修士論文 2008年度(平成 20 年度)

光回線と多波長パケット交換混在型ネットワーク における経路選択および波長割当手法

慶應義塾大学大学院 政策メディア研究科

氏名:町田 啓太

修士論文要旨 2008 年度 (平成 20 年度)

光回線と多波長パケット交換混在型ネットワーク における経路選択および波長割当手法

論文要旨

本論文では,光回線交換と多波長光パケット交換とを組み合わせたハイブリッド型光ネットワークに おいて問題となっていた,波長利用効率の低下と迂回経路による衝突回避が困難であるという2つの問 題点に対して,複数の経路制御および波長配分 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 手法を提 案し,シミュレーションによる性能評価を行う.

ネットワークトラフィックの急激な増加と高画質動画配信などをはじめとするサービスの多様化によ リ,将来のインターネットには,広帯域化と通信品質保証が必要とされる.これらを実現する一つの解 決方法として,我々は光回線交換方式(Optical Circuit Switching, OCS)と多波長光パケット交換方式 (Multi-Wavelength Optical Packet Switching, MW-OPS)という2つの転送パラダイムが混在する光 ネットワークアーキテクチャを提案している.多波長光パケット交換方式とは,ペイロードを複数波長 にわたり分割・構成し,波長依存性のない光スイッチで一括交換する方式である.本光ネットワークで はファイバ内の波長資源を二つの転送パラダイムで共有し,QoS保証が必要な場合は波長パスを用いた 光回線交換を用いて通信を行い,保証が必要でない場合は多波長光パケット交換を用いて通信を行う. この特性により,高い帯域利用効率とQoS保証を実現する.

本光ネットワークにおいて多波長光パケットは, End-to-End で波長パスに割当てられていない長波 長側の連続した波長群を用いて交換される.したがって波長パスの RWA 手法が, 多波長光パケットで 利用可能な波長数に大きな影響を与える.更に各リンクで多波長光パケットに用いれる波長数の差は, 迂回経路による衝突回避を阻害する.

本論文では,波長パスを複数の経路に分散することで各リンクでの波長数差を軽減し,かつ多波長光 パケットで利用可能な波長数を多く確保できる複数のRWA手法を提案する.本手法に関して,波長資 源の利用効率および負荷分散についてシミュレーションによる評価を行う.

その結果,経路選択手法に共通空波長数最大 (Maximum Matched Lambda, MML) を,波長割当手法に First-Fit(FF) を用いた MML-FF型 RWA 手法が,波長資源の利用効率および負荷分散の観点で既存の RWA 手法に比べ,最も性能が高いことがわかった.

キーワード

1. **ハイブリッド型光ネットワーク**, 2. Routing and Wavelength Assignment(RWA),

3. 多波長光パケット交換,4. 光回線交換

慶應義塾大学 政策・メディア研究科

町田 啓太

Academic Year 2008

Routing and Wavelength Assignment for Optical Networks Combining Circuit and Multi-Wavelength Packet Switching

Abstract

This paper compares several routing and wavelength assignment algorithms for a hybrid optical network architecture combining optical circuit switching and multi-wavelength optical packet switching. In this network, the choice of routing and wavelength assignment (RWA) algorithms critically influences the performance of wavelength utilization in the network. Moreover, load-balancing by the RWA algorithm is significantly important in order to perform deflection routing as one of the contention mechanisms in the network.

The amount of Internet traffic in current backbone networks has grown enormously due to wide deployment of broadband Internet access and new multimedia applications such as P2P file sharing and real-time streaming. On the other hand, emergence of new multimedia applications such as online fighting games or digital cinema streaming requires QoS-guaranteed transport to limit, for example, delay and jitter. In order to address this requirement, we consider a novel hybrid optical network architecture concept, which combines multiwavelength optical packet switching (MW-OPS) and optical circuit switching (OCS).

This paper compares several routing and wavelength assignment algorithms for the hybrid optical network architecture. The hybrid network provides both QoS-guaranteed transport with OCS and high bandwidth utilization with MW-OPS. In this network, due to the fact that wavelength resources in a fiber are shared between OCS and MW-OPS and in MW-OPS each multi-wavelength optical packet must be encoded into continuous, free wavelengths along the route, the choice of RWA algorithms critically influences the performance of wavelength utilization in the network. In this paper, we compare several RWA algorithms in the network by simulation.

As a result, the MML-FF RWA algorithm which combines the First-Fit (FF) wavelength assignment algorithm and the maximum matched lambda (MML) routing algorithm outperforms the others in both wavelength utilization and load-balancing.

Keywords :

1. Hybrid Optical Network, 2. Routing and Wavelength Assignment(RWA),

3. Multi-Wavelength Optical Packet Switching, 4. Optical Circuit Switching

Keio University, Graduate School of Media and Governance

Keita MACHIDA

目 次

第1章	はじめに	1
1.1	序論	1
	1.1.1 背景と目的	1
	1.1.2 本論文の構成	3
第2章	光回線と多波長パケット混在型ネットワークと BWA 手法	4
21		4
2.1	※ このに、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、	4
2.2	991 概念	4
	2.2.1 ペン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
23	光回線と名波長パケット混在型ネットワーク	6
2.0	231 米回線と多波長パケット混在型ネットワークの必要性	6
	2.0.1 元本Cシ版CバノンT加仕主TシTン シジジジタは 9.3.9 概要	7
	2.5.2 減受	8
2.4	光回線と名波長パケット混在型ネットワークにおける BWA 手法	10
2.1	おわりに	11
2.0		T T
第3章	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法	12
第3章 3.1	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに..................................	12 12
第3章 3.1 3.2	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに....................................	12 12 12
第3章 3.1 3.2	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法	12 12 12 12
第3章 3.1 3.2	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法	 12 12 12 12 13
第3章 3.1 3.2	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式	 12 12 12 12 13 14
第3章 3.1 3.2 3.3	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件	 12 12 12 13 14 15
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件	 12 12 12 13 14 15 16
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件	 12 12 12 13 14 15 16 17
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件 シミュレーション結果 おわりに 1-way シグナリング方式を用いた範囲制限型 RWA 手法	 12 12 12 13 14 15 16 17 24
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件 シミュレーション結果 おわりに 1-way シグナリング方式を用いた範囲制限型 RWA 手法 はじめに 1-way 手法	 12 12 12 13 14 15 16 17 24 24
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件 シミュレーション結果 おわりに 1-way シグナリング方式を用いた範囲制限型 RWA 手法 範囲制限型 RWA 手法の必要性 1-way BWA 手法の必要性	 12 12 12 13 14 15 16 17 24 24 24
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2 4.3	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件 シミュレーション結果 あわりに カリに 1-way シグナリング方式を用いた範囲制限型 RWA 手法 範囲制限型 RWA 手法の必要性 範囲制限型 RWA 手法	 12 12 12 13 14 15 16 17 24 24 24 25
第3章 3.1 3.2 3.3 3.4 3.5 第4章 4.1 4.2 4.3 4.4	1-way シグナリング方式を用いた既存 RWA 手法 はじめに RWA 手法 3.2.1 既存の波長割当手法 3.2.2 経路制御手法 3.2.3 1-way シグナリング方式 シミュレーション条件 シミュレーション結果 おわりに 1-way シグナリング方式を用いた範囲制限型 RWA 手法 ばじめに 範囲制限型 RWA 手法の必要性 範囲制限型 RWA 手法 ジミュレーション条件	 12 12 12 13 14 15 16 17 24 24 24 25 26

	4.5.1 各 RWA 手法とシミュレーション時間の関係	28
	$4.5.2$ 増減波長数 $\Delta\lambda$ と波長パス設定要求の棄却率	28
	$4.5.3$ 初期波長数 λ_{init} と多波長光パケットで利用可能な波長数の平均	30
	$4.5.4$ 増減波長数 $\Delta\lambda$ と多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 .	32
	4.5.5 判定間隔 W と多波長光パケットで利用可能な波長数の平均	33
4.6	おわりに.................................	35
第5章	2-way シグナリング方式を用いた負荷分散型 RWA 手法	36
5.1	はじめに..................................	36
5.2	負荷分散型 RWA 手法の必要性	36
	5.2.1 概要	36
	5.2.2 本光ネットワークにおけるディフレクションルーティング	37
5.3	負荷分散型 RWA 手法	38
5.4	性能評価	40
	5.4.1 シミュレーション条件	41
	5.4.2 評価項目	42
5.5	シミュレーション結果	42
	5.5.1 波長資源の利用効率	43
	5.5.2 負荷分散	46
5.6	おわりに...............................	48
第6章	結論	49
6.1	本研究の成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
6.2	今後の課題	50

図目次

2.1	光回線交換	5
2.2	光パケット交換	6
2.3	光回線と多波長パケット混在型ネットワークの概念	7
2.4	従来の光パケット交換と多波長光パケット交換の比較.......	8
2.5	波長資源の分配モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
2.6	Tunable LBPF による動的境界モデルの実現	9
2.7	波長パスの RWA 手法の違いによる波長資源の利用効率へ与える影響 .	10
3.1	1-way シグナリング 方式	14
3.2	14-node NSF ネットワーク	15
3.3	波長パス設定要求の棄却率 (MD)	18
3.4	波長パス設定要求の棄却率 (ML)	18
3.5	波長パス設定要求の棄却率 (MML)	19
3.6	波長パス設定要求の棄却率 (MSL)	19
3.7	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (MD)	20
3.8	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (ML)	20
3.9	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (MML)	21
3.10	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (MSL)	21
3.11	経路差による波長パス設定の平均処理時間 (MD)	22
3.12	経路差による波長パス設定の平均処理時間 (ML)	22
3.13	経路差による波長パス設定の平均処理時間 (MML)	23
3.14	経路差による波長パス設定の平均処理時間 (MSL)	23
4.1	既存の RWA 手法と範囲制限型 RWA 手法の比較	25
4.2	各 RWA 手法の波長パス設定要求の棄却率とシミュレーション時間	28
4.3	波長パス設定要求の棄却率 $(\Delta\lambda=1)$	29
4.4	波長パス設定要求の棄却率 $(\Delta\lambda=4)$	29
4.5	波長パス設定要求の棄却率 $(\Delta\lambda=8)$	30
4.6	波長パス設定要求の棄却率 $(\Delta\lambda=16)$	30
4.7	波長パス設定要求の棄却率 $(\Delta\lambda=32)$	31
4.8	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 $(\lambda_{init}=8)$	31
4.9	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 $(\lambda_{init}=16)$	32
4.10	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 $(\lambda_{init}=32)$	32

