

フォトニックネットワーク

Photonic Network

あらまし

21世紀の初頭には、高速インターネットなどの広帯域サービスが本格的に普及し、10 Mbps程度の情報を各家庭で扱うようになると予想される。これらの情報容量の爆発的な増加に備えるため光通信への期待が高まっている。本稿では現在研究開発を進めている、次世代光通信技術であるフォトニックネットワークについて紹介する。フォトニックネットワークは波長多重技術を用い、テラビット級の大容量伝送を可能とするだけでなく、波長をベースにした光信号の多重分離、分岐挿入、クロスコネクトを実現して、ネットワークに拡張性、柔軟性を与え、また、網全体の信頼度を大幅に向上させることができる。フォトニックネットワークの技術動向と課題をまとめるとともに、Supercomm 98(1998年6月、米国アトランタ)で試作展示した光分岐挿入装置、光クロスコネクト装置について紹介する。

Abstract

In the beginning of the 21st century, data communication services such as the Internet will be widely used in the home and in enterprises at the high speed of 10 Mbps. The dramatic increase in data transmission capacity will depend on new optical communication technologies such as Fujitsu's next-generation photonic network systems.

The photonic network enables ultra-large-capacity (Tera bits per second) data transmission by using dense wavelength division multiplexing (DWDM) in which a large number of optical signals are multiplexed and sent through a single optical fiber. The photonic network also uses wavelength-based optical signal processing such as optical add/drop multiplexing (OADM) and optical cross-connection (OXC). These techniques improve the expandability and flexibility of networks and especially improve their reliability.

This paper outlines technological trends and issues of the photonic network and introduces the prototype OADM and OXC systems that were demonstrated at Supercomm 98 held in 1998 in Atlanta, USA.



近間輝美(ちかま てるみ)

1982年東京大学大学院理学系研究科博士課程了。同年(株)富士通研究所入社。以来光通信システムの研究開発に従事。理学博士。ネットワークシステム研究所光システム研究部。

まえがき

インターネットを中心とするデータトラフィックが10倍/年という勢いで急増している。2000年には既存の電話トラフィックとデータトラフィックが拮抗し、2003年には90%以上がデータトラフィックになるとの予想もある。この背景には、パソコンの高性能・高機能化と急速な普及、インターネットによる電子メール、ファイル転送などのサービスの進展と企業内データ通信であるイントラネットへの適用、モバイル通信の急速な普及などがある。これまでのネットワークは電話サービスを経済的に提供する目的で構築されており、上記のデータトラフィックの増加に対応して、最適なネットワークを模索する動きが急速に進みつつある。次世代光通信技術であるフォトニックネットワークは波長多重技術(WDM: Wavelength Division Multiplexing, 1本の光ファイバの中に波長の異なる多数の光波を多重して伝送する技術)を用い、テラビット級の大容量伝送を可能とするだけでなく、波長をベースにした光信号の多重分離、分岐挿入、クロスコネクトを実現して、ネットワークに拡張性、柔軟性を与え、また、網全体の信頼度を大幅に向上させることができることから、次世代通信技術の中核として期待されている。⁽¹⁾⁻⁽³⁾

本稿では、フォトニックネットワークとは何か、また期待されることについて述べるとともに、1998年6月に米国アトランタで開催されたSupercomm 98において展示した、320 Gbps波長多重伝送装置、光分岐挿入装置、光クロスコネクト装置を中心に開発技術と今後の動向を紹介する。

フォトニックネットワークとは

光通信システムの大容量化の進展を図-1に示す。従来、光通信の大容量化は時分割多重方式(TDM: Time Division Multiplexing)により実現されてきた。高速に光をOn-Offして、デジタル信号を伝送する方式である。約5年で4倍の速度を実現して、現在最高速度の10 Gbpsに到達している。1987年エルビウム光ファイバ増幅器の出現を機に、光通信の分野で技術革新が進み、波長多重方式の適用により、最近では年率2倍で伝送容量の拡大が実現されている。このことは、ちょうどインターネットの普及と軌を一にしており、シーズとしての波長多重による大容量化と、ニーズとして的高速インターネットサービスの普及がスパイラルのように、相まって拡大していく傾向にある。現在のWDMは光ファイバをある意味では太い

パイプとして使う、Point-to-Point伝送の形態であるが、波長多重の持つ拡張性と柔軟性を活用して、光領域で分岐・挿入、ルーティングやスイッチングを行い、ノードコストの削減をねらったフォトニックネットワークへと展開していくと考えている。通常、WDMをベースにした光ネットワークに対して種々のネーミングがある。例えば、WDMネットワーク、Multi-wavelength Network、光波ネットワークなどで、いずれもほぼ同じ物を意味している。ここでは、ノードの光信号処理を意識し、また将来の光デジタル信号処理への展開も含めてフォトニックネットワークと呼ぶことにしたい。フォトニックネットワークのイメージを図-2に示す。波長を使った新しい高速大容量ネットワークとして、第一に、電子回路の速度限界を光技術で克服してテラビットの大容量を実現することが期待されている。例えば、現在電子回路技術で実現されている10 Gbpsで100波の波長多重伝送を行えば、1 Tbpsの伝送を実現できる。富士通では、1996年に世界で初めて、1 Tbps以上の伝送が現実的に可能であるこ

