

# 特別研究報告

## 題目

波長予約に基づく高速光パス設定方式の実装と評価

## 指導教員

村田 正幸 教授

## 報告者

大橋 正稔

平成 18 年 2 月 20 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

## 内容梗概

アクセス網の広帯域化、および、P2P をはじめとする通信の多様化により、基幹ネットワークにおいて高速かつ大容量通信に対する要求が高まっている。波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術は、複数の波長の光信号を多重化して伝送することにより高速かつ大容量のデータ転送を実現する技術である。WDM 技術の利用形態として、データ発生時にオンデマンドで送受信ノード間に波長チャネル (光パス) を設定し、光パス設定後にデータの転送を行う方式が考えられている。この場合、WDM に基づくネットワークを効率良く利用するためには、通信を開始するまでの時間を小さくすることが重要となる。

我々の研究グループでは、通信要求発生から通信開始までの時間が光パス設定の試行回数に大きく依存することに着目し、往復伝播遅延時間あたりに光パス設定を 2 回試みることで光パス設定を高速化する方式を提案し、シミュレーション評価を通してその有効性を示している。しかし、実際にはシミュレーションにおいて遅延が発生しないとモデル化しているメッセージの処理遅延や OXC の設定遅延があり、これらの遅延が光パス設定遅延に与える影響は未だ明らかになっていない。そこで本報告では、光パスの設定および解放を行う GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) プロトコルを PC 上に実装し OXC (Optical Cross Connect) と組み合わせて高速光パス設定方式の光パス設定実証実験を行った。実験の結果、OXC の設定変更に必要となる時間は最大で 10ms となり、光パス設定遅延に大きな影響を与えることが明らかとなった。メッセージの処理遅延は無視できるほど小さいが、OXC の設定遅延は 10ms かかり、非常に大きいことがわかった。また従来型光パス設定方式と高速光パス設定方式を比較および評価を行った結果、往復伝播遅延時間が 0.2ms の環境において、リンク負荷が 0.4 以下の場合に光パス設定遅延を 1.5ms 短縮可能であることがわかった。

## 主な用語

WDM (Wavelength Division Multiplexing)、光パスネットワーク、波長予約、光パス設定遅延

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>WDM ネットワークにおける光パス設定方式</b>	<b>6</b>
2.1	GMPLS . . . . .	6
2.1.1	LMP . . . . .	8
2.1.2	OSPF-TE . . . . .	8
2.1.3	RSVP-TE . . . . .	8
2.2	波長予約に基づく光パス設定方式 . . . . .	9
2.2.1	フォワード型 . . . . .	9
2.2.2	バックワード型 . . . . .	11
2.2.3	ハイブリッド型 . . . . .	11
<b>3</b>	<b>ハイブリッド型光パス設定方式の実装</b>	<b>14</b>
3.1	GMPLS の実装 . . . . .	16
3.2	OXC の制御処理部の実装 . . . . .	16
<b>4</b>	<b>光パス設定遅延の評価</b>	<b>17</b>
4.1	実験環境 . . . . .	18
4.2	OXC 制御遅延の計測 . . . . .	18
4.3	パス設定要求到着モデル . . . . .	27
4.4	バックワード型光パス設定方式との比較評価 . . . . .	30
<b>5</b>	<b>おわりに</b>	<b>31</b>
	謝辞	<b>32</b>
	参考文献	<b>33</b>

## 目 次

1	GMPLS におけるスイッチング	7
2	フォワード型光パス設定方式:成功時	10
3	フォワード型光パス設定方式:失敗時	10
4	バックワード型光パス設定方式:成功時	12
5	バックワード型光パス設定方式:失敗時	12
6	ハイブリッド型光パス設定方式:成功時	15
7	ハイブリッド型光パス設定方式:失敗時	15
8	GMPLS 実装プログラムの概要	17
9	光パス設定遅延の計測実験の環境構成	18
10	使用する PC および光端子付スイッチングハブ	19
11	使用する OXC	20
12	実験環境写真	21
13	各ノード間のメッセージの送受信と光パス設定のタイムチャート	23
14	パス保持時間固定 (5s) 時のバインド解除・設定メッセージ間隔に対する制御 遅延時間	28
15	バインド解除・設定メッセージ間隔固定 (1ms) 時のパス保持時間に対する制 御遅延時間	29
16	パス設定要求到着モデル	30
17	光パス設定遅延の比較結果	31

## 表 目 次

1	往復伝播遅延の計測結果 . . . . .	25
2	OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測時刻：制御メッセージ間隔が短い (約 1ms) 場合 . . . . .	25
3	OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測時刻：制御メッセージ間隔が長い (約 1000ms) 場合 . . . . .	26
4	OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測間隔と設定遅延：制御メッセージ間隔が短い (約 1ms) 場合 . . . . .	26
5	OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測間隔と設定遅延：制御メッセージ間隔が長い (約 1000ms) 場合 . . . . .	27

## 1 はじめに

近年の波長分割多重 (WDM) 技術の発達により、光ネットワークにおける利用可能帯域が拡大し、光ネットワークが増加の一途をたどるインターネットトラヒックの収容に大きな役割を担うことが期待されている。WDM 技術は複数の周波数 (波長) の光信号を多重化して光ファイバで伝送することにより、高速かつ大容量のデータ転送を実現する技術である。WDM 技術の高速データ通信への適用形態として、データ発生時に波長を割り当て、コネクション設定を高速に行い、その後にデータ転送を行う方式が考えられている [1]。この場合、送受信ノード間で波長のチャンネルを設定することで光パスを設定し、通信を行う。GMPLS は IP ネットワークで用いられるパケット転送技術 MPLS (Multi Protocol Label Switching) の概念を WDM などの回線交換型のネットワークにも適用可能となるよう拡張させたプロトコルである。GMPLS では波長に対してラベルをつけ、ラベルによってスイッチングを行うことにより送受信ノード間での光パスの確立を可能としている。

光パス設定をネットワーク内の各ノードが分散して行うための光パス設定方式として、波長を送信側、または、受信側から予約する光パス設定方式 (それぞれ、フォワード型光パス設定方式、バックワード型光パス設定方式) がある [2]。フォワード型光パス設定方式は送信ノードから受信ノードに向かって各リンクで波長を予約していく光パス設定方式である。一方、バックワード型光パス設定方式は、送信ノードから受信ノードへ向かう時は各リンクの波長の利用状況を調べるのみで、それに基づいて受信ノードから送信ノードに向かって各リンクの波長を予約していく。文献 [2] では、光パス設定時における波長の予約時間、および、予約する波長数の違いに基づいてフォワード型/バックワード型光パス設定方式の比較評価が行われている。その結果、フォワード型光パス設定方式よりもバックワード型光パス設定方式のスループット性能が良いことが示されている。また、文献 [3,4] ではバックワード型波長予約をもとにして、光パス設定時の棄却率を小さくする方式が提案されている。しかし、上記を含む分散型波長予約に関する多くの研究では、受信ノードから送信ノードに対してのみ波長予約を試みるのみであり、往復伝搬遅延時間あたりの光パス設定の試行回数は 1 回である。そのため、光パス設定のための波長予約に失敗すると、波長予約に成功し、通信が可能となるまでの時間は往復伝搬遅延時間だけ遅れる。

それらの波長予約手法の重要な評価指標のひとつとして光パス設定遅延 (光パス設定要求が発生してから光パスが設定されるまでの時間) が挙げられる [5]。フォトニックネットワークにおいて高速に光パス設定を提供することにより、様々なトランスポートアプリケーションの利用可能性が広がる。例えば Lambda-Grid 環境では広域計算を実施する前に仮想リンクを構築する必要があるが、この初期セットアップ時間を小さく抑えることでネットワークの利用率が高まり、Lambda-Grid の有用性を高めることができる。

そこで我々の研究グループでは光パスの再設定時の波長予約動作に着目した高速光パス設定方式 [6] を提案している。高速光パス設定方式はフォワード型光パス設定方式とバックワード型光パス設定方式を組み合わせ、常に波長利用情報を収集することで、光パス設定要求が棄却されて再設定を行う際に直前に収集した波長利用情報を利用する。また、往復伝播遅延時間あたりに光パス設定を 2 回試みることを可能としている。その結果、制御信号の往復回数が少なくなり、高速な光パス設定を行うことができる。本報告ではバックワード型光パス設定方式との比較する上での便宜上、この高速光パス設定方式をハイブリッド型光パス設定方式と呼ぶ。我々は文献 [6] においてシミュレーションにより性能評価を行いその有効性を示したが、シミュレーションにおいて遅延が発生しないとモデル化しているメッセージの処理遅延や OXC の設定遅延が光パス設定遅延に与える影響は明らかになっていないのが現状である。

そこで本報告では我々の研究グループが提案したハイブリッド型光パス設定方式を実装し、実証実験を通してその有効性と実用性を評価する。シミュレーション評価では考慮されておらず、実証実験による評価で初めて明らかになる点としては、例えば、提案方式における光パス設定高速化のためのオーバーヘッドの大きさに関する評価が挙げられる。提案方式では従来方式と比較して、パス設定時に中継ノードが受信する PROBE メッセージ、RESERVE メッセージの数が大きくなっており、実証実験を通してこのオーバーヘッドが小さいことを示すことにより、提案方式の有効性が確かめられる。このように、ハイブリッド型光パス設定方式を実装し、実証実験を通して評価することでハイブリッド型光パス設定方式の有効性を明らかにすることが本研究の目的である。

