

ネットワーク構成変更に対応した WDM 波長選択手法

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科
杣 信吾 桧垣 博章
E-mail: {soma,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

WDM(Wavelength-Division Multiplexing)による全光ネットワークにおいては、通信データの配送に先立って配送経路の決定、予約波長の選択、波長予約の3つの手続きが必要となる。予約波長をどのように選択するかは、波長予約の成功率に大きな影響を及ぼす。本論文では、各エッジルータが各波長の優先度を予約の成否に基づいて動的に更新するPWA手法を拡張し、ネットワークトポロジの変化に対応して優先度の変化率を変更し、より短時間に予約成功率の高い波長優先度を獲得する手法を提案する。

Wavelength Selection Supporting Network Reconfiguration in WDM Networks

Shingo Soma Hiroaki Higaki
Department of Computers and Systems Engineering
Tokyo Denki University
E-mail: {soma,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

Abstract In an all-optical WDM network, establishment of of connection consists of transmission route detection, wavelength selection and wavelength reservation. Wavelength selection is critical for achieving higher successful reservation ratio. This paper proposes a novel wavelength selection method which is extension of PWA method in which priority of each wavelength is dynamically updated in each edge router based on results of wavelength reservation. In case of network reconfiguration, our method controls differential of priority of each wavelength for achieving updated priority for higher successful reservation ratio within shorter period than the convational method.

1 はじめに

近年の高速広帯域ネットワークを活用したアプリケーションの実現への要求の高まりに対して、全光ネットワークの構築が求められている。全光ネットワークの実現技術として、波長多重化(WDM)が有力となっている。ここでは、全光ネットワークと、外部ネットワークとの接続点であるエッジルータ E_i と全光ネットワーク内部のルータであり、外部ネットワークとの接続を持たないコアルータ C_i とからネットワークが構成される。(図1)。送信元エッジルータ E_s から送信先エッジルータ E_d までの通信を行なうエッジルータ E_i とこれに接続するコアルータ C_i との間あるいは互いに隣接する2つのコアルータ C_j と C_k の間を接続する光リンクにおいて異なる波長を用いた複数の通信を同時に行なうことができる。WDMの実現手法には、リンク多重化とパス多重化がある。リンク多重化では、各コアルータには波長変換機能が実装されていることを前提とすることにより、送信元エッジルータから送信先エッジルータまでの間で

各光リンクごとに異なる波長を用いて通信することが可能である。一方、パス多重化では、送信元エッジルータから送信先エッジルータまでの間のすべての光リンクで同一の波長を用いることを制約条件として導入することにより、コアルータへの波長変換機能の実装が不要になる。いずれの多重化方法においても、送信元エッジルータから送信先エッジルータまでの通信を行なうためには、通信開始時に経路上にあるすべての光リンクにおいて、それぞれの制約条件のもとで、ひとつ以上の波長を予約することが必要である。

本論文では、パス多重化を対象として、送信元エッジルータがあらかじめ定められた経路上にある各光リンクに対して予約を要求する波長の集合を決定する波長選択手法において、各エッジルータが優先度に基づいて波長選択を行なう手法を拡張し、動的にネットワーク構成が変化する場合に、短時間で安定した波長優先度を得ることによって予約成功率を高める手法を提案する。

2 波長予約手法

パス多重化による WDM 波長予約手法には、送信元エッジルータと送信先エッジルータと間の経路があらかじめ定められていることを前提とする手法 [5] と、経路探索も含めた手法 [3] とがある。本論文では、前者を対象とする。すなわち、あらかじめ与えられた送信元エッジルータから送信先エッジルータまでの経路上にあるすべての光リンクにおいて、あるひとつの波長 λ を予約することが目的である。経路が定められていることを前提とした WDM 波長予約手法は、以下の 3 つの要因によって分類される [5]。

- 波長予約メッセージの転送方向 (図 2)
- 予約要求する波長数
- 予約可能波長が存在しないときのルータの処理方法 (図 3)

