メトロ光 IP ネットワークの遠隔波長選択制御方法に関する研究

勝 山 豊 大阪府立大学大学院工学研究科教授

1 はじめに

情報化の進展あるいはインターネットトラフィックの急増により、さらなる広帯域ネットワークが要求され、これに応えるため広帯域な光ネットワークが導入されている。また、最近の通信サービスが、IPネットワークに統合されつつあることに関連し、企業内ビジネス通信を自社用にリースしたダークファイバを用い、 すべて IP 通信でまかなう方式が極めて経済的であることが報告されている。また、北米ではファイバ自体を 企業が所有する Customer-Owned ネットワーク[1]がさらに経済的であると認識され、実際に大企業で導入さ れている。日本ではまだこの動きは顕著ではないものの、企業内イントラネットや、地方自治体等が住民に 提供する公共情報サービス用ネットワークなどはこの分類に入り、経済性の観点から今後増加すると考えら れる。

この種の通信では、地方自治体や企業など利用者がリースあるいは所有するファイバに、いかにトラフィ ックを効率的に収容するかが問題で、地方自治体の市役所、支所、分室あるいは、企業の本社、支社、支店 などを結ぶ場合、利用者が自身でトラフィック収容の設計や運用を行う形態や、プロバイダが代行する形態 などが考えられる。いずれにしても、ユーザのビルをノードとし、これをファイバにより接続したネットワ ークにおいて、トラフィック収容の設計運用を、容易にかつユーザ主体で行える手法が求められる。本論文 では、このようなユーザ主体で利用する広域/メトロ光 IP ネットワークにおいて、ビル間の光パスを遠隔制 御により再構築し、トラフィック変動に対応できる制御方法を明確にすることを目的とする。

2 対象とするネットワーク

この論文で対象とするネットワークを図1に 示す。ノードは、ユーザビルをあらわし、単一 モード光ファイバ (SM Fibers)でリング状に接 続する。図1の例では、双方向2心光ファイバ であるが、単方向1心光ファイバの接続形態も とり得る。ノード間の1心のファイバ接続をフ ァイバパス (Fiber Path)とよび、ファイバパ スに複数の波長を多重して伝送する。波長を単 位とする光接続を光パス(Lightpath)[2]とよび、 ノード間のトラフィックを収容するよう光パス を設計する。ノードは、光信号を合分波する波 長ルーティングデバイス (WRD: Wavelength Routing Device)と、電気信号と光信号を変換 する光トランシーバ、IPパケットを電気レベル でルーティングするレイヤ3スイッチからなる。

WRD は波長が異なる光信号の合分波と、光ス イッチ(SW)により光パスを再構築する。図1の ノード6は、ノード1、2、3、5と、それぞれ 波長入3、入4、入2、入1による光パスで接続さ れ、WRD はこれらの波長をファイバパスに追加 (Add) あるいはファイバパスから取り出す (Drop)機能をもつよう波長依存性カプラとスプ



リッタが配置されている。波長を Add および Drop する機能を A/D と略記する。また、ノード1と5を接続す る波長 λ 5 は、ノード6を通過(PT: Passing-Through)する。この WRD において波長 λ 4 は、SW が A/D 状態に 設定されているときは、ノード1と接続する光パスを構成するが、SW を PT 状態に設定すると、ノード6を 通過し、例えば隣のノード5 で λ 4 を A/D とすればノード1と5を接続する光パスに変更できる。このよう に、光 SW を含む WRD は波長の A/D あるいは PT 状態を選択制御することで、光パスを再構築することができ る。本論文では、この機能をもつ WRD を再構築性光 ADM(R-OADM: Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)[3]とよぶ。

このような機能をもつものとして、図 2 に示す R-OADM を作成した[4]。この R-OADM は、4 波長を合分 波するカプラ、スプリッタ、および4つの光スイッチ (SW1~SW4)からなる。波長は、CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing)標準で定められる1550nm帯の 8 波長(1470、1490、1510、1530、1550、1570、1590、 1610nm)から 4 波長を選ぶ。SW は機械式 2x2 スイッチ で、電圧 V0 をかけることで 2 つの状態 (C1 と C2) の どちらかを選択できる。制御信号は、制御信号ポート の IP/シリアルコンバータを経由し、制御/モニタイン ターフェースが受信し、電圧セレクタがどの SW に V0 を印加するかを選択する。IP/シリアルコンバータは、 IP アドレスを付与でき、外部の制御システムからの制 御 IP パケットを受信し、制御信号を取り出してシリア ル信号に変換して制御/モニタインターフェースに送信する。



