoich elementów i zgodność komunikatów przesyłanych w sieci. Ponadto OTN ma mechanizmy wykrywania uszkodzeń sieci, umożliwiające izolację tych uszkodzeń i podjęcie odpowiednich procedur naprawczych.

Sieć OTN ma także mechanizmy zapewniające wykrycie spadku wydajności sieci, co umożliwia wczesne zapobieganie błędom w transmisji oraz poprawę jakości usługi QoS (*Quality of Service*). Funkcje związane z zarządzaniem w sieci OTN, wraz z uwzględnieniem ich wykorzystania w poszczególnych warstwach optycznej sieci transportowej (omówionych przy opisie architektury funkcjonalnej sieci OTN), przedstawiono w tabeli 1.

Wymagania dotyczące zadań świadczonych przez poszczególne poziomy logiczne (czyli tak zwaną architekturę funkcjonalną) optycznej sieci transportowej opisuje Zalecenie ITU-T G. 872 (*Architecture of optical transport networks*) [1]. Twórcy standardu, wyraźnie wzorując się na modelu najbardziej rozpowszechnionego dotychczas typu sieci transportowych **SONET** (*Synchronous Optical Network*) oraz SDH, wyróżnili w optycznej sieci transportowej trzy warstwy funkcjonalne (rys. 1):

- warstwę kanału optycznego **OCh** (*Optical Channel*),



■ Rys. 1. Warstwy optycznej sieci transportowej. Oznaczenia: OTN – optyczna sieć transportowa, OCh – kanał optyczny, OMS – sekcja zwielokrotnienia optycznego, OTS – sekcja transmisji optycznej

- warstwę sekcji zwielokrotnienia optycznego **OMS** (*Optical Multiplex Section*),
- warstwę sekcji transmisji optycznej **OTS** (*Optical Transmission Section*).

Zalecenie G.872 wspomina również o świadczącej usługi dla OTS warstwie medium fizycznego *Physical Media Layer*, która określa typ używanego światłowodu. Warstwa medium fizycznego nie należy do modelu logicznego sieci OTN i nie będzie tu przedmiotem rozważań.

Z punktu widzenia opisu opakowania cyfrowego najważniejsza jest warstwa kanału optycznego OCh. Ma ona dostarczyć mechanizmów sieciowych umożliwiających przeniesienie da-

nych klienta pomiędzy dwoma dowolnymi punktami sieci OTN. Dane te mogą pochodzić z różnych systemów (SDH, ATM, IP, nawet PDH), a warstwa kanału optycznego ma działać niezależnie od typu transportowanego sygnału (a więc zapewnić przezroczystość). Warstwa OCh ma zatem przyjąć te dane (zaadaptować je). Zalecenie ITU-872 zaleca również, aby warstwa ta:

- dokonywała przegrupowania połączeń kanałów optycznych; jest to funkcja istotna ze względu na potrzebę elastycznego doboru trasy w sieci optycznej,
- utrzymywała integralność danych klienta, czyli usuwała przekłamania; projektanci standardu przewidywali, że do realizacji tej funkcji ma służyć przetwarzanie nagłówka kanału optycznego **OCh OH** (*Optical Channel OverHead*),
- sprawowała nadzór nad kanałem optycznym (tabela 1); w szczególności chodzi tu o zapewnienie dostępności kanału, parametrów wymiany informacji na odpowiednim poziomie jakości obsługi QoS (*Quality of Service*) oraz utrzymanie prawidłowego działania sieci; funkcje te realizuje również nagłówek OCh OH.

Strumień danych przenoszonych w tej warstwie składa się z dwóch części: informacji pochodzących z warstw wyższych (danych klienta), zaadaptowanych do warstwy kanału optycznego oraz z odpowiedniego nagłówka. Tak utworzona jednostka danych nazywa się jednostką transportową kanału optycznego **OTU** (*Optical Channel Transport Unit*). Opakowanie cyfrowe stanowi właśnie format tej jednostki.

Poniżej warstwy kanału optycznego przewidziano warstwę sekcji zwielokrotnienia optycznego **OMS**. Ma ona za zadanie obsługiwać sygnał złożony z wielu fal świetlnych, czyli sygnał powstały ze zwielokrotnienia wielu odrębnych kanałów optycznych. W przypadku granicznym za taki sygnał można również uznać pojedynczy kanał optyczny, co pozwala objąć architekturą OTN tradycyjne systemy światłowodowe (z jedną nośną falą optyczną) albo systemy nowsze z rezerwami (*dark fibre*). Każdy kanał optyczny ma zdefiniowaną częstotliwość (długość) fali nośnej sygnału oraz zajmowane pasmo optyczne, czyli szerokość widmową sygnału użytecznego powiększoną o stabilność źródła sygnału (którym zazwyczaj jest dioda laserowa). Zadania stojące przed warstwą OMS są następujące.

- Zapewnienie integralności przenoszonej informacji. Podobnie jak w warstwie OCh ma temu służyć przetwarzanie odpowiedniego nagłówka. Przez charakterystyczną dla tej warstwy informację rozumie się strumień danych utworzony z zespołu kanałów optycznych, z których każdy ma własne pasmo częstotliwości oraz dodany do nich nagłówek warstwy sekcji zwielokrotnienia optycznego OMS. Całą tę strukturę nazwano grupą optycznych jednostek transportowych poziomu n , **OTUGn** (*Optical Transport Unit Group of order n*), gdzie n jest liczbą kanałów optycznych zwielokrotnionych w tej warstwie.
- Sprawowanie funkcji nadzorczych w celu zabezpieczenia prawidłowego działania i zarządzania tą warstwą (tabela 1).

Warstwa sekcji transmisji optycznej OTS jest najniższą warstwą modelu sieci OTN. Znajduje się ona najbliżej medium transmisyjnego i ma za zadanie umożliwić transmisję w różnego rodzaju włóknach światłowodowych. W warstwie tej określa się parametry interfejsu fizycznego, takie jak: częstotliwość (długość) używanej fali świetlnej, poziom mocy sygnału na wyjściu nadajnika oraz dopuszczalny odstęp sygnału od szumu. Warstwa OTS ma realizować następujące funkcje:

- przetwarzanie nagłówka warstwy, w celu zapewnienia integralności przenoszonych danych,
- sprawowanie nadzoru nad warstwą, w celu umożliwienia jej prawidłowego działania (tabela 1).

