

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700085

研究課題名(和文) 物理層の影響を考慮した動的な光ネットワーク制御技術

研究課題名(英文) Dynamic control technique for optical networks considering physical layer impairment

研究代表者

平田 孝志 (HIRATA, KOUJI)

東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：10510472

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円、(間接経費) 780,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、物理層の影響を考慮した動的な光ネットワーク制御技術の確立を目的とする。光ネットワークでは、専用の波長が割り当てられた経路である光パスを設定してデータを送信する。光ネットワークを設計する際、この光パス設定の棄却率を下げるのが非常に重要である。加えて、物理層に起因する減衰や雑音等の信号劣化による影響も併せて考慮する必要がある。そこで本研究では、光パス設定の棄却率及び物理層の影響を考慮した動的な光ネットワーク制御を行うための複数の課題を提起し、それらの解決策を提案することで、高品質光ネットワークの構築を行った。

研究成果の概要(英文)：This research aims to establish a dynamic control technique for optical networks considering physical layer impairment. In optical networks, data are transmitted via lightpaths which are routes with dedicated wavelengths. It is very important to reduce blocking probability of lightpath establishment in the design of optical networks. Furthermore, we should consider the impact of physical layer impairment. In this research, we construct high-quality optical network environments by proposing some schemes which efficiently avoid blocking of lightpath establishment and physical layer impairment.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：光ネットワーク 非線形光学効果 ネットワーク設計

### 1. 研究開始当初の背景

近年のインターネットの様々なコンテンツの普及に起因する爆発的なトラフィック量の増加に対応するためのネットワーク技術として、光ネットワークが提唱されている。光ネットワークは、ネットワーク内部のスイッチング等の全ての処理を光信号のまま行うことで、中間ノードにおける電気処理のボトルネックを無くし、大容量伝送を実現する。また、光ネットワークは、従来の電氣的なネットワークよりも遥かにネットワーク機器の消費電力が少なく、エコロジーの観点からも非常に注目を集めている。

このように、光ネットワークは将来のインフラとして必要不可欠な技術であるが、物理層に起因する減衰や雑音等の信号劣化の問題が顕在化する。従来の電氣的なネットワークにおいても信号劣化は問題となるが、光ネットワークにおいては、エンドツーエンドで光信号のままデータ伝送を行うため、ネットワーク内部における雑音除去等による信号劣化の防止は非常に困難である。光ネットワークにおける物理層の影響による信号劣化の要因としては、様々なものが存在し、これらの要因により引き起こされる信号劣化が光ネットワークの伝送性能に与える影響は大きい。つまり、例えば上位のレイヤにおけるルーティングや波長割当等の伝送制御が理論的に正しく行われていても、下位のレイヤにおいて発生する信号劣化により信号の伝送損失が大きくなると、受信者は信号を正しく受信できない。この問題を解決する根本的な方法として、伝送装置やファイバ等の改良により上記の信号劣化の要因を取り除くことが考えられるが、技術的な限界が存在する。そこで、上位レイヤから、つまりネットワーク側からの解決を図る必要性が高まっている。本研究では、そのような背景のもと、光ネットワークの伝送効率改善を行ってきた。

### 2. 研究の目的

本研究は、物理層の影響を考慮した動的な光ネットワーク制御技術の確立を目的とする。近年、光ネットワークの伝送効率改善に関する研究が盛んに行われているが、これまで行われている多くの光ネットワークの研究は、他のレイヤの影響を考慮しておらず、レイヤ毎の独立した振る舞いを対象としている。しかし上述のように、現実のネットワークでは、特に物理層における様々な要因から発生する信号劣化が問題となり、上位のレイヤの情報のみでネットワーク制御を行うと効果的に動作しない。そこで本研究では、物理層の影響を考慮した動的な光ネットワーク制御を行うための複数の課題を提起し、それらの解決策を提案することで、高品質光ネットワークの構築を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、課題を複数の小課題に分け、段階的に検討を行った。具体的には、(a)理想的な状況下における光ネットワークの伝送特性の評価、(b)四光波混合による影響を考慮した光ネットワーク制御手法、(c)四光波混合を考慮した光ネットワークの省電力設計、の3つの小課題を扱った。

まず、課題(a)により、信号劣化が発生しない理想的な状況下における、光ネットワークの基本的特性を評価し、新たなネットワーク制御手法の提案を行った。次に、課題(b)において、課題(a)で提案した制御手法をもとに、信号劣化の要因の一つである四光波混合に着目し、四光波混合による影響を抑制するような制御手法の提案を行った。また、課題(c)においては、光ネットワークが消費する電力に着目し、課題(b)によって得られた知見を用いて、四光波混合による影響とネットワークの消費電力を同時に抑えることのできるネットワーク制御手法の提案を行った。

