

5-2 フレキシブル光パス交換技術

5-2 Flexible Optical Path Switching Technology

古川英昭

Hideaki FURUKAWA

将来の光ネットワークでは、通信サービス要求の動的変化への対応やリンク障害時の迅速な復旧のために、光パスを高速かつ弾力的に運用することが求められる。しかし、従来の光パス交換技術では、多数の光パスの制御時に生じる複雑な光信号の強度変動に追従することが困難である。そこで我々は、任意の数の光パスの高速制御を可能にするフレキシブル光パス交換技術の研究開発を行っている。本稿では、開発したバーストモード光増幅器を導入したフレキシブル光パスノード、本ノードを用いた複数光パスの高速制御の実証、リンク障害時における従来光増幅器が与えるネットワーク全体への影響の評価等、得られた成果について紹介する。

In future optical networks, it is required to operate optical paths at high speed and flexibly in order to cope with the dynamic change of communication service request and to promptly restore failed links. However, with conventional optical path switching technologies, it is difficult to follow the power fluctuation of optical signals caused by the collective control of many optical paths. Therefore, we have researched and developed flexible optical path switching technologies that enable high speed control of arbitrary number of optical paths. In this paper, we show achievements of research such as a flexible optical path node with our developed burst-mode optical amplifiers, a demonstration of high speed controlling of multiple optical paths using this node, and an evaluation of the influence of the conventional optical amplifier on the whole network at the time of link failure.

1 まえがき

モバイルトラフィック需要の増大に対し、ピーク速度 20 Gbps 程度、1 ms 未満の低遅延、100 倍以上のエネルギー効率を目指した第 5 世代移動体通信システム (5G) の研究開発が進んでいる [1][2]。5G が活用される社会では、高速通信、超低遅延通信、大量機器間通信などを活用した多様な通信サービスの提供が想定されている。多様な通信サービスを効率的に展開するために、共有化されたネットワーク資源やコンピューティング資源の適切な割当てを行い、通信サービスの発生、終息、状態変化に合わせて、通信サービスごとに要求される通信品質 (Quality of Service: QoS) を満足させたネットワークを迅速に提供する技術が求められている。将来の光ネットワークでは、限りある光資源の有効利用や光通信装置の消費電力の抑制のために、このような時間単位・分単位の通信サービス要求に合わせて、データを運ぶための光パス群を適切な容量かつ必要な時間だけ提供する運用方法が理想的である。また、ネットワークの保守の面では、光ファイバの切

断などによる通信障害が発生して多数の光パスが途絶した場合、途絶した光パスの通信を回復するための代替光パス群を迅速に提供することや、途絶した光パスが残存光パスの通信品質に与える悪影響を抑制することなどが求められる。

一方、従来の運用方法では、あるリンクの光パス群は通信トラフィックの事前の需要予測の基に設定されており、設定後はほぼ固定的に使用されている。また、光交換装置の安定動作のために、伝送データの有無にかかわらずに使用可能な波長全てを利用しており、効率的な資源利用とはなっていない。この原因は光交換装置の中に含まれる光増幅器の特性にある。既存の光増幅器は、入力する光信号強度が急激に変化すると利得変動を生じ、出力信号が不安定となって通信品質に悪影響を与えてしまう。このような動作の一例を図 1 に示す。中継光ノードにおいて、光スイッチによって 2 経路から合計 3 つの光パス群が合波され、光増幅器に入力されている。光パス群 3 のある光パスの出力光信号強度は、光受信器の受信可能な強度の範囲内に位置している。ここで、一方の経路からの 2 つの光パス