4.11	$\Delta\lambda$ を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均(制限	
	型 Random)	33
4.12	$\Delta\lambda$ を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均(制限	
	型 PWA)	34
4.13	Wを変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (制限	
	型 Random)	34
4.14	Wを変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (制限	
	型 PWA)	35
51	本ネットワークの例	37
5.2	空波長数をコストとした経路制御手法	39
5.3	1-way シグナリング方式	40
5.4	1 way シグノングガム ····································	40
5.5	2. (a,) ジジジジジジジン · · · · · · · · · · · · · · ·	43
5.6	波長パス設定要求の棄却率(TWC 有1)	44
5.7	波長パスの設定処理時間	44
5.8	多波長光パケットで利用可能な波長数の平均	45
5.9	経路差による多波長光パケットで利用可能な波長数の相違	46
5.10	多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数が確保できなかった場合	
	の確率	47
5.11	各経路制御における多波長光パケットで利用可能な波長数の平均	47
5.12	多波長光パケットの平均伝播時間	47

表目次

3.1	シミュレーションパラメータ	16
$4.1 \\ 4.2$	シミュレーションパラメータ	26 27
5.1	シミュレーションパラメータ	41

第1章 はじめに

1.1 序論

1.1.1 背景と目的

近年,ブロードバンドアクセスの急激な普及により,インターネット上のトラフィックはムーアの法則を超える勢いで急激に増加している.例えば中国では2007年から2008年にかけて,インターネットの利用者数が1年間で8000万人増加したという報告や,日本では100Mbps以上のFTTHを契約しているユーザーが1000万人を超えたという報告がされている.

また,ネットワーク上を流れるデータも従来のウェブや e-mail などのインタラクティ ブな通信に加え,Full-HD/4K/8K などのリアルタイム高精細動画配信や P2P による ファイル交換など,新しいアプリケーションの登場により,アプリケーションがネット ワークに求める要求も多様化してきている.

これらユーザー数の増加,新しいアプリケーションの登場によってインターネット上のトラフィックが急激に増加したことに伴い,中継ノードの処理能力がボトルネックになってきている.光ファイバを伝送路とした波長分割多重(WDM:Wavelength Division Multiplex)技術の発達によって,リンク帯域の許容容量は増加している.現在,光伝送路の帯域容量が1ファイバで20Tbpsを超えるデータ伝送も可能となっている[1]ほか,1ファイバあたりに多重化できる波長数も1000波長と増加傾向にある[2].しかしその一方で,中継ノードに流れるデータ量が急激に増加し,処理が追いつかずに遅延が発生し問題となっている.

現在のインターネットは,リンクでは光信号で伝送を行うものの中継ノードでは一 度電気信号に変換して処理を行い,処理したのち再び電気信号を光信号に変換して出 力を行っている.そのため,リンク帯域が増加することで,この光電変換がボトルネッ クとなり広帯域化を阻害している.増加し続けるトラフィックに対して,電気的に並列 処理を行って対処することは可能である.CiscoのCRS-1では,1台で1.28Tbpsのト ラフィックを処理することができ,76台連結し並列処理を行うことで最大92Tbpsのト ラフィックを処理することができる.しかし,膨大なデータを電気処理で行うには多数 の電子デバイスを用いた複雑な並列処理を必要とするほか,装置コストや消費電力の 増大が問題視されている.例えば,上述のCRS-1で92Tbpsを処理する場合,総重量 約80トン,装置コスト約80億円,消費電力1MW(小規模の水力発電所1機分に相当) となり,装置コストや消費電力の点において非現実的である.

これらインターネットの現状を踏まえると、今後もネットワーク上のトラフィックは 増加し続け、ネットワークを利用した新サービスの展開が予想されることから、将来 のインターネットは低消費電力で広帯域化を実現することに加え、遅延やジッタ、帯域 を含む QoS 保証および帯域の利用効率向上が必要不可欠となる.

広帯域化の実現に向けては,中継ノード内のデータ転送処理を光領域で実現する光 ネットワークが広く研究されている.光ネットワークではデータを光電変換せず転送 するため,最小限の装置コスト・消費電力で光の広帯域性を維持することができる.特 に光パケット交換(OPS)は,その高い帯域利用効率とインターネットとの親和性の 高さから,次世代のネットワーク基盤として研究が進められている.しかし,光パケッ ト交換は現実的な光 RAM が無いため,DiffServ[3]をはじめとするキューイング方式 を用いて QoS 保証を実現することは極めて困難である.

そこで,筆者らは OPS の利点を活かしつつ QoS 保証を実現するために,光回線と 多波長パケット混在型ネットワークを検討している [4]. 多波長光パケットとは,ペイ ロードを多波長にわたり分割・構成し,波長依存性のない光スイッチで一括交換する方 式である [5],[6].本光ネットワークではファイバ内の波長資源を二つの転送パラダイム で共有し,QoS 保証が必要な場合は波長パスを用いた光回線交換 (OCS) で通信を行い, 保証が必要でない場合は多波長光パケット交換 (MW-OPS) で通信を行う.本光ネット ワークを用いることで,高い帯域利用効率と QoS 保証を実現することができる

しかし,複数の転送パラダイムが混在するため,波長資源の割当手法によって波長 資源の利用効率が低下する可能性がある.多波長光パケットはEnd-to-Endで,波長パ スに割当てられていない長(短)波長側の連続した波長群を用いて交換される.その ため,波長パスにおける RWA(Routing and Wavelength Assignment)手法が,多波長 光パケットで利用可能な波長数を変化させ帯域利用効率に大きく影響を与える.従来 の RWA 手法 [7],[8],[9] は,OCS に基づく光ネットワークを対象としており上述の影響 を考慮していない.そのため,これらを本論文の対象とする光ネットワークに適用し た場合,多波長光パケットで利用可能な波長数を必要以上に減らし,波長利用効率を 大きく低下させる.

また,各リンクで多波長光パケットに用いれる波長数の差は,ディフレクションルー ティングによる衝突回避を阻害する可能性がある。一般的に光パケット交換ではパケッ トが衝突する場合,波長領域,空間領域,時間領域のいずれかによって衝突回避ができ る[10],[11],[12].しかし,多波長光パケット交換では波長領域での衝突回避が困難であ リ,空間領域と時間領域でしか衝突回避ができない[13].したがって,本光ネットワー クにおけるディフレクションルーティングの可否は,本光ネットワーク全体の性能に 影響を与える.そのため波長パスを複数の経路に分散し,各リンクで多波長光パケッ トに用いれる波長数の差を軽減させる RWA 手法が必要となる.

以上を背景とし,本論文では光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける 波長資源の利用効率向上およびディフレクションルーティングの支援を目的とする.こ

2

の目的を達成するため,波長パスを複数の経路に分散することで各リンクでの波長数 差を軽減し,かつ多波長光パケットで利用可能な波長数を多く確保できる RWA 手法を 開発する.

1.1.2 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す.

- 第1章 序論
- 第2章 パス / 多波長光パケット混在型光ネットワークと RWA 手法
- 第3章 1-way シグナリング方式における既存 RWA 手法
- 第4章 1-way シグナリング方式における範囲制限型 RWA 手法
- 第5章 2-way シグナリング方式における負荷分散型 RWA 手法
- 第6章 結論

第2章では光ネットワークの概要について論じる.その後,本研究が対象とする光回線と多波長パケット混在型ネットワークについて述べ,その特徴を論じる.次に,本 光ネットワークにおける RWA 手法について述べる.

第3章では,1-wayシグナリング方式を用いた光回線と多波長パケット混在型ネット ワークにおいて,既存のRWA手法の性能評価をシミュレーションにより行い,その結 果を示す.

第4章では,1-wayシグナリング方式を用いた光回線と多波長パケット混在型ネット ワークにおいて,波長資源の利用効率向上を目的とした範囲制限型RWA手法を提案する.このRWA手法についてシミュレーションによる性能評価を行う.

第5章では,2-wayシグナリング方式であるRSVP-TEを用いた光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおいて,波長資源の利用効率向上を目的とした負荷分散 RWA手法を提案する.このRWA手法についてシミュレーションによる性能評価を行う.

最後に第6章において,以上の結果を総括し将来に向けた課題・展望を示す.

第2章 光回線と多波長パケット混在型

ネットワークとRWA手法

2.1 はじめに

急激に増大しているインターネットトラフィックに対応すべく,全てを光のまま処理 する光ネットワークが注目されている.光ネットワークを用いることで,電気処理の ボトルネックを無くし,低消費電力かつ広帯域なデータ伝送を実現できる.

本章では,光ネットワークの一般的概要について論じる.2.2 において光ネットワークの必要性,概要を説明し,光ネットワークの交換方式について述べる.2.3 において 光回線と多波長パケット混在型ネットワークを説明し,2.4 において本研究のテーマで ある,光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける RWA 手法について述べ, 最後にまとめとする.

2.2 光ネットワーク

2.2.1 概念

光ネットワークは,現在のインターネットの規模拡大目指して提唱され,転送装置 や転送方法などのインターネットシステム全体の抜本的な改善を目的とした概念であ る.光ネットワークは,データ信号を電気に変換することなく光信号のまま処理を行 うため,電気処理によるボトルネックを改善し,増大するインターネットトラフィック に対応可能な次世代ネットワークであると考えられている.

光ネットワーク技術は,光RAMや3R中継器が未成熟なことから,本格的な実用化には至っていないが,今後の技術革新によって次世代のインターネット基盤として広く利用されると考えられる.

2.2.2 光ネットワークの交換方式

光ネットワークには大きく分けて3つの交換方式がある.本節ではこの3つの交換 方式について説明する.

光回線交換

図 2.1 に光回線交換 (OCS:Optical Circuit Switching) のイメージを示す.光回線交換は,電話回線と同様にEnd-to-Endでシグナリングを行い,回線を予約してからデータ伝送を開始する交換方式である.OCSでは回線を予約するため,帯域や遅延,ジッタなどの通信品質を保証することが可能である.しかし,データ伝送を行っていない場合でも他のユーザーはその回線を使用することができないため,帯域の利用効率が低い.