本報告の内容は以下の通りである。まず 2 章において WDM ネットワークにおける光パス設定手法と、既存の光パス設定方式および提案方式を説明する。3 章ではハイブリッド型光パス設定方式の実装の概要を説明する。4 章では光パス設定遅延の要因となる OXC 設定遅延を個別に測定し、OXC の設定に関する特性を調べた上で、バックワード型光パス設定方式とハイブリッド型光パス設定方式の実装プログラムによる光パス設定遅延の計測実験を通して、メッセージの処理遅延や OXC の設定遅延が光パス設定遅延に与える影響について議論を行う。最後に、5 章にて本報告のまとめと今後の課題を述べる。

## 2 WDM ネットワークにおける光パス設定方式

### 2.1 GMPLS

GMPLS は IP ネットワークで用いられるパケット転送技術 MPLS (Multi Protocol Label Switching) の概念を光ネットワークなどの異なるネットワークにも拡張、発展させたプロトコ

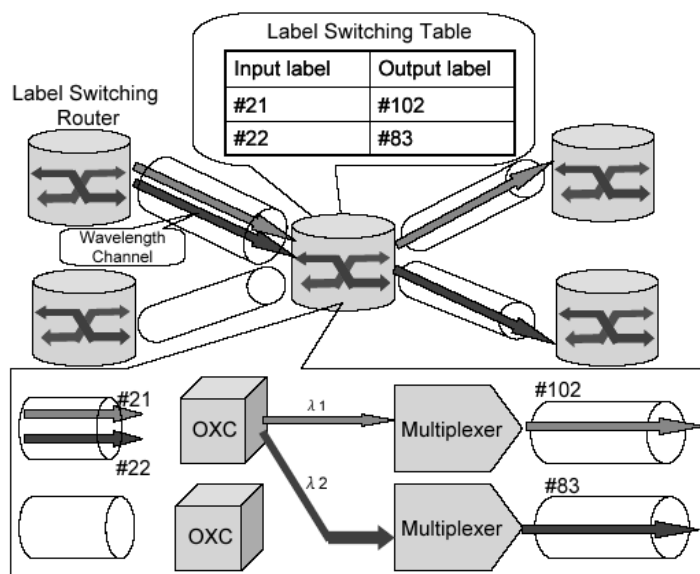


図 1: GMPLS におけるスイッチング

ルである。MPLS は IP パケットにラベルと呼ばれる短い固定長の識別標識をつけ、IP ヘッダーを見ることなくラベルをもとに目的の場所まで非常に効率よく転送できる。このラベルによる効率のいい転送方式を IP ネットワーク以外のあらゆるネットワークに適用したのが GMPLS である。GMPLS では波長に対してラベルをつけ、ラベルによってスイッチングを行うことにより光信号を電気信号に変換することなくスイッチングを可能としている。図 2.1 に GMPLS の例を示した。入力リンクでは波長  $\lambda_1$  には #21 のラベルが割り当てられており、出力リンクでは波長  $\lambda_1$  には #102 のラベルが割り当てられている。OXC には入力ラベルと出力ラベルが対応付けされたテーブルがあり、スイッチングテーブルとラベルによってスイッチングを行うことにより、2 つのリンクが繋がり 1 つの光パスが設定される。

GMPLS ではデータチャンネルとは別に制御チャンネルを設け、制御チャンネルを用いて制御メッセージの通信を行い光パスの設定および解放を制御している。この際、制御チャンネルの確立および維持などを行う LMP (Link Management Protocol) と波長の予約および解放と資源の管理を行う RSVP-TE (ReSerVation Protocol extended for Traffic Engineering)、ルーティングを行う OSPF-TE (Open Shortest Path First extended for Traffic Engineering) が働いている。



### 2.1.1 LMP

LMP は主に制御チャネルの管理とリンク属性の相関の確認を行う。制御チャネルの管理とは隣接ノード間の制御チャネルの設定と維持および状態の管理であり、ノード間で1本以上の制御チャネルを必要とする GMPLS では必要不可欠な制御である。制御チャネルの設定は Config メッセージの交換により行われ、Hello メッセージを定期的に交換することにより制御チャネルの維持と状態の管理を行う。リンク属性の相関の確認は、TE リンクやデータリンクのローカルとリモートの相関を取得することである。MPLS では同一物理インターフェース内部の論理パスを扱っていたのでこの機能は必要なかったが、GMPLS では複数の物理インターフェースを扱うので、隣接ノード双方の各物理インターフェースの相関を確認する必要がある。相関の確認は LinkSummary メッセージの交換と、それに対する LinkSummaryAck/LinkSummaryNack メッセージの返信によって行われる。また取得した相関の確認として Test メッセージの送信とそれに対する TestStatus メッセージの返信が行われる。また、オプションとしてエラー管理機能が備わっており、エラーの検出が可能である。

### 2.1.2 OSPF-TE

OSPF-TE はリンクステート型のルーティングプロトコルであり、各ノードがネットワークトポロジに関するデータベースを持ち、そのデータベースに基づいて宛先ノードへの最短経路を計算する。1つのノードが同一領域内のネットワークトポロジに関する情報をすべて持つように、各ノードは隣接リンクのリンク状態を調べ、隣接ノードに対してその状態を広告する。各ノードは隣接リンクの状態の変更や、広告された同一領域内のネットワークトポロジに関する情報を受信によりデータベースを更新し、動的に最短経路を導出することができる。

### 2.1.3 RSVP-TE

光パスを設定するには、波長変換器などの特殊な装置を用いない限り送受信ノード間の全リンクで同一の波長を用いなければならないという波長連続性制約が存在する。また、光パスに利用することができる波長は限られており、何らかの制御を行わなければ複数の光パス設定要求による資源の競合が発生してしまう。そこで、RSVP-TE により送受信ノード間の全リンクで同一波長を予約し、資源の競合を回避する。光パス設定方式には波長予約を送信ノードから受信ノードに向けて行うフォワード型光パス設定方式と、受信ノードから送信

ノードに向けておこなバックワード型光パス設定方式が提案されている。次節にて各光パス設定方式と、提案手法であるハイブリッド型光パス設定方式について説明する。

## 2.2 波長予約に基づく光パス設定方式

分散型 WDM ネットワークでは、波長を予約する際にはリンクの伝播遅延時間の影響によって他の光パス設定要求と競合する。リンクの伝播遅延時間の影響を考慮した光パス設定方式としてフォワード型光パス設定方式とバックワード型光パス設定方式がある。しかしこれらの手法ではリンクの伝播遅延により要求が棄却された場合に新たに波長利用情報を収集しなおさなければならないために再設定に時間がかかり、結果として光パス設定にかかる時間が大きくなる。そこでハイブリッド型光パス設定方式が提案された。

本章では、従来手法であるフォワード型光パス設定方式とバックワード型光パス設定方式について詳しく説明した上で、提案手法であるハイブリッド型光パス設定方式について説明する。

### 2.2.1 フォワード型

フォワード型光パス設定方式のメッセージの様子を図 2、図 3 に示す。フォワード型光パス設定方式は、送信ノードにデータ転送要求が到着した時に、経路および波長を選択し、その波長を送信ノードから受信ノードまで予約する方式である。予約する波長を RESERVE 信号に書き込み、送信ノードから受信ノードまでの経路上において、RESERVE 信号中の波長の予約を試みる。他の光パス設定によって波長が予約されている場合、光パスの設定は失敗となり送信ノードへブロックされたことを通知する NACK 信号が送信される。それと同時に、予約を行った波長を開放する RELEASE 信号を送信ノードに向けて送り出す。受信ノードに RESERVE 信号が到着した場合、送受信ノード間のすべてのリンクで波長の予約に成功しているため、光パスを設定されたことを表す ACK 信号を送信ノードに送る。送信ノードでは、ACK 信号を受け取るとデータの転送を開始し、データ転送が完了すると波長を開放する RELEASE 信号を受信ノードに向けて送り出す。

フォワード型光パス設定方式における光パス設定要求の棄却は、RESERVE 信号転送時に予約する波長が既に他の光パス設定に利用されている場合に発生する。その際は、中間ノードはそれまで予約した波長を開放するための RELEASE 信号と、光パス設定要求が棄却されたことを知らせるための NACK 信号を送信ノードに対して送信する。

