



フォトニックネットワークシステムの技術動向

Technology Trend of Photonic Network System

Fujitsu Network Communications, Inc.
Photonics Networking Laboratory
Senior Vice President

桑原秀夫 Hideo Kuwahara

はじめに

最近のインターネットをはじめとするデータ通信と移動通信の急速な普及により、通信需要が急増している。通信ネットワークとしては、この情報量の急激な増加に対して、その伝達と処理を実現する技術が必要である。伝達に関しては、大容量の光ファイバ伝送が幹線系に導入されてから久しいが、その大容量化に対しては、これまでは主に変調速度の高速化で対応してきた。すなわちデジタル変調の一つのタイムスロットを短くしていく時分割多重(TDM: Time Division Multiplexing)方式であったが、その速度は既に10 Gbpsに到達して、次世代の40 Gbps方式も検討されているが電子回路の動作限界に近づいている。一方、処理の方は電子回路の微細化により処理速度を高速化して対処してきた。半導体技術の進歩を表す際によく使われる指標であるMooreの法則は、年に約60%の処理能力の増加を表している。しかし、現在の通信需要の急増はこれを超えている。例えば、北米のインターネットプロバイダでは年に数倍の勢いに達しており、これまでのように半導体の性能向上だけでは対処できない。この伝送と処理の能力不足を解消する有力な技術がフォトニックネットワークであり、この1, 2年で急速にその実現が具体化してきた。⁽¹⁾

フォトニックネットワークの特徴と要素技術

フォトニックネットワークは上記のボトルネッ

クを解消する手段として、従来の時間と空間に加えて、膨大な波長(あるいは光の周波数)資源を活用する。波長の違いにより信号を多重化する波長多重技術(以下、WDM: Wavelength Division Multiplexing)が使えるようになったのは、種々の光デバイスの進展によるところが大きい。その一つが1980年代後半から急速に進展したエルビウムドープ光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier)である。希土類元素であるエルビウムを添加した光ファイバに光エネルギーを供給して、励起状態となった段階で、信号光が入射すると溜めていたエネルギーを使って増幅作用が起こる。従来の中継伝送技術は電気信号に変換して増幅していたが、このEDFAはそれらを置き換え、また多波長を一括して増幅できる。光通信技術にとって光ファイバ、半導体レーザに次ぐ画期的な技術と言ってよい。WDMの信号を各々波長で分けて電気信号に戻して増幅し、また光信号に直して伝送していたのでは、コストが高く実用化しなかったであろう。

フォトニックネットワークの特徴は、上記の波長多重技術により信号速度や通信プロトコルの異なる種々の信号を多重化して送れること、一部の信号を光のまま電気信号に変換することなく処理することにより上記の電子回路の限界を超える処理能力を持てること、そしてこれらの技術により、これまでの通信の常識を超えた大容量の通信ネットワークが実現できることである(図-1)。

フォトニックネットワークは情報化社会のイン

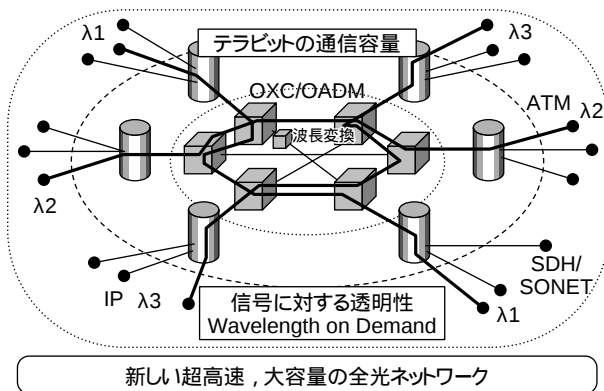


図-1 フォトニックネットワーク
Fig.1-Photonic networks.

フラであり、道路網とのアナロジーで考えると分かりやすい。まず、既存の道路は道幅も狭いため、車の速度を上げられないだけでなく、交通信号が頻繁にあり、少し交通量が増えたと渋滞を起こす。また、工事による渋滞も日常茶飯事であり、目的地までの時間が保証できない。それに対しフォトニックネットワークは100車線を持つ高速道路のようなものである。各々のレーンの速度も速いが、交通信号がなく、車の出入りは多くても各インターチェンジで停車することなくスムーズに行われ、遅延が少ない。

フォトニックネットワークを実現するにはいくつかの要素技術が必要である。その一つは上記の光増幅技術である。また、波長の異なる信号を多重分離する光フィルタが必要である。さらに、波長の違いにより信号を分岐したり挿入したりするインターチェンジの役目をする光分岐挿入装置(以下、OADM: Optical Add Drop Multiplex)、波長の違う信号間で先行を切り替えたり折り返したりする光クロスコネクト装置(以下、OXC: Optical Cross-Connect)、信号の波長を変換する波長変換装置などが要素技術として必要である(図-2)。