図 2.1: 光回線交換

光バースト交換

光バースト交換 (OBS:Optical Burst Switching) は,回線占有時間を予め設定した上 でシグナリングによる回線の予約を行い,データ伝送を開始する交換方式である.デー タを伝送している時のみ回線を占有するため,OCS に比べて帯域の利用効率は高い. しかし,グリッドコンピューティングや CD/DVD 転送など,限られたアプリケーショ ンにしかその利点を活かせず,多様化するアプリケーションに対応することが難しい. 光パケット交換

図 2.2 に光パケット交換 (OPS:Optical Packet Switching) のイメージを示す.光パ ケット交換は,現在のインターネットに代表されるパケット交換技術を光領域で実現 する交換方式である.そのため,インターネットとの高い親和性や,高い帯域利用効 率といった利点がある.しかし,現実的な光RAM が無いため,DiffServ[3] をはじめと するキューイング方式を用いて QoS 保証を実現することが極めて困難である.



図 2.2: 光パケット交換

2.3 光回線と多波長パケット混在型ネットワーク

本節では,本研究が対象としている光回線と多波長パケットを組み合わせた光ネットワークについて述べる.

2.3.1 光回線と多波長パケット混在型ネットワークの必要性

1章に示したとおり,インターネット上のトラフィックは急激に増加しており,将来 のネットワークには増加するトラフィックを収容できるだけの広帯域化が求められる. 同時に Web や e-mail などの従来のアプリケーションに加え,P2P やリアルタイムの高 画質動画配信など,新しいアプリケーションの登場してきており,アプリケーション がネットワークに求める要求も多様化している.今後も,ネットワークを利用した新 サービスの展開が予想されることから,将来のネットワークには広帯域化に加え,遅 延やジッタ,帯域を含む QoS 保証および帯域の利用効率向上が必要となる. 第2章 光回線と多波長パケット混在型ネットワークと RWA 手法 2.3. 光回線と多波長パケット混在型ネットワーク

光ネットワークの中でも,光パケット交換は,その高い帯域利用効率とインターネットとの親和性の高さから,次世代のネットワーク基盤として研究が進められている.しかし,光パケット交換は現実的な光 RAM が無いため,QoS 保証を実現することは極めて困難である.一方,光回線交換は回線を占有するため,QoS 保証が可能である.しかし,帯域利用効率が低いためインターネットユーザー全てを包括することは困難である.このように単一の転送パラダイムでは,将来のインターネットに必要な全ての要件を満たすことは難しい.

2.3.2 概要

そこで,筆者らは OPS の利点を活かしつつ QoS 保証を実現するために,光回線と多 波長パケット混在型ネットワークを検討している [4].図 2.3 に本光ネットワークの概 念図を示す.本光ネットワークではファイバ内の波長資源を二つの転送パラダイムで 共有し,QoS 保証が必要な場合は波長パスを用いた光回線交換(OCS)で通信を行い, 保証が必要でない場合は多波長光パケット交換(MW-OPS)で通信を行う.本光ネット ワークを用いることで,高い帯域利用効率とQoS 保証を実現することができる.



図 2.3: 光回線と多波長パケット混在型ネットワークの概念

多波長光パケットとは,ペイロードを多波長にわたり分割・構成し,波長依存性のな い光スイッチで一括交換する方式である[5],[6].図2.4 に従来の光パケット交換と多波 長光パケット交換の比較を示す.従来の光パケット交換では,各波長毎に独立したパ ケットを転送するため,波長数×ポート数に比例したデバイス数が必要となる.この 方式では将来的に予想される利用可能波長数の増加[2]に対応する際,装置コストや空 間的規模などのスケーラビリティの面で問題となり得る.これに対し多波長光パケッ ト交換では,単一のペイロードを多波長にわたり分割・構成し,個々の波長に分割さ れた部分ペイロードを一括転送するため,ポート数のみに比例したデバイス数で済む ため,装置コストや空間的規模を大幅に削減できる.



(a)Ordinary Optical Packet Switching (b)Multi-Wavelength Optical Packet Switching

図 2.4: 従来の光パケット交換と多波長光パケット交換の比較

2.3.3 波長資源の割当モデル

本ネットワークにおいて波長資源の分配方式の選択は,本ネットワークの特徴や交換ノードの設計に大きな影響を与える.連続した波長群のみを用いて多波長光パケットを実現する場合,波長資源の配分は図 2.5 に示す2つのモデルに大きく分類できる. 各モデルに示す交換ノードは複数のファイバポートを持ち,1ファイバあたり7波長が利用可能である.そのうち1波長は多波長光パケットのラベル用に確保されており,それ以外の波長資源が波長パスと多波長ペイロードで利用可能となる.

(a)静的境界モデルは,波長パス用の波長数と多波長ペイロード用の波長数をあらか じめ決定し,境界を静的に設定するものである.これにより,波長資源の割当および 管理が容易となるが,境界を越えた波長資源の利用ができないため,波長資源の利用 効率は低下する.一方,(b)動的境界モデルは,境界を動的に変化させることで各転送 パラダイムにおいて柔軟な波長割当ができる.そのため,波長資源の利用効率は高い が,波長パスを短(長)波長側に集約し,多波長光パケットで利用可能な連続した波長 群を多く確保できるような,OCS でのRWA 手法や波長変換を用いた制御が必要とな る.本稿では,波長資源の利用効率向上を目的としていることから,動的境界モデル を用いる.動的境界モデルの場合,波長パスが設定されていない時,全ての波長を多 波長光パケットに利用できる.

本論文では,動的境界モデルを用いた光回線と多波長パケット混在型ネットワーク を対象とする. 第 2章 光回線と多波長パケット混在型ネットワークと RWA 手法 2.3. 光回線と多波長パケット混在型ネットワークと RWA 手法



図 2.5: 波長資源の分配モデル



図 2.6: Tunable LBPF による動的境界モデルの実現

図 2.6 に、Tunable LBPF(Long-Wavelength Bandpass Filter)を用いた動的境界モデ ルの実現例を示す.図 2.6 において最も短波長側にある λ_0 は多波長光パケットのラベ ル用に確保され、波長パスと多波長ペイロードは残りの波長資源を用いて構成される. なお、W は波長パスで、MAX は多波長光パケットで利用可能な最大の波長数を表し ている.Tunable LBPF は、その境界より長波長側の波長のみを透過させるため、多 波長ペイロードを一括して抽出および処理することができる.また、境界を動的に変 化させることで、両転送パラダイムの波長資源の比率を動的に変更できる.したがっ て、Tunable LBPF を用いる場合は多波長ペイロードを境界より長波長側に、波長パ スは境界より短波長側に構成する必要がある.図 2.6 において、 λ_1 から λ_W へ光パス を、 λ_{W+1} から λ_{MAX} へ多波長光ペイロードを割当てた場合、W が MAX よりも小さ 第 2章 光回線と多波長パケット混在型ネットワークと RWA 手法 2.4. 光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける RWA 手法

ければ (MAX - W) の波長数を排他的に多波長ペイロードで利用することができる.

2.4 光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける

RWA 手法

本光ネットワークは2つの転送パラダイムが混在したネットワークである.そのため, 本光ネットワークに動的境界モデルを適用する場合,OCSでの波長パスのRWA(Routing and Wavelength Assginment)手法が波長資源の利用効率に影響を与えるため考慮する 必要がある.図 2.7 に,波長パスのRWA 手法の違いによる波長資源の利用効率へ与え る影響を示す.



(a)波長資源の利用効率:高

(b)波長資源の利用効率:低

図 2.7: 波長パスの RWA 手法の違いによる波長資源の利用効率へ与える影響

図 2.7 において,3本の波長パスを設定する場合を考える.本論文が採用したモデ ル(図 2.6) において,多波長ペイロードはEnd-to-End で波長パスに割当てられていな い,長波長側の連続した波長群でのみ構成される.したがって,(a)の様に波長パスを 長(短)波長側に集約して割当てることで,多波長光パケット用の連続した波長群を確 保するでき,波長資源を無駄なく使用できる.一方,(b)の様に無作為に波長パスを割 当てた場合,連続した波長群が確保しにくくなり多波長光パケットで利用可能な波長 数を必要以上に減らしてしまう.さらに λ_4 , λ_6 は空波長なのに関わらず,連続して空 いていないため多波長光パケットで利用できず,波長資源の利用効率が大きく低下し てしまう.

このように OCS の波長パスにおける RWA 手法が,多波長光パケットで利用可能な 波長数を変化させ帯域利用効率に大きく影響を与える.従来の RWA 手法 [7],[8],[9] は, OCS に基づく光ネットワークを対象としており上述の影響を考慮していない.そのため,これらを本論文の対象とする光ネットワークに適用した場合,多波長光パケットで利用可能な波長数を必要以上に減らし,波長利用効率を大きく低下させる.

本研究では,光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける波長資源の利用 効率向上を目的とした RWA 手法の開発する.

2.5 おわりに

本章では,光ネットワークの一般概念と交換方式について述べ,それらの特徴と将 来のインターネットに必要な要件を論じた.さらに,将来のインターネットに必要な 要件を満たす,光回線と多波長パケット混在型ネットワークを説明し,その際に問題 となる RWA 手法について論じた.

第3章 1-wayシグナリング方式を用い

た既存RWA手法

3.1 はじめに

既存の RWA 手法は OCS に基づく光ネットワークを対象としているため,本ネット ワークに適用した場合,十分なパフォーマンスが得られない可能性がある.

本章では,光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおいて,既存の波長割当 手法と幾つかの経路制御手法の組み合わせについてシミュレーションを行い,波長パ ス設定要求の棄却率,多波長光パケットで利用可能な波長数との関係を評価する.

まず,3.2において本章で用いる既存の波長割当手法と複数の経路制御手法について 述べる.3.3にてシミュレーションパラメータおよび評価方法について論じた後,3.4に シミュレーション結果をしめし,最後にまとめとする.

3.2 RWA 手法

本節では,性能評価を行う波長割当手法および経路制御手法のアルゴリズムについて論じる.

3.2.1 既存の波長割当手法

4種類の波長割当手法を用いた.

• Random

経路上で使用可能な波長の中から無作為に使用する波長を選択する手法である.

• Firtst-Fit

全ての波長に番号を割当て,使用可能な波長の中で最も小さい番号の波長から割 当てていく手法である.この手法は利用中の波長を番号の小さい波長にパッキン グすることができ,番号が大きい波長には長距離の波長用に残しておくことがで きる.また,本手法を用いることで,波長パス交換で使用される波長を短波長側 に集約するとともに,各リンクでの多波長光パケットで利用可能な波長群数を同 一数にでき,波長資源の利用効率を向上することができる.

• Most-Used

使用可能な波長の中で、その波長が使用されているリンク数が最も多い波長を選択する手法である.First-Fit同様、波長のパッキング効果を図るものであり、波 長資源の使用を最小限に抑えることを目的としている.