Strumień informacji charakterystycznej dla tej warstwy jest tworzony analogicznie jak w warstwach wyższych. Składają się na ten strumień dane adaptowane z warstwy sekcji zwielokrotnienia OMS oraz nagłówki warstwy transmisji optycznej. Stanowią

wią one moduł transportu optycznego poziomu n , to jest OTM n . Jego przekaz odbywa się dzięki:

- przesyłaniu sygnału zmultipleksowanego poziomu n (czyli sygnału z warstwy OMS),
- utworzeniu optycznego kanału nadzorczego **OSC** (*Optical Supervisory Channel*) – jest to specjalnie wydzielony kanał optyczny, który transmituje informację sterującą między jednostkami warstwy OTS; na optyczny kanał nadzorczy składa się kilka rodzajów danych, część z nich może być używana przez więcej niż jedną warstwę sieci.

OPAKOWANIE CYFROWE

Według zamierzeń projektantów, cyfrowe opakowanie (DW) ma być mechanizmem służącym zapewnieniu poprawnej transmisji w kanale optycznym. Cyfrowe opakowanie zapewnia dopasowanie różnych rodzajów protokołów sieciowych, stosowanych w dotychczasowych sieciach, do interfejsu optycznej sieci transportowej. Pełni zatem rolę analogiczną do warstwy łącza danych w otwartym modelu odniesienia **OSI/ISO** (*Open System Interconnection/International Standardization Organization*), który jednak w przypadku sieci OTN nie jest modelem adekwatnym.

Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania można zbudować sieć opartą na DWDM jako szybkiej warstwie fizycznej, która będzie obsługiwała jednocześnie różne stopy protokołów w sieci klienta. Użycie cyfrowego opakowania daje (opcjonalną) możliwość poprawienia bitowej stopy błędów **BER** (*Bit Error Rate*) w przesyłaniu strumienia danych dzięki zastosowaniu kodów korekcyjnych **FEC** (*Forward Error Correction*).

W wyniku zastosowania opakowania cyfrowego uzyskuje się przezroczystość sieci optycznej, która dla użytkowników jest widziana jako jednolita sieć rozległa. Dzieje się tak z dwóch powodów: po pierwsze jest zapewniana synchronizacja przesyłanych danych (a trzeba pamiętać, że mogą one pochodzić z różnych systemów klientów sieci OTN). Po drugie, mimo że w sieci OTN przenosi się różne protokoły, dzięki cyfrowemu opakowaniu jest możliwa kontrola jakości transmisji. Urządzenia odczytują bowiem jedynie jego nagłówek, który zawsze ma ten sam format. Opakowanie cyfrowe jest zatem bardzo dogodnym rozwiązaniem, ze względu na możliwość ujednoczenia procedur zarządzania i kontroli sieci, procedur OA&M, niezależnie od zróżnicowania formatów informacji sygnalizacyjnych związanych z różnymi protokołami.

Opakowanie cyfrowe może też służyć do zapewniania bezpiecznego działania pierścieni optycznych, kontrolując każdą falę nośną z osobna. Jest środkiem do skutecznego zarządzania wykorzystywanymi długościami fal. Dotychczas podobne funkcje wykorzystywały mechanizmy SDH, które niestety nie w pełni nadają się do takich działań. Według założeń opakowanie cyfrowe ma zapewniać funkcjonalność i niezawodność na poziomie SDH, oferując jednocześnie znacznie większe pasmo transmisyjne. Na koniec warto również wspomnieć o aspekcie finansowym – stworzenie jednolitej i szybkiej sieci powoduje bowiem znaczną redukcję kosztów jej utrzymania, zatem cen oferowanych usług, oraz obniżenie kosztów jej budowy (ze względu na wydłużenie odcinka regeneracyjnego).

Od strony pełnionych funkcji zadanie opakowania cyfrowego polega na zapewnieniu pełnej usługi transportowej dla cyfrowego kanału optycznego. Z założenia przyjmuje się więc, że powinno spełniać następujące funkcje:

- nadzoru nad ciągłością transmisji (*Continuity supervision*),
- nadzoru nad połączeniami (*Connectivity supervision*),
- nadzoru nad jakością transmisji (*Quality supervision*),
- transportu informacji przeznaczonej dla operatorów sieciowych (*Transport of information for network operators*).

Nadzór nad ciągłością transmisji ma zapewniać poprawne przesyłanie danych. Ponieważ podczas niej cała ramka może zostać zagubiona, a ciągłość traktu transmisyjnego zerwana, powinno się zapewnić co najmniej wykrywanie takich nieprawidłowości w działaniu sieci (o ile nie da się im zapobiec lub ich usunąć). W przypadku opakowania cyfrowego do głównych zadań funkcji nadzoru ciągłości mają należeć:

- sprawdzanie, czy ramka nie została zagubiona;
- generowanie sygnałów alarmowych służących do identyfikacji błędów, który wystąpił podczas transmisji;
- wykrywanie transmisji jednostek OTU (*Optical channel Transport Unit*) oraz ODU (*Optical channel Data Unit*), jednostki te są zdefiniowane w dalszej części artykułu.

Funkcja nadzoru nad połączeniem ma polegać na śledzeniu ścieżki, po której są przesyłane jednostki OTU oraz ODU.

Nadzór nad jakością ma za zadanie rozwiązać problemy innego rodzaju niż nadzór nad ciągłością transmisji. W przypadku każdej transmisji występują bowiem przekłamania przesyłanego sygnału. Chociaż technika cyfrowa jest na nie bardziej odporna niż technika analogowa, to jednak i w tym przypadku muszą zdarzać się błędy. Opakowanie cyfrowe do kontroli błędów używa takich metod, jak:

- kontrola parzystości **BIP-8** (*Bit Interleaved Parity*), której dokonuje się na blokach ośmiobitowych;
- generowanie sygnału służącego do wykrywania błędów odległych (nazwa tego sygnału również wywodzi się z systemu SDH, jest to sygnał **REI** – *Remote Error Indication*);
- bezpośrednia korekcja błędów **FEC** (*Forward Error Correction*).