フォトニックネットワークの役割

通信におけるフォトニックネットワークの役割は、伝達と光技術を用いた処理であり最も物理層

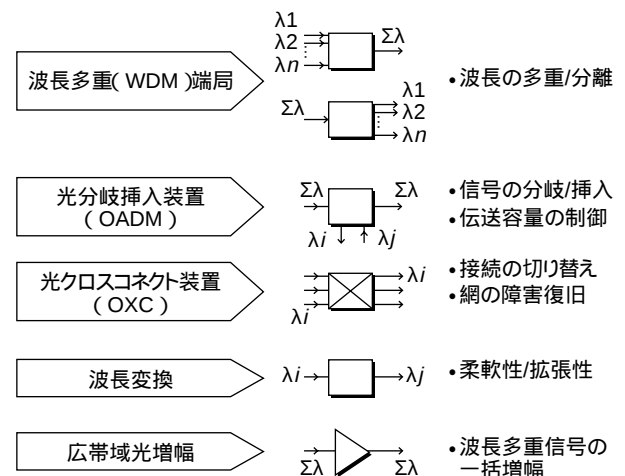


図-2 フォトニックネットワークの要素
Fig.2-Element of photonic network.

に近い部分であるが、通信需要の変化とともにフォトニックネットワークを通る信号の形態も変化してきている。ネットワークの主体が従来の電話からデータに移り、信号もIP(Internet Protocol)の比率が増加するに伴い、インターネットのビジネス情報に対する高い信頼性、コンピュータ間通信に伴う信号のバースト性と大容量性が要求される。インターネット接続業者からは低価格化の強い要求もあり、IP信号をいかに安くコンピュータ間でやりとりできるかがネットワークに対する要求である。そういった要求に応えるべく、従来の通信ネットワークで標準的であったSDH/SONETなどの同期網ではなく、IPとWDM技術を直接つなげた“IP over WDM”が中間レイヤのコストを削減できるため注目されている(図-3)。標準化活動においても、ITUではDigital Wrapper技術が賛同を得つつあり、また、米国を中心としたOIF(Optical Internet Forum)では、SONETの枠組み(Framing)だけを使うPOS(Packer over SONET/SDH)が有力な候補として議論されている。富士通もITU、OIFともに代表を送り参画している。

また、フォトニックネットワークを具体的に実現していくために従来の物理層を、下から光チャネル(Optical Channel: OCh)、光多重(Optical Mux: OMux)、光伝達(Optical Transport)の各層

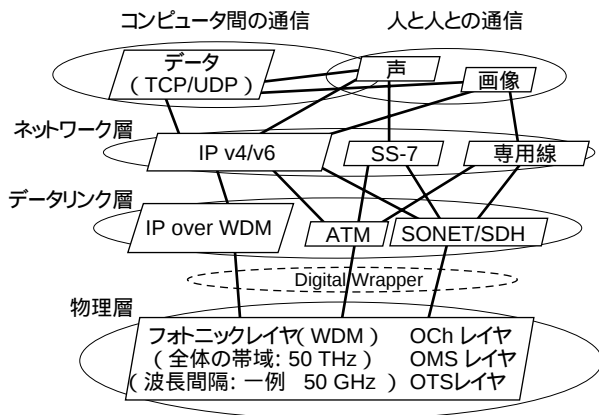


図3 フォトニックネットワークのアーキテクチャ
Fig.3-Photonic network architecture.

に分け、その間のインタフェースを取り決めていく国際標準化の動きも始まっている。波長資源については、ITUで193.1 THzを基準点として、25 GHz間隔の波長グリッドを用いていくことが決められ、その後、光フィルタなどの光デバイスの開発が急速に進展した。

フォトニックネットワークにおいてはそのネットワーク管理が重要であり、これまでのネットワークにはなかった波長の次元を管理していく手法とその共通インタフェースが標準化の場でも議論されている。WDM端局、OADM、OXCなどの各ネットワークエレメントから、波長や光パワーなどのアナログ情報を集める光モニタが開発されており、それらの情報をもとにネットワーク管理システムがネットワークを統合的に管理することにより、全体のスループットと効率を高めることができる。

フォトニックネットワークの展開

フォトニックネットワークは、初めは単純な伝送技術から始まり、その後、光処理を取り入れた高度なものに展開していくと考えられる。第1段階のWDMを用いた2地点間の(Point-to-point)伝送は既に多くの商用システムが稼働しているが、その波長数と光増幅器での中継間隔、および再生中継するまでの伝送距離については、新しいファ