• Least-Used

使用可能な波長の中で,その波長が使用されているリンク数が最も少ない波長を 選択する手法である.全ての波長を均一に使用することで,波長のロードバラン スを目的とした手法である.

3.2.2 経路制御手法

4種類の経路制御手法を用いた.

- 最小遅延 (MD:Minimum Delay)
 複数ある経路の中から遅延が最小となる経路を選択するものである。
- 空波長数最大 (ML:Maximum Lambda)
 複数ある経路の中で使用可能な波長数が最も多い経路を選択する手法である。
- ・ 共通空波長数最大 (MML:Maximum Matched Lambda)

 各リンク共通で使用可能な波長数が最大となる経路を選択する手法である
- 連続空波長数最大 (MSL:Maximum Sequence Lambda)
 連続した使用可能な空き波長数が最大となる経路を選択する手法である。

(1)を用いた場合,常に遅延が最小となる経路を使用するため,使用される経路が偏っ てしまい,経路毎に使用可能な波長数に大きな差が発生してしまう.しかし,(2)では 使用可能波長数が最も多い経路を選択するため,各経路をまんべんなく使用すること ができ,経路の負荷分散が可能となる.(3)を用いた場合,各リンクで使用可能な波長 数が同じであるため,波長変換を用いずに波長パスを設定することができる.(1)を除 く経路制御手法では,空波長数を経路選択のコストとして考えている.その中でも(4) は,(2),(3)の手法の間に大きな違いがある.(2),(3)では,確保する空き波長の連続 性を考慮していないため,使用可能な波長が不連続(虫食い状態のようなもの)な可能性がある.

多波長光パケット交換においてペイロードは連続した波長群で符号化され,転送される.そのため,各リンクにおいて同じ連続した波長群を確保する必要があり,(4)の手法を用いることで多波長光パケット交換で使用可能な連続した波長群数を確保できると考えられる.また,経路制御(2),(3),(4)に関して,同数の経路があった場合は最小遅延のパスを優先し,波長割当(c),(d)では短波長のものから割当てることとした.

3.2.3 1-way シグナリング方式

図 5.3 に 1-way シグナリング方式のシーケンス図を示す.1-way シグナリング方式 は,波長パス設定要求送信ノード(以下,Srcノード)にて,波長パス要求受信ノード (以下,Dstノード)までの経路上で空いている波長を選択し,Resv メッセージに波長 情報を付加した後,SrcノードからDstノードへ送出する.各リンクにおいて,選択し た波長が予約可能な場合は随時予約を行い波長パスを設定していく.その際,リンク ステートのアップデートを行う.Dstノードまで波長パスの設定が成功した場合,Src ノードへ向けて確認メッセージであるConfメッセージを送出しSrcノードが受信した 後,データの送信を開始する.途中のリンクで波長がすでに使用中で波長パスが設定 できない場合,Srcノードへ失敗したことを通知するResv-Errメッセージを送出する.



図 3.1: 1-way シグナリング方式

3.3 シミュレーション条件

本稿では,リンクステート型経路制御により(1)最小遅延,(2)空き波長数最大,(3) 共通空き波長数最大,および(4)連続空き波長数最大の経路を用い,波長割当方式とし て(a)Random,(b)First-Fit,(c)Most-Used,(d)Least-Usedを用いて,それぞれの組み 合わせでシミュレーション評価を行った.

図 3.2 に示す NSF ネットワーク上で,シミュレーションを行った.表 5.1 にシミュ レーションパラメータを示す.



図 3.2: 14-node NSF ネットワーク

Parameters	Value
Number of Nodes	14
Number of Wavelengths	64
Link Bandwidth	10Gbps
Processing Time	1ms
Switching Time	3ms
Path Setup Request	Poisson Process
Path Setup Destination	Uniform Distribution
Duration of Lambda Path	Exponential Distribution (Av. $3600s$)
Wavelength Assignment	Random, First-Fit, Mlst-Used, Least-Used
Routing Algorithm	MD, ML, MML, MSL
Total Simulation Time	72 hours

表 3.1: シミュレーションパラメータ

評価モデルは波長数 64 の NSF ネットワーク上で,全てのコアノードにエッジノード を配置し,同一の負荷で波長パス要求を行うものとした.波長パス要求の際,宛先はラ ンダムとした.波長パスの要求はポアソン過程とし,波長パスの持続時間は平均 3600 秒の指数分布とした.なお,波長パスの管理は分散制御で行った.このネットワーク 上で,(i)波長パス要求の棄却率,(ii)全エッジ間で多波長光パケット交換に利用可能な 最大波長数の平均と分散,(iii)最小遅延経路をの遅延時間を1とした時の各経路制御手 法の遅延時間の割合についての評価を行った.

3.4 シミュレーション結果

本節では,シミュレーション実験の結果を示す.

図 3.3~3.6 に各手法における波長パス設定要求の棄却率を示す. 棄却率は全ての手法に共通して, Random が最も低かった. これは他の波長割当手法と違い, 波長資源

が余っていれば波長パスを割当てていくためである.しかし,図 3.7~3.10 では波長 資源を多く用いるため,波長パス要求の棄却率を抑えることはできるが,多波長光パ ケット交換で使用可能な連続した波長群を確保することは難しい.一方, Most-Used, Least-Used の棄却率はFirst-Fit と同じ傾向である.これはアルゴリズムを設計する際, 最初の波長を利用可能な波長数の中で短波長側の波長から割当ていく拡張を行ったこ とに起因しているため、First-Fitとほぼ同様の挙動を示している、しかし、Least-Used に関しては使用頻度の低い波長から割当てていくため, Most-Used, First-Fit と比べ て棄却率を抑えることができたと考えられる. Most-Used は First-Fit と同様に波長の パッキング効果を図るものであるが,使用頻度の高い波長を何度も使用する可能性が 高く,利用可能な波長数はFirst-Fitよりも低下し,その分散も大きい.図 3.11~3.14 に多波長光パケットで利用可能な波長数が最も確保可能な経路を選択した場合の波長 パス設定時間と最小遅延経路を選択した場合の波長パス設定時間の割合を示す.経路 制御手法の違いに関わらず,多波長光パケットで利用可能な波長数が最も確保可能な 経路を選択した場合、設定時間が増加しており、最小遅延経路以外の経路を利用して いることがわかる.今回のシミュレーションでは経路制御手法の違いによる平均設定 時間の変化は見られず、ほぼ同じ値を示していた、

以上より,Random が最も棄却率が低い方式だが,同時に多波長光パケット交換で 使用可能な連続した波長群を確保しにくい.一方,First-Fit では棄却率は最も高いも のの,多波長光パケット交換で使用可能な波長群数は最も多い結果になった.したがっ て,波長パスを多く使用するネットワークではRandom を,多波長光パケット交換を 主に使用するネットワークではFirst-Fit を用いることで高いパフォーマンスを得られ ると言える.今回の結果では,経路制御の違いで性能に大きな差はでなかった.これ は全てのコアノードにエッジノードを配置し,同一の負荷で波長パスの要求を出して いるため偏りがなかったためと考えられる.

3.5 おわりに

本章では,光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおいて,既存の波長割当 手法と幾つかの経路制御手法の組み合わせについてシミュレーションを行い,波長パ ス設定要求の棄却率,多波長光パケットで利用可能な波長数との関係を評価した.

その結果,1-wayシグナリング方式を用いた既存手法では波長パス設定要求の棄却率 を抑えつつ多波長光パケットで利用可能な波長数を多く確保することは難しいことが 分かった.



図 3.3: 波長パス設定要求の棄却率 (MD)



図 3.4: 波長パス設定要求の棄却率 (ML)



図 3.5: 波長パス設定要求の棄却率 (MML)



図 3.6: 波長パス設定要求の棄却率 (MSL)



図 3.7: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (MD)



図 3.8: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (ML)



図 3.9: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (MML)



図 3.10: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (MSL)



図 3.11: 経路差による波長パス設定の平均処理時間 (MD)



図 3.12: 経路差による波長パス設定の平均処理時間 (ML)



図 3.13: 経路差による波長パス設定の平均処理時間 (MML)



図 3.14: 経路差による波長パス設定の平均処理時間 (MSL)

第4章 1-wayシグナリング方式を用い

た範囲制限型 RWA 手法

4.1 はじめに

本章では,光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける,1-wayシグナリン グ方式を用いた範囲制限型 RWA 手法について論じる.

まず,4.2 において本光ネットワークにおける負荷分散型 RWA 手法の必要性につい て述べ,4.3 にて負荷分散型 RWA 手法について論じる.その後,4.4 にてシミュレー ションパラメータおよび評価方法について述べ,4.5 にシミュレーション結果を示し, 最後にまとめとする.

4.2 範囲制限型 RWA 手法の必要性

3章では本光ネットワークに既存の RWA 手法を適用し,波長パス設定要求の棄却率 および多波長光パケットで利用可能な波長数の平均について性能評価を行った.しか し,既存の RWA 手法では波長パス設定要求の棄却率を抑えつつ多波長光パケットで利 用可能な波長数を多く確保することはできない.例えば,Random 型を用いた場合,利 用可能な空波長数の中から無作為に選択するため波長パス設定要求の棄却率を抑制で きる.しかし,連続した空波長群を確保することができないため,多波長光パケット で利用可能な波長数を大きく減らし,波長資源の利用効率が低下する.一方,First-Fit を用いた場合,長(短)波長側から割当てて行くため多波長光パケットで利用可能な連 続した波長群を多く確保できる.しかし,長(短)波長側に波長パス設定要求が集中す るため,波長パス設定要求の棄却率が高くなる.

したがって既存の RWA 手法では本光ネットワークの要件を満たすことができないため,新しい RWA 手法が必要となる.

4.3 範囲制限型 RWA 手法

本節では,波長パス設定要求の棄却率を抑えつつ多波長光パケットで利用可能な波 長数を多く確保できる範囲制限型 RWA 手法について述べる.図 4.1 に既存の RWA 手 法と範囲制限型 RWA 手法の比較を示す.



図 4.1: 既存の RWA 手法と範囲制限型 RWA 手法の比較

(a)既存手法の場合,波長パス設定要求の要求数に関わらず,ファイバ内の全波長 資源の中から波長パス用に選択できる.そのため,波長パス設定要求が少ない時でも Random型を用いることで,連続した波長群が多く確保できず多波長光パケットで利 用可能な波長数が減少してしまう.First-Fit型を用いることで波長パスを短(長)波長 側に集約し連続した波長群を多く確保することができるものの,波長パス設定要求の 棄却率が著しく増加するため,本光ネットワークの要件を満たすことができない.(b) 範囲制限型 RWA 手法の場合,波長パス設定要求が少ないときは波長パスで選択可能 な波長資源の範囲を制限し,要求が多いときは範囲を広げる.これにより,波長パス 設定要求の棄却率を抑えつつ多波長光パケットで利用可能な波長数を多く確保できる. 本論文では,波長パス設定要求の棄却率に応じて制御を行う.