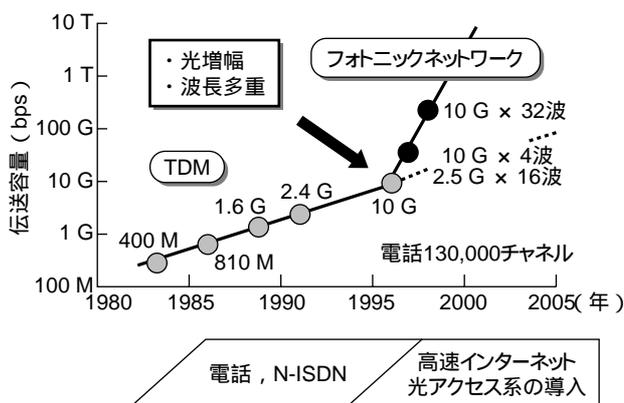
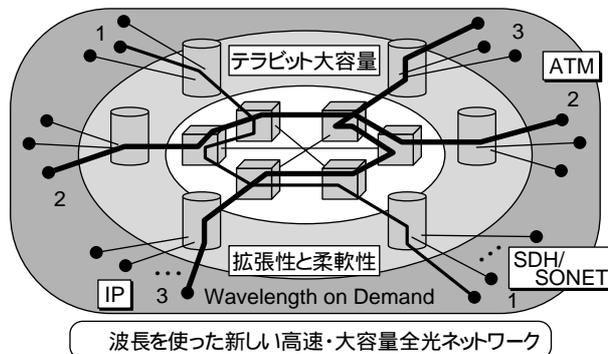


図-1 光通信システムの大容量化の進展

Fig.1-Evolution of large-capacity optical transmission systems.



SDH/SONET: 新同期, ATM: 非同期転送モード, IP: インターネットプロトコル

図-2 フォトニックネットワーク

Fig.2-Photonic networks.

とを実証している。⁽⁴⁾ さらに大きな特徴は、拡張性と柔軟性である。通信需要に応じて、Wavelength on demandといった形で、容量を柔軟に増設していくことができる。また、ネットワーキングに際して、個々の波長多重された信号に対して、光領域でルートの切替や、分岐挿入を行うことにすれば、信号の種類やフォーマットに依存しないトランスパレントでオープンなネットワークの実現が期待される。具体的には、波長 1 にはSDH/SONETの信号、波長 2 にはATM信号、波長 3 にはルータから直接IP (Internet Protocol) 信号がネットワークに接続される。このようなネットワークを従来のTDMベースで実現

しようとする、速度変換やフォーマットの変換を行う装置が必要になり、ネットワーク全体のコスト上昇、サービス導入の遅れにつながる。フォトニックネットワークでは将来新しいフォーマットやサービスが現れた場合にも、その収容が容易に実現できる可能性がある。フォトニックネットワークの構成要素を図-3に示す。減衰した波長多重信号を一括して増幅中継する光増幅中継器、波長多重信号を多重分離するWDM端局装置、波長多重された信号から任意の波長の分岐挿入を行う光分岐挿入装置(OADM : Optical Add Drop Multiplexer)、また多数本のファイバ内にある波長を別のファイバに切り替える光クロスコネクト装置(OXC : Optical Cross-Connect)、などが必要となる。さらに、これらの装置内で波長変換機能が必要になる場合もある。現在、商用化されているのは、WDM端局装置と光増幅中継器であるが、今後波長多重の導入が進み、光バス(光波長信号)を効率的に運用管理するOADM、OXCなどが装置化されてネットワークで適用されるものと予想される。

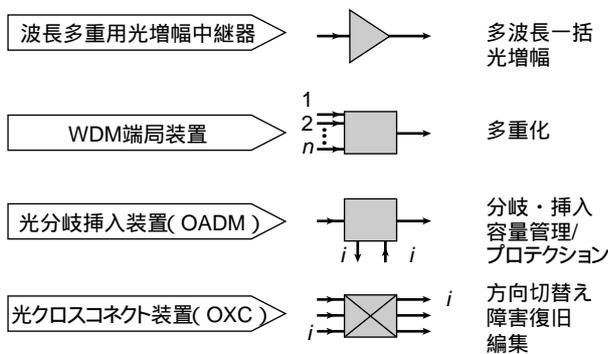


図-3 フォトニックネットワークの構成要素
Fig.3-Main elements of photonic networks.

