高速ネットワークの構築と利用技術

次世代波長多重技術を用いた高速ネットワークの展開

特集解説

キーワード

ATM-PON, WDM-PON, SDH/SONET リング, OADM リング, 超高密度 WDM

岩 月 勝 美

上 松 仁

NTT 未来ねっと研究所

1. はじめに

数か単位で急増するといわれるインターネットのトラヒック需要に対処すべく、WDM 技術によるバックボーンネットワークの大容量化が進展している。個々のユーザが、多様かつ高速・広帯域なインターネット接続サービスを楽しむには、バックボーンネットワークの大容量化に加えて、WDM の特徴を生かした波長バースト技術や波長ルーティング技術をアクセスネットワークや県内・市内転送ネットワークに適用し、スケーラビリティやフレキシビリティに富む高速ネットワークを構築する必要がある⁽¹⁾。本論文では、波長バースト技術や波長ルーティング技術のベースとなる動的 WDM や Super DWDM (超高密度 WDM) といった次世代 WDM 技術を用いた高速ネットワークについて、それぞれ、

(1) アクセスネットワーク

ATM-PON 方式から、波長バースト技術を用いた WDM-PON 方式によるアクセスネットワークの高速・広帯域化

(2) 県内・市内転送ネットワーク

高速・広帯域アクセスネットワークを収容するため、SDH/SONET リングから、波長ルーティング技術を用いた OADM リングネットワークへの展開

(3) バックボーンネットワーク

Super DWDM による超大容量伝送技術の進展の観点から解説する。

2. WDM 技術の動向

次世代 WDM 技術について述べる前に、現状の WDM 技術レベルをみておこう。図 1 は、リリースあるいはリリース予定の WDM 装置の性能を波長数と波長当たりのビットレートで示したものである。この図から、波長多重数は既に 100 を超え、2001～2002 年にかけて、複数のベンダから伝送容量 (波長数×波長当たりのビットレート) 1 Tb/s を超える装置がリリースされる予定であることがわ

図 1 WDM 装置プロダクト

かる。表 1 は、主要な大洋横断の WDM 伝送システムの概要をまとめたものである。給電容量からケーブル当たりの心線数に制約が生じる海底伝送システムでは、システム容量 (伝送容量×心線数/2) の増大に WDM 技術は不可欠であるため、積極的に導入されていることがわかる。2001 年には、システム容量を 1 Tb/s に拡張可能なシステムが完成予定である。従って、現状の WDM 技術は、2000 年の初頭に、1 Tb/s を超える伝送システムをプロダクトアウトできる能力を十分もっているといえる。

WDM の研究レベルはどうであろう。図 2 は、ここ数年間に論文発表された WDM 伝送実験結果をまとめたグラフである。縦軸には、帯域利用効率 (波長当たりのビットレートを WDM 信号の周波数間隔で割った量) と波長数と光増幅器による中継間隔との積で定義した WDM の性能指数ともいえる量を用いている。この図から、次の 2 点が主な研究動向として読み取れる。

- (1) 伝送距離が 1,000 km 以下の陸上伝送をねらった研究では、敷設伝送路を有効に利用することが重要である。特に、DSF (分散シフトファイバ: Dispersion Shifted Fiber) の零分散帯を利用する際には、FWM (四光波混合: Four Wave Mixing) による SNR (信号対雑音比: Signal to Noise Ratio) 劣化の回避と帯域利用効率の改善が重要な技術課題であった。後述するように、最近、伝送路それ自身を光増幅器とする分布ラマン増幅により、上記の技術課題を克服し、帯域利用効率や波長数の増大による大幅な伝送性能の向上が達成されている⁽²⁾⁽³⁾。
- (2) 伝送距離が 10,000 km にもおよぶ大洋横断伝送をねらった研究では、光ファイバ伝送路の分散管

Special Issue on "Technologies for Construction and Utilization of High Speed Networks".
New Trend on High-Speed Network Based on Advanced WDM Technology.
By Katsumi Iwatsuki and Hitoshi Uematsu (NTT Network Innovation Laboratories).