本手法では、初期波長数 λ_{init} と最大波長数 L の範囲内で,波長パス要求に対する棄 却率が閾値 Th_{out} を超えた場合,波長パスで使用可能な波長数を増減波長数 $\Delta\lambda$ だけ 増加させる.棄却率が Th_{in} 以下の場合,波長パスで使用可能な波長数を $\Delta\lambda$ だけ減 少させる. $\Delta\lambda$ 増加させても棄却率が Th_{out} 以下に減少しない場合,更に $\Delta\lambda$ 増加させ る.棄却率の判定間隔は W によって決まる.なお,波長選択についてはその範囲内で Random または PWA (Priority-based Wavelength Assignment)[14] とし,それぞれ範囲 制限型 Random(以後,制限型 Random),範囲制限型 PWA(以後,制限型 PWA)とす る.本手法により,波長パスの棄却率が高い場合は多くの波長を用いることで棄却率 を下げることができ,棄却率の減少とともに波長パスで利用可能な波長数を制限する ことで空波長数が増え,多波長光パケットで使用可能な連続した波長群を多く確保す ることができる.なお,PWAとは光バースト交換における自律分散学習型波長割当ア ルゴリズムである.各ノードは自ノードの送信履歴の統計結果から学習し,各波長を ランク付け,その優先順位に従って波長を割当てる手法である.

4.4 シミュレーション条件

本節では,前章で示した RWA 手法を用いて, NSF ネットワーク上で,シミュレーションを行った.表 4.1 にシミュレーションパラメータを示す.

Parameters	Value
Number of Nodes	14
Number of Wavelengths	64
Link Bandwidth	10Gbps
Processing Time	1ms
Switching Time	3ms
Path Setup Request	Poisson Process
Path Setup Destination	Uniform Distribution
Duration of Lambda Path	Exponential Distribution (Av. $3200s$)
Wavelength Assignment	Random, PWA
Routing Algorithm	MD
Total Simulation Time	72 hours

表 4.1: シミュレーションパラメータ

本光ネットワークは14のノードで構成され,各コアノードにエッジノードが配置されている.波長パスと多波長ペイロードで利用可能な波長数は,各ファイバ内64波長とし,その他,多波長光パケットのラベル用に1波長が確保されている.ノード内におけるシグナリングメッセージの処理時間は1msとし,光スイッチのスイッチング速度は3msとした.

波長パスの設定要求は,各エッジノードが行う.要求の発生頻度は各ノード同一とし,宛先はランダムとした.

本稿では,波長割当手法として,Random,PWAの2種類を,経路制御手法として, 最小遅延(MD:Minimum Delay:)型経路制御手法を用いて,それぞれの組み合わせで評 価を行った.

Parameters	Value
初期波長数 (λ_{init})	8, 16, 32
最大波長数 (L)	64
増減波長数 $(\Delta \lambda)$	1, 4, 8, 16, 32
閾値 (Th_{out})	0.3
閾値 (Th_{in})	0.3
判定間隔 (W)	1, 3, 5, 7, 9

表 4.2: 範囲制限型 RWA 手法に関するパラメータ

表 4.2 に範囲制限型 RWA 手法に関するパラメータを示す.本シミュレーションでは, $\lambda_{init} = 8, 16, 32$, $Th_{out} = Th_{in} = 0.3$, $\Delta \lambda = 1, 4, 8, 16, 32$, W = 1, 3, 5, 7, 9 としてそれ ぞれの組み合わせで測定を行った.従来手法では, $\lambda_{init} = 64$, $\Delta \lambda = 0$ とした.

4.5 シミュレーション結果

本節では,シミュレーション実験の結果を示す.

4.5.1 各 RWA 手法とシミュレーション時間の関係

図 4.2 に,負荷 0.3 における各 RWA 手法の波長パス設定要求の棄却率とシミュレーション時間の関係を示す.制限型 Random,制限型 PWA では時間経過とともに Th_{out} = 0.3 に収束している様子が確認され,本手法が正しく動作していることがわかる.



図 4.2: 各 RWA 手法の波長パス設定要求の棄却率とシミュレーション時間

4.5.2 増減波長数 $\Delta \lambda$ と波長パス設定要求の棄却率

図 $4.3 \sim 4.7$ に, $\Delta \lambda$ を変化させた時の波長パス設定要求の棄却率を示す.なお, $\lambda_{init} = 8$, W = 1 とした.

Δλの値に関わらず, PWA が最も棄却率を抑えられていることがわかる.これはPWA が,各ノードペア毎に波長の優先順位を保持しているため,波長選択時の競合を抑え ることができ, Randomに比べ棄却率を抑えられたと考えられる. PWA と Random で 比較した場合,負荷が高くなるにつれて Randomの棄却率が高くなった.

PWA と制限型 PWA で比較した場合,制限型 PWA は PWA に比べ棄却率が高い.これは,PWA がファイバ内の全波長資源の中から波長を選択できるのに対し,制限型は 棄却率の値に応じて波長パスで選択可能な波長資源の範囲を制限しているからである と考えられる.すなわち,棄却率が Th_{out} 以下の場合は選択範囲を狭め, $Th_{out} =$ 以上の場合は選択範囲を広げるため,図 4.2より明らかなように Th_{out} 周辺に棄却率が収束する.

制限型 Random と制限型 PWA で比較した場合では,制限型 PWA が高い負荷においても Thout 以下に棄却率を抑えることができた.





図 4.3: 波長パス設定要求の棄却率 $(\Delta \lambda = 1)$



図 4.4: 波長パス設定要求の棄却率 $(\Delta \lambda = 4)$



図 4.5: 波長パス設定要求の棄却率 ($\Delta \lambda = 8$)



図 4.6: 波長パス設定要求の棄却率 ($\Delta \lambda = 16$)

4.5.3 初期波長数 λ_{init} と多波長光パケットで利用可能な波長数の平均

図 $4.8 \sim 4.10$ に, λ_{init} を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 を示す.なお, $\Delta \lambda = 1$, W = 1 とした.

λ_{init}の値に関わらず,制限型PWAが最も波長数を多く確保できる.これは,棄却率 に応じて波長パスで利用できる波長資源の範囲を制限させることで,負荷が低い場合, 多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数が増えたためであると考えられる.し



図 4.7: 波長パス設定要求の棄却率 ($\Delta \lambda = 32$)



図 4.8: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 $(\lambda_{init} = 8)$

かし,制限型 Random では多波長光パケットで利用可能な波長数をほとんど確保できない.これは,無作為に波長を選択するため,連続した波長群を確保できないためであると考えられる.

PWA と制限型 PWA で比較した場合,負荷が低くなるにつれて差が大きくなり,最 大で約20波長程度多く多波長光パケットで利用可能な波長数を確保できた(図 4.10).



図 4.9: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 $(\lambda_{init} = 16)$



図 4.10: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 ($\lambda_{init} = 32$)

4.5.4 増減波長数 $\Delta \lambda$ と多波長光パケットで利用可能な波長数の平均

図 4.11, 4.12 に,制限型 Random および制限型 PWA における, λ_{init} を変化させた 時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均を示す.なお, $\lambda_{init} = 8$, W = 1 と した.

制限型 Random の場合, $\Delta\lambda$ の値に関わらず, 多波長光パケットで利用可能な波長数 を多く確保することは難しい. 一方,制限型 PWA の場合, $\Delta\lambda$ の増減幅を細かくして

いくに連れ,多波長光パケットで利用可能な波長数を多く確保できる結果となった.これは,増減幅を広くした場合(例えば $\Delta \lambda = 32$),多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数が急激に減少してしまうためであると考えられる.制限型 Random に関しても同様の傾向が見られるが,その差は小さいものであった.



図 4.11: $\Delta\lambda$ を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (制限型 Random)

4.5.5 判定間隔 W と多波長光パケットで利用可能な波長数の平均

図 4.13, 4.14 に,制限型 Random および制限型 PWA における, W を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均を示す.なお, $\lambda_{init} = 8$, $\Delta \lambda = 1$ とした.

RWA 手法に関わらず,判定間隔が長くなるにつれて多波長光パケットで利用可能な 波長数を多く確保できた.これは,判定間隔を長くすることで波長パスで選択可能な 波長数を増減する回数が減るため,間隔が短い場合と比較して,多波長光パケットで 排他的に利用可能な波長数を確保できる時間が長いからであると考えられる.

制限型 PWA では, 判定間隔を長くすることで負荷 0.25 で多波長光パケット用に, 25 波長程度確保することができた.制限型 Random では 14 波長程度確保することができた.



図 4.12: Δλ を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (制限型 PWA)



図 4.13: W を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均 (制限型 Random)



図 4.14: W を変化させた時の多波長光パケットで利用可能な波長数の平均(制限型 PWA)

4.6 おわりに

本章では,1-wayシグナリング方式を用いた範囲制限型 RWA 手法について,各パラ メータを変化させ,波長パス設定要求の棄却率および,多波長光パケットで利用可能 な波長数の平均について性能評価を行った.

その結果,既存の RWA 手法に比べて,波長パス設定要求の棄却率を抑えつつ多波長 光パケットで利用可能な波長数を多く確保することができた.

特に, $\lambda_{init} = 32$, $\Delta \lambda = 1$,W = 9における制限型 PWA が最も高い性能となり,増減波長数の増減幅を小さくし,閾値判定間隔を長くした場合が本光ネットワークの要件を最も満たせることがわかった.

しかし,既存手法のFirst-Fitの方が多波長光パケットで利用可能な波長数を多く確保できるため,さらなる改良が必要である.

第5章 2-wayシグナリング方式を用い

た負荷分散型 RWA 手法

5.1 はじめに

3章および4章では1-wayシグナリング方式を用いて波長パス設定を行った.しかし, 1-wayシグナリング方式では波長パスの棄却率を抑えつつ,多波長光パケットで利用可 能な波長数を多く確保することはできない.

