

光バックボーンネットワーク 向け WDM 装置の開発

信頼性の高い光バックボーンネットワークを構築するにあたり、今後需要が増大するトラフィックに柔軟に対応し、より経済的なネットワーク構築を可能とする波長分割多重技術を適用した WDM 装置、OADM 装置を開発した。

まつもと やすのり 松本 保則	みやわき ゆたか 宮脇 豊	すずき つよし 鈴木 剛
たなか やすひろ 田中 康裕	みやした かずみ 宮下 和巳	

1. まえがき

FOMA (Freedom Of Mobile multimedia Access) や無線 LAN (Local Area Network) の普及に伴い、動画サービスに代表されるさまざまなサービスアプリケーションが増加し、モバイルマルチメディア系トラフィックが増大している。このようなトラフィックの増大に対応するため、より高速で大容量のバックボーンネットワークを早期に構築することが必要となっている。

波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 方式は、1本の光ファイバケーブルに複数の光信号を多重化する技術であり、新たな光ファイバケーブルを敷設することなく、飛躍的に伝送容量を増大することができる。ドコモでは、自社光ファイバケーブルおよびダークファイバ (光ファイバ心線の貸出しサービス) を利用し、光バックボーンネットワークの構築を進めている。特にダークファイバの利用にあたり、1本の光ファイバケーブルで大容量化が図れる WDM 方式は、コストパフォーマンスに優れたネットワークを構築するうえで最も有用な方式である。

本稿では WDM 方式に適用される主要技術、ネットワークを構築する際の課題と対策、開発した WDM 装置、光分岐/挿入 (OADM: Optical Add/Drop Multiplexing) 装置について概説する。

2. 波長分割多重技術

2.1 波長分割多重技術

WDM 装置のシステム構成図を図1に示す。本装置は、クライアントインタフェースから受信した光信号をトランスポンダで一度電気信号に変換し、再度異なる波長の光信号に変換後、光合波器の OMUX (Optical MultipleXing) で波長多重を行う。波長多重された光信号は送信アンプ