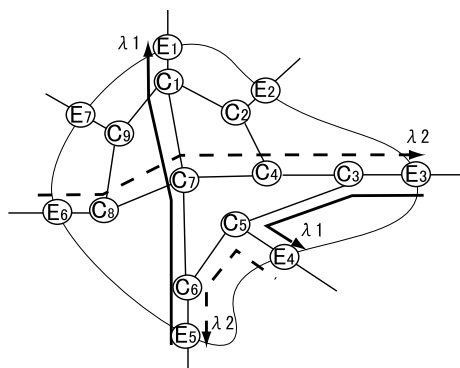


図 1: 全光 WDM ネットワーク

送信元エッジルータおよび経路上にあるコアルータは、次ホップのコアルータまたは送信先エッジルータとの間の光リンクにおける波長集合 Λ の使用を予約する。この予約手続きは、ルータが波長予約メッセージ $Res(\Lambda)$ を受信することによって行われる。この波長予約メッセージの転送方向には、送信元エッジルータから送信先エッジルータへの方向とその逆方法が考えられる。前者による手法をフォワードリザベーション手法、後者による手法をバックワードリザベーション手法とよぶ [5]。フォワードリザベーション手法では、送信元エッジルータが次ホップのコアルータとの間の光リンクにおける未予約波長集合 Λ の部分集合 $\Lambda' \subset \Lambda$ に含まれる波長を予約する。そして、次ホップのコアルータに波長予約メッセージ $Res(\Lambda')$ を送信する。 $Res(\Lambda')$ を受信したコアルータは、次ホップのコアルータまたは送信先エッジルータとの間の光リンクにおける未予約波長集合 Λ'' に対して、 $\Lambda''' = \Lambda' \cap \Lambda''$ なる集合 Λ''' に含まれる波長を予約する。もし、 $\Lambda''' = \phi$ であるならば、予約可能波

長が存在しないときのコアルータの処理としてあらかじめ定められた処理を行なう。 $\Lambda' \neq \phi$ なる $Res(\Lambda')$ を送信先エッジルータが受信したならば、 $\Lambda'' \subset \Lambda'$ なる波長をこれらのエッジルータ間の通信に使用することができる。応答メッセージ $Ack(\Lambda'')$ を送信先エッジルータから送信元エッジルータまで配送することにより、 Λ'' に含まれない波長の予約を取り消し、他の通信に利用することを可能とする。

一方、バックワードリザベーション手法では、波長予約メッセージの転送開始以前に、未予約波長調査メッセージ $Prob()$ を送信元エッジルータから送信先エッジルータまで転送することによって、経路上のすべての光リンクにおいて共通に予約されていない波長をあらかじめ調査する。すなわち、送信元エッジルータは、次ホップのコアルータとの間の光リンクで予約されていない波長の集合 Λ を含む波長調査メッセージ $Prob(\Lambda)$ を次ホップコアルータに送信する。波長集合 Λ を含む $Prob(\Lambda)$ を受信したコアルータは、次ホップのコアルータとの間の光リンクで予約されていない波長の集合 Λ' に対して、 $\Lambda'' = \Lambda \cap \Lambda'$ なる波長集合を含む $Prob(\Lambda'')$ を次ホップコアルータまたは送信先エッジルータに送信する。送信先エッジルータが受信した $Prob(\Lambda)$ に含まれる Λ が経路上のすべての光リンクにおいて共通に未予約である波長の集合である。 $Prob(\Lambda)$ を受信した送信先エッジルータは、 Λ の部分集合 Λ' を対象として波長予約メッセージ $Res(\Lambda')$ を送信先エッジルータに向けて経路上を転送することによって、波長予約を行なう。

最初に送信される波長予約メッセージ、すなわち、フォワードリザベーション方式では送信元エッジルータが送信する波長予約メッセージ、バックワードリザベーション方式では送信先エッジルータが送信する波長予約メッセージに含まれる波長集合の大きさによって、アグレッシブ方式とコンサバティブ方式に分類される。アグレッシブ方式では、より多くの波長を含む波長予約メッセージが送信される。この方式では、通信に使われる波長の候補が多数であるため、経路上のすべての光リンクにおいていずれかの波長が共通に未予約である可能性が高くなる。すなわち、波長予約の成功率が高くなる。しかし、通信に使われない多数の波長を一時的に予約することになるため、他の通信の波長予約成功率を低下させることになるという問題がある。一方、コンサバティブ方式は、より少ない波長を含む波長予約メッセージが送信される。この方式では、通信に使われる波長の候補が少数であるため、必ずしも波長予約の成功率が高くない。しかし、通信に使われない波長を一時的に予約する