本章では,2-wayシグナリング方式を用いて波長パス設定を行い,光回線と多波長光 パケット混在型ネットワークにおいて波長パスを複数の経路に分散することで各リン クでの波長数差を軽減し,かつ多波長光パケットで利用可能な波長数を多く確保でき る RWA 手法を開発する.そしてこの RWA 手法に関して,波長資源の利用効率および 負荷分散についてシミュレーションによる評価を行う.

まず,5.2 において本光ネットワークにおける負荷分散型 RWA 手法の必要性につい て述べ,5.3 にて負荷分散型 RWA 手法について論じる.その後,5.4 にてシミュレー ションパラメータおよび評価方法について述べ,5.5 にシミュレーション結果を示し, 最後にまとめとする.

5.2 負荷分散型 RWA 手法の必要性

本節では,光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける負荷分散型 RWA 手法の必要性について述べる.

5.2.1 概要

2章において,本光ネットワークは複数の転送パラダイムが混在し,1ファイバ内の 波長資源を2つの転送パラダイムで共有するため,波長資源の割当手法によって波長資 源の利用効率が低下する可能性があると述べた.しかし,RWA 手法が本光ネットワー クに及ぼす影響は上述の項目だけではない. 本光ネットワークにおいて,各リンクで多波長光パケットに用いれる波長数の差は, ディフレクションルーティングによる衝突回避を阻害する可能性がある.一般的に光 パケット交換ではパケットが衝突する場合,波長領域,空間領域,時間領域のいずれか によって衝突回避ができる[10],[11],[12].しかし,多波長光パケット交換では波長領域 での衝突回避が困難であり,空間領域と時間領域でしか衝突回避ができない[13].した がって,本光ネットワークにおけるディフレクションルーティングの可否は,本光ネッ トワーク全体の性能に影響を与える.そのため波長パスを複数の経路に分散し,各リ ンクで多波長光パケットに用いれる波長数の差を軽減させる RWA 手法が必要となる.

5.2.2 本光ネットワークにおけるディフレクションルーティング

図 5.1 に動的境界モデルを本光ネットワークに適用した際の例を示す.本光ネット ワークは R1,R5のエッジノードと R2-R4のコアノードから構成される.各リンクで利 用可能な波長は最大で4波長であり,これは波長パスと多波長ペイロードで共有であ る.これ以外に λ_0 が多波長光パケットのラベル用に1波長確保されている.なお,各 リンクの伝送遅延は等しいものとする.



図 5.1: 本ネットワークの例

図 5.1 では, R3 を経由して R2 から R4, R4 を経由して R2 から R5 へ波長パスが設定され,残りの波長を用いて R1 から R5 へ最小遅延経路で,多波長光パケットが転送されている様子を示している.図 5.1 において,多波長ペイロードで利用可能な波長は最大で4 波長だが,R4 を経由して R2 から R5 へ波長パスが設定されているため,多波長ペイロードは3 波長での構成となる.

エッジノードは,ユーザーノードからパケットを受け取ると,自ノードで保持してい る経路表から宛先までの経路を決定し,その経路で利用可能な空波長数を調べる.そ の後,ユーザーノードから受け取ったパケットをその利用可能な空波長数分に分割し, 各波長にペイロードとして符号化する.そして,宛先情報を含んだラベルを λ_0 に付加 する.

コアノードは, MW-OPS での衝突回避機構として, ファイバ遅延線 (FDL) を保持 している.本光ネットワークにおいて FDL がすでに使用中の場合,他の出力ポートで 多波長ペイロードで利用可能な波長数が,現在符号化されている多波長ペイロードの 波長数と同数もしくはそれ以上であれば,ディフレクションルーティングを用いた衝 突回避が可能である.今,R2においてR4への出力ポートの FDL が使用中であり,R3 を経由するディフレクションルーティングを試みる.しかし,R3 では,多波長光ペイ ロードで利用可能波長数が波長パスによって2 波長に制限され,ディフレクションルー ティングを行うことができない.このように,動的境界モデルを本ネットワークに適 用した場合,各リンクで多波長光パケットに用いることができる波長数の差が,ディ フレクションルーティングの可否を左右する.

5.3 負荷分散型 RWA 手法

本論文が採用したモデル (図 2.6) において,多波長ペイロードは End-to-End で波長 パスに割当てられていない,長波長側の連続した波長群でのみ構成される.したがって Random 型波長割当手法のように,無作為に波長パスを割当てた場合,連続した波長 群が確保しにくくなり多波長光パケットで利用可能な波長数を必要以上に減らし,波 長利用効率を大きく低下させる.そのため,波長パスを短波長側に集約して割当て,多 波長光パケット用の連続した波長群を確保する必要がある.また,特定の経路に波長パ スが集中した場合,各リンクの空波長数に差が生じる.そのため,各リンク共通で利 用可能な波長数が経路によって異なり,図 5.1 のように MW-OPS でのディフレクショ ンルーティングの実現が困難となる.この問題を回避するためには,最小遅延経路以外 の経路を用いて波長パスを設定し,各リンクでの空波長数を均一にするために負荷分 散を行う必要がある.以上の点から,本ネットワークでの波長資源の利用効率向上に は,(1)短波長側への集約,(2)負荷分散,という2つの要件を満たす波長パスの RWA 手法が必要となる.

項目 (1) に関しては First-Fit 型波長割当手法が, Random 型波長割当手法に比べ, 効 果的であると考えられる.項目 (2) に関しては最小遅延経路以外の経路を選択するこ とで,波長パスの負荷分散を実現できる.本稿では項目 (2) の要件を満たすため, 最小 遅延 (MD:Minimum Delay:) 型経路制御手法に加え, (a) 空波長数最大 (ML:Maximum Lambda), (b) 共通空波長数最大 (MML:Maximum Matched Lambda), という2つの 経路制御手法を用いる.図 5.2 に ML および MML の例を示す.



図 5.2: 空波長数をコストとした経路制御手法

MLは,経路上で利用可能な波長数が最大となる経路を選択する手法である.一方 MMLは,経路上で利用可能な波長数の中でも,各リンク共通で空いている波長数が最 大となる経路を選択する手法である.したがって MLを用いた場合,選択した波長が 経路上のあるリンクでは既に利用されている可能性があり,波長パス設定要求の棄却 率が MMLに比べて増加すると考えられる.

本稿での RWA 手法では,リンクステート型経路制御方式を用いて経路決定を行う. ML や MML の場合は,ダイクストラアルゴリズムのコストとして波長数を用いる。

シグナリング方式には 2-way を用いる.図 5.3 に 1-way シグナリング方式を,図 5.4 に 2-way シグナリング方式を示す.

1-way は, Src ノードから送出される Resv メッセージに選択した波長情報を付加し, 随時波長パスを設定していく方式である.そのため,波長パス設定の処理が簡略化で きるため,処理時間を短くできる.しかし,Src ノードから Dst ノードまでの経路上で 選択した波長が空いているかについては考慮していない.そのため,要求数が増える と棄却率が著しく増加する可能性がある.4章で述べた範囲制限型 RWA 手法において, 多波長光パケットで利用可能な波長数が25 波長程度しか確保できなかったのは,棄却 率が増えることで多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数が減少したからだと 考えられる.

それに対し, 2-way では Path メッセージを用いて Src ノードから Dst ノード間の各 リンクで利用可能な空波長を予め調査する.その後,経路上で共通して空いている波長 を選択し, Dst ノード側から Resv メッセージを用いて波長パスを設定する.そのため, 1-way に比べて波長パス設定の成功確率を向上させることができる.2-way も 1-way と 同様,波長パス設定の際にすでに波長が使用不可の場合は, ResvErr メッセージを送出 する.

5.4. 性能評価



図 5.3: 1-way シグナリング方式



図 5.4: 2-way シグナリング方式

5.4 性能評価

本節では,前節で示した RWA 手法を用いて,それぞれの組み合わせでシミュレーション評価を行った.

5.4.1 シミュレーション条件

NSF ネットワーク上で,シミュレーションを行った.表 5.1 にシミュレーションパ ラメータを示す.

Parameters	Value
Number of Nodes	14
Number of Wavelengths	64
Link Bandwidth	10Gbps
Processing Time	1ms
Switching Time	3ms
Path Setup Request	Poisson Process
Path Setup Destination	Uniform Distribution
Duration of Lambda Path	Exponential Distribution (Av. $3200s$)
Wavelength Assignment	Random, First-Fit
Routing Algorithm	MD, ML, MML
Total Simulation Time	72 hours

表 5.1: シミュレーションパラメータ

本光ネットワークは14のノードで構成され,各コアノードにエッジノードが配置されている.波長パスと多波長ペイロードで利用可能な波長数は,各ファイバ内64波長とし,その他,多波長光パケットのラベル用に1波長が確保されている.ノード内におけるシグナリングメッセージの処理時間は1msとし,光スイッチのスイッチング速度は3msとした.

波長パスの設定要求は,各エッジノードが行う.要求の発生頻度は各ノード同一とし,宛先はランダムとした.波長パスの設定にはRSVP-TE[15]を用いた.

本稿では,波長割当手法として,Random,First-Fitの2種類を,経路制御手法として,MD,ML,MMLの3種類を用いて,それぞれの組み合わせで評価を行った.

多波長光パケットで利用可能な波長数および負荷分散の評価を行うため,各エッジノー

ドは10秒毎に他の全ノードへ,2つの多波長光パケットを生成する.1つはMDの経路 を用いて伝送され,もう1つは連続空波長数最大(MSL:Maximum Sequence Lambda) の経路を用いて伝送される.MSLは,多波長光パケットで利用可能な連続した波長群 が最も多く確保できる経路を選択する手法である.この多波長光パケットの経路選択 には,Explicit Routing Object(ERO) [15]を用いた.なお,波長パス用の経路制御手 法と区別するため,多波長光パケット用の経路制御手法をそれぞれ MD-Pkt,MSL-Pkt とする.

5.4.2 評価項目

本稿では (1) 波長資源の利用効率, (2) 負荷分散, という 2 つの項目について評価を 行う.

項目(1)では,各RWA 手法における波長パス設定要求の棄却率と,多波長光パケットで利用可能な波長数について評価を行う.更に各RWA 手法における波長パスの設定処理時間についても評価を行う.??で述べた通り,本光ネットワークでは波長資源の利用効率を向上させる上で,短波長側へ波長パスで利用する波長を偏らせる必要がある.よって項目(1)では,この性質が波長パス設定要求の棄却率および多波長光パケットで利用可能な波長数に与える影響を,明らかにすることを目的として評価を行う.また,MD以外の経路制御手法では必ずしも最小遅延となる経路を選択するとは限らないため,MDに比べ波長パスの設定処理時間が増加する可能性がある.よって,項目(1)では各RWA 手法における波長パスの設定処理時間についても評価を行う.