波長多重伝送システム

波長多重伝送システムの構成を図-4に示す。すでに、実用システムとして2.5 Gbps、16波多重システムなどが運用されている。主な技術課題は、送信部の光源の波長安定化、中継器として用いる広帯域光増幅器、1.6 nm、0.8 nm 波長間隔に光信号を合波、また受信部で波長多重信号を分波する光合分波器の実現、さらに光ファイバ伝送路の分散・非線形の克服である。富士通では、すでに10 Gbpsの信号を32波多重して、広帯域光増幅中継器3台を用いて単一モードファイバ320 km(中継間隔: 80 km)伝送可能なシステム(製品名: FLASHWAVE320G)を商品化している。送信部の波長安定化には、安定度の高い光フィルタを基準とした波長ロッカーを用い、ITU-Tで標準化され

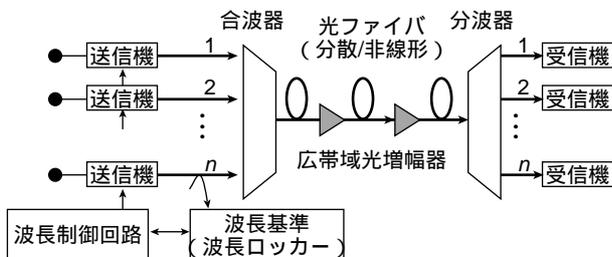


図-4 波長多重(WDM)伝送システムの構成と技術課題
Fig.4-WDM transmission system and technical issues.

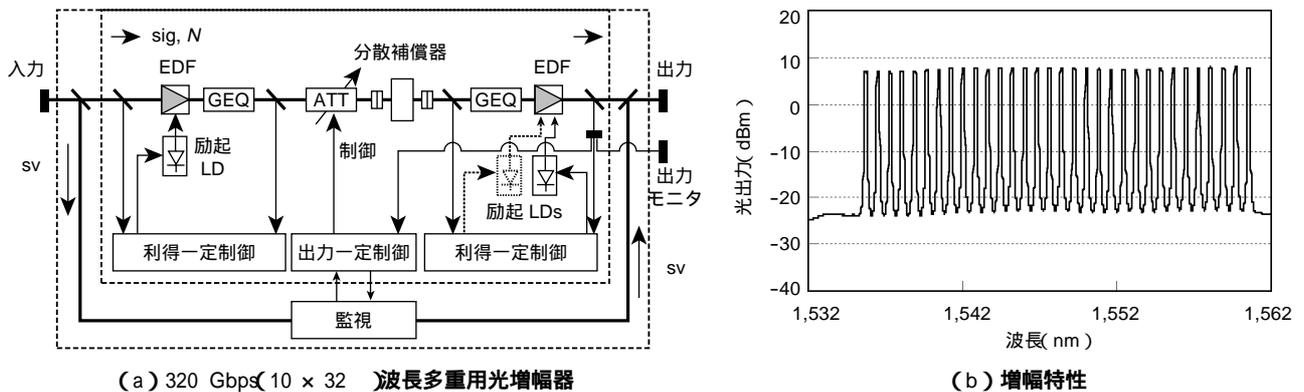


図-5 320 Gbps(10 G x 32波)波長多重用光増幅器
Fig.5-320 Gbps(10 G x 32 waves)WDM amplifier.

ている波長に ± 0.05 nm で安定化している。⁽⁵⁾ 波長多重信号の光パワーを監視するために送信部に光スペクトラムモニタが搭載されており⁽⁶⁾、伝送路に送出される光パワーを管理している。光増幅中継器の構成と利得特性を図-5に示す。利得等化器の搭載により約30 nmの帯域にわたり1 dB以下の利得平坦性が得られている。また、富士通独自の構成である中段に光可変減衰器を用い、広い光入力ダイナミックレンジ、光の監視信号と連携したスムーズな波長増設撤去機能、初期導入コストを低減する励起レーザの増設機能など、各種の運用性に優れた機能を提供している。⁽⁷⁾ システム全体の構成を図-6に示す。波長多重システムは、今後さらに、増幅域の拡大とともに、波長数が増大していくと考えられ、近い将来100波を超える多重システムの実現が期待されている。

光分岐挿入装置

光分岐挿入装置は、波長多重化された光信号のうち一部の波長光を分岐して取り出す機能と新たな信号を挿入する機能を有する装置であり、光波ネットワークの運用

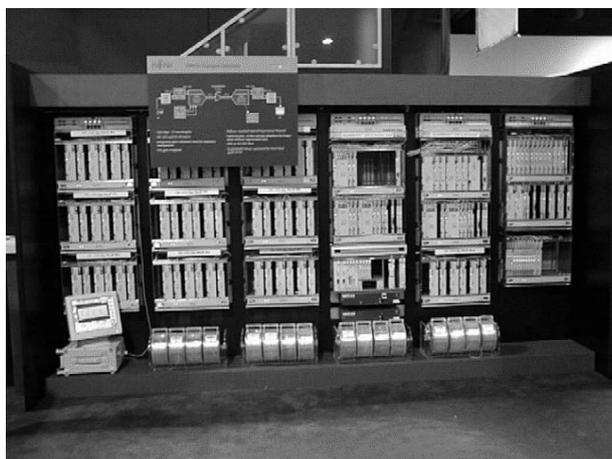


図-6 FLASHWAVE320G
Fig.6-FLASHWAVE320Gsystem.