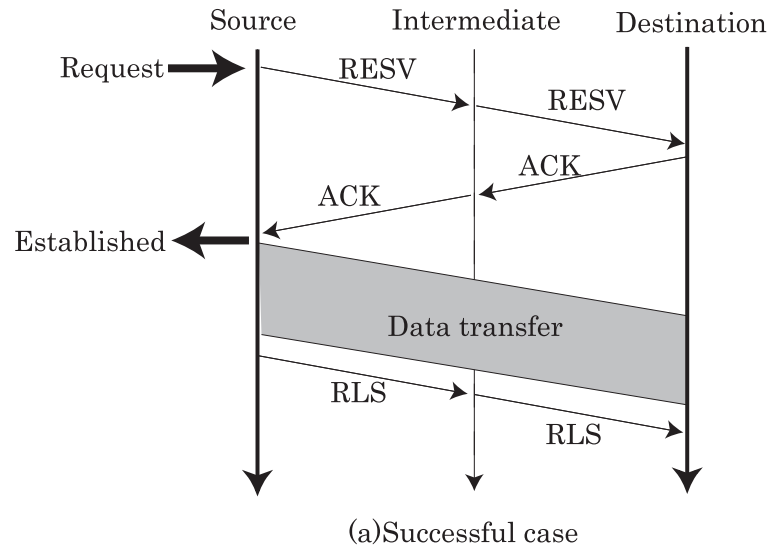


図 2: フォワード型光パス設定方式:成功時

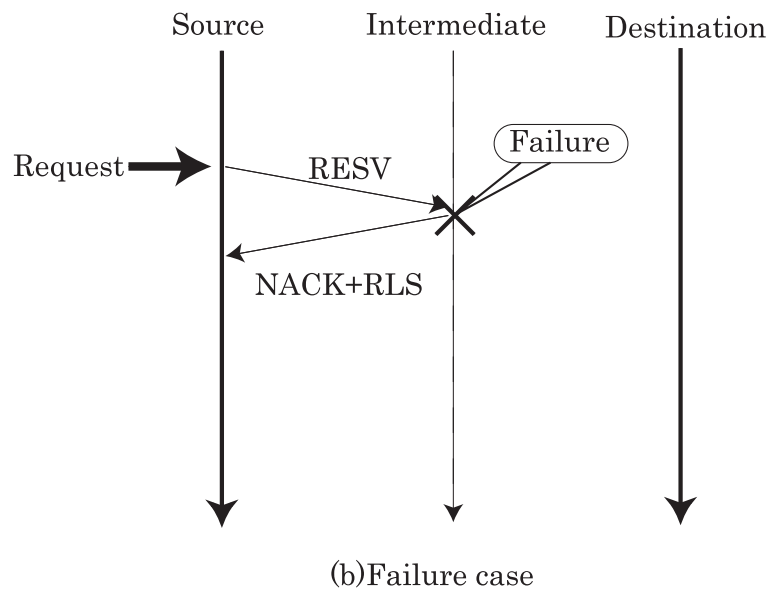


図 3: フォワード型光パス設定方式:失敗時

### 2.2.2 バックワード型

バックワード型光パス設定方式のメッセージの様子を図4、図5に示す。バックワード型光パス方式では、データ転送要求の発生時に送信ノードは受信ノードまでの経路を選択する。送信ノードに接続されている経路上のリンクにおいて利用可能な波長を、送信ノードはPROBE信号として登録する。そして経路にそってPROBE信号を受信ノードへ送信する。この時、PROBE信号にはその経路で利用可能な波長情報が格納される。そして、この経路上に存在する中継ノードがこのPROBE信号を受信する。この時、中継ノードはさらに中継ノード自身のリンク中で利用可能な波長情報をPROBE信号に反映させる。もし利用可能な波長がPROBE信号に登録されていれば削除する。受信ノードがPROBE信号を受け取ると、PROBE信号中に格納された利用可能な波長集合の中から1波長を選択する。この選択した波長を用いて送信ノードから受信ノードまでPROBE信号の経由した経路にそってその波長を予約する。波長予約はRESERVE信号を用いて行い、受信ノードから送信ノードに向けて行われる。

バックワード型光パス設定方式における光パス設定要求の棄却には2種類ある。1つはPROBE信号により利用可能な波長を調べた結果、利用可能な波長が存在しないと判明した時であり、判明した中間ノードはNACK信号を送信ノードに対して送信する。もう1つは受信ノードから送信ノードに向けて波長を予約する際に、選択した波長についてすでに他の光パスによって波長予約が行われていた場合であり、その中間ノードは送信ノードにNACK信号を送ると同時に、受信ノードに対してRELEASE信号を送り、それまで予約した波長を解放する。バックワード型光パス設定方式では、PROBE信号による利用状況の調査と、実際に波長予約が行われるまでにはリンクの伝播遅延による時間差がある。そのため、この間に他の光パス設定によって波長が使用されている可能性がある。しかし、バックワード型光パス設定方式はフォワード型光パス設定方式に比べて波長の予約時間を短くすることができるため性能が向上し、また、波長の利用状況を動的に収集することから、最新の利用状況に基づいた波長選択が可能となる。

### 2.2.3 ハイブリッド型

ハイブリッド型光パス設定方式の動作を図6、図7に示す。通信要求が送信ノードに到着すると、送信ノードはバックワード型光パス設定方式と同様にPROBE信号を受信ノードに向けて送出する。従来方式と異なる点は、受信ノードでPROBE信号を受け取った時に、RESV信号を送出するだけでなく、PROBE信号を生成し送信ノードに向けて送出する点にある。受信ノードからRESV信号によって波長予約が順次行われている時に、競合により波長予約に失敗すると、送信ノードでは受信ノードから送られてくるPROBE信号から

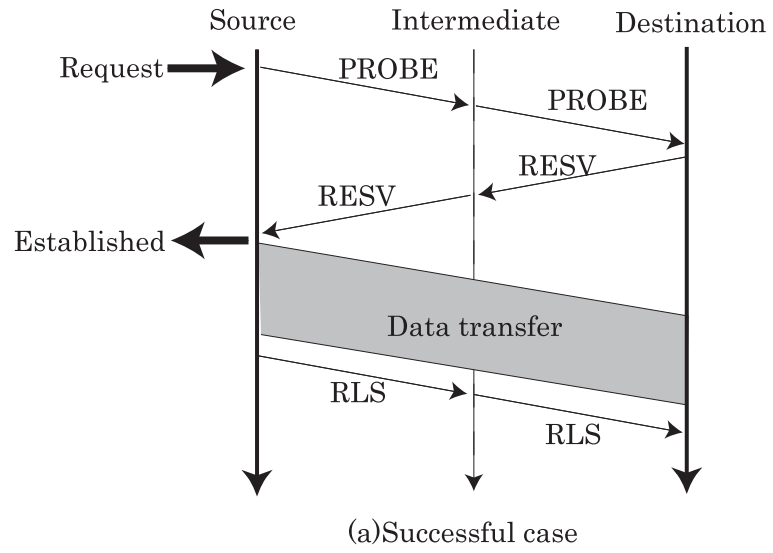


図 4: バックワード型光パス設定方式:成功時

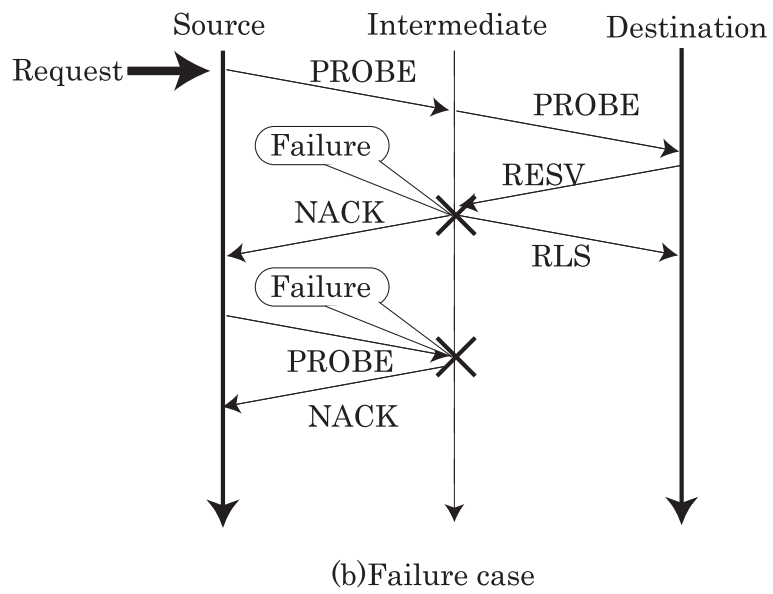


図 5: バックワード型光パス設定方式:失敗時

波長を選択し、フォワード型光パス設定方式と同様に送信ノードから受信ノードに向けて波長予約を試みる。また、バックワード型光パス設定方式と同様に PROBE 信号を生成し、受信ノードに向けて送出する。

以上のように、ハイブリッド型光パス設定方式では往復伝搬遅延時間あたりの波長予約の試行回数が2回となるため、従来方式に比べて波長予約のための制御信号の往復回数が少なくなる。その結果、高速な光パス設定を行うことができる。ハイブリッド型光パス設定方式の詳細な動作は以下の通りである。

### (1) 送信ノードの動作

- (S1) 端末から通信要求を受取ると PROBE 信号を生成し、最初のリンクにおける空き波長を候補波長として PROBE 信号へ書き込み、次のノードへ送出する。
- (S2) 中間（受信）ノードから RESV 信号を受取ると、端末へコネクション設定が完了したことを知らせる。端末は、RESV 信号中に書き込まれた波長を用いて通信を開始する。
- (S3) NACK 信号を受取ると（NACK 信号中の予約波長が空集合の場合）、受信ノードから送られてくる PROBE 信号中の空き波長を調べ、ランダムに選んだ1波長を予約波長とし次リンクの波長を予約する。次に、波長番号を RESV 信号に書き込み、受信ノードに向けて送出する。また、受信ノードから送信ノードにむけての波長予約に備え、(S1) に従って PROBE 信号を再度作成し、受信ノードに向けて送出する。
- (S4) NACK 信号を受取ると（予約波長が空集合以外の場合）、予約波長が書き込まれた RLS 信号を受信端末に送出する。続いて (S3) と同様に RESV 信号および PROBE 信号を生成し、これらの信号を受信ノードに向けて送出する。
- (S5) ACK 信号を受取ると、ACK 信号中に書き込まれた波長を用いて通信を開始する。
- (S6) 通信が終わると最初のリンクで予約された波長を解放するとともに予約波長が書き込まれた RLS 信号を受信端末へ送出する。