表 1 WDM を用いた海底伝送システム

システム名	システム容量	伝送距離	サービス開始	陸揚げ国/地域
SEA-ME-WE-3	20Gbit/s(2.5Gx8chx4sys.) (40Gbit/sまでupgrade可)	33,000Km	1999年3月	日本、韓国、中国、台湾、フィリピン、ブルネイ、ベトナム、シンガポール、マレーシア、インドネシア、オーストラリア、タイ、ミャンマー、スリランカ、インド、パキスタン、アラブ首長国連邦、オマーン、サウジアラビア、エジプト、トルコ、キプロス、ギリシャ、イタリア、モロッコ、ポルトガル、フランス、イギリス、ベルギー、ドイツ
China-US	80Gbit/s (2.5Gx8chx4sys.)	30,000Km	1999年末	中国、日本、USA、グアム、台湾、韓国
PC-1	160Gbit/s (10Gx4chx4sys.)	21,000Km	1999年末	日本、USA
JAPAN-US Cab Network	80Gbit/s (640Gbit/sまでupgrade可)	22,000Km	2000年第1四半期	日本、USA
TAT-14	640Gb/s (10Gx16chx4sys.)	15,300Km	2000年10月	USA、デンマーク、ドイツ、オランダ、フランス、イギリス
FLAG-Atlantic	160Gbit/s (1.28Tbit/sまでupgrade可)	12,500Km	2001年第1四半期	USA、フランス、イギリス

図 2 WDM 伝送性能

図 3 次世代 WDM による高速ネットワーク

理⁽⁴⁾⁽⁵⁾、光増幅器の広帯域化^{(5)~(7)}、および誤り訂正符号の適用により、1 Tb/s (10 Gb/s×100 ch) で 10,000 km の伝送性能⁽⁷⁾が達成されている。

今後、波長間隔の高密度化による帯域利用効率の向上と光増幅器の広帯域化による波長数の増大に一層の拍車がかかり、光ファイバの低損失波長帯である 1.4 から 1.6 μm までを使い切る WDM 技術⁽⁸⁾が登場し、次世代 WDM 技術の基盤となる豊富な波長資源が開拓されるのもそれほど遠い将来のことではないと予測される。

3. 次世代 WDM 技術による高速ネットワーク

昨今の爆発的なインターネット需要への対応には、これまでの WDM 技術によるバックボーンネットワークの大容量化だけではなく、冒頭でも述べたように、Super DWDM や動的 WDM といった次世代 WDM 技術をベースに、アクセスネットワークや県内・転送ネットワークを含めたネットワーク全体の高速・広帯域化などが必要である。図 3 は、次世代 WDM 技術の特徴を生かした高速ネットワークの構成イメージである。FTTH を合言葉に PON (パッシブオプティカルネットワーク：Passive Optical Network) 方式の導入が進むアクセスネットワークでは、ピーク速度の向上がインターネットユーザの快適さの鍵を握ることから、オンデマンドで各ユーザに波長をパースト的に割り当てる動的 WDM の適用が検討されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

県内・市内転送ネットワークでは、WDM の高密度化・広帯域化で飛躍的に増大した波長それ自身を各ノード間のパスとしてアサインする波長ルーティング技術をベースにした OADM (光 ADM：Optical Add/Drop Multiplexer) の研究開発が進展している⁽¹¹⁾。バックボーンネットワークでは、Super DWDM による point-to-point 伝送の大容量化が一層加速されると同時に、波長単位でクロスコネクトを行うことで、超大容量化したノード構成が簡素化できる OXC (光クロスコネクト：Optical Cross Connect) の検討^{(12)~(14)}も進められている。以下では、それぞれのネットワークについて具体例をあげて説明をする。

〈3・1〉 アクセスネットワーク 現状のアクセスネットワークの大半はメタリックケーブルで構成されている。メタリックケーブルを高速で使う ADSL などの技術を駆使しても数 Mbit/s 程度の通信速度が限界と考えられ、LAN 並の快適なピーク速度をユーザに提供するには、光伝送方式をアクセスネットワークに導入することが必須となる。光ファイバは低損失であるため、point-to-point では 40~80 km 程度の伝送距離が容易に確保できる。ユーザから最寄りの局舎までの距離は、従来のメタリック伝送の制約から数 km となっており、光伝送方式をこのような短距離に適用するとオーバスペックとなってしまう。そこで、光カップラで光パワーを複数に分岐し、伝送距離を短くするかわりに収容ユーザ数を増加させて、ユーザ当た