### 4. 研究成果

以下、それぞれの課題に対する研究成果を述べる。なお、以下の評価は全てシミュレーション実験により行っている。

#### (1) 理想的な状況下における光ネットワークの伝送特性の評価

光ネットワークでは、専用の波長が割り当てられた経路である光パスに沿ってデータが送信される。本研究では、光パス設定要求に応じて動的に光パスを設定するようなネットワーク環境を想定する。通常、そのようなネットワークにおいては、性能指標として光パス設定の棄却率が使用される。光パスは送受信ノード間の経路上で波長を占有する。つまり、同じ波長を利用した異なる光パスはあるリンクにおいて同一のファイバを利用出来ず、さらに波長変換なしでは経路上の全てのリンクにおいて同じ波長を使用しなければならない。その結果、一般に光ネットワークにおける光パス設定の棄却率は非常に高い。この棄却率を低下させ、光ネットワークを効率よく運用するためには、戦略的な経路及び波長選択が必要不可欠である。

本研究では、後方型波長予約を用いた経路及び波長選択手法を提案した。提案手法では、光パス設定要求が発生するたびに、後方型波長予約のシグナリングを用いて送受信ノード間の複数の経路上のリンク状態を収集する。受信ノードはその収集された情報を用いて、経路上の波長利用状況が均一となるように経路及び波長の組合せを選択する。それゆえ、提案手法では、各ノードがリンク状態を交換する必要がない。提案手法により、光ネットワークにおいて光パス設定の棄却率が効果的に改善されることが期待できる。

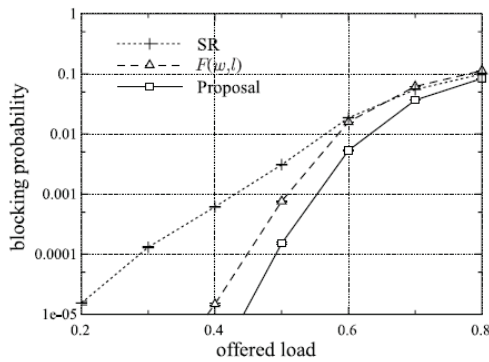


図1 棄却率 (課題 (a))

図1に、ネットワークの負荷に対する光パス設定の棄却率を示す．図において、「SR」及び「 $F(w, l)$ 」は既存手法の棄却率を示している．図より、提案手法により、光パス設定の棄却率が効果的に削減されていることがわかる．

この研究成果は、国際会議及び論文誌上で発表を行った．また、光ネットワークの一部のノードに波長変換機能を持たした環境において、本手法を発展させた制御手法も併せて提案しており、この成果も国際会議及び論文誌上で発表を行っている．

## (2) 四光波混合による影響を考慮した光ネットワーク制御手法

光ネットワークの伝送容量は波長分割多重技術の発展により急速に拡大している．しかしそれに伴い、光ファイバ内で起こる光非線形現象が解決すべき課題として現れてきた．四光波混合(Four Wave Mixing: FWM)は光非線形現象のひとつで、複数の周波数の入射光から、3次の非線形分極により、新たな光が発生する現象である．四光波混合によって発生する光は、光パスが使用する波長上に雑音として現れるため、信号劣化の要因となる．また、長距離伝送が可能で基幹網での使用を想定された分散シフトファイバでは、四光波混合の影響が大きく出る．そのため、四光波混合は光ネットワークを構築する上で、解決すべき重要な課題である．

このような背景のもと、本研究では光ネットワークにおける四光波混合の影響を考慮した光パス設定法を提案した．提案手法は、ライトパス設定の際、四光波混合の発生を回避するような経路、波長、ファイバの選択を行う．またその際、提案手法は、波長資源の枯渇による光パス設定の棄却を回避するために、ネットワーク内の波長資源の利用状況も考慮して経路及び波長の選択を行う．提案手法により、四光波混合の発生を抑制しつつ、光パス設定の棄却率の効果的な改善が期待できる．

図2はネットワークの負荷に対する光パス設定の棄却率である．ただし、ここでいう棄却率とは、波長資源の枯渇によって光パス自体が設立できなかった場合と、光パスは設

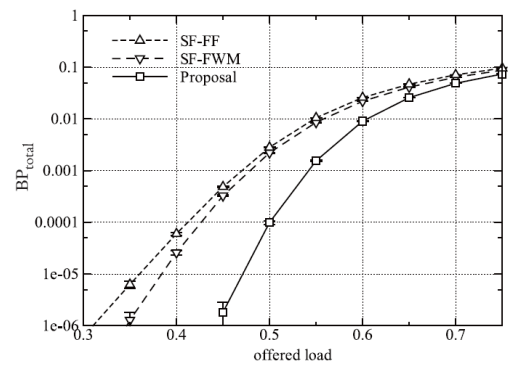


図2 棄却率 (課題 (b))