管理に大きな柔軟性と拡張性を与える装置として実用化が期待されている。WDMシステムにおいて、信号の分岐挿入を行う一つの構成方法は各ノードにおいて、すべての波長を光から電気信号に変換して電気パスの編集を行い、再び光信号に変換して送信する構成である。この構成は、波長数に比例して装置数が増大していくことになり、中継伝送路の経済性の観点から望ましい構成ではない。通常、ADM装置がリング状に接続されているネットワークの場合、あるノードで平均的にドロップされるトラフィックは20-50%で、残りはスルーされているケースがほとんどと言われている。波長多重信号の場合も同様に、ドロップは一部でほとんどがスルーとすれば、光領域で選択分岐し、残りの波長はそのまま光増幅中継する構成が、必要な数だけ電気装置を用意すればよいことになり、ネットワーク全体として経済的になると考えられる。このことが、光ADM導入の大きなモチベーションの一つである。とくに、今後IP処理を行う大規模ルータは2.4 G/10 Gなどの高速インタフェース(OC-48c, OC-192c)を持ち、パケットを編集して行き先ごとに波長を指定するような連携をとれば、光ADMを用いて効率的なネットワークが構成(IP over WDM)できると考えられる。ネットワークのプロテクションに関しても、電気SWで切替えを行っているところを光SWに置き換えることで対応する光プロテクション方式が構成できる。⁽⁸⁾ 光領域での切替制御を行うことで、フォーマットの異なる信号、伝送速度の異なる信号を統一的に処理できるオープンな機能を提供できる可能性があり期待されている。

光ADMの機能、構成についてはまだ定まったものはないが、表-1に示すような世代交代が考えられる。第一世代の分岐挿入波長が固定のタイプは、すでに、ファイバグレーティングなどを用いて実現され商用化されている。次節に、第二世代光ADMとして、新しく開発した音響光学型波長可変フィルタ(AOTF: Acousto-Optic Tunable

表-1 光ADMの種類と世代交代

世代	第一世代	第二世代	第三世代
構成	Passive OADM	Dynamic reconfigurable OADM	
分岐・挿入波長	波長・波長数固定	任意に波長・波長数設定可能	
電気ノード(Client)との接続	ファイバ接続替え 手動切替え	空間光SW, 波長選択SWによる接続替え	Provisioningによる自動切替え
プロテクション	SONET/SDH APS		光レイヤ APS
適用形態	線形接続	線形接続 トラフィック制御	線形, リング接続 トラフィック制御 OBLSRなど
キーデバイス	ファイバグレーティング誘導体フィルタ	PLC空間光SW, AOTF 波長可変レーザ	

APS : Automatic Protection Switch
OBLSR : Optical Bi-directional Line Switched Ring
PLC : Planer Lightwave Circuit

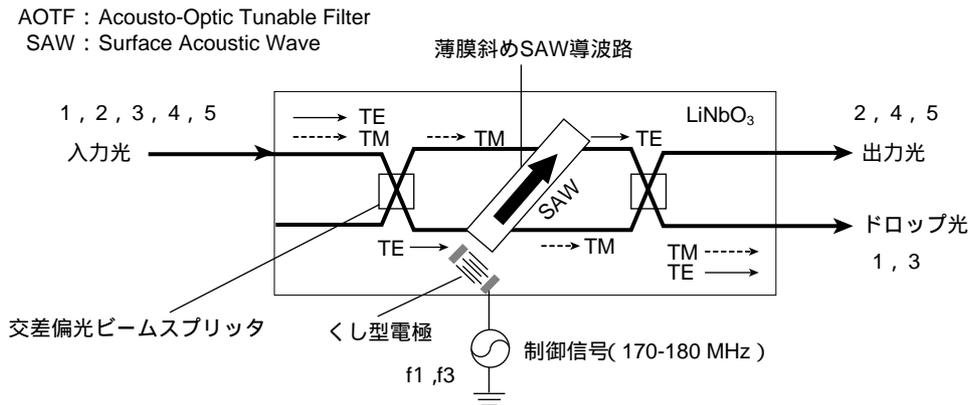


図-7 音響光学型波長可変フィルタ(AOTF)
Fig.7-Acousto-optic tunable filter(AOTF)

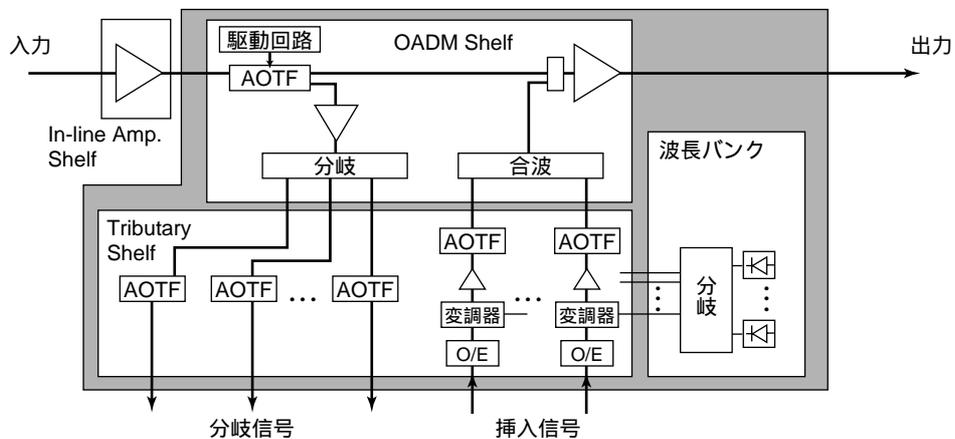


図-8 光分岐挿入(OADM)試作機の構成
Fig.8-OADM configuration using AOTF.