### (2) 中間ノードの動作

- (I1) PROBE 信号を受取ると次のリンクでの空き波長の集合と、PROBE 信号中の候補波長の集合の積集合をとり、次のノードへ PROBE 信号を送出する。

- (I2) RESV 信号を受取ると RESV 信号中の予約波長の集合と次のリンクの空き波長の集合の積集合をとる。予約波長が空集合でない場合は RESV 信号を次のノードへ送出する。予約波長が空集合である場合、NACK 信号を送信ノードに向けて送出する。
- (I3) NACK 信号、あるいは、ACK 信号を受取ると、そのまま次のノードへ送出する。
- (I4) RLS 信号を受取ると、次のリンクの予約波長を解放し、次のノードへ RLS 信号を送出する。

### (3) 受信ノードの動作

- (R1) PROBE 信号を受取ると、PROBE 信号中の空き波長を調べ、1 波長をランダムに選び予約波長とする。次に、受信ノードにつながったリンクでその予約波長が空いているかを調べる。空いていない場合は予約波長を空集合とし、NACK 信号を送信ノードへ送出する。空いている場合には予約波長を予約し、RESV 信号を送信ノードへ送出する。また、次のリンクにおける空き波長を候補波長として PROBE 信号へ書き込み、送信ノードに向けて送出する。
- (R2) RESV 信号を受取ると、RESV 信号中の予約波長を調べ、空集合の場合は NACK 信号を送信ノードへ送出する。空集合以外の場合は ACK 信号を送信ノードへ送出する。
- (R3) NACK 信号を受け取ると (NACK 信号中の予約波長が空集合の場合)、送信ノードから送られてくる PROBE 信号中の空き波長を調べ、ランダムに選んだ 1 波長を予約波長として次リンクの波長を予約する。次に、波長番号を RESV 信号に書き込み、送信ノードに向けて送出する。また、次のリンクにおける空き波長を候補波長として PROBE 信号へ書き込み、送信ノードに向けて送出する。
- (R4) NACK 信号を受取ると (予約波長が空集合以外の場合) 予約波長が書き込まれた RLS 信号を受信端末に送出する。続いて (R3) と同様に RESV 信号および PROBE 信号を生成し、これらの信号を受信ノードに向けて送出する。

## 3 ハイブリッド型光パス設定方式の実装

本章では、我々が作成した GMPLS を PC 上に実装するための GMPLS 実装プログラムの概要について説明する。

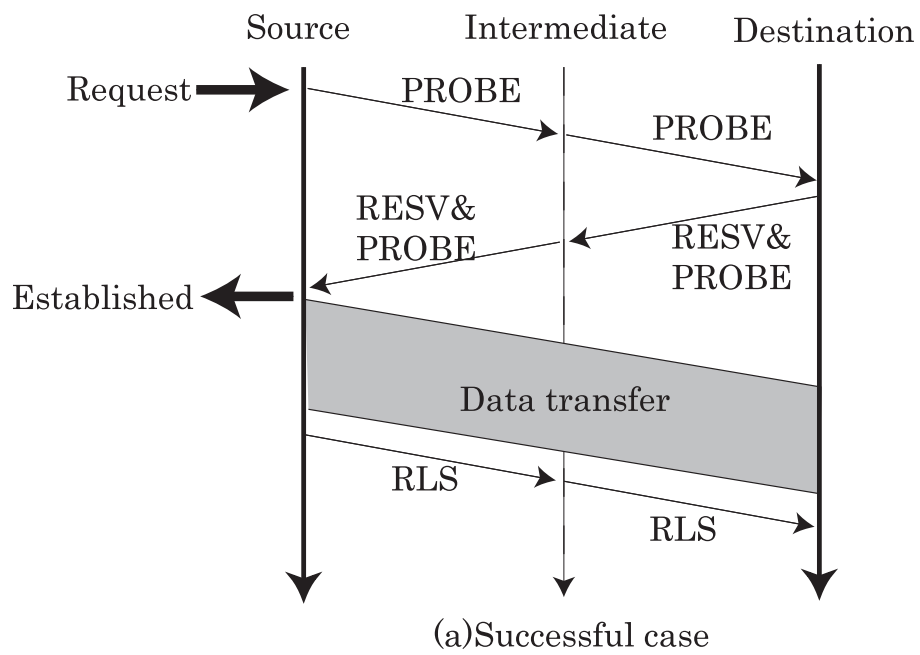


図 6: ハイブリッド型光パス設定方式:成功時

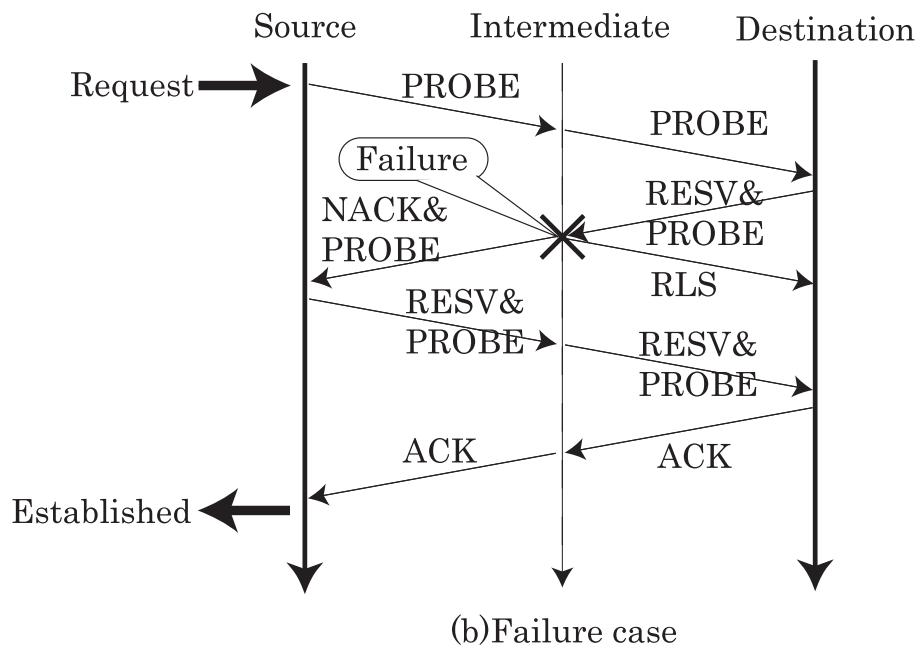


図 7: ハイブリッド型光パス設定方式:失敗時



### 3.1 GMPLS の実装

GMPLS 実装プログラムは C++ 言語で記述しており、Linux kernel 2.6.9 上で動作する。シグナリングメッセージは UDP を用いて通信する。図 8 に実装した制御プログラムの概要を示す。制御プレーンと実装したモジュールについては、資源予約モジュール (RSVP Controller)、ルーティングモジュール (OSPF Controller)、リンクマネジメントモジュール (Link Management Protocol Controller) がそれぞれ対応している。コンソールインターフェースは光パス設定要求のコマンド入力と、光パス設定状況の表示を行う。GMPLS System Manager は Console Interface からのメッセージとシグナリングや制御を行うモジュールからのコマンドを受信する。Path Request Generator はパスの設定と解除の要求を RSVP Controller に対して生成する。要求の発生頻度については、GMPLS System Manager によって設定される。RSVP Controller はリクエストキューを持っており、Path Request Generator からの要求はキューにいれられる。そして、パスの設定、解除と RSVP シグナリングの制御を行う。RSVP Controller がパスの設定を始める際に、Routing Algorithm により指定する経路を用いる。制御プレーンが隣接ノードから RSVP Reserve/Release メッセージを受信すると、RSVP Controller がそれを受け取り、Resource Manager によって選択された波長の予約および解除を行う。RSVP Reserve/Release シグナルは Network Interface を通じて次ノードに転送される。Network Interface では Link Management Protocol Controller が動作しており、転送エラーや隣接ノードとの接続状態の検出を行っている。OSPF Controller はリンク状態情報の交換を行っており、波長資源の予約状況が変化すると制御プレーンを通して隣接ノードに対して予約状況を伝える。OSPF Controller は隣接ノードの広告した情報の受信も行い、受信した情報をデータベースに記録する。その情報は Routing Algorithm による経路選択のために用いられる。なお、本稿ではシグナリングプロトコルを評価するためルーティングアルゴリズムは固定経路であるとし、各目的地ノードへの経路をコンソールから入力して指定している。

### 3.2 OXC の制御処理部の実装

OXC の制御には GSMP (Generalized Switching Management Protocol) が用いられる。OXC 上では GSMP\_slave プログラムが動作しており、受信した GSMP メッセージに基づいて OXC の操作を行う。まず制御プレーンにおいて GMPLS 実装プログラム起動時に OXC に adjacency 確立メッセージを送信し、OXC との adjacency を確立する。一度 adjacency を確立すると、OXC と制御プレーンのノードの間で adjacency を維持するためのメッセージの送受信が定期的に行われる。