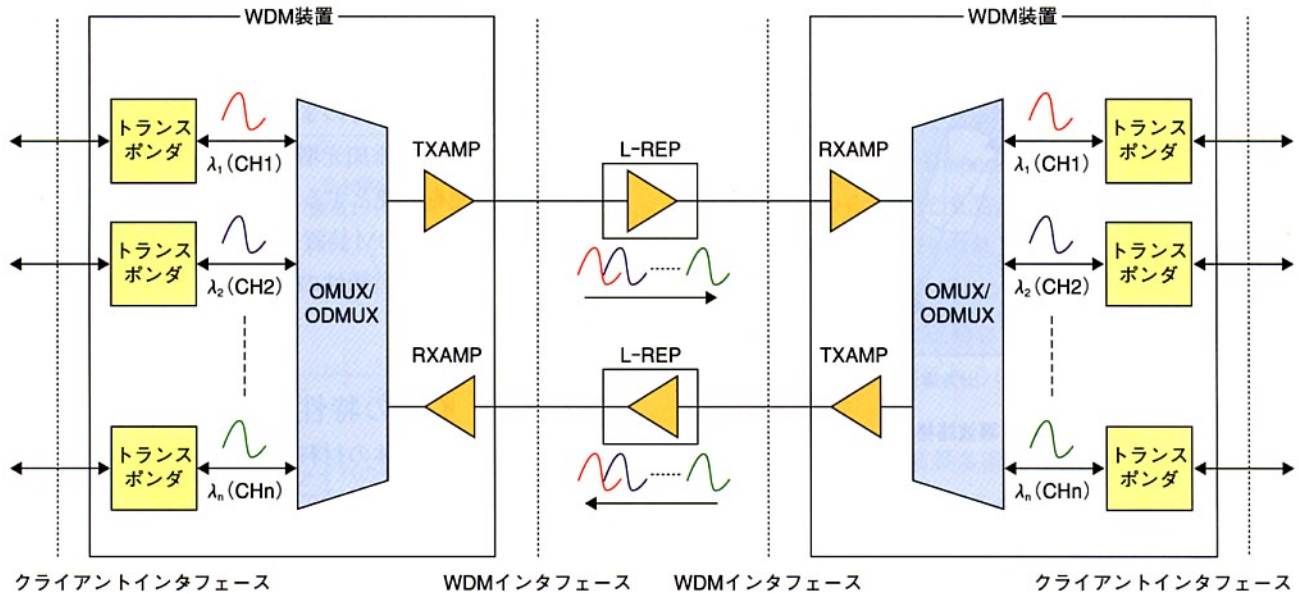


図1 WDM装置のシステム構成

(TXAMP : Transmitting AMPlifier) で一括増幅し、WDMインタフェースへ送出する。また、WDMインタフェースから受信した波長多重された光信号を受信アンプ (RXAMP : Receiving AMPlifier) で一括増幅し、ODMUX (Optical DeMUltiplexing) で波長分割した後にトランスポンダで波長変換を行い、クライアントインタフェースへ送出する。

WDM方式の主要技術である波長変換、光合分波、光増幅について以下に説明する。

(1) 波長変換

クライアントインタフェースに接続されたSONET (Synchronous Optical NETwork), SDH (Synchronous Digital Hierarchy) およびギガビットイーサネット (GbE : GigaBit Ethernet) などから受信された光信号は、トランスポンダで異なる波長の光信号に変換 (波長変換) される。各光信号の伝送に使う波長と、隣接する波長の周波数間隔は、国際電気通信連合・電気通信標準化部門 (ITU-T : International Telecommunication Union-Telecommunication standardization sector) 勧告G.692で規定されている。その周波数間隔は100GHzまたは50GHzであり、Cバンドと呼ばれる1,530nm~1,570nmの波長帯において、100GHz間隔で最大41波、50GHz間隔で最大81波を多重する。波長間隔が狭いほど同時に伝送できる光信号の数が増加し、大容量化が可能となる [1]。

(2) 光合分波

光合分波技術が適用されるOMUXおよびODMUXには、アレイ導波路格子 (AWG : Arrayed-Waveguide

Grating) (図2)、ファイバグレーティング型フィルタ (図3) が用いられ、光合分波が実現される。AWGは、シリコン基板上に形成された導波路形の回折格子により合分波を行うものであり、入出力導波路、2つのスラブ導波路、長さの異なる多数の導波路からなるアレイ導波路から構成される。トランスポンダで波長変換された複数の光信号 ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) を各入力導波路に別々に入射すると、1つの出力導波路から多重された光信号が出力される。ファイバグレーティング型フィルタは、受信した波長多重信号のうち、特定の波長のみを反射するファイバグレーティングと、光信号の光路を変更するサーキュレータから構成され、特定の波長を分波することができる。

(3) 光増幅

時分割多重 (TDM : Time Division Multiplexing) 装置は、単一波長の光信号を伝送する装置である。この装置では、光ファイバ内で減衰して波形が劣化した光信号を一度電気信号に戻して増幅後、再度光信号に変換する3R (Reshaping Retiming Regenerating) 再生中継方式を採用している。WDM装置にTDM装置と同様の3R再生中継方式を適用すると、各波長単位の再生中継を行うため、再生中継器が複雑、高コストとなる。そこでWDM装置では、波長多重した光信号を光のまま一括して増幅する光増幅器を採用している。光増幅器には、エルビウムなどの希土類元素を光ファイバに添加し、エネルギー準位間の誘導放出を利用したものと、ガラス物質による光の散乱光であるラマン散乱光を利用したものの2種類がある。