Filter)を用い試作した、任意に波長・波長数を設定可能な光分岐挿入装置を紹介する。

音響光学型波長可変フィルタ(AOTF)

AOTFは一つのデバイスで複数の光波長に対する分岐機能、挿入機能を持つことから光分岐挿入装置を構築するための有力な光デバイスとして注目されている。古くから知られたデバイスであったが、波長幅、損失、クロストーク特性に課題があり、現在実用化されている1.6 nm, 0.8 nm間隔の高密度に並んだ波長多重信号の分岐・挿入が困難であった。AOTFの構成を図-7に示す。くし型電極から170-180 MHzの制御信号を入力すると、ニオブ酸リチウムの基板に表面弾性波(音響波)が励起される。それと導波路中の光が相互作用して偏波が回転する原理に従って、波長が選択される。選択される波長は、入力する制御信号の周波数で決まり、複数の周波数を入力すると、複数の波長が同時に選択されることから、光ADMに適したデバイスである。富士通では音響波の閉じ込めに薄膜を用いる方式の適用、またプロセス上の種々の改善を行

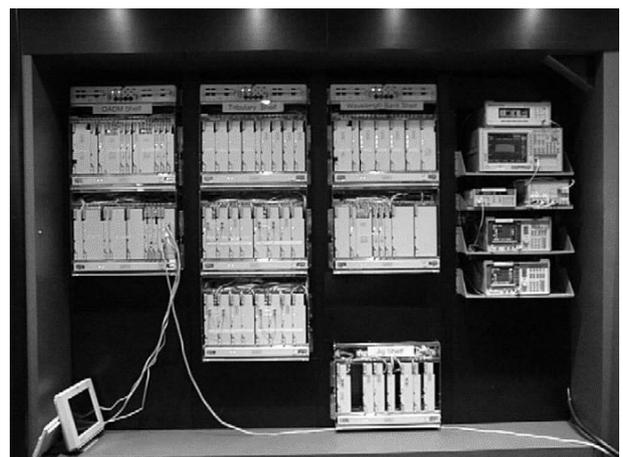


図-9 OADM装置
Fig.9-Prototype of optical add drop multiplexer.

い、等化帯域幅0.37 nm, クロストーク抑圧37 dB, 挿入損失 9 dB, 選択波長域80 nm以上という、これまでにない性能を実現し⁽⁹⁾, 実用化に大きく一歩前進した。

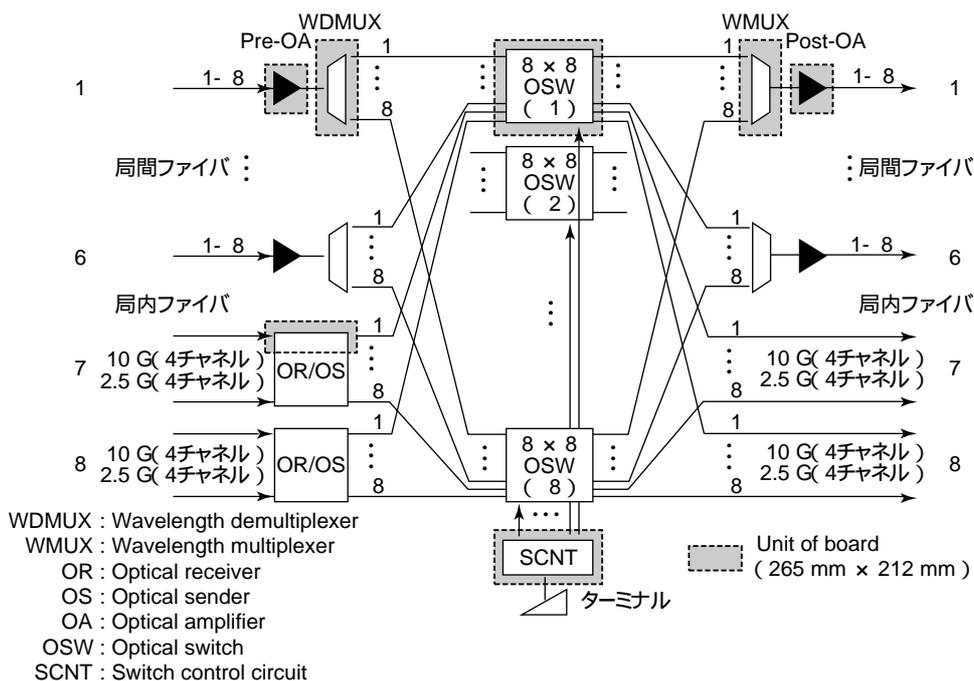


図-10 光クロスコネクタOXC 試作機の構成
Fig.10-Configuration of prototype OXC system.