ネットワークからの多重光はスプリッタで分波し、例えば波長λ1はSW1に入射する。SW1がC1状態のと きλ1は通過し、波長λ1の光トランシーバが接続されていれば、これに受信される。光トランシーバの出力 光はSW1を経由し、カプラで合波されてネットワークに送信される。すなわち、SWがC1状態のとき光トラ ンシーバが接続されていれば、その波長の光はAdd/Dropされる。他のR-OADMが接続されていれば、この R-OADMの状態により送信先が定まる。SWがC2状態のとき、分波された光はカプラに送信され、合波されて 再びネットワークに戻る。すなわち、SWがC2状態のとき、その波長の光はR-OADMを通過する。

作成した R-OADM の光損失を測定した結果を図3に示す。図3(a)は、各波長のAdd ポートから入力し、ネットワークへの出力ポートとの間の損失を測定し、得られた4つの結果を合わせたグラフである。SWをC1 状態に設定して測定したため、光トランシーバを接続した場合に波長をAdd するときの損失になる。図3(b) は、ネットワーク側から入力し、ネットワークへ出力する損失の測定結果である。SWを1つだけC2状態と





し、他の SW は C1 状態とした 4 つの場合の測定結果を合わせたグラフであり、各波長の光が R-OADM を通過する (PT) 場合の損失に相当する。各使用波長で Add 損失が 3~4dB、通過損失が 3.5~4.5dB であった。この損失は、光が通過するカプラ、スプリッタ、SW、コネクタの全損失を含む。また、使用波長以外では、損失は 30dB 以上で遮断できていることがわかる。

3.光パス再構築実験

3.1 実験ネットワークと制御エンジン

上記の R-OADM を用い、遠隔制御により SW の波長状 態を選択し、光パスを再構築する実験ネットワークを 構築した。ネットワーク構成を図 4 に示す。4 つのノ ードを双方向 2 心 SM ファイバでリング状に接続した。 ファイバパスは、時計回り伝送用に $\Phi1 \sim \Phi4$ 、反時計 回り伝送用に $\Phi5 \sim \Phi8$ とした。4 つのノードを光パス でフルメッシュ接続すると、 $_4C_2=6$ 本の光パスが必要で あり、これを図 4 のように L1~L6 とした。

この6本の光パスを、時計方向(CW: Clockwise)伝送 と、反時計方向(CCW: Counter Clockwise)伝送に分け

てファイバパスに収容した。また、6 つの光パ スに対し、λ1~λ3の3つの波長を割り付けた。 ファイバパス、光パス、割り当てた波長の関係 を図5に示す。各ファイバパスに多重された光 の波長は全て異なり、物理的な波長多重条件を 満足していることがわかる。

この波長割り付けに従い、WRD として図6に 示すように R-OADM を構成し、実験ネットワーク とした。図6では、カプラをC、スプリッタをS と表示している。R-OADM 中の SW は図示してい ないが、実際は図2に示す構造をしている。ま た、各 R-OADM は4 波長用であるが、実際に使用 する波長しか図示していない。使用した光トラ ンシーバは標準の 1000Base-LX 規格であり、 光出力パワーと最小受光レベルとの差は 22dBであり、ファイバに収容される光パス の通過損失が、22dB以下となるように、ノ ード間のファイバ長を定めた。この結果、 図 6 に示すように、ノード間距離は 6km、 5km、10km、10km のファイバ長となった。 また、以下に示す光パス再構築実験におい て、パケット転送用に各ノードにパソコン を1台ずつ(PC1~PC4)設置し、転送される パケットのモニタ用に LAN アナライザ(LA) をノード1に設置した。

R-OADM を制御する制御エンジン (Control Engine)を図7に示すように実装 した。主要機能は制御システム (Control System) 部にあり、ネットワーク管理者は ウエブブラウザからインターネット経由で アクセスする。R-OADM の制御信号ポートは、



| CW | CCW | | | | |
|---|------------------------------|--|--|--|--|
| Φ1 | Φ5 | | | | |
| (1→2) L1(λ1), L2(λ2) | (1→4) L3(λ1) | | | | |
| $\Phi^{2}_{(2 \to 3)}$ L2(λ 2), L4(λ 1), L5(λ 3) | Ф6 (2→1) L1(λ1), L2(λ2) | | | | |
| Φ3 | Ф7 | | | | |
| (3→4) L5(λ3), L6(λ1) | (3→2) L2(λ2), L4(λ1), L5(λ3) | | | | |
| Φ4 | <u>Φ8</u> | | | | |
| (4→1) L3(λ1) | (4→3) L5(λ3), L6(λ1) | | | | |