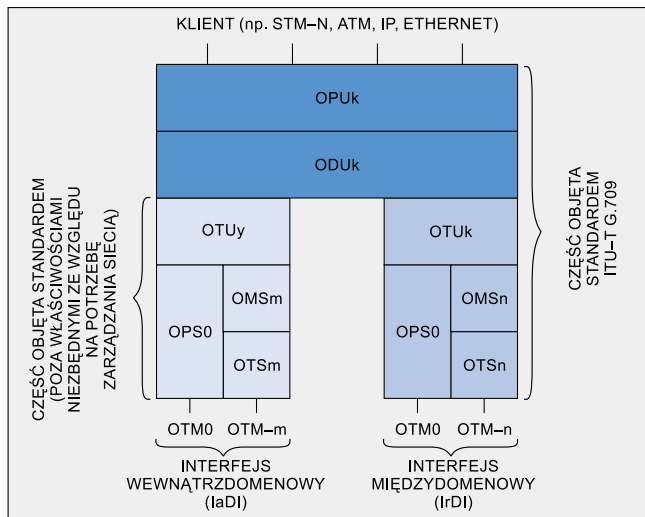
Metody te mają dotyczyć błędów występujących w bitach jednostek OTU oraz ODU.

Ostatnia funkcja (tzn. transportu informacji dla operatorów) to podstawowe zadanie warstwy łącza danych. Transmisja informacji pochodzącej od operatorów (tzw. *payload*, czyli coś, za co się płaci) jest oczywiście celem każdej sieci telekomunikacyjnej.

Strukturę opakowania cyfrowego opisano w Zaleceniu ITU-T G.709 *Network Node Interface for the Optical Transport Network (OTN)*. Przedstawia ono wygląd sygnału na styku ONNI optycznej sieci transportowej, a przede wszystkim sposób przeniesienia nagłówka kanału optycznego OCh OH, bajtów danych klienta, jak i bajtów bezpośredniej korekcji błędów FEC. Wymienione bajty przenosi się w takiej właśnie kolejności, w związku z czym omawianą technikę nazywa się „opakowaniem” (*wrapping*). Sama nazwa „opakowanie cyfrowe” nie jest jednak wprowadzona przez żaden standard. Używa się jej na oznaczenie opisywanego sposobu ramkowania (o cyfrowym opakowaniu pisze się też niekiedy „ramka optyczna”). Samo określenie powstało w Stanach Zjednoczonych przy okazji prac tamtejszej organizacji normalizacyjnej **ANSI** (*American National Standards Institute*). Nazwa „opakowanie” występuje również w komercyjnych informatorach rozprowadzanych przez producentów sprzętu – najbardziej znane jest firmowe określenie *WaveWrapper*, które firma Lucent Technologies nadała swojej wersji cyfrowego opakowania.

Rekomendacja G.709 szczegółowo przedstawia sposób przesyłania informacji w sieci OTN na styku międzydomenowym (Ir-DI). Korzysta ona z warstw określonych w modelu z rekomendacji G.872. Rozpatruje jednak sieć OTN od strony przesyłanych sygnałów. Z tego względu definiuje trzy jednostki danych, które muszą być przenoszone w kanale optycznym. Każda z tych jednostek ma wydzielone specyficzne funkcje, mające przyczynić się do poprawnej transmisji informacji klienta przez optyczną sieć transportową. Te trzy jednostki to (rys. 2):

- jednostka danych klienta kanału optycznego **OPU** (*Optical channel Payload Unit*),
- jednostka danych kanału optycznego **ODU** (*Optical channel Data Unit*),



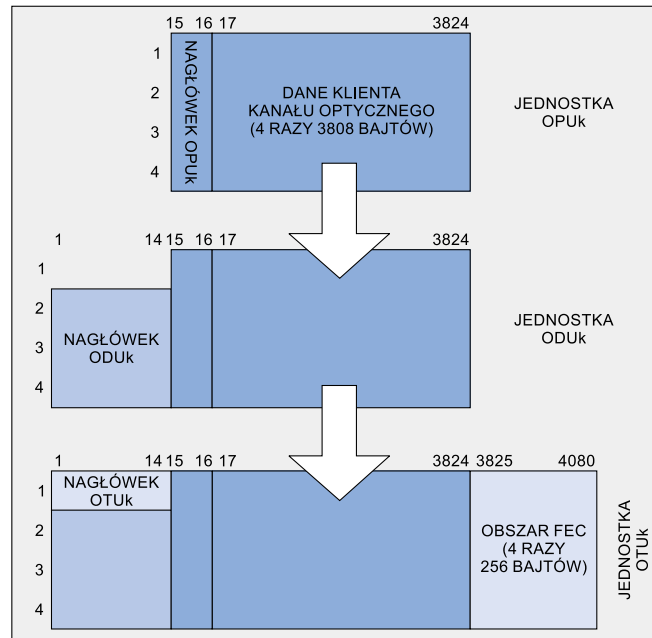
■ Rys. 2. Podstawowa struktura sygnału w węzle optycznej sieci transportowej [6]. Oznaczenia: STM – synchroniczny moduł transportowy, ATM – asynchroniczny przekaz danych, IP – protokół Internetu, OPU – optyczna jednostka danych klienta, ODU – optyczna jednostka danych, OTU – jednostka transportowa kanału optycznego, OPS – optyczna sekcja fizyczna, OMS – optyczna sekcja zwielokrotnienia, OTS – optyczna sekcja transmisyjna, OTM – optyczny moduł transportowy

● jednostka transportowa kanału optycznego **OTU** (*Optical channel Transport Unit*).

Jednostka OPU, wzorowana na wirtualnych kontenerach stosowanych w systemach SONET/SDH, służy do adaptacji w warstwie kanału optycznego informacji pochodzącej z warstw wyższych. Jej celem jest dostosowanie strumienia danych klienta do oferowanej przepływności kanału optycznego. Z tego względu standard przewiduje, w jaki sposób mają być w niej ułożone poszczególne bajty danych klienta oraz w jaki sposób uzupełniać ten sygnał do wyższej przepływności kanału. Oprócz danych klienta i bajtów wypełnienia do jednostki OPU zalicza się również nagłówki, który przynosi głównie informację o tym, z jakiego systemu pochodzą dane klienta. Zalecenie przewiduje na razie możliwość transportu kontenerów STM sieci SDH, komórek ATM oraz pakietów nieokreślonego typu (co można wykorzystać w razie potrzeby do transmisji pakietów IP czy ramek typu Ethernet; procedura ta wymaga jednak dalszego dopracowania). Jednostka OPU w żadnym momencie nie jest oddzielnie przesyłana w sieci, zawsze jest elementem jednostki niższego poziomu (ODU).