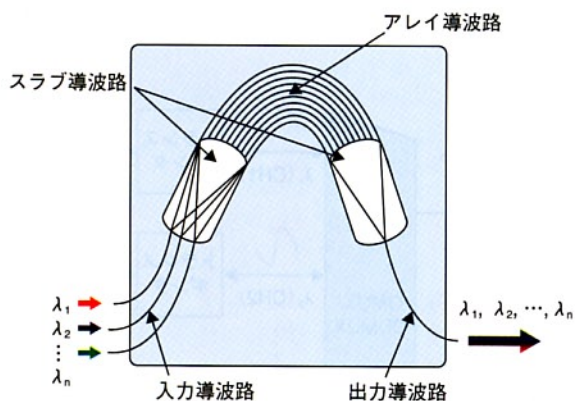


図2 アレイ導波路格子

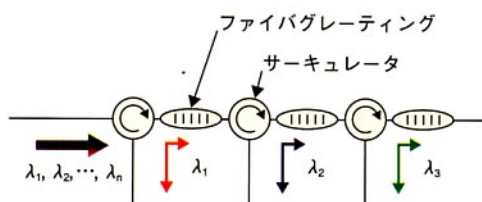


図3 ファイバグレーティング型フィルタ

エルビウム添加光増幅器[2]の構成を図4に示す。入力光信号と励起用のレーザー光をカップラにより合波し、エルビウムを添加した光ファイバに入力する。エルビウム添加光ファイバでは、1,480nmまたは980nmのレーザー光によって高いエネルギー準位に電子が励起され、光ファイバ中のエルビウム原子に光信号が入射されると誘導放出光が生じ、光信号のパワーが光ファイバに沿って次第に大きくなる。エルビウム添加光増幅器はこの原理を応用したものであり、高出力、低雑音、広帯域という特長を有する。WDM装置ではTXAMP、RXAMPおよび線形中継器(L-REP: Linear-REPeator)で、この光増幅器を使用している。

一方、ラマン散乱光増幅器はエネルギー源としてのレ

ーザー光を光ファイバに入射し、光ファイバの誘導ラマン散乱を利用してレーザー光から光信号に光エネルギーを移すものである。ラマン散乱光増幅器は、伝送路の光ファイバケーブルをそのまま利用できるという利点があるが、エルビウム添加光増幅器に比べて桁違いに高出力なレーザー光を必要とするなどの問題点もある[2]。

今回開発したWDM装置およびOADM装置では、市場での実績が豊富で信頼性の高いエルビウム添加光増幅器を採用した。

2.2 光ファイバの特性

光ファイバを誘電体の材料により分類すると、石英ガラスを主体とした石英系光ファイバ、多種類のガラスから成る多成分光ファイバ、プラスチック光ファイバの3種類に分類される。情報通信ネットワークに用いられている光ファイバケーブルには、1,450nm~1,650nmの領域で低損失な伝送特性を有し、長期安定度の面で優れている石英系光ファイバが使用されている[2]。光ファイバを用いた伝送システムを構築するうえでは、光ファイバの損失特性、分散特性が重要な要素となる。基幹網で広く用いられている光ファイバの損失特性を図5に、分散特性を図6に示す。

損失とは、光ファイバ内を伝搬する光のパワーがどれだけ減衰していくかを示す尺度であり、損失が小さいほど遠くまで光信号を送ることが可能となる。WDM方式では、石英系光ファイバの損失が最も低くなる1,550nm帯の波長を光源として使用している。

分散とは、光ファイバにパルス変調された光パルス信号("1"または"0")を入射させたとき、出射されたパルスの幅が入射パルスより時間的に広がる現象である。光ファイバでの分散量が増大すると、受信側では光パルスの識別が不可能となり、通信に重大な影響を及ぼす。