試作装置の構成

AOTFを用いた光ADM装置のシステム構成を図-8に、装置の外観を図-9に示す。AOTFで選択された波長は分波器で分配され、さらにAOTFで選択されて各電気ノードに接続される。Add側は波長可変レーザの代替として、「波長バンク」構成が採られている。ネットワークで使用する波長をあらかじめ用意しておき、合波後分配する構成で、各Addポートでは、分配された波長多重信号からAOTFを用いて所要の波長を選択して、受信した入力信号で外部変調器を駆動する構成となっている。32波の10 G信号、320 Gbpsから任意の4波を分岐挿入することができ、表-1の分類で言うと第二世代の光ADMになっている。また、信号の伝送速度や信号フォーマットに依存しないトランスパレント型であるため、SDH/SonetのほかにATMやIP信号などを波長多重信号として、分岐・挿入していくことも可能である。また、波長数は需要に応じて段階的に拡張できる構造となっており、経済的な効率のよい装置の運用管理が可能となる。さらに、ネットワークを構成する伝送路や装置の故障を迂回させるループバック機能への対応も可能である。

光クロスコネクタ装置

光クロスコネクタ装置(OXC : Optical Cross-Connect)は複数の入出力ファイバを持っており、各ファイバで送られてきた波長多重された信号をまず分離し、各波長ご

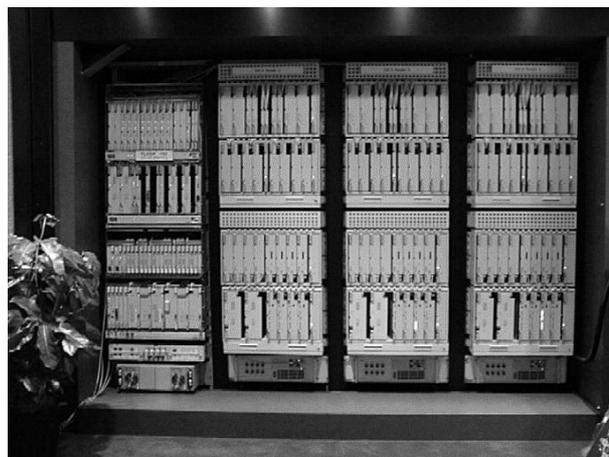


図-11 OXC装置
Fig.11-Prototype of optical cross-connect.

とに方路を切り換えるスイッチ網を通った後、再び波長多重されて伝送路に送り出される。OXCとして次の三つのタイプが検討されている。

- (1) ファイバ単位での障害復旧を行うタイプ
 - (2) 波長単位で光パスの編集、障害復旧を行うが、波長変換機能を持たないタイプ
 - (3) 波長変換機能を持つタイプ
- 技術的には、(1)(3)の順に難しく、装置の規模も大きくなる。

(2)のタイプとして図-10に試作装置の構成、図-11に外観を示す。⁽¹⁰⁾ 64チャンネルの光パスを処理することができ、

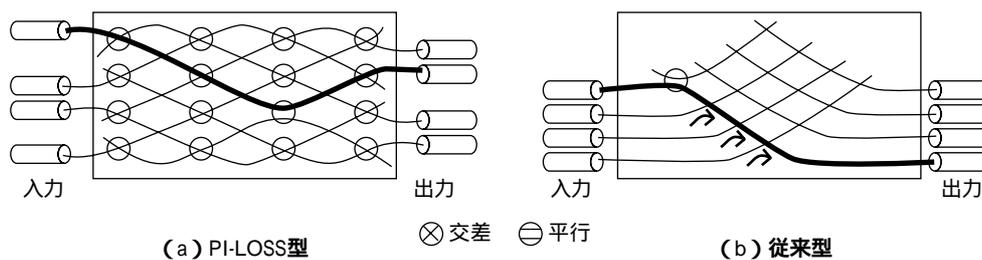


図-12 PI-LOSS型光スイッチ
Fig.12-PI-LOSS optical switch.