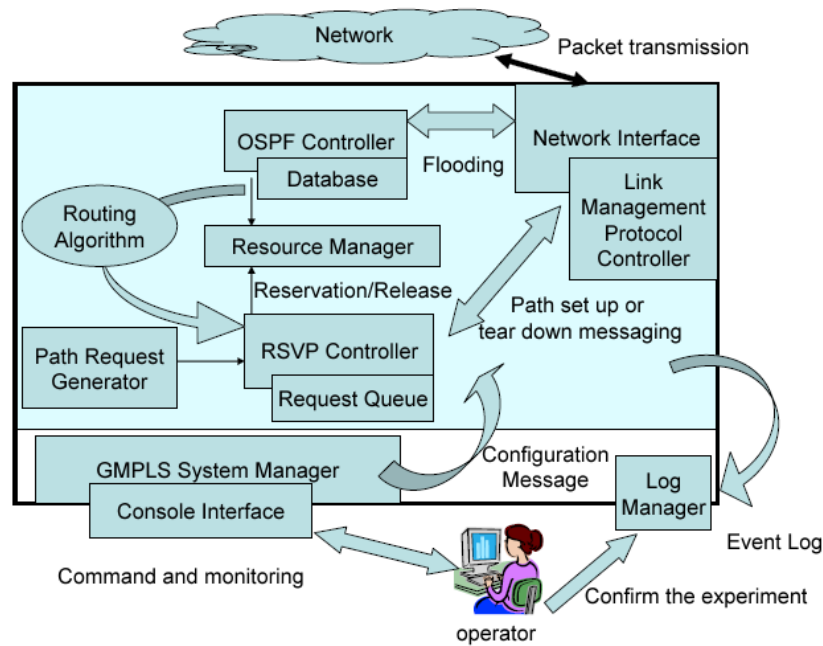


図 8: GMPLS 実装プログラムの概要

GSMP には様々なメッセージが定義されているが、今回は SW 設定を行う Add Branch メッセージと SW 設定解除を行う Delete Branches メッセージの 2 種類のみ用いる。RESV\_PROBE メッセージまたは ACK メッセージがルート上の目的地ノードの直前のノードから目的地ノードに送信される際に、直前のノードは同時に OXC に対して Add Branch メッセージを送信する。メッセージには入力ポート番号と出力ポート番号を指定し、指定入力ポートからの信号を指定出力ポートへ出力するバインド設定を行う。

同様に RELEASE メッセージが送信ノードで生成される際に、送信ノードは同時に OXC に対して Delete Branches メッセージを送信する。メッセージには入力ポート番号と出力ポート番号を指定し、師弟入力ポートからの信号を指定出力ポートへ出力するバインド設定を解除する。

#### 4 光パス設定遅延の評価

本章では実験ネットワークを構築し、OXC の設定遅延の計測とハイブリッド型光パス設定方式とバックワード型光パス設定方式による光パス設定遅延の比較および評価を行う。

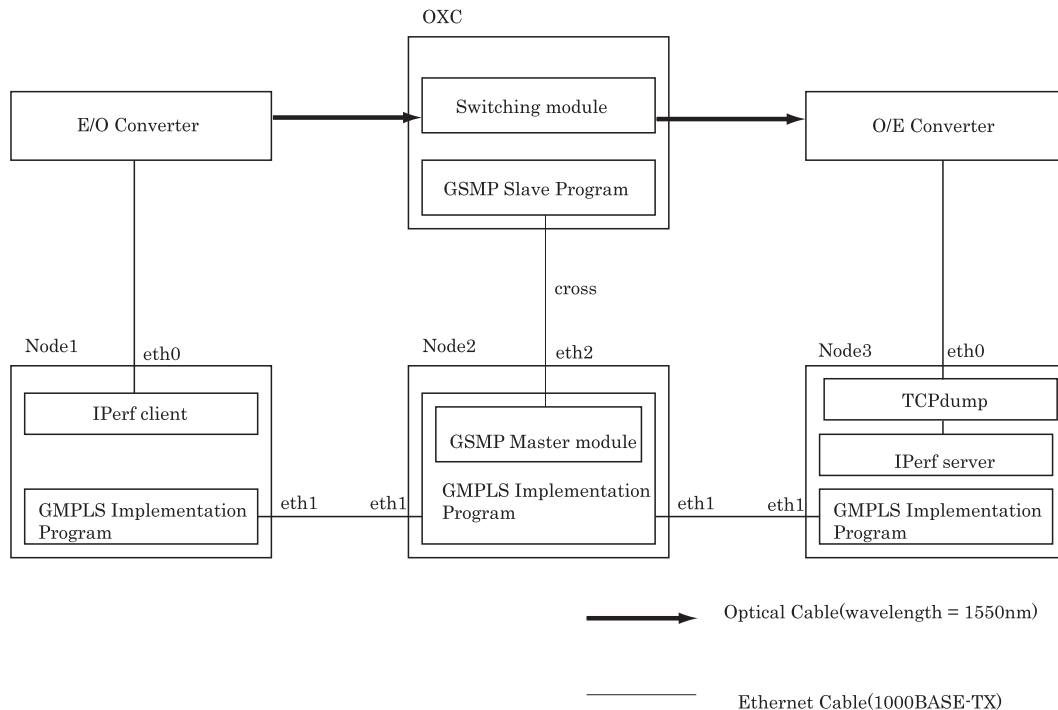


図 9: 光パス設定遅延の計測実験の環境構成

#### 4.1 実験環境

PC 3 台と、波長 1550nm の光端子付スイッチングハブ 1 台、OXC 1 台により構成した実験環境を図 9 に示す。また、実験環境の写真を図 10、11、12 に示す。各ノードでは GMPLS 実装プログラムを動作させ、スイッチングハブを介してイーサネットにより通信を行い、制御プレーンを構成している。またノード 2 と OXC の制御用ポートを接続し、ノード 2 上で動作している GMPLS 実装プログラムから OXC の制御を行う。データプレーンでは、スイッチングハブの VLAN 機能を用いてイーサネットポートと光端子を 1 対 1 で繋ぐことにより E/O コンバータとして動作させる。ノード 1 からのパケットは E/O コンバータにより波長 1550nm の光信号となり OXC によりスイッチングされ、O/E コンバータを介してノード 3 に到着する。

#### 4.2 OXC 制御遅延の計測

光パス設定遅延を計測する前に、本節では OXC 設定遅延を明らかにする。なお、ここで言う OXC 設定遅延とは、OXC 設定変更を開始してから光パス上にデータが流れ始めるまで



図 10: 使用する PC および光端子付スイッチングハブ



図 11: 使用する OXC

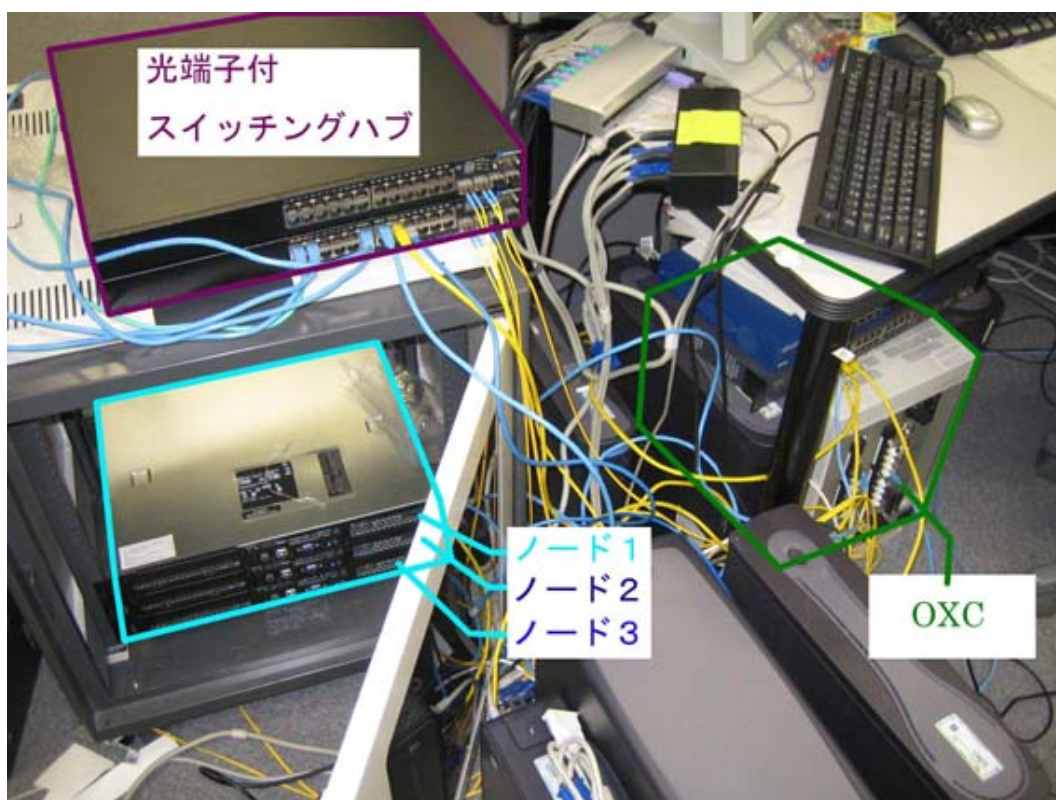


図 12: 実験環境写真

の時間である。4.1 節に示した実験環境においてノード 3 からノード 1 に対して IPerf [7] により UDP パケットを固定レート 80Mbps で送出する。ノード 1 では UDP パケット到着の間隔を tcpdump によって観測する。UDP パケットはおよそ 0.1ms 間隔で送出されるので、OXC の入出力ポートをバインドしている状態では UDP パケット到着の間隔は 0.1ms 前後となる。OXC においてバインドを解除・再設定を行い、UDP パケットの到着をノード 1 で観測し、データプレーンレベルでの OXC 設定遅延を測定した。