項目 (2) では,負荷分散がどの程度達成しているのかを調べる目的で,異なる2つの 経路における多波長光パケットで利用可能な波長数の差と平均伝播遅延の差について 評価する.異なる2つの経路としては MD-Pkt と MSL-Pkt を利用し,測定は多波長光 パケットを実際に転送して行う.

本稿では評価項目に関わらず,各ノードに全入力波長への波長変換が可能な波長変換器 (TWC:Tunable wavelength converter)を備えた場合を最適状態とし,TWCの有無による性能の違いについても評価を行う.

5.5 シミュレーション結果

本節では,シミュレーション実験の結果を示す.

5.5.1 波長資源の利用効率

波長パス設定要求の棄却率と伝播遅延



図 5.5: 波長パス設定要求の棄却率 (TWC 無し)

図 5.5 に TWC を用いない場合の波長パス設定要求の棄却率を示す.図 5.5 より, MML が MD および ML に比べて棄却率を抑えられていることがわかる.これは空波長数を コストとして経路を選択することで,空波長数の変化に伴い選択する経路が変化し,波 長パスの設定要求を複数の経路に分散することができるとともに,各リンク共通で空 いている波長数が,最も多く確保できる経路を選択することで,波長パス設定の成功 確率を向上できるためである.一方, ML は MML と同じく空波長数をコストとして いるため,使用する経路を分散することができる.しかし, ML は各リンク共通で空 いている波長の確保については考慮していない.したがって選択した波長が,あるリ ンクでは既に利用されている可能性があり, MML よりも棄却率が高くなったと考えら れる.MD は,最小遅延となる経路を選択するため,特定の経路に波長パスの設定要 求が集中することで,全ての波長が使用されてしまい棄却率が高くなったと考えられ る.図 5.5 より,TWC を用いない場合では MML が棄却率を抑えることができ,特に MML-FF が棄却率を最も抑えることができた.

次に,TWCを用いた場合の波長パス設定要求の棄却率を図 5.6 に示す.ここで各 ノードは,全入力波長への波長変換が可能な波長変換器を備えるものとし,その状態を TWC=100% と表すこととする.波長割当にはFirst-Fitを用いる.図 5.6 より,TWC を用いた場合では ML および MML が棄却率を抑えられている.MML-FF を用いた場 合,負荷 0.4 以下では TWC の有無にかかわらず棄却率は 0 となった.図 5.6 より,TWC を用いた場合でも MML が棄却率を最も抑えることができた.



図 5.6: 波長パス設定要求の棄却率 (TWC 有り)



図 5.7: 波長パスの設定処理時間

図 5.7 に, MD における波長パス設定処理時間を基準とした時の, ML および MML における波長パス設定処理時間の増加率を示す.図 5.7 より, ML および MML は必ず しも最小遅延経路を選択するとは限らないため,最小遅延経路を選択する MD と比較 して波長パスの設定処理時間が増加していることがわかる.遅延の増加率は ML で平均 1.25 倍, MML で平均 1.1 倍以下となり, MML が波長パス設定処理時間の増加率を 最小限に抑えられる結果となった.

以上の結果から, TWCの有無に関わらず MML-FF が波長パスの設定要求の棄却率 を抑え,波長パス設定処理時間の増加率を最小限に抑えることができた.

多波長光パケットで利用可能な波長数

図 5.8 に,多波長光パケットで利用可能な波長数の平均を示す.TWCを用いた場合, 全ての RWA 手法において TWC を用いない場合に比べ,多波長光パケットで利用可能 な波長数を多く確保することができる.また,負荷 0.7 では TWC を用いない場合,多 波長光パケットで利用可能な波長数をほとんど確保することができないが,TWC を用 いた場合では,5 波長以上確保することができる.なお,TWC を用いた場合では RWA 手法の違いによる大きな差はなかった.一方,TWC を用いない場合は負荷 0.1 から 0.6 において,MML-FF が他の手法に比べて多波長光パケットで利用可能な波長数を多く 確保できる.特に,負荷 0.5 において MD-FF,ML-FF は多波長光パケットで利用可能 な波長数を約 3 波長しか確保できないのに対し,MML-FF では約 10 波長ほど確保でき る結果となった.なお,負荷 0.7 以上では TWC を用いない場合,全ての RWA 手法で 多波長光パケットで利用可能な波長数を確保することは難しい.



図 5.8: 多波長光パケットで利用可能な波長数の平均

図 5.10 に,多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数が確保できなかった場合の確率を示す.図 5.10 では負荷が高くなるにつれ,波長パスによって波長資源が消費されてしまうため,多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数の確保が困難となる. TWCを用いない場合,負荷 0.6 以上では全ての RWA 手法で多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数を確保することは難しい.しかし,負荷 0.5 において,MD-FF および ML-FF は多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数を確保できない確率が増加しているのに対し,MML-FF は確保することができる.一方,TWC を用いた場 合では TWC を用いない場合と比較して,負荷 0.7 以下であれば多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数を常に確保できており,特に MML-FF(TWC=100%) が最も性能が高い結果となった.

以上の結果から, TWC の有無に関わらず MML-FF が多波長光パケットで利用可能 な波長数を最も多く確保することができ,多波長光パケットで排他的に利用可能な波 長数を確保できた.また, TWC を用いない場合では MML-FF が他の RWA 手法と比 べ,高い負荷でも多波長光パケットで利用可能な波長数を多く確保することができた.



5.5.2 負荷分散

図 5.9: 経路差による多波長光パケットで利用可能な波長数の相違

図 5.11 に, MD-Pkt および MSL-Pkt の各経路で利用可能な多波長光パケット用波長数の平均を示す.TWCを用いた場合, ML-FF および MML-FF が経路の違いによる波長数の差を最も小さくすることができる.図 5.9 に, MD-Pkt における多波長光パケットで利用可能な波長数を基準とした時の, MSL-Pkt における多波長光パケットで利用可能な波長数の増加率を示す.TWCを用いない場合では MML-FF が最も低い増加率となり,経路差による多波長光パケットで利用可能な波長数のバラつきを最も抑えることができる.TWCを用いた場合では, ML-FF および MML-FF がそのバラつきを最も抑えることができる.特に負荷 0.7 以下では,その増加率がほぼ 1.0 であり,各リンクにおける多波長光パケットで利用可能な波長数をより均一化できている.

図 5.12 に, MD-Pkt における多波長光パケットの平均伝搬時間を基準とした時の, MSL-Pkt における多波長光パケットの平均伝搬時間の増加率を各 RWA 手法ごとに示

す.TWC を用いない場合, MML-FF が最も低い増加率となり, 2つの経路における平均伝播時間の差を最も縮めることができた.これは図 5.9,5.11 からも明らかなように, 2つの経路における多波長光パケットで利用可能な波長数の差が小さいためであると考えられる.一方, TWC を用いた場合では ML-FF および MML-FF が 2 つの平均伝播時間の差を最も縮めることができた.

以上の結果から TWC の有無にかかわらず, MML-FF が MD-Pkt および MSL-Pkt と いう異なる 2 つの経路における,多波長光パケットで利用可能な波長数の差や平均伝 搬遅延の差を最小限に抑えることができ,最も高い負荷分散を達成できた.



図 5.10: 多波長光パケットで排他的に利用可能な波長数が確保できなかった場合の確率



図 5.11: 各経路制御における多波長光パケットで利用可能な波長数の平均





5.6 おわりに

本章では,複数の経路制御および波長割当手法をパス/多波長光パケット混在型光 ネットワークに適用し,性能評価を行った.本光ネットワークにおいて波長資源は,波 長パスと多波長光パケットで共有し,多波長光パケットはEnd-to-Endで波長パスに割 当てられていない長波長側の連続した波長群でのみ構成される.そのため,波長パス における RWA 手法が波長資源の利用効率に大きな影響を与える.また,各リンクで多 波長光パケットに用いることができる波長数の差は,ディフレクションルーティング による衝突回避を阻害する可能性がある.

そこで本章では,波長資源の利用効率向上および負荷分散による空波長数の平滑化を目的として,複数のRWA手法を本ネットワークに適用しシミュレーションによる評価を行った.その結果,波長割当手法にFirst-Fitを用いた,MML-FF型RWA手法が波長の利用効率および負荷分散の点において,最も性能が高い結果となった.

48

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本研究では,光回線と多波長パケット混在型ネットワークにおける RWA 手法を検討し,波長資源の利用効率向上およびディフレクションルーティングのための負荷分散 を実現した.

本光ネットワークではファイバ内の波長資源を二つの転送パラダイムで共有し, QoS 保証が必要な場合は波長パスを用いた光回線交換を用いて通信を行い,保証が必要で ない場合は多波長光パケット交換を用いて通信を行う.この特性により,高い帯域利 用効率と QoS 保証を実現する.

本光ネットワークにおいて多波長光パケットは, End-to-End で波長パスに割当てら れていない長波長側の連続した波長群を用いて交換される.そのため, 波長パスにお ける RWA 手法が, 多波長光パケットで利用可能な波長数を変化させ帯域利用効率に大 きく影響を与える.従来の RWA 手法は, OCS に基づく光ネットワークを対象として おり上述の影響を考慮していない.そのため, これらを本論文の対象とする光ネット ワークに適用した場合, 多波長光パケットで利用可能な波長数を必要以上に減らし, 波 長利用効率を大きく低下させる.

また,各リンクで多波長光パケットに用いれる波長数の差は,迂回経路による衝突 回避を阻害する可能性がある。一般的に光パケット交換ではパケットが衝突する場合, 波長領域,空間領域,時間領域のいずれかによって衝突回避ができる.しかし,多波長 光パケット交換では波長領域での衝突回避が困難であり,空間領域と時間領域でしか 衝突回避ができない.したがって,本光ネットワークにおける迂回経路の可否は,本 光ネットワーク全体の性能に影響を与える.そのため波長パスを複数の経路に分散し, 各リンクで多波長光パケットに用いれる波長数の差を軽減させる RWA 手法が必要と なる.

本研究では,上記の要求を満たすため,(1)RSVP-TEを用いたシグナリング方式,(2) 空波長数をコストとした経路制御手法,(3)波長パスで選択可能な波長資源を動的に変 化させる範囲制限型波長割当手法を用いた RWA 手法を開発した.各 RWA 手法に関し て,波長資源の利用効率および負荷分散についてシミュレーションによる性能評価を 行った.