りのコストを下げる仕組みがPONである。光アクセスネットワークの広帯域性を活かしたデジタルCATVやB-ISDNなどのサービス提供を目的に、PONに用いられる光部品などを世界中で共通化して量産効果によるコスト削減をねらって、世界主要国の通信事業者と主要ベンダが集まって結成されたデファクト標準化組織FSAN (Full Service Access Network)で、ATM-PONの標準化が進められたのと同時に、通信の国際的な標準化機関であるITUでも標準化⁽¹⁵⁾が行われた。図4にATM-PONの仕組みを示す。下り信号のフレームは53 ByteのATMセルを全ONUに送信し、各々のONUは自あてのセルを取込む。下り信号に含まれるPL-OAMセルで上り方向フレームの53個のセル送出権を各々のONUに与える。ONUが送出するセルはバースト光信号になっており、光信号のタイミング誤差による衝突を回避すると共に、バースト信号の同期引き込みを行うためのオーバーヘッドが3 Byte付与されている。ONUはPL-OAMセルで与えられた送出権に従ったタイミングでバースト光信号を送出することにより、衝突なしに複数のONUとOLTが通信できる。

このPONにWDM技術を導入した例を図5に示す。従来のPONと同様にOLTの光源を複数のONUで共用し、OLTからの光ファイバを複数ONUに分岐している。従来のPONと異なる点は、光カップラの代わりに光フィルタが用いられていることである。OLT側の光源から各々異なる波長の光バースト信号を送出し、光フィルタで宛先のONUに光バーストをルーティングする。光フィルタ

は光カップラと異なり、光パワーが分岐されないため光信号のSNR劣化が少なくなる。この性質を利用するとPONの経済性を損なうことなく、半径40 km程度の広範囲なユーザを一箇所のOLTで収容可能となる。このことは、従来のメタル伝送距離に捕われない広域なアクセスネットワークの構築を可能とする。WDM-PONの基礎実験系と実験結果を図6に示す。OLTである送信器にSSG-DBRと呼ばれる可変波長光源を用いて、光バースト信号を発生させている。200 nsecのガードタイムで16チャンネル分の波長を切替え、1 kByteの光バースト信号を送出し、光ファイバ増幅器を用いて16分岐、320 kmの伝送実験に成功している⁽¹⁰⁾。

〈3・2〉 県内・市内転送ネットワーク 県内・市内転送ネットワークでは、伝送路をリング状に構成し、その中のパスを各ノードでadd-drop (分岐挿入)するリングネットワークが用いられている。図7に示すように、リングネットワークは、リング内の異なるノードへの複数のパスをリング状の一つの伝送路に多重し、需要が生じたノードでパスをadd-dropすることにより、突発的な需要に即応できる利点をもつ。更に、図8に示すように、伝送路故障が発生した場合、逆回りの伝送路を用いてう回を行うことで、故障を高速に救済できる。従来のSDH/SONETリングシステムでは、リング伝送路の光信号をすべて電気信号に変換してから時間スイッチにより時分割多重されたパスのadd-dropを行い、再び光信号に変換してリング伝送路に送信している⁽¹⁶⁾。これに対し、波長ルーティング技

図 4 ATM-PON と信号フォーマット

図 5 WDM-PON の例

図 6 光パケットルーティング実験

図 7 リングネットワーク

術を用いたリングネットワークでは、光フィルタや光スイッチを用いることにより波長単位で add-drop を行う。図 9 に光フィルタ、光スイッチを用いた分岐挿入部と光ファイバ増幅器を組み合わせた OADM ノードの例を示す⁽¹⁷⁾。OADM ノードを通過する各波長は電気に変換されず光のまま通過し、add されたノードから drop されるノードまでトランスパレントに伝達可能である。そのため、ギガビットイーサなどの SDH/SONET ハイアラーキと無関係な高速・広帯域な信号もリング伝送路に自由に多重でき、今後現れるであろう新しいフレームやビットレートを有する通信サービスへ容易に対処できる利点を有する。現在、波長当たりの伝送速度が 10 Gbit/s で 32 波多重の OADM システムが実用化されつつある⁽¹⁷⁾。