1 回の OXC 設定に着目した制御メッセージと OXC 制御に関する特性 OXC の制御に関する GSMP メッセージと、それによる光パス設定の様子を図 13 に示した。PC1 は OXC に対してバインド解除メッセージを送信し ( $t_1$ )、それに対する Ack を受信する ( $t_3$ )。OXC はバインド解除メッセージを受信するとバインドの解除を行い、それにより光パス設定が解除され、PC1 のインターフェース 1 において UDP パケットの受信が止まる。このとき、最後にパケットを受信した時刻 ( $t_2$ ) を記録する。続いて PC1 は OXC に対してバインド設定メッセージを送信し ( $t_4$ )、それに対する Ack を受信する ( $t_6$ )。OXC はバインド設定メッセージを受信するとバインドの設定を行い、それにより光パスが設定され、PC1 のインターフェース 1 において UDP パケットの受信が再開される。このとき、最初にパケットを受信した時刻 ( $t_5$ ) を記録する。バインド解除メッセージに対する Ack を受信した直後 (0.7ms の間隔後) にバインド設定メッセージを送信する場合と、1 秒間隔をあげた場合について計測を行った。

PC1 と PC3 の間および PC2 と OXC の間の往復伝播遅延の計測結果を表 1 に示す。この結果より、PC2 から送信したメッセージが OXC に到着するのが PC2 でメッセージを送信してから 0.079ms (インターフェース 2-6 間の平均伝播遅延:0.158ms/2) 後であり、OXC が切り替わるのは PC1 においてパケットの受信状況が変化する 0.053ms (インターフェース 1-3 間の平均伝播遅延:0.211ms/4) 前であると近似できる。以上の結果より、伝播遅延を考慮した OXC 設定遅延を算出することができる。

バインド解除メッセージの送信時刻 ( $t_1$ ) からの各時刻の経過時間を表 2、3 に示す。また、その結果から注目すべき 5 つの観測間隔と、それにより導かれる OXC 設定解除遅延および OXC 設定遅延を表 4、表 5 に示す。表 2、表 4 は PC1 においてバインド解除メッセージの Ack を受信した直後 (0.7ms 後) にバインド設定メッセージを送信した場合であり計測を 4 回行った結果を示している。また表 3、表 5 はバインド解除メッセージの Ack を受信してから 1 秒後にバインド設定メッセージを送信した場合であり、計測を 2 回行った結果を示している。

各観測時刻の間を以下のように定める。

- $d_1$  : バインド解除メッセージを OXC に送信してから、最後の UDP パケットを受信するまでの時間。

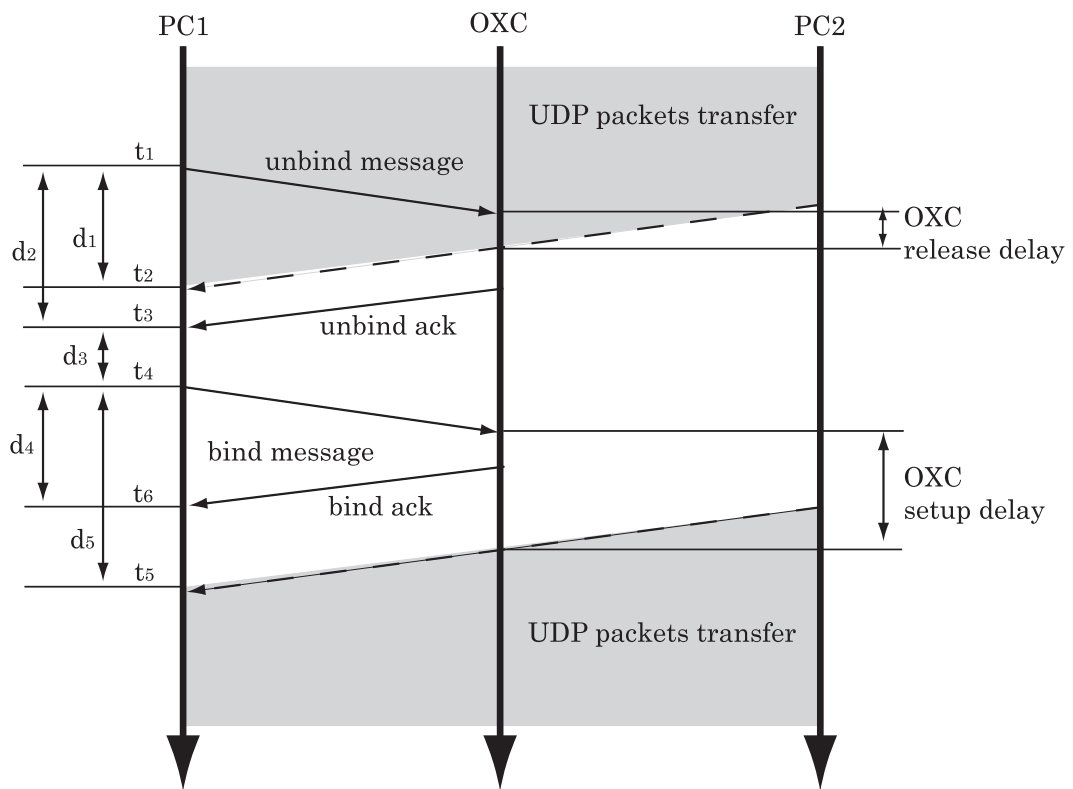


図 13: 各ノード間のメッセージの送受信と光パス設定のタイムチャート



- $d_2$  : バインド解除メッセージを OXC の送信してから、バインド解除メッセージに対する Ack を受信するまでの時間。
- $d_3$  : バインド解除メッセージに対する Ack を受信してからバインド設定メッセージを送信するまでの時間。
- $d_4$  : バインド設定メッセージを送信してからバインド設定メッセージに対する Ack を受信するまでの時間。
- $d_5$  : バインド設定メッセージを送信してから最初の UDP パケットを受信するまでの時間。

よって、OXC 設定遅延および OXC 設定解除遅延は以下のように算出できる。

- OXC 設定解除遅延 =  $d_1 - (0.053 + 0.079)$
- OXC 設定遅延 =  $d_5 - (0.053 + 0.079)$

この結果について、UDP パケットの送信間隔が約 0.1ms であり、平均 RTT と最小 RTT および最大 RTT の差が約 0.1ms であることから約 0.2ms の粒度までは信頼できる。バインド解除メッセージの Ack を受信した直後にバインド設定メッセージを送信した場合では結果が安定しており、伝播遅延を考慮した OXC 設定解除遅延は平均で 3.386ms であり、OXC 設定遅延は平均で 6.878ms であることがわかった。しかし、バインド解除メッセージの Ack を受信してから 1 秒後にバインド設定メッセージを送信した場合では設定解除遅延に関しては安定しておりバインド解除メッセージの Ack を受信した直後にバインド設定メッセージを送信した場合と同様の結果を示したが、設定遅延に関しては安定せず、約 600ms から 900ms もの時間を要している。

この原因として考えられるのは E/O コンバータとして用いているスイッチにおいて、リンクダウンおよびリンクアップの検出に時間がかかっているのではないかと考えられる。数 ms の間隔でリンクダウンしてもスイッチはそれを検出できずリンクアップ状態が続いているととらえるが、1 秒の間隔でリンクダウンするとスイッチはリンクダウンを検出した後、リンクアップの検出をすることになる。この際の検出間隔が粗い影響で、設定遅延が長くなりかつばらつきが生じていると考えられる。光パス設定遅延の計測の際には、スイッチにおけるリンクダウンおよびリンクアップの検出遅延も考慮に入れる必要がある。

また、OXC 設定解除メッセージに対する Ack の受信と最後の UDP パケットの受信の間には 1.5ms 程度 ( $d_2 - d_1$ ) の時間があるが、これは OXC 設定解除メッセージの生成にかかる遅延であると考えられる。そのほか、 $d_4$  に注目すると、バインド解除メッセージの Ack を受信した直後にバインド設定メッセージを送信した場合のほうがバインド解除メッセージ

表 1: 往復伝播遅延の計測結果

	最小 RTT(ms)	最大 RTT(ms)	平均 RTT(ms)
PC1-PC3 間	0.099	0.296	0.211
PC1-OXC 間	0.100	0.215	0.158

表 2: OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測時刻：制御メッセージ間隔が短い (約 1ms) 場合

	1 回目 (ms)	2 回目 (ms)	3 回目 (ms)	4 回目 (ms)
$t_1$	0.000	0.000	0.000	0.000
$t_2$	3.485	3.571	3.470	3.546
$t_3$	5.350	5.061	5.084	5.160
$t_4$	6.044	5.696	5.794	5.814
$t_5$	13.231	12.443	12.842	12.793
$t_6$	17.220	16.553	16.955	16.903

の Ack を受信してから 1 秒後にバインド設定メッセージを送信した場合よりも 5ms ほど長くなっている。この原因としては、バインド解除メッセージの Ack を受信してから 1 秒後にバインド設定メッセージを送信した場合では E/O として用いているスイッチでリンクダウンの検出が行われ、UDP パケットの転送はスイッチで止まるためバインド設定時に OXC に UDP パケットは届いていないのに対し、バインド解除メッセージの Ack を受信した直後にバインド設定メッセージを送信した場合はスイッチでリンクダウンを検出しないために常に OXC に UDP パケットが到着しており、OXC は設定を行う前にリンクをダウンさせるなどなんらかの処理を行い、その処理遅延が 5ms かかっているのではないかと考えている。