Jednostka ODU jest odpowiedzialna za zarządzanie ścieżką połączenia (czyli całym odcinkiem, na którym przesyła się dane klienta między punktami końcowymi, w relacji *end-to-end*). Składa się z bajtów tworzących OPU oraz nagłówka, który przynosi informację sygnalizującą błędne działanie sieci, kontrolującą protekcję oraz – co najważniejsze – połączenia tandemowe występujące w danej ścieżce (m. in. dokonuje w nich detekcji błędów). Połączenie tandemowe jest to połączenie realizowane w obrębie podsięci, przez którą przebiega ścieżka połączenia. Nagłówek ODU przynosi największą ilość informacji sterującej (rys. 3).

Jednostka OTU odpowiada za sekcję, przez którą przechodzi sygnał. Sekcja jest to odcinek między dwoma urządzeniami w sieci, które zapewniają tzw. usługi **3R** (*Reamplification, Reshaping & Retiming*), czyli ponowne wzmocnienie, przywrócenie prawidłowego kształtu oraz podstawy czasu sygnału. Każda sekcja składa się z pary łączy, które przesyłają sygnały w przeciwnych kierunkach. Głównym zadaniem jednostki OTU jest umożliwienie prawidłowego rozpoznania i synchronizacji (czyli prawidłowego ramkowania) użytecznego sygnału cyfrowego przesyłanego



■ Rys. 3. Sposób składania poszczególnych jednostek w kanale optycznym. Oznaczenia: FEC – bezpośrednia korekcja błędów, pozostałe oznaczenia jak na rys. 2

w kanale optycznym, monitorowanie wydajności oraz korekcja błędów. Jednostka ta składa się co najmniej z jednej jednostki ODU, nagłówka oraz bajtów bezpośredniej korekcji błędów FEC (rys. 3). Na razie zalecenie nie precyzuje, w jaki sposób miałyby być dokonywany transport dwóch i więcej jednostek ODU w jednej OTU.

Dla styku typu IrDI zdefiniowano jeden typ tej jednostki. Pracuje się jeszcze nad innymi formatami ramek. Dla łączy laDI dopuszcza się kilka innych typów jednostek. Rekomendacja przewiduje bowiem zastosowanie różnych wielkości FEC lub też całkowitą rezygnację z kodu korekcyjnego w cyfrowym opakowaniu. Jednakże podstawowa struktura ramki OTU z kodem korekcyjnym musi być zachowana w połączeniach między sieciami różnych operatorów oraz między podsieciami dzierżawionymi przez różnych właścicieli. Ponadto ramka standardowa może być wykorzystywana wewnątrz domen sieciowych. Istnieje jednak możliwość zastosowania ramkowania alternatywnego (tylko w obrębie danej domeny), którego celem może być wspieranie specyficznych usług oferowanych w tej domenie.

Wyżej wymienione jednostki mają zawsze tę samą wielkość, niezależnie od przepływności bitowej kanału. W przypadku różnych szybkości zmienia się tylko czas ich przesyłania. Jednostka OPU ma zawsze wielkość 15 240 bajtów (w tym 8 bajtów nagłówka OPU), nagłówek ODU liczy 42 bajty, nagłówek OTU 14 bajtów, zaś pole FEC zawiera 1024 bajty. Wobec tego cała jednostka OTU liczy 16 320 bajtów.

Dla zaznaczenia różnych przepływności po nazwie jednostki stosuje się odpowiedni indeks (OPUk, ODUk, OTUk). Indeks $k=1$ oznacza przepływność jednostki rzędu 2,5 Gbit/s, $k=2$ reprezentuje 10 Gbit/s, zaś $k=3$ dotyczy strumienia 40 Gbit/s.

W tym miejscu można jeszcze wspomnieć o alternatywnych wersjach cyfrowego opakowania. Pochodzą one z opracowań firmowych czynionych na potrzeby ANSI. Autorzy dotychczasowych polskich publikacji dotyczących omawianej techniki (np. [4], [5]), powoływali się raczej na te wersje (głównie autorstwa firmy Lucent). Odmiany te różnią się od omawianej w niniejszym artykule struktury jedynie rozkładem bajtów nagłówka OCH OH. Przenoszona informacja oraz pełnione funkcje są takie same. Główna różnica polega na tym, że nie wyszczególnia się trzech

wyżej opisanych jednostek, co zdaje się być największą wadą tych wersji (choćby ze względu na zmniejszenie elastyczności potencjalnej dzierżawy pasma w kanale optycznym). Poza tym różnice nie są istotne i nie ma potrzeby omawiać ich tu dokładnie.

Model G. 709 wraz z Zaleceniem G. 872 wyróżnia warstwę sekcji zwielokrotnienia OMS oraz warstwę sekcji transmisji optycznej OTS. O ile jednostki OPU, ODU i OTU zawierają się w pojedynczym kanale optycznym, o tyle warstwy OMS oraz OTS odnoszą się do wielu kanałów optycznych (długości fali). Twórcy standardu uwzględnili jednak również sytuację, gdy jest używana tylko jedna nośna optyczna (jak w klasycznych systemach światłowodowych). Przewidziano wówczas zastosowanie tzw. sekcji fizycznej poziomu 0, **OPSO** (*Optical Physical Section of order 0*), która zastępuje w takim przypadku sekcje zwielokrotnienia i transmisji. Zespół informacji przesyłanych w światłowodzie stanowi optyczny moduł transportowy **OTM** (*Optical Transport Module*), w którym są zawarte dane z warstw wyższych.

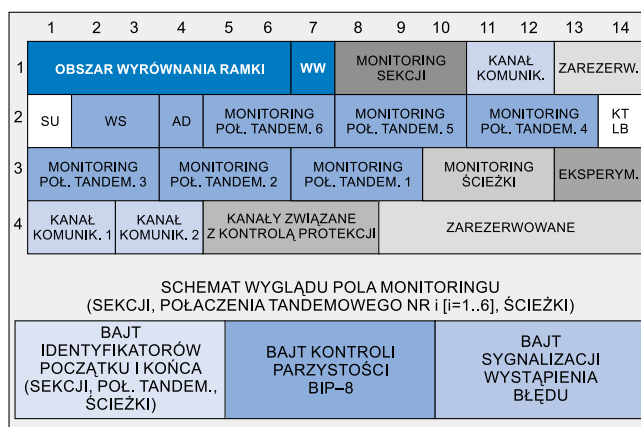
Bez wątplenia najważniejszą strukturę z punktu widzenia realizacji funkcji zarządzania w sieci optycznej stanowi tzw. nagłówek dzielony jednostek ODU oraz OPU (rys. 4). Na obecnym etapie standaryzacji oba nagłówki są połączone, jednak w przyszłości, gdy zostaną opracowane bardziej skomplikowane metody składowania OTU z ODU, jego wygląd może być bardziej złożony.