ことが少ないため、他の通信の波長予約成功率を大きく低下させることがない。

最後に、予約可能波長が存在しないときの処理について説明する。フォワードリザベーション方式、バックワードリザベーション方式ともに、波長予約メッセージ $Res(\Lambda)$ を受信したコアルータまたは送信元エッジルータは、次ホップのコアルータまたは送信先エッジルータとの間の光リンクで未予約となっている波長の集合を Λ' とするとき、 $\Lambda'' = \Lambda \cap \Lambda'$ なる波長集合 Λ'' に含まれる波長をこの光リンクに対して予約する。ここで、 $\Lambda'' = \phi$ であるときの処理には、ドロップ方式、ホールディング方式、部分ウェイト方式 [6] がある。ドロップ方式では、波長予約手続きをただちに中断する。すなわち、これまでに予約した波長をすべて解放することによって、他の通信の波長予約成功率を低下させることを回避する手法である。これに対してホールディング方式では、 $\Lambda'' \neq \phi$ となるのを一定時間待つ。他の通信の開始や終了による波長の予約と解放によって Λ'' は時間とともに変化するため、この間に $\Lambda'' \neq \phi$ となれば、波長予約の手続きを継続し、経路上のすべての光リンクにおいて共通の波長の予約を行なうことができる。一方、部分ウェイト方式では、ホールディング方式と同様に $\Lambda'' = \phi$ となった光リンクに対する波長の予約を一定時間待つが、この間に $Res(\Lambda)$ を次ホップのコアルータに転送する点異なる。次ホップ以降の波長予約を並行に実行することによって、 $\Lambda'' \neq \phi$ となった場合、経路上のすべての光リンクの波長予約に要する時間を短縮することが可能である。ただし、 $\Lambda'' = \phi$ のままタイムアウトした場合には、より多くの光リンクにおいて予約したにもかかわらず実際の通信には使われなかった波長が存在することから、他の通信の波長予約成功率を低下させることがある。

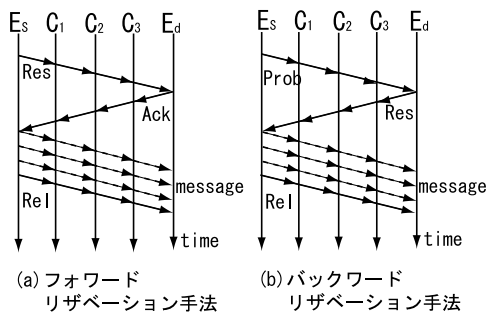


図 2: 波長予約メッセージの転送方向

3 優先度に基づく波長選択手法

2 章で述べた波長予約手法では、まず波長予約メッセージ $Res(\Lambda)$ の送信元となるエッジルータが予約候補

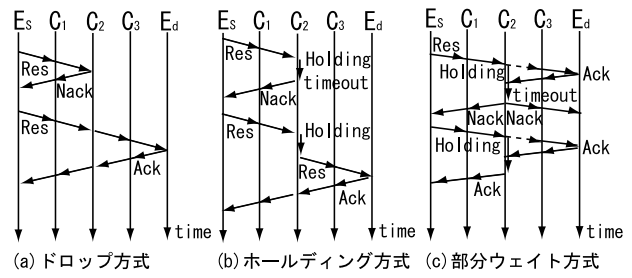


図 3: 予約可能波長が存在しないときの処理方法

波長の集合 Λ を決定する。フォワードリザベーション方式、バックワードリザベーション方式のいずれにおいても、この波長集合 Λ に含まれる波長が予約の対象になる。この波長集合 Λ をどのように定めるかは、波長予約の成功率に大きな影響を与える。論文 [1] では予約候補波長集合 Λ をランダムに選択する手法が提案されている。この方法は、全光ネットワークがサポートしている波長数 (光リンクの多重度) に対して、未予約波長数が多い場合、すなわちネットワークの使用率が比較的低い場合には予約成功率が高く、予約に必要な諸状態情報の保持にともなう記憶オーバーヘッドや、情報の一貫性維持に必要な通信オーバーヘッドをともなわないという点で優れている。しかし、予約可能な波長数の減少にともなって、予約成功率が急激に低下するという問題がある。これは、 $Res(\Lambda)$ メッセージの再送を繰り返しても予約済みの波長が選択され続けることによるものである。そこで、ラウンドロビンで波長を選択し、最初に検出できた未予約波長による通信を行なうファーストフィット手法が論文 [1] で提案されている。この手法では、ランダム手法における予約成功率の低下の原因であるリトライ回数の増加には対応している。しかし、各エッジルータが同一の波長列を用いる場合には、あるエッジルータが選択した波長は他のエッジルータが最近予約に用いた可能性が高くなるため、常に一定回数以上のリトライを要することになる傾向がある。各エッジルータが異なる波長列を持つことによってこの問題を解決できると考えられるが、予約成功率を高くする波長列の割り当てを決定することは困難である。ランダムに選択する方法、ラウンドロビンで選択する方法などが考えられる。各エッジルータに異なる波長列を与える手法として、論文 [4] はモーストユーズド手法を提案している。これは、各エッジルータが過去の波長予約の成否情報に基づいて、最も多く予約に成功し、通信に用いられた波長から順に候補波長を選択する手法である。あるエッジルータにおいて予約の成功回数が多い波長は、このエッジルータが用いる経路と光リンクを共有するほか