複数回の OXC 設定に着目した制御メッセージと OXC 制御に関する特性 前節により 1 回の OXC 設定に関する OXC の特性を把握することができた。次に OXC 設定を連続して行った際にどのような特性があるのかについて調べる。

パス保持時間を 5 秒に固定した場合にメッセージ間隔 ( $d_3$ ) を 0.7ms、50ms、300ms、500ms、1000ms とした場合に観測されるパケット到着間隔より OXC の切り替えとその観測が安定して行うことができるメッセージ間隔を調べる。同様に、メッセージ間隔を 0.7ms とした場合にパス保持時間を 50ms、100ms、300ms、500ms、1000ms とした場合に観測されるパ

表 3: OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測時刻：制御メッセージ間隔が長い(約 1000ms) 場合

	1 回目 (ms)	2 回目 (ms)
$t_1$	0.000	0.000
$t_2$	3.479	3.697
$t_3$	5.219	5.187
$t_4$	1011.295	1009.399
$t_5$	1952.408	1620.331
$t_6$	1017.595	1015.815

表 4: OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測間隔と設定遅延：制御メッセージ間隔が短い(約 1ms) 場合

	1 回目 (ms)	2 回目 (ms)	3 回目 (ms)	4 回目 (ms)
$d_1$	3.485	3.571	3.470	3.546
$d_2$	5.350	5.061	5.084	5.160
$d_3$	0.694	0.635	0.710	0.654
$d_4$	11.176	10.857	11.161	11.089
$d_5$	7.187	6.747	7.048	6.979
OXC 設定解除遅延	3.353	3.439	3.338	3.414
OXC 設定遅延	7.055	6.615	6.916	6.847

表 5: OXC 制御メッセージおよびデータプレーンのパケットの観測間隔と設定遅延：制御メッセージ間隔が長い (約 1000ms) 場合

	1 回目 (ms)	2 回目 (ms)
$d_1$	3.479	3.697
$d_2$	5.219	5.187
$d_3$	1006.076	1004.212
$d_4$	6.300	6.416
$d_5$	941.113	610.932
OXC 設定解除遅延	3.347	3.565
OXC 設定遅延	940.981	610.800

ケットの到着より OXC の切り替えとその観測が安定して行うことができるパス保持時間の最小値を調べる。

図 14 はパス保持時間を 5 秒に固定して、 $d_3$  を 0.7ms、50ms、100ms、300ms、500ms、1000ms と変化させた場合の無通信時間と、その後に最初にパケットを受信した時刻を示している。 $d_3$  が 0.7ms と短い間隔でも OXC の切り替えは安定して行われているが、 $d_3$  が 500ms 以上になると、無通信時間が不安定になることがわかる。また全体を通して、通常よりも OXC 設定に 30ms 余分にかかることがあり、その場合通信を開始した数百ミリ秒後から約 1.1 秒間無通信時間が発生する。以上の結果より、無通信時間が 500ms 以上の場合に OXC 設定遅延が不安定になることから、計測においては無通信時間を 500ms 未満に抑える必要があり、さらに不安定な要素についても排除する必要がある。

また図 15 は  $d_3$  を 1ms に固定して、パス保持時間を 50ms、100ms、300ms、500ms、1000ms と変化させた場合の無通信時間と、その後に最初にパケットを受信した時刻を示している。パス保持時間が 300ms 以下では制御遅延がおよそ 13ms 前後であるのに対し、500ms 以上では 10ms 前後と差が生じている。

### 4.3 パス設定要求到着モデル

光パス設定要求のモデルを図 16 に示す。ノード 1 においてノード 2 とノード 3 に対してそれぞれ到着率  $\lambda$  で光パス設定要求が発生し、同様にノード 2 においてノード 3 に対して到着率  $\lambda$  で光パス設定要求が発生する。要求発生はポアソン過程に従う。光パスの保持時間は平均 1000ms の指数分布に従うものとする。また、GMPLS 実装プログラム上で利用可能