光信号の波形を補正するには、光増幅器と同様に従来は電気信号に戻し、再度光信号に変換する方法が一般的であ

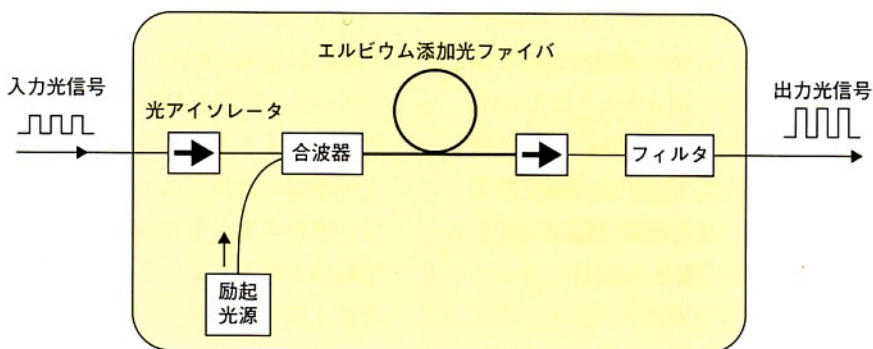


図4 エルビウム添加光増幅器の構成

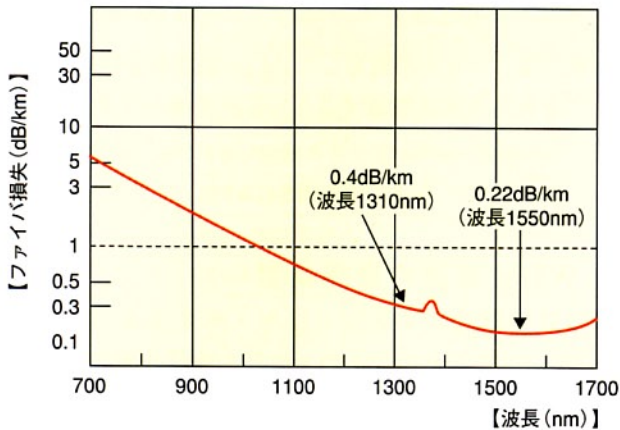


図5 石英系光ファイバの光損失特性

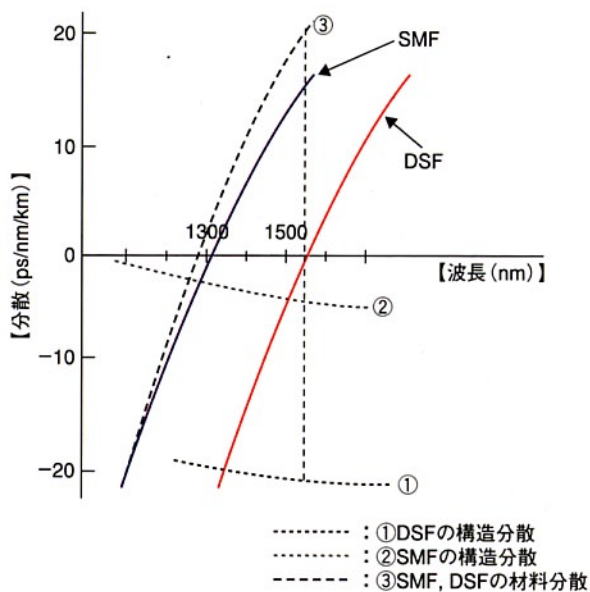


図6 石英系光ファイバの分散特性

った。WDM方式では分散補償ファイバ（DCF：Dispersion Compensating Fiber）と呼ばれる、伝送路の光ファイバと逆の分散特性を持つ光ファイバを装置内に搭載し、光伝送路で生じた分散を補償する。

3. 光バックボーンネットワーク構築の課題と対策

WDM方式を用いた装置は、適用するネットワーク形態により、WDM装置とOADM装置に大別される。

WDM装置は長距離かつ大容量の伝送に適しており、2地点間を結ぶポイント・ツー・ポイントのネットワークに適用される。OADM装置は、WDM技術を用いたリング型のネットワークに適用される。波長多重信号の中から自ノードで必要となる任意の波長を分岐／挿入する機能を有し、主に都市内ネットワークおよび複数の拠点がある企業内ネ

ットワークなど、総延長距離が比較的短い小規模なリング型のネットワークを構成するのに適している。

WDM装置およびOADM装置の開発においては、利用するダークファイバの光ファイバケーブル種別が分散シフト光ファイバ（DSF：Dispersion shifted Single mode Fiber）であることから、四光波混合（FWM：Four Wave Mixing）光による波長多重数の制限が課題となった。さらに、OADM装置を導入するリング型ネットワークのリング長が720kmを超える大規模なネットワークであることが2つ目の課題となった。これらの課題に対する対策を以下に述べる。