の経路を用いるエッジルータでは用いられる可能性が低いと考えられる。すなわち、共通の光リンクをもつ経路を用いるエッジルータ間で使用頻度の高い波長をそれぞれ分け合うような異なる波長列を動的に構成することを可能にしている。

論文 [2] では、モーストユーズド手法を発展させ、各エッジルータが波長に優先度を与え、優先度の高い未予約の波長を送信元エッジルータが選択する PWA(Priority-based Wavelength Assignment) 方法を提案している。この方法では、送信元エッジルータがそれぞれの波長の予約を試みた結果の成否に応じて優先度を動的に変化させている。すなわち、波長 λ の予約に成功した場合には、その波長が次回以降に選択される優先度 $P(\lambda)$ を (1) 式にしたがって高く更新し、一方、波長 λ の予約に失敗した場合には、(2) 式にしたがってその波長の優先度 $P(\lambda)$ を低く更新する。

$$P(\lambda) := \frac{P(\lambda) \times N(\lambda) + 1}{N(\lambda) + 1}, N(\lambda) := N(\lambda) + 1 \quad (1)$$

$$P(\lambda) := \frac{P(\lambda) \times N(\lambda)}{N(\lambda) + 1}, N(\lambda) := N(\lambda) + 1 \quad (2)$$

これによって、WDM ネットワークの管理者があらかじめ優先度を与えることなく、各エッジルータの通信要求に応じて適切に優先度を設定できるという点で優れた手法であるといえる。ここで提案されている優先度の計算手法にしたがうと、(1) 式は $P(\lambda) := P(\lambda) + (1 - P(\lambda))/(N(\lambda) + 1)$ 、(2) 式は $P(\lambda) := P(\lambda) - P(\lambda)/(N(\lambda) + 1)$ となることから、優先度の値は時間の経過、すなわち $N(\lambda)$ の増加とともに安定し、値が変化しにくくなる。図 4 は、波長予約が成功し続ける、あるいは失敗し続ける場合の優先度の値の変化を示している。一方、図 5 は、 s 回の波長予約が連続して成功し、 f 回の波長予約が連続して失敗した場合の優先度の変化を示している。これらの図からも分かるように、システムの運用開始後の時間経過が長くなればなるほど、優先度は変化しにくくなっていることが分かる。

4 提案手法

前章で述べた PWA 手法 [2] 優先度の変化特性は、運用開始時に特定の初期値を与えることなく、WDM ネットワークの使用状況に応じて優先度を変化させ、最終的には波長予約成功率の高い安定した優先度設定を行なえるという点で優れた手法である。しかし、WDM ネット

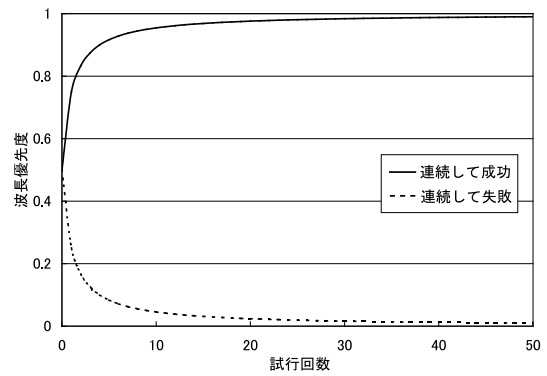


図 4: PWA 手法の優先度 (1)