図 8 リングネットワーク（単方向型）の故障切替え

〈3・3〉 バックボーンネットワーク DSF は超高速伝送を目的に 1.5 μm 帯で波長分散を低減した光ファイバであるが、WDM 伝送では光ファイバの非線形現象である FWM が顕著に生じ、WDM 信号の SNR 劣化を引き起こす。この技術課題は、従来、WDM 信号の波長配置を不等間隔にすることで克服されていたが、帯域利用効率の改善が未解決のままであった。そこで、登場したのが分布ラマン増幅である。この光増幅技術は、伝送路の損失を分布定数的に補償していることから、EDFA（エルビウム添加光ファイバ増幅器：Er-doped optical fiber amplifier）などを用いた集中増幅技術に比べ、ASE（増幅自然放光：Amplified Spontaneous Emission）雑音による SNR 劣化が少なくなるため、WDM の各光信号パワーを低減しても所望の SNR を十分確保できる。従って、FWM 光の発生を大幅に軽減できることとなり、帯域利用効率が改善できる。

図 10 は、分布ラマン増幅を用いた 1 Tb/s の Super DWDM 伝送実験系とその実験結果である⁽²⁾。100 波長の

図 9 光 ADM の構成例

(a) 実験系

(b) 1,040 km 伝送後の光スペクトル

(c) 1,040 km 伝送後の誤り率特性

図 10 分布ラマン増幅を用いた 1 Tb/s Super DWDM 伝送実験

WDM 信号 (1,540.2~1,560.0 nm) は 25 GHz の波長間隔で並べられ、伝送路で生じる FWM を低減するため、隣り合う WDM 信号の偏波を互いに直交させている。波長当たりの伝送速度は、誤り訂正符号による伝送速度の上昇分を加味し、10.7 Gb/s に設定されている。伝送路である周回ループは、80 km の DSF と利得等化器から構成されている。DSF を前後方励起することで、分布ラマン増幅を行い、DSF の損失を補償している。周回ループ中の

EDFA は、利得等化器と光スイッチの損失補償に用いられている。図 10(b), (c) は、それぞれ 1,040 km 伝送後の WDM 信号の光スペクトルと誤り率特性を示している。伝送後の WDM 信号の光パワーレベル偏差は、8 dB 以内に押さえられていることがわかる。FWM により、DSF の零分散波長域である 1,550 nm 付近での誤り率特性が劣化しているものの、分散等化を行うことなく、全チャンネルで誤り率 10^{-12} 以下 (誤り訂正を仮定) が達成されて

いる。

4. む す び

次世代 WDM 技術を用いた高速ネットワークの展開について、それぞれ、アクセスネットワーク、県内・市内転送ネットワークおよび、バックボーンネットワークにおけるトピックスを述べた。21 世紀の情報通信インフラの基盤技術として、次世代 WDM 技術の果たすべき役割は大きく、その研究開発の進展に期待したい。

(平成 12 年 1 月 20 日受付)