Głównym zadaniem nagłówka OTU jest umożliwienie rozpoznania transmisji ramki (a więc faktu przesyłania sygnału użytecznego) w kanale przez urządzenia kończące sekcję oraz synchronizacji zegara systemu. Dokonuje się tego dzięki obszarowi sześciu bajtów wyrównania, który zawiera określoną sekwencję bitów. W nagłówku OTU znajduje się również bajt wyrównania wieloramki. Wieloramka jest strukturą, której zawartość można poprawnie interpretować dopiero po złożeniu ciągu bitów pochodzących z większej liczby ramek (umożliwia to przesyłanie dłuższych komunikatów, a więc niosących więcej informacji). Takie ramki należy zliczać i rozpoznawać pierwszą ramkę w sekwencji wieloramki – do takiej numeracji służy właśnie pole wyrównania wieloramki. Między innymi korzystając z tej użytecznej struktury wszystkie pola monitorowania nagłówka dzielonego.

Cyfrowe opakowanie pozwala także na realizowanie kanałów komunikacyjnych służących do wymiany informacji między stanowiskami nadzorczymi. W nagłówku OTU, dla potrzeb sekcji, zarezerwowano jedno pole, natomiast w nagłówku ODU, dla kontroli ścieżki – dwa. Format przesyłanej w tych polach informacji jest dowolny (mogą to być dane, głos itd.).

Nagłówek ODU zawiera również bajt sygnału utrzymaniowego, który ma za zadanie oznaczyć sytuację, gdy jednostka OTU przynosi jedynie sygnał alarmowy związany z błędnym działaniem ścieżki. Sam sygnał utrzymaniowy jest przesyłany w jednostce OPU (jest to odpowiednia sekwencja bitów – np. same jedynki lub zera). Wyróżniono trzy rodzaje tego sygnału. Najważniejszym z nich jest znany z systemów SDH sygnał **AIS** (*Alarm Indication Signal*), który informuje o defekcie łącza. Przesyła się go wtedy, gdy urządzenia stwierdzają w pewnym punkcie ścieżki tak dużą liczbę przekłamań, że muszą zaprzestać transmisji sygnału użytecznego. Inne sygnały utrzymaniowe to: informacja o braku połączenia ze źródłem sygnału oraz informacja o blokadzie łącza. Sygnały utrzymaniowe, jak i wszystkie inne sygnały dotyczące wykrywania nieprawidłowości i jakości transmisji, są transmitowane w sekcji w ten sposób, że informacja dotycząca jednego z łączy jest wysyłana na drugim z pary, pracującym w kierunku przeciwnym.

W nagłówku dzielonym (rys. 4) wyróżniono trzy rodzaje pól służących do monitorowania: sekcji (w nagłówku OTU), ścieżki oraz połączeń tandemowych (w nagłówku ODU). W każdej podsekcji zawierającej ścieżkę jest tworzone nowe połączenie tandemowe. Ogólnie pola monitorowania zawierają niżej wymienione informacje.



■ Rys. 4. Nagłówek dzielony jednostek OTU/ODU. Oznaczenia: WW – obszar wyrównania wieloramki, SU – sygnał utrzymaniowy, WS – wierzchołek stosu dla połączeń tandemowych, AD – kanał aktywacji/dezaktywacji dla połączeń tandemowych, KTLB – kanał informacji dotyczącej typu oraz lokalizacji błędu

- Identyfikatory punktów początku i końca (odpowiednio: sekcji, ścieżki i danego połączenia tandemowego). Pole to, używające wieloramki, niesie informację na temat położenia geograficznego oraz operatora danego punktu.

- Bity kontroli parzystości BIP-8. Wartość tego pola niesiona w ramce o numerze i , jest sumą kontrolną obliczoną na podstawie zawartości całej jednostki OPU, pochodzącej z ramki o numerze $i-2$.

- Wskaźniki błędów. Pole to sygnalizuje określonym bitem, że wynik obliczenia sumy kontrolnej BIP-8 nie zgadza się z wartością przesłaną w tym polu. Alarm taki jest oczywiście przesyłany w przeciwnym kierunku. W polu tym następuje również oznaczenie według określonego kodu, jak duża jest różnica. Dzięki temu, że opisany tu mechanizm wraz z kontrolą parzystości zaimplementowano w każdej sekcji i w każdym połączeniu tandemowym oddzielnie, łatwa jest lokalizacja miejsca, w którym następuje przekłamanie.

Opakowanie cyfrowe umożliwia realizację połączeń tandemowych z zagnieżdżeniem do sześciu poziomów. Z tego powodu w nagłówku ODU występuje wskaźnik stosu skojarzony z polami monitorowania połączeń tandemowych. Ponadto w nagłówku ODU jest umieszczone pole przenoszące kanał do negocjacji połączenia tandemowego, przez który są przesyłane komendy potrzebne do nawiązania oraz zerwania połączenia.

W nagłówku dzielonym nie pominięto także zagadnień związanych z bezpieczeństwem sieci, implementując pole do automatycznego przełączania na ścieżkę protekcyjną. Niestety, na razie nie jest dopracowany format tego pola. Z kolei pole informacji na temat typu oraz lokalizacji błędu służy głównie do przekazywania wskaźnika błędu oraz identyfikacji operatora, u którego wystąpił błąd. Twórcy standardu zarezerwowali również 2 bajty na potrzeby eksperymentalne. Pole to ma w przyszłości służyć operatorowi sieci do specyficznych zastosowań (np. gdyby w nagłówku było potrzebne transmitowanie dodatkowej informacji do obsługi jakichś aplikacji).

OPTYCZNY KANAŁ NADZORU OSC

Drugą strukturą, istotną z punktu widzenia przenoszenia informacji utrzymaniowo-zarządzającej, jest optyczny kanał nadzoru **OSC** (*Optical Supervisory Channel*). Uzupełnia on koncepcję opakowania cyfrowego. Jest to wydzielony kanał optyczny, w którym są transmitowane, między jednostkami warstwy transmisyjnej, informacje sterujące pracą sieci. W kanale OSC przekazuje się kilka rodzajów informacji nagłówkowych. Część z nich

może być używana przez więcej niż jedną warstwę sieci (tzn. poza warstwą transmisji również przez warstwę zwielokrotnienia, jak i kanał optyczny). Kanał OSC służy w zasadzie do zdalnego monitorowania pracy sieci, ale w określonych przypadkach może też być używany do transmisji danych wysyłanych przez użytkowników końcowych sieci OTN.