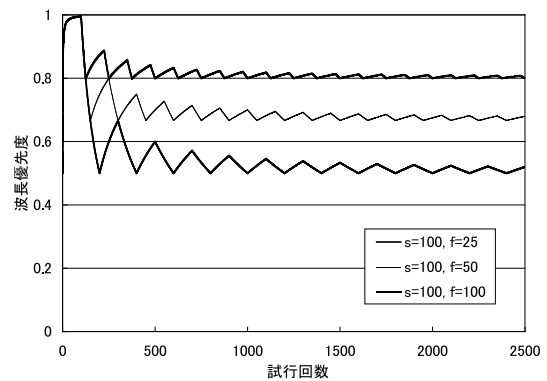


図 5: PWA 手法の優先度 (2)

ワークの構成が変化した場合、すなわち、新しいエッジルータが追加される、現用のエッジルータが削除される、コアルータが追加、削除される、新たな光リンクが追加される、といった場合には、優先度が変化しにくい状況は好ましくない。たとえば、同一のコアルータ C に接続する 2 つのエッジルータ E_i と E_j において、WDM で用いられる波長の集合 Λ に含まれる 2 つの波長 λ_s, λ_t について、 E_i で $P(\lambda_s) > P(\lambda_t)$ ならば E_j で $P(\lambda_t) > P(\lambda_s)$ が成り立ち、逆に E_j で $P(\lambda_s) > P(\lambda_t)$ ならば E_i で $P(\lambda_t) > P(\lambda_s)$ が成り立つように PWA では優先度を与える。すなわち、 E_i と E_j の間で同一の波長に高い優先度を与えない。しかし、新たにエッジルータ E_k が C に接続されたとき、以降の波長予約成功率を高く維持するためには、 E_i と E_j が高い優先度を与えている波長の一部について、その波長の優先度を低減し、 E_k がこれらに高い優先度を与えるように優先度を更新し、 E_i, E_j, E_k がともに高い優先度を与える波長が存在しないようにしなければならない。しかし PWA 手法では、 $N(\lambda)$ の増加により $P(\lambda)$ は安定し、変化しにくくなっていることから、このような更新を行なうためには多数の予約失敗を経なければならない。一方、こ

のようなトポロジ変化による波長優先度の更新は、ネットワーク全体で均等に必要とされるものではない。変化した部位に近いエッジルータでは大きな更新が必要とされるが、遠いエッジルータでは大きな更新をするべきではない。新しいネットワークトポロジに柔軟に対応するために、本論文では、トポロジ変化が発生したルータの近隣のルータの優先度を一時的に不安定にすることによって、より迅速に新しい環境に順応する手法を提案する。ここでは、不安定にする方法として、トポロジ変化を契機として波長予約の成功および失敗による優先度の変化率を拡大する。ここで、 n は変化したルータからの最短経路によるホップ数とする。この優先度の変化率の拡大はトポロジ変化に関わるルータからのホップ数 h の関数 $F(h)$ とする。たとえば、エッジルータが追加された場合には、追加されたエッジルータでは $F(0)$ 倍、このエッジルータに隣接するコアルータでは $F(1)$ 倍というように変化率を拡大する。 $F(h)$ は h の単調減少関数である。このため、トポロジ変化に関わるルータの近隣では波長優先度の変化を促進しつつ、WDM ネットワーク全体としてはこれまでの波長予約の成否に基づいて得られた波長割り当ての安定性を保つことができる。波長優先度の更新を行なうためには、トポロジ変化が発生したことと、それに関わるルータからのホップ数を各エッジルータに通知しなければならない。これは、更新要求メッセージのフラッディングによって実現できる。

本論文では、波長優先度の拡大方法として、 $N(\lambda)$ を減少させる方法を提案する。3章で述べたように、PWA 手法では、波長予約に成功した場合の $P(\lambda)$ の増加分は $(1 - P(\lambda))/(N(\lambda) + 1)$ 、波長予約に失敗した場合の $P(\lambda)$ の減少分は $(P(\lambda))/(N(\lambda) + 1)$ であり、 $N(\lambda)$ についての減少関数になっている。そこで、 $N(\lambda)$ を減少させることにより、1回の波長予約の成否によって優先度を大きく変化させることが可能となる。また、トポロジ変化に関わるルータからのホップ数が小さいエッジルータほど $N(\lambda)$ の減少率を大きくすることによって、近隣では大きな優先度更新を行ないつつ、遠方ではその影響を小さく抑えて安定性を維持することができる。たとえば、次式のように $N(\lambda)$ を更新することが考えられる。

$$N(\lambda) := N(\lambda) \times \frac{h}{h_{th}} \quad (h \leq h_{th} \text{ のとき}) \quad (3)$$