文 献

- (1) K. Iwatsuki, N. Takachio, and H. Obara: "Innovation of advanced WDM technologies for future multimedia networks", APSITT '99, Session 12, (1999)
- (2) H. Suzuki, J. Kani, H. Masuda, N. Takachio, K. Iwatsuki, Y. Tada, and M. Sumida: "25 GHz-spaced 1 Tb/s (100×10 Gb/s) super dense-WDM transmission in the C-band over a dispersion-shifted fiber cable employing distributed Raman amplification", ECOC '99, Post deadline paper PD 2-4, (1999)
- (3) T. N. Nielsen, A. J. Stentz, P. B. Hansen, Z. J. Chen, D. S. Vengsarkar, T. A. Strasser, K. Rottwitt, J. H. Park, S. Stulz, S. Cabot, K. S. Feder, P. S. Westbrook, and S. G. Kosinski: "1.6 Tb/s (40×40 Gb/s) transmission over 4×100 km nonzero-dispersion fiber using hybrid Raman/Erbium-doped inline amplifier", ECOC '99, Post deadline paper PD 2-2, (1999)
- (4) M. Murakami, T. Matsuda, and T. Imai: "Quarter Tbit/s (25×10 Gbit/s) over 9288 km WDM transmission experiment using nonlinear supported RZ pulse in higher order dispersion managed line", *Electron. Lett.*, **35**, 6 pp. 488~489 (1999)
- (5) T. Tsuritani, N. Takeda, K. Imai, K. Tanaka, A. Agata, I. Morita, H. Yamauchi, N. Edagawa, and M. Suzuki: "1 Tbit/s (100×10.7 Gbit/s) transoceanic transmission using 30 nm-wide broadband optical repeaters with Aeff-enlarged positive dispersion fiber and slope-compensating DCF", ECOC '99, Post deadline paper PD 2-1 (1999)
- (6) T. Matsuda, M. Murakami, and T. Imai: "Designing a compound gain equalizer for transoceanic in-line amplifier systems", ECOC '99, **TuA3**, pp. 234~245 (1999)
- (7) T. Naito, N. Shimojoh, T. Tanaka, H. Nakamoto, M. Doi, T. Ueki, and M. Suyama: "1 Tbit/s WDM transmission over 10,000 km", ECOC '99, Post deadline paper PD 2-1 (1999)
- (8) J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori, and K. Oguchi: "Triple-wavelength-band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted fiber", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 11, pp. 1506~1508 (1999)
- (9) L. Boivin, M. Wegmueller, M. C. Nuss, and W. H. Knox: "110 channels×2.35 Gb/s from a single femtosecond laser", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11**, 4, pp. 466~468 (1999)
- (10) M. Fukutoku and N. Shibata: "16 WDM optical packet routing experiment over 640 km transmission distance at data rate of 2.5 Gbit/s", OFC '99, ThM 3-1 (1999)
- (11) H. Bock, A. Richter, P. Leisching, C. Glingener, D. Stoll, G. Fischer, P. Pace, J. Philipson, and M. Farries: "Dynamic all-optical-networking at 0.8 Tbit/s in a transparent WDM ring network", ECOC '99, Post deadline paper PD 3-2 (1999)
- (12) M. Koga, A. Watanabe, T. Kawai, K. Sato, and Y. Ohmori: "Large-capacity optical path cross-connect system for WDM photonic transport network", *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, **16**, 7, pp. 1260~1269 (1998)
- (13) A. Tzanakaki, K. M. Guild, D. Simeonidou, and M. J. O'Mahony: "Error-free transmission through 30 cascaded optical cross-connects suitable for dynamically routing WDM networks", *Electron. Lett.*, **35**, 20, pp. 1755~1756 (1999)
- (14) H. Maeda, Y. Tada, M. Sumida, S. Saito, and Y. Hayashi: "Performance degradation of long-distance optical WDM networks due to bandwidth limitations of wavelength multiplexers and Demultiplexers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 11, pp. 1509~1511 (1999)
- (15) ITU-T Recommendation G.983.1: "Broadband access systems based on Passive Optical Networks (PON)"
- (16) W. J. Goralski: "SONET" McGraw-Hill series on computer Communication
- (17) 桑野・服部・福德・小野: "光 ADM リングシステム" NTT R & D (2000 年 1 月号掲載予定)

岩 月 勝 美 (非会員) 1958 年 3 月 10 日生。81 年名古屋工業大学電子工学科卒。86 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年 4 月 NTT 通信網第一研究所入社。以来、光ファイバセンサ、光ソリトン伝送、非線形光伝送の研究に従事。96 年から NTT 技術部において、技術企画を担当。現在、NTT 未来ねっと研究所において、次世代の WDM ネットワークの研究に従事。同研究所主幹研究員。電子情報通信学会、IEEE 会員。

上 松 仁 (非会員) 1960 年 7 月 1 日生。83 年大阪大学工学部通信工学科卒。85 年同大学院修士課程修了。同年 NTT 横須賀電気通信研究所入所。以来、ATM 中継伝送システム、CLAD 装置の研究に従事。91 年大阪大学、工学博士。95 年から NTT マルチメディアシステム部において ATM アクセスシステム、ATM 専用サービス、ATM 帯域共用サービスの開発に従事。現在、NTT 未来ねっと研究所において次世代の広帯域アクセスシステムの研究に従事。同研究所主幹研究員。電子情報通信学会、IEEE 会員。