Kanał ten różni się od kanałów przenoszących dane klienta. Najczęściej ma on względnie małą przepływność, na przykład 2 Mbit/s, osadza się go na innej długości fali niż kanały przeznaczone dla klienta. W sieci optycznej OSC może odgrywać dosyć znaczącą rolę ze względu na to, że pełni funkcję zdalnego monitorowania linii optycznej, wspomagając wymianę informacji związanej ze zdalnym zarządzaniem urządzeniami sieciowymi w przypadku niezainstalowania na nich lokalnych agentów sieciowych. Ponadto wspomaga funkcje optycznego OA&M (informacja utrzymaniowa, protokoły ochronne itp.). Kanał OSC transportuje także informację nagłówkową sekcji transmisji optycznej OTS, sekcji zwielokrotnienia optycznego OMS, jak i część nagłówka warstwy kanału optycznego, nie powiązaną ściśle z samym kanałem (na przykład informacja OA&M). Ta ostatnia informacja jest przesyłana przez nagłówek nieskojarzony tej warstwy. Natomiast informacja nagłówka OCH, ściśle skojarzona z każdym optycznym kanałem, jest przesyłana dzięki opakowaniu cyfrowemu.

W scenariuszach zakładających ewolucję sieci optycznej do inteligentnej sieci transportowej (tzw. *Intelligent OTN*) zakłada się, że kanał OSC będzie pełnił rolę środka do przenoszenia informacji protokołów trasowania (doboru trasy).

OPAKOWANIE CYFROWE JAKO PODSTAWA USŁUG W SIECIACH TRANSPORTOWYCH

Dlaczego opakowanie cyfrowe jest tak potrzebne? Dlatego, że stanowi metodę ramkowania sygnału cyfrowego w kanale optycznym. Z jednej strony sygnał analogowy przenoszony przez warstwę fizyczną (bez interpretacji przez odpowiednie urządzenia są to tylko impulsy świetlne) jest zamieniany dzięki niemu do postaci cyfrowej, z drugiej strony umożliwia transmisję sygnału klienta. Sygnał klienta (*payload*) zostaje jak gdyby opakowany przez bity, mające zapewnić bezpieczną transmisję tego sygnału, a następnie odtworzenie go w postaci nieznieształconej.

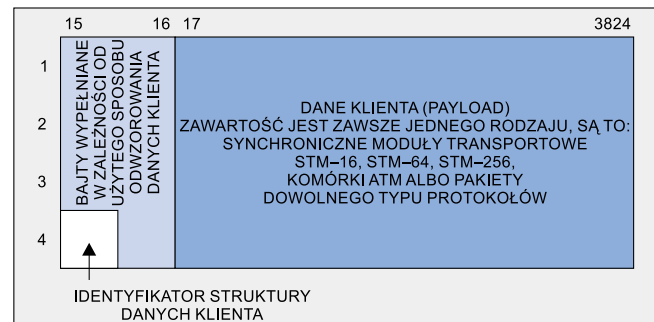
Opakowanie cyfrowe jest niezbędne, ponieważ wspomniane wyżej funkcje mogą być zrealizowane jedynie na poziomie warstwy kanału optycznego, a nie w warstwach multipleksacji oraz transportowej. Jest tak dlatego, ponieważ warstwy te odnoszą się już tylko do analogowych parametrów transmisji i nie mają dostępu do bitów sygnału klienta. Jednocześnie funkcje te nie mogłyby być implementowane w warstwach wyższych ze względu na zróżnicowanie protokołów klienta.

Inna ważna funkcja zapewniana przez opakowanie cyfrowe to zwiększanie bezpieczeństwa przesyłanego przez klienta sygnału w porównaniu do używanego przez niego protokołu. Przyczynami błędów transmisji w systemach DWDM są pewne niepożądane zjawiska fizyczne (zazwyczaj eliminowane już w warstwie optycznej przez zastosowanie odpowiednich światłowodów) oraz uszkodzenia (np. przerwanie) lub złe wykonanie światłowodu (np. niedokładne spawy) albo sprzętu optycznego. Przyczyną pogorszenia jakości transmisji może być także zużywanie się źródeł sygnału (laserów półprzewodnikowych), co powoduje emisję tych sygnałów z mniejszą mocą i pogorszenie stosunku sygnał/szum. Pewną liczbę błędów można usunąć przez zastosowanie kodów korekcyjnych FEC. Cyfrowe opakowanie korzysta z kodów typu Reed-Solomon (255,239) – do każdego 239 bajtów OTU dodaje się odpowiednio uformowaną na ich podstawie sekwencję 16 nadmiarowych bajtów kodu. Zapewnia to korekcję do 8 błędnych bajtów albo wykrycie 16 takich bajtów.

Dodatkowo, w trakcie transmisji przez sekcję, stosuje się przepłot (tak, że bity fizycznie są przesyłane w inny sposób niż objaśniano wcześniej). Pozwala to na korekcję błędów blokowych, ponieważ po rozkodowaniu rozkładają się one w czasie nie tworząc już sekwencji trudnej do naprawienia. Skuteczny kod korekcyjny umożliwia wydłużenie odcinka regeneracyjnego (traktu światłowodowego) ze względu na tzw. wzmocnienie kodu (czyli poprawę stosunku sygnał/szum wnoszoną przez kod korekcyjny). Zapewnia to pracę systemu z niezmienną stopą błędów przy gorszym stosunku sygnału do szumu. Mechanizmy te wraz z kontrolą parzystości stanowią bardzo sprawny mechanizm kontroli jakości w sieci optycznej. Nadmiarowość wnoszona przez mechanizmy korekcji błędów i przesyłania informacji utrzymaniowej wynosi 7,1% $\left(\frac{FEC+OH}{Dane\ klienta} = \frac{8192+512\ bajtów}{121\ 856\ bajtów} \approx 7,1\% \right)$. Wartość ta w porównaniu do narzutu wnoszonego przez SDH jest około dwa razy większa $\left(\frac{OH_{SDH}}{Dane_{SDH}} = \frac{648\ bajtów}{18\ 792\ bajtów} \approx 3,4\% \right)$, ale za to

opakowanie cyfrowe oferuje znacznie lepsze zabezpieczenie danych użytkownika oraz umożliwia realizację wielu zadań zarządzająco-urządzeniowych, wykonywanych, w przeciwieństwie do SDH, na poziomie warstwy optycznej.