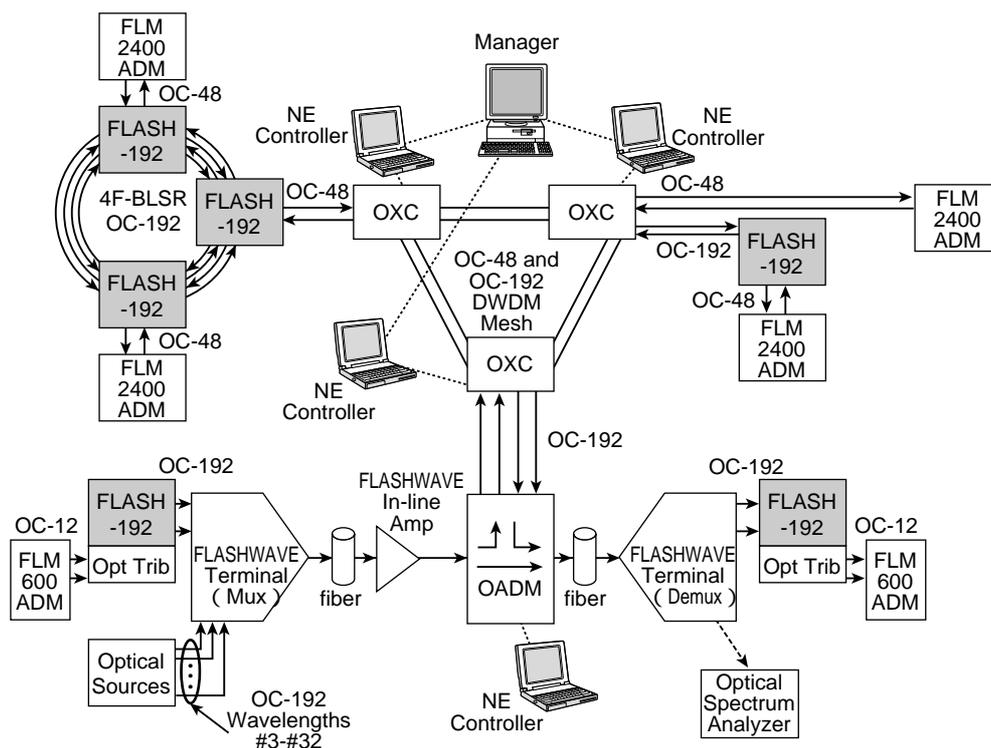


図-13 Supercomm 98展示構成
Fig.13-Demonstration configuration in Supercomm 98 Exhibition.

2.5 Gと10 Gの信号の混在が可能である。OXCの実現においては、スイッチアーキテクチャ、ネットワーク管理が主要な技術である。

スイッチアーキテクチャ

光空間スイッチがOXCを構成する上で主要素の一つである。従来型の光スイッチと富士通で考案した⁽¹¹⁾PI-LOSS (Path Independent Loss 型)光スイッチの構成を図-12に示す。従来構成ではスイッチサイズの増加に伴う挿入損失・損失ばらつきが問題となっていたが、PI-LOSS構成の場合は、パスの接続パターンに関係なく光信号が通過するスイッチエレメントが一定となり、損失ばらつきが小さくなる特長がある。平面ガラス導波路技術を用いた8×8光スイッチが実現できており、挿入損失9dB、ク

ロストーク40dB以下、スイッチング時間として4.5msの良好な特性が得られている。試作装置では、この光スイッチが8個用いられており、各ファイバからきた同一波長が一つの光スイッチに集められて入力され、方路の切替えが行われる。

ネットワーク管理

個々のOXC装置を制御するコントローラと光パス網全体を管理するネットワークマネージャから構成されており、コントローラは、光クロスコネクタスイッチの制御、光スペクトルモニタを用いた光パスの監視などを行っている。また、光パスのセットアップには光信号に重畳したパイロットトーンが用いられている。^{(12),(13)} ネットワークマネージャでは、発信端末から受信端末までの光パ

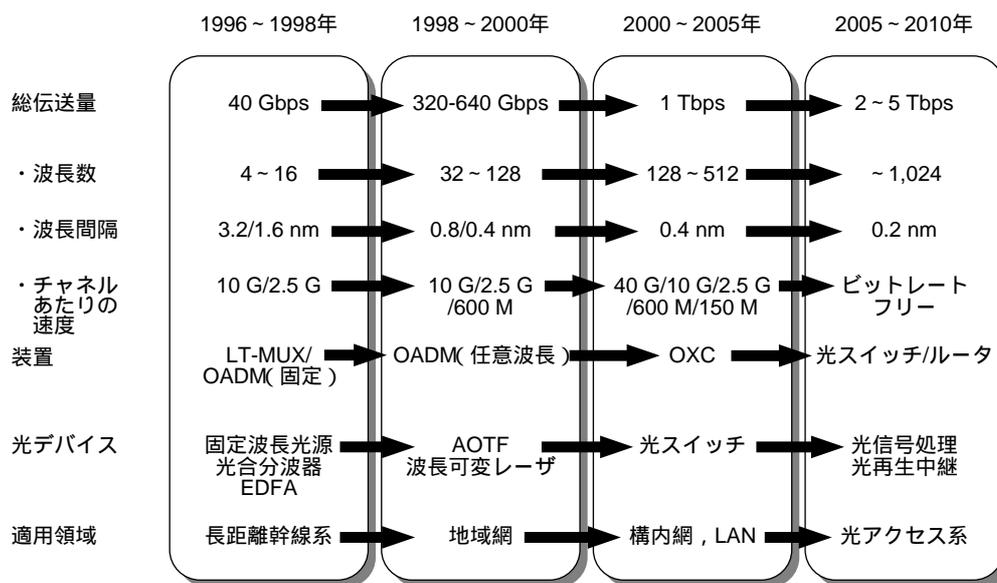


図-14 フォトニックネットワーク技術の進展
Fig.14-Photonic technology roadmap.