イバの開発も伴い、また、より低い伝送コストの実現をめざして今も熾烈な競争が続いている。波長間隔は、200 GHzから100 GHz、50 GHz、25 GHzへと高密度化の検討が進んでいる。第2段階は伝送から一部の信号を分岐挿入する光分岐挿入の実現である。分岐挿入する波長が固定されたものは既に海底システムをはじめとして開発が進んでいる。分岐挿入する波長を自由に換えられるものも研究開発が進んでいる。OADMによるリング形態のネットワークとその障害回避の種々の方式が検討されている。第3段階はOXCを用いたメッシュ型ネットワークが想定されている。OADMによるリング網が互いに隣接した部分を統合してリンクの数を整理したネットワークの実現が期待されている。また、その後には光信号の行き先を光のまま識別する光ルータの実現が期待されており、研究が始まっている(図-4)。

これらのネットワークの期待と技術の進展から、各社でフォトニックネットワークの開発が盛んに進められている。最近では、1999年10月にジュネーブで開催されたTelecom、北米で毎年6月に開催されるSupercommのような通信分野の展示会では大きな目玉となり、各社のコンセプトと技術の競争となっている。

富士通も1999年10月にジュネーブで開催されたTelecomでは10 Gbpsを32波多重化できる320 Gbps

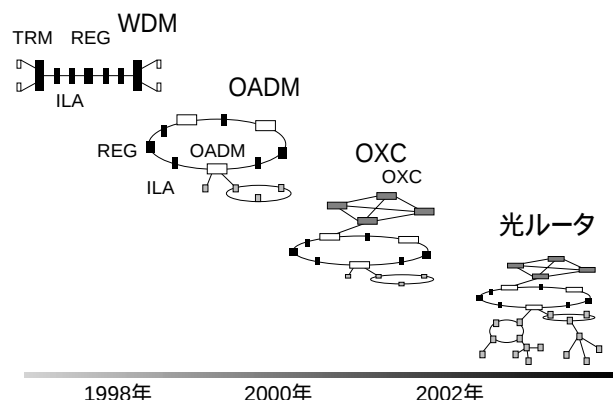


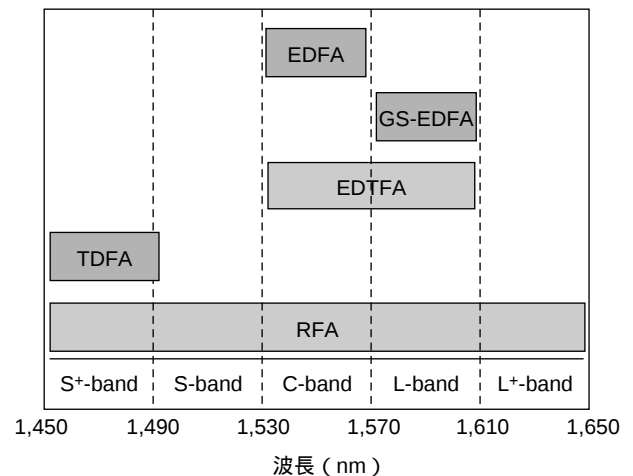
図4 フォトニックネットワークの展開
Fig.4-Evolution of photonic network.

WDM 伝送をベースとして、OADM、OXC、IP over WDM の試作品を展示し、将来の1,000程度の波長を使ったフォトニックネットワークの概念などを発表している。⁽²⁾ これまでにも富士通では研究段階であるが、70 nm以上の帯域を持つ一括波長変換技術も発表している。また、超高速光通信システムの研究、とくに40 Gbpsの回路検討についても欧州を中心に、急速に盛んになってきた。

フォトニックネットワークにおける技術課題

この分野での技術課題はまだ多いと言わざるを得ない。一つは、波長数が多くなり、光ファイバ内の光パワーが高くなると、光ファイバの非線形性が顕著に表れることである。信号の波形が自己の光強度の変化によって生じる屈折率の変化により歪を受ける自己位相変調効果(Self Phase Modulation)は単一波長でも起こる非線形効果であるが、屈折率変化は光強度の時間微分に比例するので高速になる程その影響は大きい。WDMで最も重要かつ伝送容量を制限する要因は、多波長の信号間の和、差で発生する近い波長の光が他の信号にとって妨害となる四光波混合(Four Wave Mixing)であり、また、ある波長の信号が近い波長の信号の強度変化により屈折率変化を受けて信号が歪む相互位相変調(Cross Phase Modulation)である。非線形効果の中のラマン増幅は、ファイバ中の分子振動により長波長側に利得をもつ現象であり、多波長伝送した場合に光エネルギーが長波長側の信号に移り、WDM信号の平坦性が悪くなるが、逆に積極的に利用して伝送路自身を増幅媒体として動作させ、信号パワーの低下を防ぐなどの利用法がある。ラマン増幅は、基本的にどの波長でも利得が実現できるのが大きな利点であり、今後の帯域拡大に大きな役割を担うと思われる(図-5)。