図6 実験ネットワークの具体的な構成

ノードのレイヤ3スイッチ(L3SW)に接続し、制御エンジンからの制御信号により、各SWを制御する。制御信 号は、IP/シリアルコンバータに付与した IP アドレス宛に TCP/IP により送信するため、ネットワーク中の1 つのノードから光リング中の全R-OADM を全て制御することができる。今回の実験ではノード1に設置し、図 6 に示す CE が制御エンジンである。また、L3SW のルーティングの設定を遠隔設定する機能[5]も制御エンジ ンに実装した。すなわち、L3SW の SNMP(Simple Network Management Protocol)を利用し、制御エンジンから ルーティングを設定するコマンドを送信すると共に、必要に応じてルーティング情報を記載したファイルを TFTP(Trivial File Transfer Protocol)により送信して L3SW を構成する。L3SW は、設定されたルーティン グ情報等を MIB (Management Information Base)に保存する。制御エンジンは、制御に必要な情報を自身の データベースに保持する。

3.2 光パス再構築実験

図 6 におけるネットワークで、光パス再構築のため、R-OADM の SW を表 1 に示す 3 種類の状態(a)~(c)に

設定する実験を行った。(a)~(c)の状 態に設定したとき、構成される光パス を図8に示す。図8(a)は初期状態を表 し、波長 λ1 をノード 1 と 2 で C1 状態 に、λ2をノード1と3でC1状態に、 λ3をノード1と4でC1状態にし、他 の SW はすべて C2 状態に設定したもの である。C1 状態の波長はそのノードで Add/Drop されるため、C1 としたノード 間で光パスが形成される。すなわち初 期状態(a)では、ノード1と他の3ノー ド間で P2P (Point-To-Point) 接続する 光パスが構成される。同様に、状態(b) は4つのノードをフルメッシュ接続し、 状態(c)は、光パスでリング状に接続す る。

初期状態(a)は、ネットワークを新規 建設した場合に相当し、建設後に L3SW の IP アドレスとノード1と IP 通信を する静的ルーティング(Static)を設定 し、ノード1と他の3ノードとが光パ スにより通信できる状態になる。初期 状態(a)のネットワークにおいて、PC1 から PC2、PC3、PC4 に ICMP (Internet Control Message Protocol) $\mathcal O$ echo request をそれぞれ送信した状態で、 制御エンジンから4つのノードのL3SW のルーティングを OSPF (Open Shortest Path First)に変更し、かつ R-OADMの SW を表1の状態(b)に遠隔制御した。 この結果、図8(b)に示すように4ノー ド間の光パスはフルメッシュ接続にな る。この制御を行ったとき、ノード1 のLANアナライザ(LA)によりモニタし たパケットを図9に示す。この図は、 モニタしたパケットを種別ごとに分類 し、モニタした時間に対しプロットし たものである。制御信号の送信前には、 ノード 1 から他の 3 ノードへの echo



図7 制御エンジンから R-OADM の制御

表1R-OADM のスイッチの設定

| LP | Wavelength | | Node 1 | | Node 2 | | Node 3 | | | Node 4 | | | | |
|----|------------|------|-------------|-------------|--|--|--------|-----|-----|-------------|--------------|-----|-------------|-----|
| | (nm) | | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) | (a) | (b) | (c) |
| L1 | λ1 | 1590 | C1 | C1 | C1 | C1 | C1 | C1 | | | \setminus | | | |
| L2 | λ2 | 1530 | C1 | C1 | C2 | C2 | C2 | C2 | C1 | C1 | C2 | | \setminus | |
| L3 | λ3 | 1510 | C1 | C1 | C1 | $\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{$ | | | | \setminus | $\mathbf{>}$ | C1 | C1 | C1 |
| L4 | λ4 | 1570 | | | \geq | C2 | C1 | C1 | C2 | C1 | C1 | | \setminus | |
| L5 | λ5 | 1550 | \setminus | \setminus | $\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{\mathbf{$ | C2 | C1 | C2 | C2 | C2 | C2 | C2 | C1 | C2 |
| L6 | λ6 | 1610 | | | | | | | C2 | C1 | C1 | C2 | C1 | C1 |