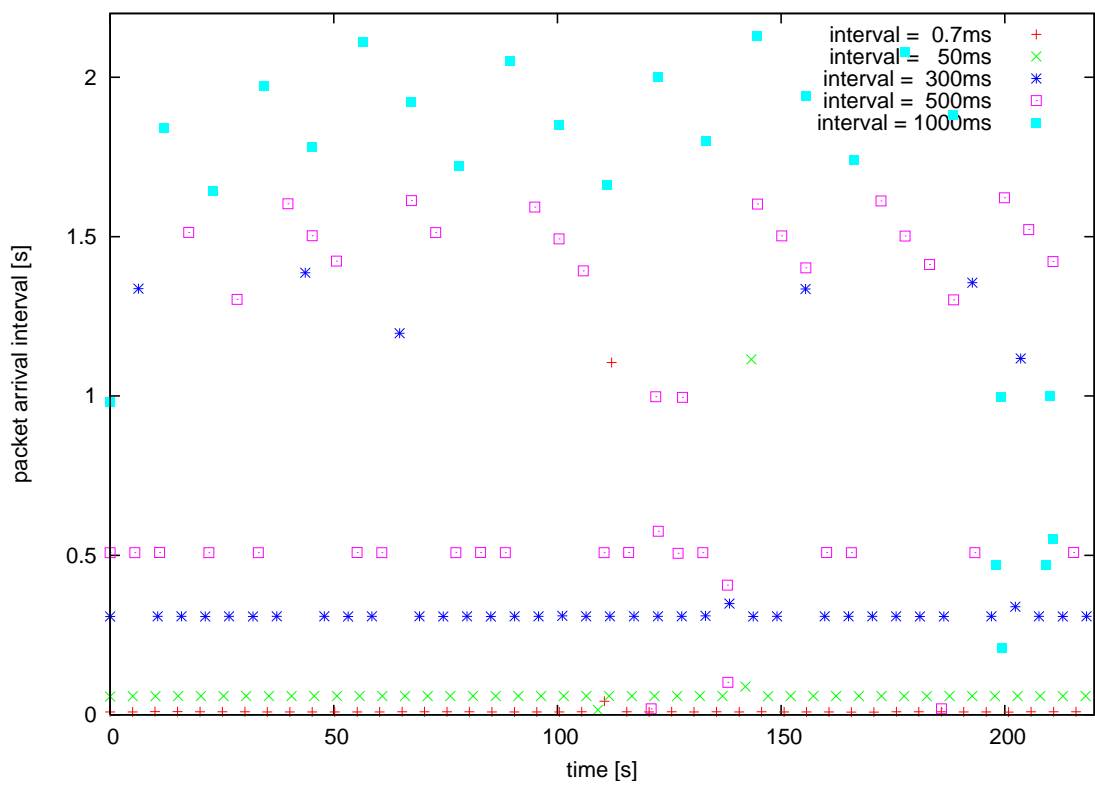


図 14: パス保持時間固定 (5s) 時のバインド解除・設定メッセージ間隔に対する制御遅延時間

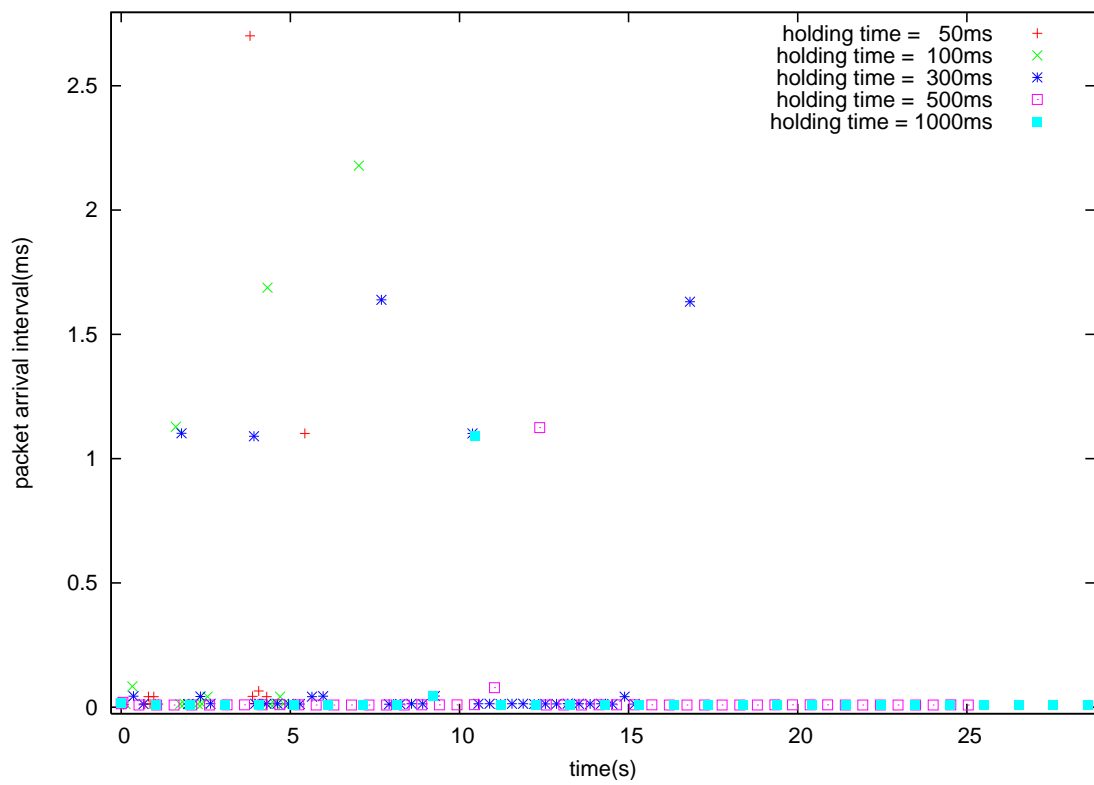


図 15: バインド解除・設定メッセージ間隔固定 (1ms) 時のバス保持時間に対する制御遅延時間

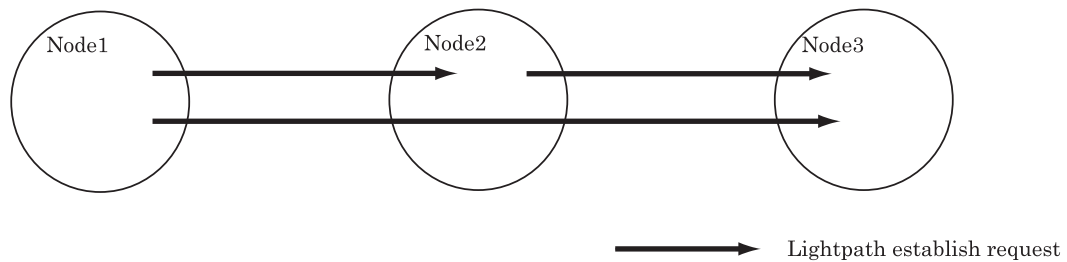


図 16: パス設定要求到着モデル

な波長多重数は 8 とするが、機材の関係上実際に光パス設定を行うのは 1 波長のみとする。波長選択は利用可能波長の中からランダムに行われることから、各波長について光パス設定に関する設定遅延特性は同一であり、1 波長の実装により観測された事象は他の全ての波長においても生じるとみなせる。

また、簡単のために光パス設定はノード 1 からノード 3 に対してのみ行う。ノード 1 からノード 2 に対する光パスおよびノード 2 からノード 3 に対する光パスに関しては OXC にノード 1 からノード 3 に対する光パス設定に用いていないポート間への解除・設定メッセージを送信し、設定遅延を設けている。なお、データプレーンにおけるパケットの送信方向（ノード 3 からノード 1）が光パスの方向と一致していないが、これはノード 1 において同一のタイマによる計測を行う必要があるためである。次節で光パス設定遅延を計測する際にもノード 3 からノード 1 に対してパケットを送信しているが、このことが光パス設定遅延に影響を及ぼす可能性は低いと考えられる。

#### 4.4 バックワード型光パス設定方式との比較評価

以上の実験環境において、ノード 1 においてノード 3 に対するリクエストが発生した時刻と、そのリクエストにより OXC のバインド設定・解除が行われノード 1 のデータプレーンにおいて観測される光パス設定時刻の差より光パス設定遅延を導出する。その計測結果を図 17 に示す。結果より、光パス設定要求の到着率がおよそ  $0.0018[\text{requests/ms}]$  以下のとき、ハイブリッド型光パス設定方式による平均光パス設定遅延はバックワード型光パス設定方式と比較して小さいことがわかる。この時リンク利用率は 40% 付近となっており、実ネットワークにおいて十分適用可能であることがわかる。また、文献 [6] でも観測されるように、到着率が高くなるとハイブリッド型光パス設定遅延が増加し、バックワード型光パス設定方式よりも性能が劣化する。この理由は以下の通りである。負荷が高くなるとともに波長予約を行った後に他ノードで光パス設定要求の棄却が多くなり、波長が無駄に予約される可能性

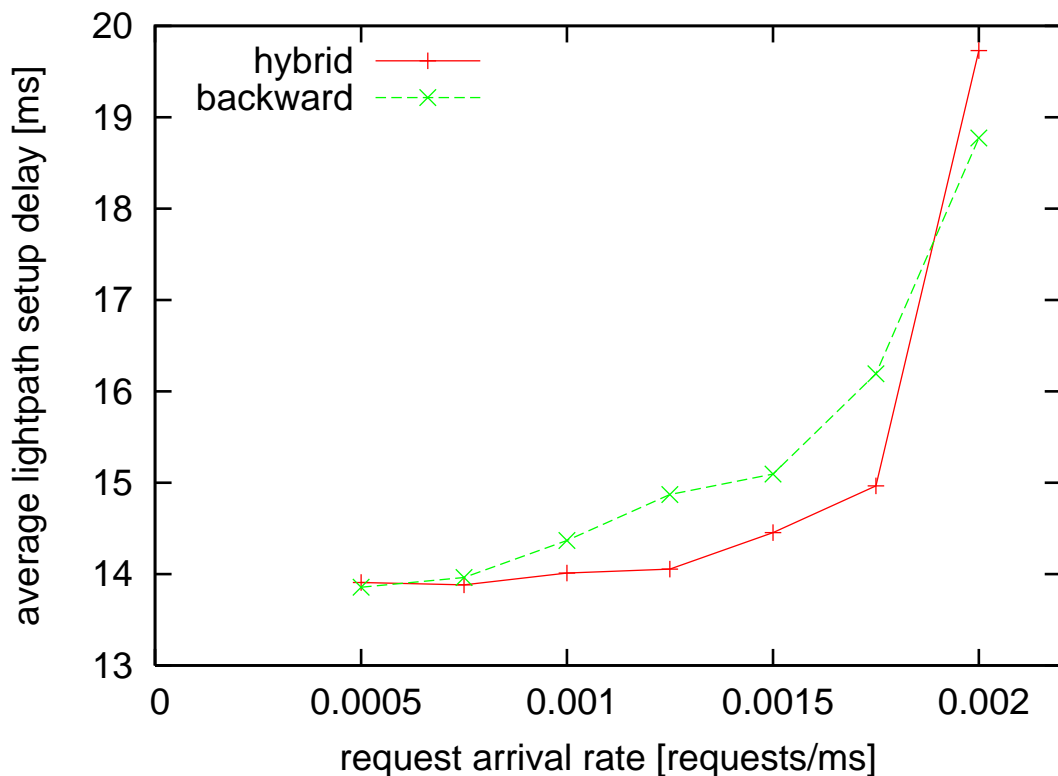


図 17: 光パス設定遅延の比較結果

が高まる。ハイブリッド型光パス設定方式はバックワード型光パス設定方式よりも光パス設定試行回数が多く、無駄に波長が予約される波長予約回数も多くなり、その結果、光パス設定遅延が大きくなっている。この問題への対処としては、PROBE 信号で収集したリンクの利用情報をもとにバックワード型とハイブリッド型を切り替える方式が考えられるが、これは今後検討していく予定である。

## 5 おわりに

本報告では、通信要求が到着してから通信開始までの時間の短縮を目的としたハイブリッド型光パス設定方式の実装と評価を行った。ハイブリッド型光パス設定方式では、受信ノードから送信ノードに向けて波長を予約するとともに、波長の空き状況を調べるための PROBE 信号を送信ノードに向けて送る。波長予約に失敗した場合に送信ノードから受信ノードに向けて波長を予約することにより、往復伝搬遅延時間の光パス設定の試行を 2 回とすることにより、通信が可能になるまでの時間を短縮している。GMPLS 実装環境における従来手法と



の比較評価では、リンク利用率が 40%以下の場合で従来手法よりも光パス設定遅延を短くすることができることを明らかにした。今後は光パス上に TCP トラフィックを流し、その輻輳ウィンドウサイズを調べ、光パス設定変更時の影響を明らかにするとともにルーティング手法の違いによる光パス設定遅延への影響を明らかにする予定である。

## 謝辞

本報告を終えるにあたりまして、御指導、御教授を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科 村田正幸教授に厚く御礼申し上げます。

また本報告の作成に常日頃から熱心に、御指導および御助言を賜りました大阪大学大学院経済学研究科 荒川伸一助手に深く感謝致します。

並びに適切な御助言を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科 若宮直紀助教授、長谷川剛助教授に心より感謝致します。

最後に日頃から、本報告の作成にあたり様々な相談に答えて頂きました福島行信氏、石田晋哉氏、小泉佑揮氏、牧野 暢孝氏、福元 良太氏をはじめとする村田研究室および中野研究室の皆様方に心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath communications: An approach to high bandwidth optical WAN's," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 40, pp. 1171–1182, July 1992.
- [2] X. Yuan, R. Melhem, R. Gupta, Y. Mei, and C. Qiao, "Distributed control protocols for wavelength reservation and their performance evaluationin," *Photonic Network Communications*, vol. 1, no. 3, pp. 207–218, 1999.
- [3] J. Zheng and H. T. Mouftah, "Distributed lightpath control based on destination routing for wavelength-routed WDM networks," *Optical Network Magazine*, vol. 3, pp. 38–46, July 2002.
- [4] J. Zheng and H. T. Mouftah, "A nested path reservation protocol for multiplexed all-optical networks," in *Proceedings of ONDM*, pp. 401–411, Feb. 2003.
- [5] D. Saha, "An efficient wavelength reservation protocol for establishment in all-optical networks(AONs)," in *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 2, pp. 1264–1268, Nov. 2000.
- [6] Y. Kanitani, S. Arakawa, M. Murata, and K. Kitayama, "Distributed wavelength reservation method for fast lightpath setup in WDM networks," in *Proceedings of Optical Network and Technologies Conference*, pp. 121–128, Oct. 2004.
- [7] "Iperf – the TCP/UDP bandwidth measurement tool," available at <http://dast.nlanr.net/Projects/Iperf/>.