(1) FWM光による波長多重数の制限に対する対策

ITU-T勧告では、Cバンドと呼ばれる1,530nm～1,570nmの波長帯について、各光信号の伝送に使う波長と、隣接する波長の周波数間隔を規定している。WDM技術でCバンドが使用される理由は、光ファイバ内を伝わる光の伝送損失が1,550nm帯で最も小さくなるためであるが、DSFはCバンドを使用したWDM伝送には適さない。

光ファイバは材料、構造および光の波長に依存して、波形劣化の要因となる分散が発生する。この分散が最小となる波長は零分散波長と呼ばれ、零分散波長は単一光源波長による伝送には適しているが、WDM伝送に使用すると、隣接する波長同士の干渉によりFWM光が発生する。発生したFWM光の波長と主信号の波長が一致すると、FWM光が主信号に対する雑音となり、正常に通信することができなくなる（図7）。世界の基幹網の多くは、1,310nm帯で分散が0になるシングルモード光ファイバ（SMF：Single Mode Fiber）を利用しているが、日本国内の基幹網では長距離伝送用として1,550nm帯で零分散となるDSFが多く敷設されている。そのため、DSFとWDM伝送の組合せによるFWM光の発生を抑制する必要があり、零分散波長から離れたLバンドと呼ばれる1,570nm～1,610nmの波長帯を使用する方式を適用した。また、もう1つの対策として、波長の周波数間隔を不均等に配置することでFWM光の影響を回避した。

波長の周波数間隔を不均等に配置する場合、Cバンドでは波長多重可能な光信号数に制限が生じる。その結果、伝送容量が不足することから、クライアントインタフェースから受信した複数の光信号を、WDM装置で電氣的に多重してから波長変換を行い、1波当りの伝送容量を増やす方式を適用した。

(2) 大規模リング型ネットワークへの適用に対する対策

先に述べたようにOADM装置は、主に小規模なリング

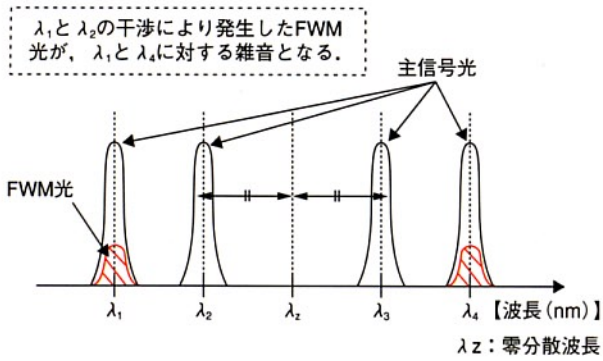


図7 FWM光の概念

型ネットワークを構成するのに適しているが、ドコモでは大規模なネットワークに導入する必要がある。このような長距離伝送を行う際に課題となるのが、光増幅器の多段中継による伝送特性の劣化である。

OADM装置ではTXAMP, RXAMP, L-REPに光増幅器を用いているが、光増幅器を多段に接続するネットワークでは、個々の増幅器内で発生する雑音光成分（ASE：Amplified Spontaneous Emission）が蓄積されることにより、信号対雑音比（SNR：Signal to background Noise power Ratio）が劣化する。そこで本装置では、誤り訂正符号化（FEC：Forward Error Correction）を適用することにより、所要SNRを低減した[3]。また、大規模リング型ネットワークに対応するため、3R再生中継専用のトランスポンダを装備している。この3R再生中継専用トランスポンダを採用することにより、2個のトランスポンダをバック・ツー・バックで接続する構成と比べ、経済的に大規模リング型ネットワークを構築することが可能になった。

4. WDM装置/OADM装置概要

本章では、ドコモが開発したWDM装置およびOADM装置と、それらを監視制御するNE監視制御システム（NE-OpS：Network Element-Operation System）について概説する。ネットワーク構成図を図8に示す。

4.1 WDM装置の機能概要

WDM装置はポイント・ツー・ポイントに適用し、SONET, SDHおよびGbEの光信号を波長分割多重する機能と長距離伝送を行うための光増幅中継機能を有する光伝送装置である。1本の光ファイバケーブルに最大40波の光信号を多重して伝送することができる。

光増幅のみで伝送可能な中継距離は、光ファイバケーブルの種別によらず480km以下までであり、480kmを超える長距離伝送を行う場合は、再生中継トランスポンダにより対応する。