ここでは、ホップ数が閾値 h_{th} 未満の場合は、ホップ数 h に対して $N(\lambda)$ を h/h_{th} 倍に減少させている。

5 評価

提案手法の性能評価をシミュレーション実験により PWA 手法と比較することによって行なった。10台のコ

アルータが直線状に接続され、各コアルータに1台のエッジルータが接続している環境において、末端のコアルータに接続するエッジルータを1台追加する。各光リンクでは16波長が多重化されている。各エッジルータの通信開始要求は平均間隔が5msecのポアソン過程にしたがい、通信時間は平均5msecの指数分布であると仮定する。また、送信先は均一分布にしたがってランダムに選択し、波長予約プロトコルにはフォワードリザベーション手法を用い、予約可能波長が存在しないときの処理方法にはドロップ方式を用いる。追加エッジルータの接続はシミュレーション開始時刻の1000msec後に行なう。

図6は、PWA手法による既存エッジルータの波長優先度の変化を示している。この図では、波長 λ_1 と λ_2 を優先度の高い状態で保持している。追加のエッジルータが接続された1000msec以降であっても、波長 λ_1 と λ_2 の優先度は変化しにくい状態となっている。一方図7は、1000msec時に追加されたエッジルータのPWA手法による波長優先度の変化を示している。1000msec時点で各エッジルータが高い優先度を与えた波長をすでに分けあってしまったために、追加エッジルータは予約に成功した波長を使い続けることはできず、特定の波長に高い優先度を与えることができない。例えば、追加エッジルータが波長 λ_1 と λ_2 の予約を行なっても、既存のエッジルータも波長 λ_1 と λ_2 の予約を行なうために、同等の確率で予約に失敗する。このとき、既存のエッジルータでは、優先度の変化率が小さいために、予約に失敗しても優先度がほとんど変化しない。しかし、追加エッジルータでは優先度の変化率が大きいため、予約に失敗すると優先度が大きく低下し、他の波長の予約を行なうことを繰り返す。一時的に成功した波長でも、その波長はすでに既存のエッジルータが高い優先度を与えているため、結果的には失敗を繰り返し、他の波長での予約を繰り返す。