その結果,経路選択手法に共通空波長数最大 (Maximum Matched Lambda, MML) を,波長割当手法に First-Fit(FF)を用いた MML-FF 型 RWA 手法が,波長パスの設定 要求の棄却率を負荷 0.5 以下で 0 とし,他の RWA 手法に比べて最大約 10 倍ほど多く, 多波長光パケットで利用可能な波長数を確保できた.さらに経路の違いによる多波長 光パケットで利用可能な波長数の差を,最大約1.1倍まで抑制することができ,波長資 源の利用効率および負荷分散の観点で最も性能が高いことを示した.

6.2 今後の課題

本論文では,ポアソン過程に基づいたトラフィックパターンのみの評価となってお り,実トラフィックでの評価を行っていない.そのため,提案した RWA 手法を実際の 光ネットワークに適用した場合,本論文の結果との差異が生じる可能性があり,評価 する必要があると考えられる.

波長パスを新規に設定する際,ファイバ内の空波長数が設定された波長パスの本数 だけ減少する.そのため,多波長光パケットで利用可能な波長数が変化し,多波長ペ イロードの一部が欠落してしまう.したがって,多波長光パケットの構成波長数を変 化させた後,波長パスを設定するシグナリング方式が必要であると考えられる.

また,光ネットワークの一般的なプロトコル群である GMPLS への実装を行い,実 用化に向けた取り組みを行う必要があると考えられる.

謝辞

まず本研究を進めるにあたり,ご指導頂きました主査である慶應義塾大学環境情報 学部教授 村井純博士,副査である同大学環境情報学部教授 中村修博士、東京大学先端 科学技術研究センター教授 森川博之博士,同大学先端科学技術研究センター特任講師 今泉英明博士に感謝致します。

研究に関することだけでなく,物事の考え方や姿勢についても貴重な意見を頂きました.ありがとうございました.

また,研究を進める上での助言などを頂きました,慶應義塾大学環境情報学部専任 講師 重近載行博士,同大学環境情報学部専任講師 湧川隆次博士,同学部専任講師 バン ミーター・ロドニー博士,東京大学先端科学技術研究センター准教授南正輝博士,同 大学先端科学技術研究センター特任助教 猿渡俊介博士,同大学客員研究員 川西直博士 に感謝致します.ありがとうございました.

共に修士論文に取り組んだ仲間である、慶應義塾大学政策メディア研究科修士課程 金井瑛氏,空閑洋平氏,奥村祐介氏,神谷尚保氏,東京大学森川研究室修士課程高木 衛氏,力武紘一郎氏,Pedro Ignacio Morales 氏,千家雅之氏に感謝致します。

外部から来た私を受け入れて下さった東京大学森川研究室の諸氏に感謝致します. そして,モービル広域ネットワーク (MAUI) プロジェクト及び徳田・村井・楠本・中 村・高汐・重近・湧川・バンミーター研究室の諸氏に感謝致します.

最後に常に私を支えて下さった家族に感謝します.

2009年1月 町田啓太

参考文献

- Hiroji Masuda, Akihide Sano, Takayuki Kobayashi, Eiji Yoshida, Yutaka Miyamoto, Yoshinori Hibino, Kazuo Hagimoto, Takashi Yamada, Tomohumi Furuta, and Hiroyuki Fukuyama. "20.4-Tb/s (204 × 111Gb/s) Transmission over 240 km Using Bandwidth-Maximized Hybrid Raman/EDFAs ", Optical Fiber Communication Conference 2007 (OFC2007), PDP20, 2007.
- [2] Takara, H., Ohara, T. Yamamoto, T. Masuda, H. Abe, M. Takahashi, H. Morioka,
 T.: Field demonstration of over 1000-channel DWDM transmission with
 supercontinuum multi-carrier source. Electronics Letters, Vol. 41, (2005) 270-271
- [3] [2474]K. Nichols, S. Blake, F. Baker, D. Black. "Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers," RFC2474, Dec. 1998.
- [4] Hideaki Imaizumi, Katsuya Watabe, Takuo Tanemura, Yoshiaki Nakano, Hiroyuki Morikawa. "HOTARU: a Novel Concept of Hybrid Optical Network Architecture combining Multi-Wavelength Packet and Circuit Switching," submitted to ONDM 2009
- [5] Katsuya Watabe, Mamoru Takagi, Keita Machida, Takuo Tanemura, Hideaki Imaizumi, Yoshiaki Nakano, and Hiroyuki Morikawa. "320Gb/s Multi-Wavelength Optical Packet Switching with Contention Resolution Mechanism using PLZT Switches," OFC2008, San Diego, USA, Feb. 2008.
- [6] Hideaki Furukawa, Naoya Wada, Hiroaki Harai, Makoto Naruse, Hideki Otsuki, Michiaki Katsumoto, Tetsuya Miyazaki, Katsuya Ikezawa, Akira Toyama, Naoki Itou, Hiroshi Shimizu, Hiroshi Fujinuma, Hatsushi Iiduka, Gabriella Cincotti, and Ken-ichi Kitayama. "All-Optical Multiple- Label-Processing Based Optical Packet Switch Prototype and Novel 10Gb Ethernet/80 (8 Lambda x 10)Gbps-Wide Colored Optical Packet Converter with 8-Channel Array Burst-Mode Packet Transceiver," OFC2007, San Diego, USA, Feb. 2007.
- [7] Hui Zang, Jason P. Jue, Biswanath Mukherjee. "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," SPIE Optical Networks Magazine, vol. 1, No. 1, pp. 47-60, 2000.

- [8] Xi Wang, Hiroyuki Morikawa, and Tomonori Aoyama. "Priority-Based Wavelength Assignment Algorithm for Burst Switched WDM Optical Networks," IEICE Trans. Commun., vol. E86-B, no. 5, pp. 1508?1514, May 2003.
- [9] Xiaowen Chu, Bo Li. "Dynamic Routing and Wavelength Assignment in the Presence of Wavelength Conversion for All-Optical Networks," IEEE/ACM TRANS. ON NETWORKING, VOL. 13, NO.3, pp. 704-715, June 2005.
- [10] Haijun Yang, Yoo. S. J. B. "All-Optical Variable Buffering Strategies and Switch Fabric Architectures for Future All-Optical Routers," Journal of Lightwave Technology, vol. 23, no. 10, pp. 3321-3330, Oct. 2005.
- [11] Lin Li, Stephen Scott, and Jitender Deogun. "Performance Analysis of WDM Optical Packet Switches with a Hybrid Buffering Architecture," OptiComm2003, pp. 346-356, Nov. 2003.
- [12] D. J. Blumenthal, K. Y. Chen, J. Ma, R. J. Feuerstein, and J. R. Sauer. "Demonstration of a Deflection Routing 2 x 2 Photonic Switch for Computer Interconnects," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 4, no. 2, pp. 169-173, Feb. 1992.
- [13] 斉藤 哲也, 渡部 克弥, 松本 延孝, 今泉 英明, 森川 博之, 羽鳥 光俊, "多波長光パ ケットネットワークにおける遅延線バッファを用いた衝突回避機構の評価,"信学技報, PN2006-96, Mar. 2007.
- [14] 橋口 知弘, 王 渓, 森川 博之, 青山 友紀, "光波長多重ネットワークにおける波長優
 先度を用いた波長予約方式の性能評価,"信学技報, CS2003-54, 2003.
- [15] [RFC3209]D.Awduche, L. Berger, T. Li, V.Srinivasan, G. Swallow,"RSVP-TE:Extensions to RSVP for LSP Tunnels," RFC3209, December 2001.

研究成果

国際会議(4)

[1] <u>K.Machida</u>, H.Imaizumi, H.Morikawa, and J.Murai, "A RWA Performance Comparison for Hybrid Optical Networks combining Circuit and Multi-Wavelength Optical Packet Switching," 13th Conference on Optical Network Design and Modeling(ONDM 2009), Braunschweig, Germany, Feb. 2009.

[2] H. Imaizumi, K. Watabe, M. Takagi, <u>K. Machida</u>, A. Watanabe, and H. Morikawa, "A Hybrid Optical Network Architecture Concept Cobining Multi-Wavelength Packet and Circuit Switching (HOTARU)," The Conference on IP+ Otical Network (IPOP2007), Tokyo, Japan, June 2007. (demo)

[3] K. Watabe, M. Takagi, <u>K. Machida</u>, T. Tanemura, H. Imaizumi, Y. Nakano, and H. Morikawa, "320Gb/s Multi-Wavelength Optical Packet Switching with Contention Resolution Mechanism using PLZT Switches," OThA5, in Proceedings of The Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC 2008), San Diego, USA, Feb. 2008.

[4] H. Imaizumi, M. Takagi, <u>K. Machida</u>, H. Li, D. E. Rianto, Y. Okamura, and H. Morikawa, "A Hybrid Optical Network Architecture Concept Cobining Multi-Wavelength Packet and Circuit Switching (HOTARU)," The Conference on IP+ Otical Network (IPOP2008), Tokyo, Japan, June 2008. (demo)

研究会(3)

[5] 町田 啓太,渡部 克弥,今泉 英明,森川 博之,村井 純,"パス・多波長パケット混 在型光ネットワークにおける連続波長割当手法の基礎的検討,"電子情報通信学会研究 報告,フォトニックネットワーク研究会 (PN2007-74), Mar. 2008.

[6] 町田 啓太, 今泉 英明, 森川 博之, 村井 純, "パス/多波長光パケット混在型光 ネットワークにおける負荷分散型 RWA 手法,"電子情報通信学会研究報告, フォトニッ クネットワーク研究会 (PN2008-39), Dec. 2008.

[7] 高木 衛,渡部 克弥,町田 啓太,今泉 英明,種村 拓夫,中野 義昭,森川博之, "PLZT 型光スイッチを用いたフィードフォワード型入力バッファ付き 320Gb/s 多波 長光パケット交換の実証実験,"電子情報通信学会研究報告,フォトニックネットワー ク研究会 (PN2007-78), Mar. 2008.

大会(2)

[8] 町田 啓太, 渡部 克弥, 今泉 英明, 森川 博之, 村井 純, "パス・パケット混在光八 イブリッドネットワークにおける波長割当方式,"電子情報通信学会総合大会, B-12-15, Mar. 2008.

[9] 高木 衛,渡部 克弥,町田 啓太,今泉 英明,種村 拓夫,中野 義昭,森川博之, "PLZT 型光スイッチを用いた衝突回避機構付き 320Gb/s 多波長光パケット交換の検 証,"電子情報通信学会総合大会,B-12-9,Mar. 2008.

55