4.2 OADM装置の機能概要

OADM装置はリング型ネットワークに適用し、SONET, SDHおよびGbEの光信号を波長分割多重する機能を有し、ノードビルの需要に応じて40波または6波いずれかの波長を分岐/挿入することが可能である。また、WDM装置と同様に、長距離伝送を行うための光増幅中継機能を有し、1本の光ファイバケーブルに最大40波の光信号を多重して伝送することができる。リング長は1,200km以下に対応する。さらに、OADM装置はリング切替機能を有し、回線障害時には波長単位で経路を自動的に迂回する。

表1にWDM装置およびOADM装置の主要諸元を示す。

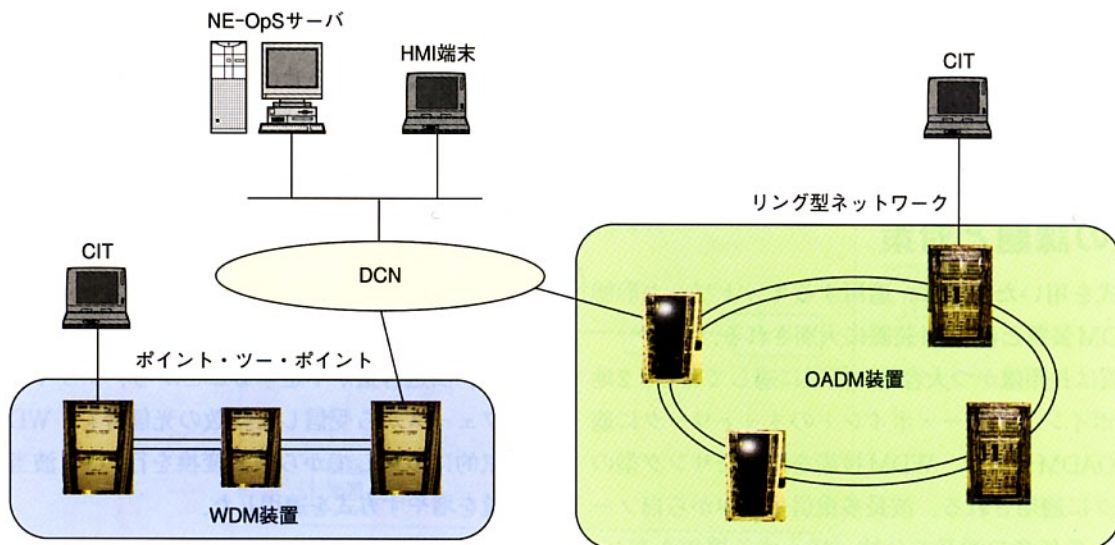


図8 ネットワーク構成図

表1 WDM装置/OADM装置主要諸元

		WDM装置	OADM装置
波長多重数		最大40波	
再生中継区間距離		480km	—
リング長		—	1200km
最大中継区間距離		80km	
最大中継区間損失		25dB	
適用光ファイバ		SMF, DSF	
クライアント インタフェース	600M	I-4, L-4.1, L-4.2, L-4.3	
	2.4G	I-16, L-16.1, L-16.2, L-16.3	
	GbE	1000BASE-SX, 1000BASE-LX	
適用コネクタ		SCコネクタ, MUコネクタ	
切替機能		—	予備系開放, UPSR切替

4.3 その他機能の特長

(1) シャットダウン機能

WDM装置およびOADM装置は、波長多重数が増加するに従い多重後の光出力レベルが大きくなる。そのため、作業者の安全性を考慮し、波長多重光増幅後の光出力部は反射減衰量を監視制御しており、フレネル反射レベルであればパッケージの光出力コネクタが未接続と判定して送信光レベルを小さくする。また、伝送路の光ファイバケーブル断による入力信号断（LOS：Loss Of Signal）を検出した場合に、出力を自動で停止する機能を有している。