課題の中で最大のものは光デバイスの開発であろう。これまでにも半導体レーザをはじめとする光半導体素子、富士通が力を入れているLN変調



EDFA	: Erbium-Doped Fiber Amplifier(1,530-1,570 nm)
GS-EDFA	: Gain-Shifted EDFA(1,570-1,610 nm)
EDTFA	: ED Tellurite-based FA(1,530-1,610 nm)
TDFA	: Thulium-Doped Fluoride-based Fiber Amplifier (1,450-1,490 nm)
RFA	: Raman Fiber Amplifier(1,450-1,650 nm or more)

図-5 広帯域光増幅技術
Fig.5-Broadband optical amplifier.

器などがあって、ここまで開発が進んだわけであるが、まだまだフォトニックネットワークを本来の姿で実現するには多くのデバイスが必要である。波長を自由自在に扱うには、最近成果が出始めている波長可変レーザや、音響光学波長可変フィルタなどとともに、さらなる広帯域光増幅器、空間光スイッチ、分散補償デバイスなどの研究開発が重要である。デバイスの動向については別稿が用意されているので、全体のロードマップを図-6に示すにとどめ、ここでは省略させていただく。

今後の方向

展開の章でも述べたが、Point-to-pointの伝送は商談が始まり大きく展開している。OADMの機能拡大、OXCの商用化、光ルータの実現が次のターゲットであろう。そのためには、光デバイスの強化、ネットワーク管理の充実が不可欠であるが、本格的な普及にはコストの低下が鍵である。ネットワークの扱う容量は、少し前は幹線系にはギガビット、ビジネス領域にはメガビット、住宅

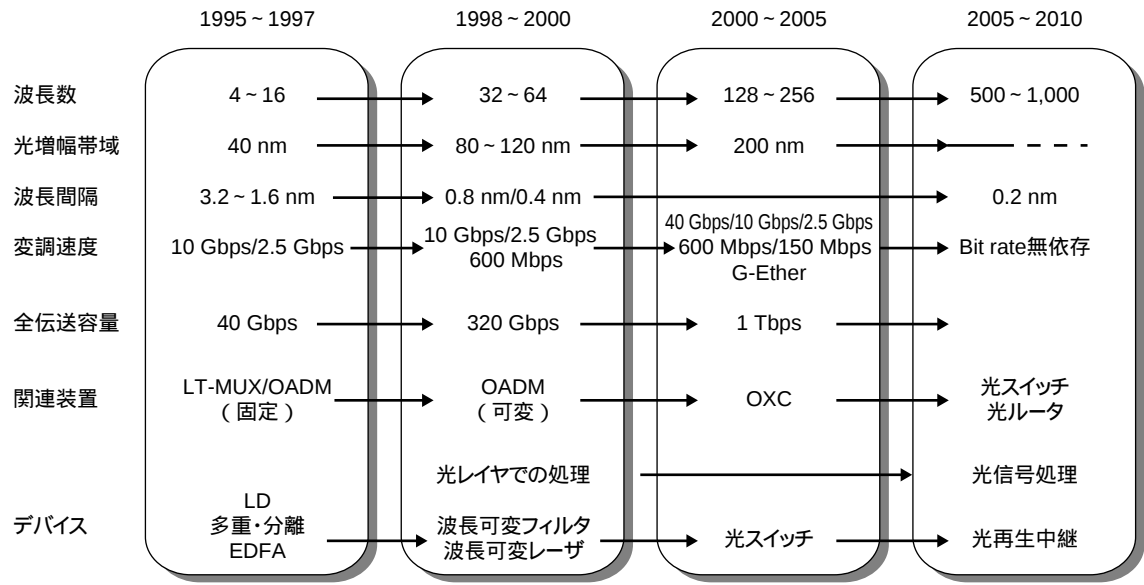


図-6 フォトニックテクノロジーのロードマップ
Fig.6-Photonic technology road map.

にはキロビットであったが、現在はそれらがテラビット、ギガビット、メガビットにそれぞれなりつつある。将来はペタビット、テラビット、ギガビットに増加することになる。

参考文献

(1) Special Issue on Photonic Networks : *FUJITSU Sci. Tech. J.*, 35, 1, 1999.

(2) H. Kuwahara et al. : Photonic Network Architecture toward 1000 Wavelengths. *Telecom99 INF.5*.