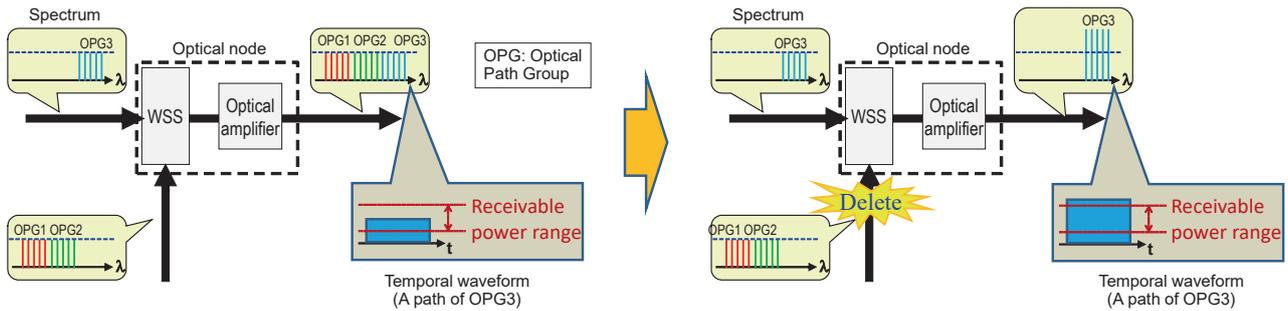


図1 複数光パスの設定/解放時における既存の光増幅器の利得変動を原因とした残存光パスへの光強度変動の発生

群1、2を削除した場合、残存する光パス群3への光増幅器の利得が増大し、過大な出力光信号強度となる。よって、光信号強度が光受信器の最適な受信強度範囲から外れるなど、伝送品質(QoT: Quality of Transmission)が劣化する可能性が高くなる。このため、通信需要にかかわらず入力光信号強度を一定とし、通信中に光信号を切り替えない運用方法を取らざるを得ない。

そこで我々は、光ネットワークにおける通信サービス要求の動的変化への対応や通信障害時における通信の維持を目指して、任意の数の光パスを高速に提供可能なフレキシブル光パス交換技術の研究開発を実施している。本稿では、我々がこれまでに開発してきた利得変動を抑制するバーストモード光増幅器の特性や、本増幅器を導入したフレキシブル光パスノードについて紹介する。また、これまでに得られた成果として、残存する光パスに過渡的な信号劣化を起こさず、従来の10分の1以下の時間で4波長の光パスを一括設定可能であることを示した実証実験の結果や、通信障害発生時において従来光増幅器が与える悪影響がネットワーク全体に及ぶことを示したシミュレーション結果などについて述べる。

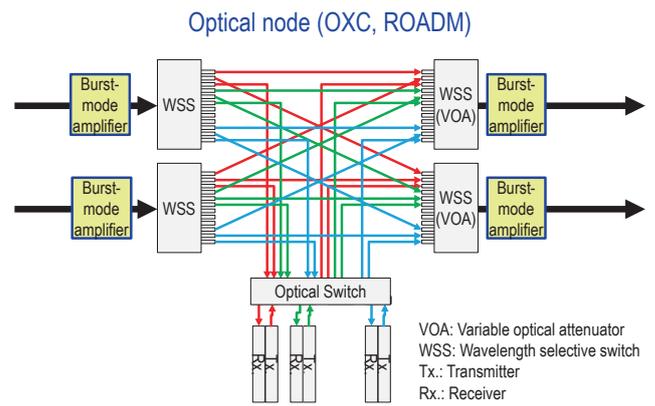


図2 フレキシブル光パスノードの構成

強度損失を補償するために、ノード入力時や出力時に光信号強度を増幅する。可変光減衰器は、光信号に光強度変動があった場合、波長別に光強度が一定になるように調整する。現在、WSSはこの可変光減衰器としても用いられている。WSSの動作速度はミリ秒程度である。

複数波長の光パスの設定/解放が行われる場合及びリンク障害が発生した場合、光増幅器へ入力する光信号強度の総和が瞬間的に大きく変動する。一般的な光増幅器であるEDFA (Erbium doped fiber amplifier)を用いた場合、入力光信号強度の急激な変化により過渡応答が生じ、出力光強度が変化しQoTが劣化する可能性がある。この問題に対して、バースト光信号による過渡応答を抑圧するために、我々は大口径の特殊なファイバを用いて固有飽和電力を大きく設計したバーストモードEDFA[3]を開発した。また、補助的な利得変動抑制技術である光帰還ループによる利得クランプ手法を導入し、長い時間スケールでも利得変動の抑制効果を持たせた光帰還ループ型バーストモードEDFAを開発した[4]。ここでは、複数光パスの設定/解放時における、定常状態でのバーストモードEDFAの利得変動特性を評価した結果を示す[5]。