定できたが、四光波混合の発生によって受信SN比が閾値を下回った場合を棄却とみなした場合を合わせた値である．図において、「SF-FF」及び「SF-FWM」は既存手法の結果を示す．図より、提案手法を用いることで、四光波混合の影響を大きく抑制できることがわかる．

本研究成果は国内研究会及び論文誌上での発表を行っている．

## (3) 四光波混合を考慮した光ネットワークの省電力設計

近年の爆発的なトラフィック量の増加に対応するためにネットワークが発展してきたが、ネットワークの規模が大きくなることにより、ネットワーク機器が消費する電力が深刻な問題となっている．実際、ネットワーク機器の消費電力は年間約12%ずつ増加していると言われている．光ネットワークで使用される光スイッチはIPルータと比較して、消費電力が少ない．そのため、光ネットワークはIPネットワークよりも低消費電力で構成できるが、今後のネットワーク機器の消費電力増加量を考えると、光ネットワークのさらなる省電力化は重要な課題である．

光ネットワークは送受信器、光ファイバ増幅器、多重化器、光スイッチ等で構成されるが、中でも光ファイバ増幅器は多くの電力を消費する．光ファイバ増幅器は、異なる波長の複数の光信号を光/電気/光変換なしで増幅する装置であり、ファイバ毎に設置される．複数ファイバ環境では、各リンクは複数の光ファイバで構成されるため、多くの光ファイバ増幅器が必要となり、消費電力が大きくなる．光信号が伝送されていない場合、光ファイバ増幅器をスリープさせることで電力消費を抑えることが可能となるが、一方で、一つでも光信号がファイバ中を伝送すると、光ファイバ増幅器は稼働することになる．よって、電力消費を効率的に抑えるためには、波長の異なる光信号をできるだけまとめて増幅することが必要である．

本研究では、適切な経路、波長、ファイバ選択によって、棄却率、四光波混合による信号劣化、消費電力を同時に効果的に抑制する光パス設定手法を提案する．消費電力を削減

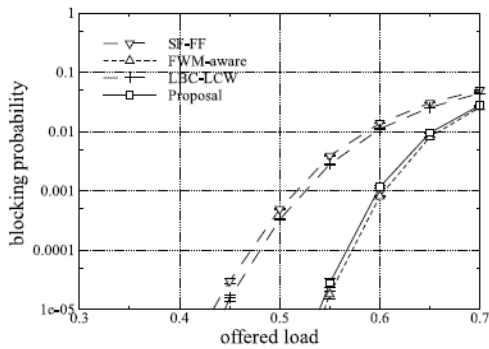


図3 棄却率 (課題 (c))

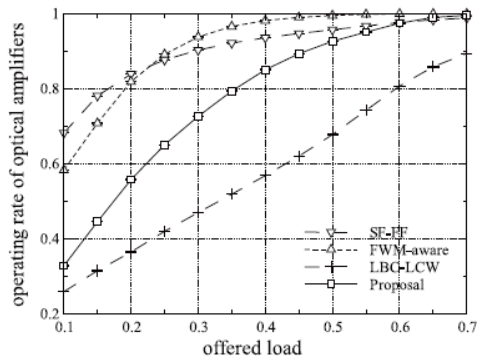


図4 電力消費量 (課題 (c))

するためには、光パス設定の際に、できるだけ一つの光ファイバに複数の光信号をまとめて光ファイバ増幅器で増幅する必要がある。一方、四光波混合は同一ファイバ上で利用する周波数が近いほど、その影響が強くなる。よって、四光波混合の影響を低減するためには、できるだけ多くのファイバに分散して光信号を送信するほうが良い。これらの関係はトレードオフとなると考えられるが、提案手法は両者を考慮した光パス設定によって、これらの影響を同時に削減することを狙う。さらに、提案手法は、波長資源の枯渇による光パス設定の棄却を回避するために、ネットワーク内の波長資源の利用状況も考慮して経路と波長の選択を行い、光パスを設定する。

図3、4、5はそれぞれ、ネットワークの負荷に対する、棄却率、電力消費量、平均光SN比を示している。図において「SF-FF」、「FWM-aware」、「LBC-LCW」は既存手法である。図3より提案手法は棄却率の増加を大きく抑制していることがわかる。また、図4及び5より電力消費をある程度抑制しつつ高いSN比を示していることがわかる。このように提案手法を用いることで、省電力を実現しつつ、四光波混合の影響や光パス設定の棄却率を大きく抑制ができるような光ネットワークの制御が行える。