Kolejnym atutem opakowania cyfrowego jest jego uniwersalność dla klientów korzystających z wyższych warstw. Sieć optyczna oparta na idei cyfrowego opakowania pozwala użytkownikom sieci na transmisję praktycznie wszystkich rodzajów protokołów, które mogą pochodzić z warstwy klienta. Na razie co prawda dokonano szczegółowej specyfikacji dotyczącej tylko komórek ATM oraz kontenerów SDH, ale to się zapewne zmieni. Opakowanie cyfrowe zapewnia zatem przezroczystość sieci.



■ Rys. 5. Jednostka danych klienta kanału optycznego OPU. Oznaczenia: STM – synchroniczny moduł transportowy, ATM – asynchroniczny przekaz danych

Jednostką pośredniczącą między klientem a siecią OTN jest jednostka danych klienta kanału optycznego OPU (rys. 5). W jednostce tej dane klienta, w zależności od używanego protokołu, są umieszczane w odpowiedni sposób i opatrzone nagłówkiem, którego główną funkcją jest przeniesienie informacji o tym protokole. Jednostka OPU pełni funkcje analogiczne do kontenerów wirtualnych stosowanych w systemach SDH. W zależności od typu danych, które są przesyłane w sieci optycznej (czyli w zależności od typu tzw. *payload*) zmienia się sposób ułożenia bitów w jednostce OPU. Dotyczy to również nagłówka tej jednostki, ponieważ – w zależności od przesyłanej zawartości – może on zmieniać swoją postać. Dotychczasowa wersja Zalecenia G. 709 [6] przewiduje możliwość przenoszenia w charakterze danych klienta sygnałów SDH (STM-16, 64, 256), komórek ATM oraz dowolnego rodzaju pakietów (takie postępowanie nosi nazwę **GFP**, *Generic Framing Procedure*). Istotną wadą obecnej wersji zalecenia jest brak standaryzacji przesyłania pakietów IP, co wydaje się niezbędne ze względu na wykorzystanie w przyszłości sieci OTN do transmisji danych w sieci Internet.

Rekomendacja G. 709 ściśle określa strukturę opakowania cyfrowego tylko na styku między operatorami (IrDI). Daje też możliwość modyfikacji tego formatu przez określonego operatora (skrócenie, wydłużenie lub rezygnacja z bitów FEC) w obrębie jego domeny (czyli na styku IaDI), co umożliwi implementację specyficznych funkcji. Zapewnienie kompatybilności na styku IrDI zapewnia natomiast rozwój systemów DWDM, które dotychczas realizowano tylko jako rozwiązania firmowe, co utrudniało łączenie systemów różnych operatorów.

Należy także dodać, że opakowanie cyfrowe rozwiązuje problemy kompatybilności DWDM w dziedzinie cyfrowej – sieć jest tak samo widziana przez klienta, bez względu na jej fizyczną realizację. Dzięki przezroczystości sieci szkieletowej OTN, zapewnianej przez opakowanie cyfrowe, istnieje możliwość ewolucyjnego przejścia z dotychczasowych technik przesyłania danych za pośrednictwem światłowodu (systemy TDM, czyli SONET/SDH oraz systemy ATM) do sieci opartych na technice DWDM.

Należałoby jeszcze wspomnieć o pewnych pytaniach dotyczących opakowania cyfrowego. Pierwsze z nich dotyczy sposobu, w jaki miałyby być dokonywane składanie większej liczby jednostek ODU do jednostki OTU. Jak wyżej opisano, na razie w zaleceniu uwzględnia się sytuację, gdy w OTU_k umieszcza się ODU_k o tym samym indeksie. W przyszłych sieciach przełączanych automatycznie przewiduje się jednak nieco inne rozwiązania. Miałyby one polegać na przełączaniu jednostek ODU. Koncepcja opiera się na tym, że przepływność ODU₁, czyli 2,5 Gbit/s, jest wystarczająca dla przeciętnego klienta optycznej sieci transpor-

towej, natomiast kanał optyczny może przenosić dużo więcej informacji (transportować nawet jednostki OTU₃ o szybkości transmisji 40 Gbit/s). Taka sytuacja umożliwia rozważanie pomysłów multipleksacji jednostek ODU w OTU wyższych rzędów. Dotychczas rozważa się trzy warianty tej metody (rys. 6).

- Schemat warstwowy ODU (*Layered ODU scheme*). Działa na zasadzie podobnej jak multipleksacja w hierarchii plejochronicznej PDH. Ta sama liczba (4) jednostek ODU niższego rzędu jest upakowywana w OTU wyższego rzędu. Rozwiązanie to ma dwie wady: wymaga nagłówka dopełniającego liczbę bitów (o wielkości ok. 1 % ODU) dla każdego poziomu zwielokrotnienia; przełączanie każdego połączenia na poziomie ODU₁ wymaga zakończenia wszystkich połączeń na poziomie ODU_k wyższego rzędu niż 1.

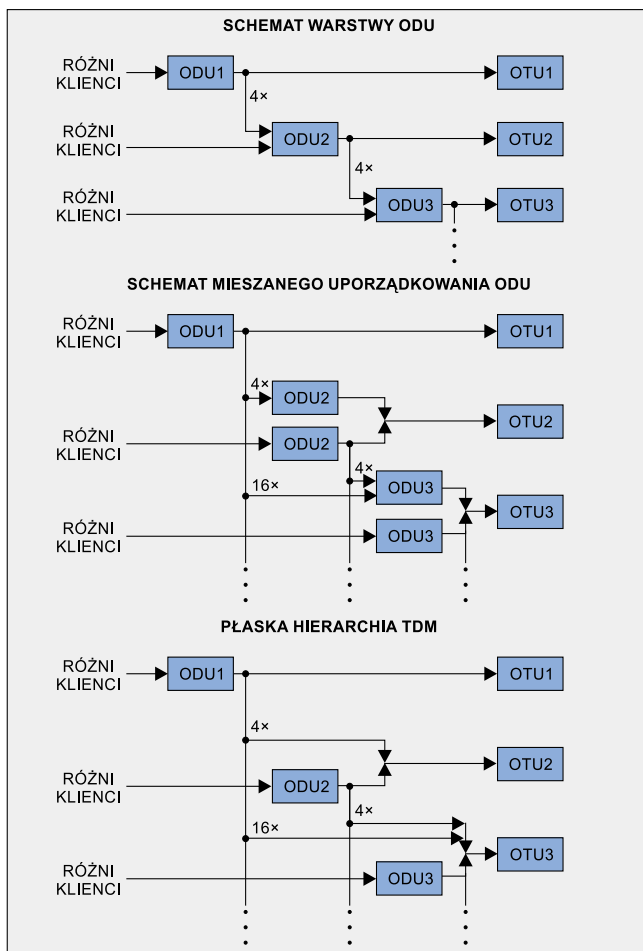
- Schemat mieszanego uporządkowania ODU (*Lower and higher order ODUs*). Nie jest tak zhierarchizowany jak przypadek poprzedni. ODU różnych rzędów mogą być wymieszane w OTU wyższych rzędów. Rozwiązanie to zapewnia agregację ruchu i transportowanie go przez domeny. Ma jednak tę wadę, że w sytuacji przełączania połączenia na poziomie ODU niższego rzędu wszystkie połączenia na poziomie wyższego rzędu muszą być zakończone.