スの構成管理，障害管理を行い，ファイバ断などの障害が発生した場合に，高速かつ効率的にパスを切り替える障害復旧機能を実現している。

Supercomm 98 展示

上に述べてきた，WDM伝送装置，光分岐挿入，光クロスコネクタのプロトタイプ装置を，1998年6月に米国アトランタで開催されたSupercomm 98(毎年開催される通信事業者向けの北米最大の展示会，出展社：約700社，来場者：約4万5千人)に展示した。展示構成を図-13に示す。10 Gbps信号を32波多重化した波長多重伝送装置「FLASHWAVE320Gシステム」，4本のファイバによるリング構成に対応した10 G伝送装置「FLASH-192」などの製品レベルの展示と光分岐挿入装置，光バスクロスコネクタ装置の試作プロトタイプを相互接続して，動画伝送，光信号の分岐挿入，切替え動作，光クロスコネクタ3台をメッシュに接続した障害復旧のデモなどの動展示を行った。フォトニックネットワークに関するこれまでにない大規模動展示ということで，来場者の注目を集めるとともに，次世代光ネットワークのビジョンを示すことができた。

今後の動向

フォトニックネットワークの今後の進展を図-14に示す。現在の波長多重システムは，0.8 nmもしくは1.6 nm波長間隔で，40波を多重するシステムが実用化されてい

る。各波長あたりの伝送速度は，2.5 Gbpsが主流であるが，10 Gbpsも導入が開始されつつある。この状況が今後，つぎのように進展していくと予想される。

- (1) 新しい増幅帯域の開拓により，増幅域が広がり，また波長間隔についても0.4 nm，0.2 nmと狭くなり，100波 ~ 200波と波長多重数が増えていく。その際に光増幅器とともに波長可変光源の実現がキーとなる。
- (2) WDMの導入先も長距離幹線系から，地域網，アクセス系へと広がっていく。WDMの1波あたりの伝送速度も，種々の光部品の低コスト化とともに600 Mbps，150 Mbpsと低速化が促進される可能性がある。
- (3) IP over WDMなどに象徴されるように，異種信号を柔軟に収容するトランスペアレンシーの向上に向けて研究開発が進む。具体的には，ビットレートフリー光再生中継器，金光中継器などの研究開発が重要になる。
- (4) OADMやOXCなどの装置導入と関連して，IP Router，ATM，SDH/SONET，フォトニックの間で機能配備について見直しが進む。一般にフォトニックでは波長単位での光プロテクションなどを行う光信号処理機能が重要になってくる。

む す び

本稿では，フォトニックネットワークの特徴と必要性を概説し，その要素技術となる波長多重伝送装置，光ADM装置，光XC装置などの光ノード装置と，それらを実現するデバイス技術について紹介した。現在のところ商

用化されているのは波長多重伝送装置であるが、光ADM装置、光XC装置については今年から2001年にかけて初期導入を考えている。現在、ネットワークの変革期にあり、光通信技術がその動向に大きな影響を与える状況になってきている。21世紀に向けて研究開発をますます加速していきたい。

参考文献

- (1) H. Yoshimura : NTT's research activities on future photonic networks . Photonic Network Forum(PNF 97) Tokyo , Dec. , 1997 .
- (2) Y. Mochida : Recent achievements in advanced optical networking technology and forward view . 3rd European Conference on Networks & Optical Communications(NOC 98) Manchester , June 1998 .
- (3) K. Sato , S. Okamoto and H. Hadama : Network Performance and Integrity Enhancement with Optical path Layer Technologies . *IEEE J-SAC* , SAC-12 , 1 , pp.159-170 (Jan. 1994)
- (4) H. Onaka et al. : 1.1 Tb/s WDM transmission over a 150 km 1.3 μ m zero-dispersion single-mode fiber . OFC 96 Technical Digest , San Jose , USA , PD-19 , Feb. 1996.
- (5) 三田村ほか : エタロン型波長検出モジュール . 1998年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 , B-10-180 ,(1998)
- (6) K. Otsuka et al. : A high-performance optical spectrum monitor with high-speed measuring time for WDM optical networks . ECOC 97 , Edinburgh , UK , Tu3 , Sep. 1997.
- (7) S. Kinoshita et al. : Wide-dynamic-range WDM optical fiber amplifiers for 32 \times 10 Gb/s , SMF transmission systems . Optical Amplifiers and Their Applications(OAA 98) , WA2 , pp.173-176 , Vail , July 1998.
- (8) GR-2979-CORE , Common Generic Requirements for Optical Add-Drop Multiplexers(OADM)s and Optical Terminal Multiplexers(OTM)s . Issue 1 , Bellcore , Apr. 1998.
- (9) T. Nakazawa et al. : Ti : LiNbO₃ AOTF for 0.8 nm channel-spaced WDM systems . OFC 98 , PD1 , Feb. 1998.
- (10) I. Nakajima et al. : Prototype WP-based optical path cross-connect node using PI-LOSS optical switches . Technical Proceedings 24th European Conference on Optical Communication , 1998 , pp.251-252 .
- (11) T. Simoe , K. Hajikano and K. Murakami : A path-independent insertion loss optical space switching network . *Tech. Dig. ISS 87* , 4 , C12.2 , pp.999-1003(1987)
- (12) Y. Hamazumi and M. Koga : Transmission capacity of optical path overhead transfer scheme using pilot tone for optical path network . *IEEE J. Lightwave Technol.* , 15 , 12 , pp.2197-2205 (Dec. 1997)
- (13) Proposed overhead channel realization for optical layers . ITU-T SG15 , Delayed Contribution , D. 68 , NTT , Geneva , Apr. 1997.