本研究成果は査読付き論文誌に採択された。

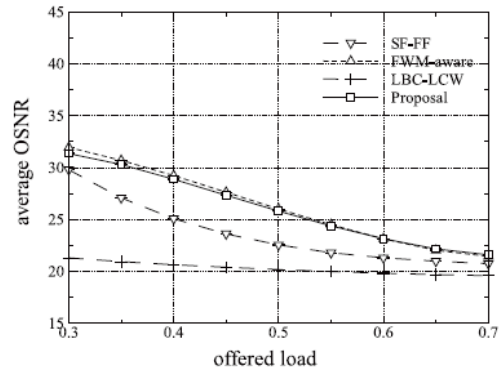


図5 平均光 SN 比 (課題 (c))

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

[1] 平田孝志, 村口正弘, ``四光波混合の影響を考慮した全光ネットワーク省電力化のための光パス設定手法,`` 電気学会論文誌 (採録決定済), 2014 (査読有).  
<http://www.iee.jp/>

[2] K. Hirata, Y. Fukuchi, and M. Muraguchi, ``Dynamic lightpath establishment considering four wave mixing in multifiber WDM networks,`` Photonic Network Communications, vol. 26, no. 2, pp. 120-130, 2013 (査読有).  
DOI: 10.1007/s11107-013-0414-2

[3] K. Hirata and M. Kawahara, ``Group replica caching scheme for optical grid networks,`` Optical Switching and Networking, vol. 10, no. 3, pp. 223-232, 2013 (査読有).  
DOI: 10.1016/j.osn.2013.02.006.

[4] K. Hirata and Dewiani, ``Dynamic routing and wavelength assignment in multifiber WDM networks with wavelength conversion capability,`` Network and Communication Technologies, vol. 1, no. 2, pp. 36-47, 2012 (査読有).  
DOI: 10.5539/nct.v1n2p36.

[5] Dewiani, K. Hirata, K. Kalegele, Y. Higami, and S. Kobayashi, ``Dynamic routing and wavelength assignment with backward reservation in wavelength-routed multifiber WDM networks,`` Journal of Networks, vol. 7, no. 9, pp. 1441-1448, 2012 (査読有).  
DOI: 10.4304/jnw.7.9.1441-1448.

[6] K. Hirata and M. Kawahara, ``Contention resolution considering

multicast traffic in optically burst-switched WDM networks,' ' Photonic Network Communications, vol. 23, no. 2, pp. 157-165, 2012 (査読有).  
DOI: 10.1007/s11107-011-0346-7.

〔学会発表〕(計7件)

[1] 伊藤 耕平, 平田 孝志, 村口 正弘, ``低消費電力光ネットワーク実現のための動的ライトパス設定手法,' ' 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 112, no. 463, NS2012-195, pp. 175-178, 沖縄県, 2013年3月.

[2] 平田 孝志, 村口 正弘, ``マルチファイバ WDM ネットワークにおける四光波混合を考慮したライトパス設定,' ' 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 112, no. 231, NS2012-97, pp. 95-100, 京都府, 2012年10月.

[3] Dewiani, K. Hirata, Y. Higami, and S. Kobayashi, ``Dynamic routing and wavelength assignment in multifiber WDM networks with sparse wavelength conversion,' ' in Proc. the 3rd IEEE International Conference on ICT Convergence (ICTC 2012), Jeju, Korea, Oct. 2012, pp. 567-572.

[4] K. Hirata and M. Kawahara, ``Replica caching scheme according to status of neighboring nodes in optical grid networks,' ' in Proc. the 2nd IFIP International Conference on Network of the Future (NoF 2011), Paris, France, Nov. 2011, pp. 113-117.

[5] Dewiani, K. Hirata, Y. Higami, and S. Kobayashi, ``Dynamic routing and wavelength assignment scheme using signaling of backward reservation in multifiber WDM networks,' ' in Proc. the 2nd IEEE International Conference on ICT Convergence (ICTC 2011), Seoul, Korea, Sep. 2011, pp. 447-452.

[6] 平田 孝志, デウイアニ, 樋上 喜信, 小林 真也, ``マルチファイバ WDM ネットワークにおける後方型波長予約を用いた経路及び波長選択手法,' ' 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 111, no. 196, NS2011-79, pp. 115-120, 宮城県, 2011年9月.

[7] Dewiani, K. Hirata, Y. Higami, and S. Kobayashi, ``Wavelength selection based on wavelength availability in multi-fiber WDM networks,' ' in Proc. the 2nd IEEE International Conference on Multimedia Technology (ICMT 2011), Hangzhou, China,

Jul. 2011, pp. 3794-3797.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)  
取得状況(計0件)

〔その他〕  
なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平田 孝志 (HIRATA, Kouji)  
東京理科大学・工学部・助教  
研究者番号: 10510472

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 研究連携者

なし