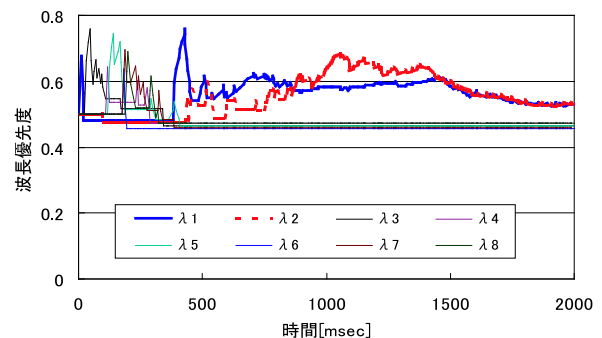


図6: PWA 手法の既存エッジルータの波長優先度変化

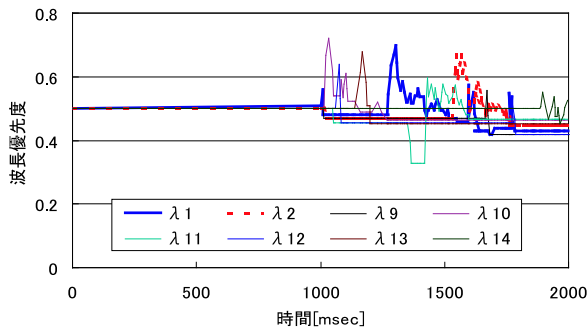


図 7: PWA 手法の追加エッジルータの波長優先度変化

図 8 は提案手法における、既存エッジルータの波長優先度の変化を示している。既存エッジルータは、追加エッジルータが接続される 1000msec までは、波長 λ_1 と λ_2 を優先度の高い状態で保持している。追加エッジルータが接続された 1000msec 以降、一時的にさまざまな波長予約を行なっているが、再びいくつかの波長を、優先度の高い状態で保持する。一方、図 9 は 1000msec 時に追加されたエッジルータの提案手法における波長優先度の変化を示している。追加エッジルータは、ネットワークに接続された 1000msec 以降、複数の波長に予約を試み、その結果いくつかの波長に高い優先度を与えている。提案手法では、既存エッジルータが λ_1 を通信開始後に高い優先度で保持している。しかし、追加エッジルータがネットワークに接続されたときに優先度の変化率を式 (3) にしたがって拡大したために、 λ_1 の予約に失敗することによって λ_1 の、優先度を大きく低下させている。一方、追加エッジルータでは、 λ_1 に高い優先度を与えており、これによって新たな優先度割り当てが確立し、高い優先度の波長を分けあうことによって、予約成功率を向上させることができる。

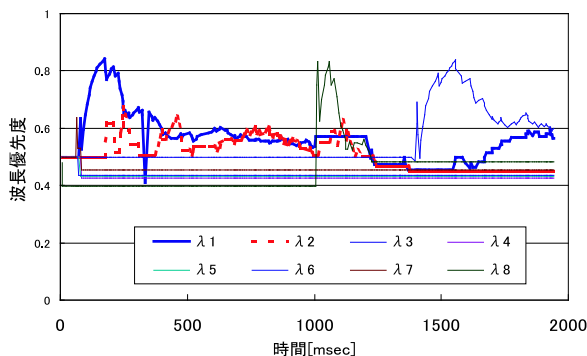


図 8: 提案手法の既存エッジルータの波長優先度変化

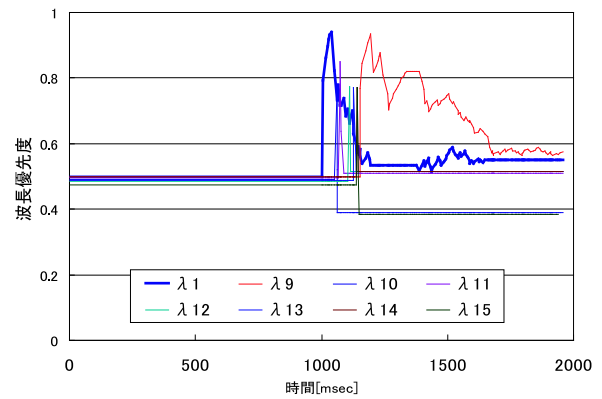


図 9: 提案手法の追加エッジルータの波長優先度変化

6 まとめと今後の課題

本論文では、WDM 波長予約における波長選択手法として、エッジルータごとに各波長に優先度を与える PWA 手法を拡張し、ネットワークトポロジが変化した際に、より迅速に安定した優先度を得るために、一時的に優先度を不安定にする手法を提案した。また、トポロジ変化時における優先度更新方法を提案し、シミュレーションにより、従来手法よりも短時間で予約成功率の高い波長優先度割り当てに更新できることを示した。今後はネットワーク全体の安定性維持についてシミュレーションにより評価を行なう。今後は、具体的に関数 $F(n)$ を定め、安定に要する時間が短縮されることを確認する。

参考文献

- [1] Chlamtac, I., Ganz, A. and Karimi, G., "Purely Optical Networks for Terabit Communication," Proceedings of the 8th IEEE INFOCOM, pp. 887-896 (1989).
- [2] Hashiguchi, T., Wang, X., Morikawa, H. and Aoyama, T., "Performance Evaluation of Distributed Wavelength Assignment in WDM Optical Network," Network Architectures, Management and Applications, Vol. 5282, pp. 480-491 (2004).
- [3] Li, L. and Somani, A.K., "Dynamic Wavelength Routing Using Congestion and Neighborhood Information," Proceedings of the IEEE/ACM Transactions on Networking, No. 5, Vol. 7, pp. 779-786 (1999).
- [4] Subramaniam, S. and Barry, A., "Wavelength Assignment in Fixed Routing WDM Networks," Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, pp. 406-410 (1997).
- [5] Yuan, X., Gupta, R. and Melhem, R., "Distributed Control in Optical WDM Networks," Proceedings of the IEEE Conference on Military Communications, Vol. 3, pp. 100-104 (1996).
- [6] 高須, 俊垣, "WDM における経路決定手法の提案," 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, 信学技報, Vol. 103, No. 493, pp. 1-6 (2003).