図8R-OADMのSW 設定により作られる光パス

request と echo reply パケットが観測され、OSPF へ変更する制御パケットが TELNET パケットとして観測さ れた。OSPF へ変更する制御パケットは、最初にノード4 へ送信したため、ノード 1-4 間の ICMP パケットが 2.7 秒後に消滅し、OSPF パケットが 1.94 秒後に観測された。これは、ノード4 の L3SW で OSPF が設定され、 リブートされたためパケットが消滅し、その後、起動した OSPF が隣接する L3SW を探すパケットの送信を開 始したものと考えられる。制御エンジンは、続けて OSPF 設定信号をノード3、2、1 と送信し、ノード4 と同 じ状態が観測された。最後にノード1 の OSPF が起動され、ノード1 と他の3 ノードとの間で ICMP パケット

が再び観測された。結局、最初の ICMP パケットが消滅してから再度3ノード間 でパケットが再開されるまで、19.37 秒 かかったことが分かる。同時に、R-OADM のSW制御により、フルメッシュの光パス 接続が完了しているが、ノード1でパケ ットモニタをしているため、他のノード 間のパケットはモニタできず、次の実験 で確認した。

次の実験では、図8(b)のフルメッシュ 接続の状態から、(c)のリング接続に再構 築する実験をおこなった。リング接続に 再構築するには、R-OADMのSWを表1の (b)から(c)に変更する。例えば、ノード 1と3の R-OADM において、 λ 2の SW を C1からC2に変更すれば、ノード1と3 でλ2の光はブロックされ、光パス L2 は 消滅する。ノード1からノード3へ ICMP のecho request パケットを連続して送信 しながら、R-OADM の SW 制御信号を送信 し、パケットをノード1でモニタした。 結果を図10に示す。制御信号を送信する 前に、OSPF は既に起動されているため、 OSPF パケットと、ノード1と3間の echo request と echo reply パケットが観測さ れた。R-OADM の制御信号を送信すると制 御用の TCP パケットが観測され、その後 0.21 秒後に ICMP パケットが消滅した。 この6秒後に、ノード4宛の echo request が観測され、ノード 2 から echo reply パケットが観測された。この結果から、 R-OADM の制御信号により光パスが変更





図 10 フルメッシュ接続からリング接続へ光パスの再構築

される時間は、パケットモニタベースで 0.21 秒かかること、使用中の光パス(L2)が消滅した場合、OSPF が 代替ルートを検出し、パケット送信が再開されるまで6秒かかることがわかる。また、図 10 からノード 1-3 間のトラフィックは、直接接続する光パス L2 が消滅した場合、ノード1 からノード4を経由する光パス L3 を経由して echo request がノード3に送信され、ノード2を経由する光パス L1 により echo reply を受信す るようルーティングが変更されたことがわかる。すなわち、ノード間のトラフィックを送受信する光パスが 再構築されたことがわかる。また、同時に、ノード1と3の間でパケット送受信が行われているため、ノー ド2と3、ノード3と4の間も光パスで接続されており、変更前には、この光パスが存在したことが分かる。

次の光パス再構築実験として、状態(c)のリング接続から、フルメッシュ接続(b)に戻す実験を行った。パ ケットをモニタした結果を図 11 に示す。この実験結果は、図 8(c)のリング接続状態において、ノード1か らノード3へ echo request を連続して送信し、R-OADMの SW を表1の状態(b)に変更し、パケットをモニタ したものである。R-OADMの SW を変更する前は、図 10の最後の状態と同じであり、echo request はノード

1からノード4を経由し、echo reply はノード2を経由してノード1で受信 されている。R-OADM の SW を変更する と、図11に示すように、ノード2から の echo reply がノード 3 からの echo reply 受信に変わり、次いでノード 4 への echo request がノード3への echo request へと変化した。この間の変更 は、パケット送信の遅延なく行われた。 これは、ノード2あるいは4を経由す る2ホップの光パスは存在し、R-OADM の変更は直接光パス L2 の追加である ため、OSPF は L2 を検出した時点で直 接光パスであるL2 に変更したためで あると考えられる。また、直接光パス L2 に変更した後は、L2 により送受信を 続けていることが分かる。