(2) プリエンファシス機能

一般的なWDM装置およびOADM装置では、トランスポンダ増設時に、各波長のレベルが平坦になるよう、受信側装置のトランスポンダ入力側で受信波長のレベルをモニタしながら、送信側トランスポンダの出力レベルを調整するという、煩雑かつ難易度の高い保守作業（プリエンファシス調整）が必要であった。本装置では、各波長当りの出力レベルを自動的に一定に制御するALC（Automatic Level Control）機能を有し、トランスポンダの実装のみで波長増設が可能である。

4.4 NE-OpSの機能概要

WDM装置およびOADM装置の監視制御は、NE-OpSを用いて行う。NE-OpSは、装置の構成管理、故障管理などの機能を有するNE-OpSサーバと、その状態をグラフィカルに表示するヒューマンマシーンインタフェース（HMI：Human Machine Interface）端末、装置初期立上時の初期設定を行う架前制御端末（CIT：Craft Interface Terminal）から構成される。

装置の監視制御は、光監視制御チャンネル（OSC：Optical Supervisory Channel）を介して行われ、OSC上の監視制御情報は、1つのポイント・ツー・ポイントまたは1つのリング型ネットワークに2ノード設置されるGNE（Gateway Network Element）を経由してNE-OpSに通知される。OSCは、主信号の波長帯であるCバンドやLバンドから離れた波長を用いている。1台のNE-OpSサーバで管理可能な装置数は250以下であり、1台のNE-OpSサーバに接続可能なHMI端末は15台以下である。

5. あとがき

2003年3月よりWDM装置およびOADM装置が導入され、トラヒックの急激な増加にも十分耐えうる大容量かつ経済的な光バックボーンネットワークの構築が進められている。

今後は、さらなるネットワークコストの低減を図るため、1波当たり10Gbit/sの伝送容量へのアップグレード、中継区間距離の長延化に向けた開発を進めるとともに、アクセスネットワークへのWDM技術の適用についての検討を進める。

文献

- [1] ITU-T Recommendation G.692 Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers
- [2] 西村憲一, 白川英俊：“やさしい光ファイバ通信, 改訂3版”, pp.52/213-214, 1999, 社団法人電気通信協会
- [3] ITU-T Recommendation G.707 Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)

用語一覧

3R : Reshaping Retiming Regenerating
 ALC : Automatic Level Control (出力一定制御)
 ASE : Amplified Spontaneous Emission (雑音光成分)
 AWG : Arrayed-Waveguide Grating (アレイ導波路格子)
 CH : CHannel
 CIT : Craft Interface Terminal (架前制御端末)
 DCF : Dispersion Compensating Fiber (分散補償ファイバ)
 DCN : Data Communication Network (情報転送網)
 DSF : Dispersion shifted Single mode Fiber (分散シフト光ファイバ)
 FEC : Foward Error Correction (誤り訂正符号化)
 FOMA : Freedom Of Mobile multimedia Access
 FWM : Four Wave Mixing (四光波混合)
 GbE : GigaBit Ethernet (ギガビットイーサネット)
 GNE : Gateway Network Element
 HMI : Human Machine Interface
 L-REP : Linear-REPeator (線形中継器)
 ITU-T : International Telecommunication Union-Telecommunication
 standardization sector (国際電気通信連合・電気通信標準化部門)
 LAN : Local Area Network
 LOS : Loss Of Signal (入力信号断)
 NE-OpS : Network Element-Operation System (NE監視制御システム)
 OADM : Optical Add/Drop Multiplexer (光分岐/挿入)
 ODMUX : Optical DeMULTipleXing
 OMUX : Optical MULTipleXing
 OSC : Optical Supervisory Channel (光監視制御チャンネル)
 RXAMP : Receiving AMPLifier (受信アンプ)
 SDH : Synchronous Digital Hierarchy (大容量伝送路方式)
 SMF : Single Mode Fiber (シングルモード光ファイバ)
 SNR : Signal to backgroud Noise power Ratio (信号対雑音比)
 SONET : Synchronous Optical NETwork
 TDM : Time Division Multiplexing (時分割多重)
 TXAMP : Transmitting AMPLifier (送信アンプ)
 UPSR : Unidirectional Path Switched Ring
 WDM : Wavelength Division Multiplexing (波長分割多重)