- Płaska hierarchia TDM (*Flat TDM hierarchy*). Umożliwia ona umieszczanie ODU₁ w ODU₃ (w odpowiedniej liczbie), ale nie pozwala na mieszanie różnych poziomów ODU w OTU wyższych rzędów. Umożliwia agregację ruchu, ale nie pozwala na transport tego ruchu przez domeny. Ma ogromną zaletę – zapewnia bezpośredni dostęp do ODU dowolnego poziomu.

Opakowanie cyfrowe jest metodą realizacji ramkowania sygnału cyfrowego w kanale optycznym, pełniącym funkcję warstwy łącza danych. Zapewnia ono zamianę sygnału analogowego na cyfrowy, stanowi techniczną bazę transportu informacji klienta, zwiększa bezpieczeństwo przesyłania sygnału klienta, umożliwia uniwersalne przenoszenie informacji dla różnych protokołów stosowanych przez klientów.

Przedstawione w artykule pomysły są jednym ze sposobów świadczenia usług dzierżawy pasma w optycznej sieci transportowej. Umożliwienie takiej dzierżawy wydaje się niezbędne dla zbudowania w przyszłości zadowalającej sieci transportowej. Na razie raczej nie jest możliwe wykorzystanie przez jednego operatora tak ogromnych przepływności, jakie oferuje technika DWDM. Zezwolenie na korzystanie z możliwości dzierżawy pasma w optycznej sieci transportowej będzie rozsądne z punktu widzenia właściciela i operatora sieci optycznej, ponieważ da mu szansę na szybki zwrot kosztów poniesionych na jej budowę. Trudno sobie również wyobrazić, aby sieć OTN przenosiła dane tylko jednego operatora, tak jak to się działo w przypadku sieci SONET/SDH. Sytuacja współdzielenia (dzierżawy) zasobów jednego operatora przez innych operatorów (klientów) jest w tej chwili wymuszana przez rynek oraz panujące regulacje prawne, które skłaniają dotychczasowych operatorów do otwarcia się na konkurencję.

Sieci hierarchii synchronicznej, nastawione na transport sygnałów jednego operatora, nie są przystosowane do nowych warunków. Rozwiązanie tego problemu umożliwi architektura sieci OTN. Zarysowana w artykule metoda dzierżawy jednostek ODU wydaje się być metodą najdogodniejszą, ponieważ jest dokonywana powyżej warstwy fizycznej, która musi mieć jednakowe parametry oraz poniżej warstwy protokołów klienta, co gwarantuje przezroczystość sieci transportowej. Można liczyć na to, że twórcy standardu dopracują szczegóły również tego zagadnienia, co zapewne byłoby związane z rozbudową nagłówka OTU (który musiałby informować o przenoszonych jednostkach ODU) oraz nagłówka ODU (który powinien wówczas przenosić jakiś typ informacji ułatwiającej dobór trasy).



■ Rys. 6. Proponowane sposoby składania OTU_k z ODU_k [2]. Oznaczenia: ODU – jednostka danych kanału optycznego, OTU – jednostka transportowa kanału optycznego, TDM – zwielokrotnienie z podziałem w dziedzinie czasu

Mimo intensywnych prac standaryzacyjnych, dokumenty definiujące optyczną sieć transportową nie mają jeszcze ostatecznego kształtu. Wydaje się jednak, że podstawowe ustalenia już poczyniono. Zostały one opisane w niniejszym artykule. Rola opakowania cyfrowego w realizacji nowoczesnej sieci optycznej jest podstawowa, jednakże to rozwiązanie nie gwarantuje realizacji pełnej funkcjonalnie wersji „inteligentnej” sieci transportowej (**ASON** lub **ASTN** – *Automatic Switched Transport Network*). Brak jest przekazywania wiadomości analogicznych do tych wykorzystywanych w protokołach doboru trasy, np. dla IP oraz wsparcia dla sygnalizacji umożliwiającej dynamiczne zestawianie połączeń przez klienta. Realizacja tych funkcji nie wydaje się możliwa w obecnej wersji opakowania cyfrowego, gdyż nie ma odpowiednich dostępnych pól w nagłówku ODU, OTU czy OPU. Istnieją jednak możliwości przenoszenia tego typu informacji w obszarze danych klienta.

Koncepcja opakowania cyfrowego stanowi solidną podstawę realizacji uniwersalnych sieci optycznych nowej generacji.

LITERATURA

- [1] ITU-T Recommendation G.872: *Architecture of optical transport networks*, February 1999
- [2] IST LION Project Milestone WP1M1 *Network Requirements – Analysis of Services*, August 2000
- [3] Jajszczyk A., Lason A., Wajda K.: *Trendy rozwojowe optycznych sieci transportowych budowanych na potrzeby sieci Internet*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 5-6, 2001
- [4] Jajszczyk A.: *Ewolucja sieci stacjonarnych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 1, 2001
- [5] Perlicki K.: *Rozwój telekomunikacyjnych sieci optycznych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, nr 1, 2001
- [6] ITU-T Recommendation G. 709, Draft 0.8: *Network Node Interface for the Optical Transport Network (OTN)*, February 2001

Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 7T11D01020

Artykuł rezensowany

(Artykuł nadesłano do red. – listopad 2001)