図11 リング接続からフルメッシュ接続へ光パスの再構築

4.まとめ

メトロネットワークや地域ネットワークへの適用を想定し、光 IP ネットワーク用の再構築性光 Add/Drop Multiplexer (R-OADM)を作成し、R-OADM を制御する制御エンジンを実装した。作成した R-OADM は、CWDM 標 準のなかの4波長を対象とし、カプラ、スプリッタ、2x2光スイッチからなる光部分と、光スイッチを制御 する駆動部分からなる。駆動部分は、IP/シリアルコンバータが制御信号を IP パケットとして受信し、そこ からスイッチ駆動信号を取り出して指定されたスイッチの状態を切り替える。IP/シリアルコンバータは、IP アドレスが付与できるため、1箇所の制御エンジンからネットワーク上の複数の R-OADM を制御できる。作成 した R-OADM では、制御信号をレイヤ3スイッチを経由して受信する構造とした。

作成した R-OADM を用い、4 ノードを双方向 2 心光ファイバでリング状に接続し、波長多重した信号を送受 信する実験ネットワークを構築して、光パス再構築実験を行った。光パスは、4 ノードを最大でフルメッシ ュ接続できるよう6 つの光パスを多重する設計を行った。このネットワークにおいて、1 つのノードと他の 3 つのノードを P2P (Point-To-Point)接続する構成を初期状態とし、OSPF を動作させて P2P からフルメッシュ 接続に光パスを再構築する実験をおこなった。続いて、フルメッシュからリング状に接続する再構築を行い、 R-OADM により光路を変更することと、OSPF によりルーティングを動的に変更することで、本 R-OADM から成 る光 IP ネットワークと制御エンジンの基本性能を明らかにした。R-OADM のスイッチ切り替えにより光パス を遮断した場合、パケットが停止するまでに、パケットモニタベースで 0.21 秒要すること、直接光パスを遮 断し、ホップを1 つ経由する迂回ルートを OSPF により動的に探索し、6 秒後にパケット転送が再開されるこ とが分かった。また、逆に直接光パスを追加する場合には、パケット転送の遅延なく迂回パスから直接光パ スに変更されることも明らかになった。このように、光パスを削除する場合、光パスを追加する場合の両方 ともに、光パスを再構築できることを明確にした。

【参考文献】

- [1] B.St Arnaud, Jing Wu and B.Kalali, "Customer-controlled and -managed optical networks", IEEE Journal of Lightwave Technology,vol.21,No.11,pp.2804-2810,2003.
- [2] B.Mukherjee, "WDM optical communication networks: Progress and challenges", IEEE Selected Areas in Communications, vol.18, pp.1810-1824, Oct., 2000.
- [3] Hongyue Zhu and B.Mukherjee, "Online connection provisioning in metro optical WDM networks using reconfigurable OADMs", *J. Lightwave Tec.*, vol. 23, pp2893-2901, Oct. 2005.

- [4] M.Hashimoto, A.Ueno, M.Taniue, S.Kawase, O.Koyama.Y.Katsuyama. "Design and control system for regional CWDM optical IP networks with reconfigurable optical add/drop multiplexers", Proc. of The 9th ConTEL, pp.23-30, Zagreb, Croatia, Jun., 2007.
- [5] O.Koyama, K.Nishikawa, T.Onishi and Y.Katsuyama, "Centralized system for physical layer management in CWDM optical ring IP networks", Proc. of Optoelectronics & Communications Conference, pp.366-367, Seoul, Korea, July, 2005.

〈発表資料〉

| 題名 | 掲載誌・学会名等 | 発表年月 |
|--|---|------------|
| Design and Control System for Regional CWDM Optical IP Networks with Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexers | The 9th International Conference on Telecommunications 2007 (conTEL2007), Zagreb, Croatia | June, 2007 |
| Traffic Grooming & Wavelength | The 12th Optoelectronics & Communications | July, 2007 |
| Assignment System over www for | conference, fokonama, Japan | |
| Regional WDM Optical IP Networks | | |
| Lightpath Reconfiguration in Regional | The 32nd Annual IEEE Conference on Local | Oct., 2007 |
| IP-over-WDM Networks by a Centralized | Computer Networks (LCN2007) | |
| Control System | | |