市販EDFA及びバーストモードEDFAに、光パス群と見立てたCバンド帯(1530 nm-1565 nm)のほぼ

2 フレキシブル光パスノードとバーストモード光増幅器

新しく提案した光交換装置であるフレキシブル光パスノードの構成を図2に示す。従来のROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)やOXC (Optical Cross Connect)などの光交換装置との差違は、光強度変動抑制のためにバーストモード光増幅器を新たに導入し、従来の機器と置き換えたことである。光パスノードの主な機器の機能及び動作について述べる。波長選択光スイッチ(Wavelength Selective Switch: WSS)は、光パスの設定/解放などの光パス経路制御時に、隣接ノードや自ノードから入力された光信号の経路を適切な宛先に向けて切り替える。光増幅器は、光信号が各機器や光ファイバを通過する際の

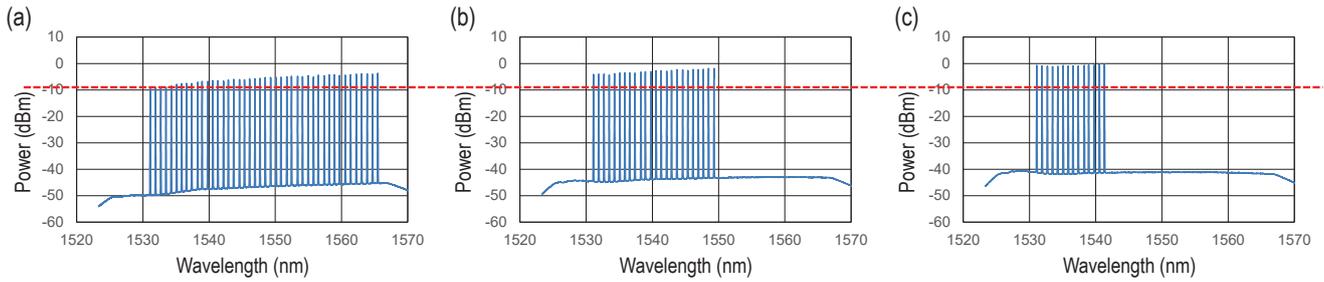


図3 市販のEDFAによる増幅後のスペクトル波形 (a) 残存波長数 44、(b) 残存波長数 24、(c) 残存波長数 14

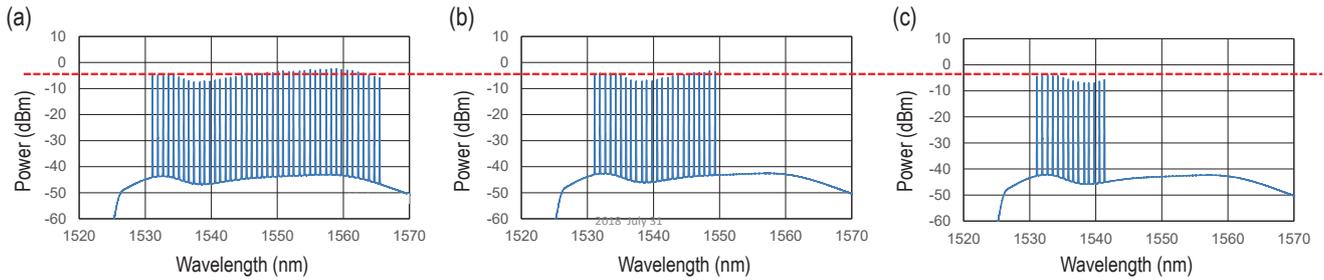


図4 バーストモードEDFAによる増幅後のスペクトル波形 (a) 残存波長数 44、(b) 残存波長数 24、(c) 残存波長数 14

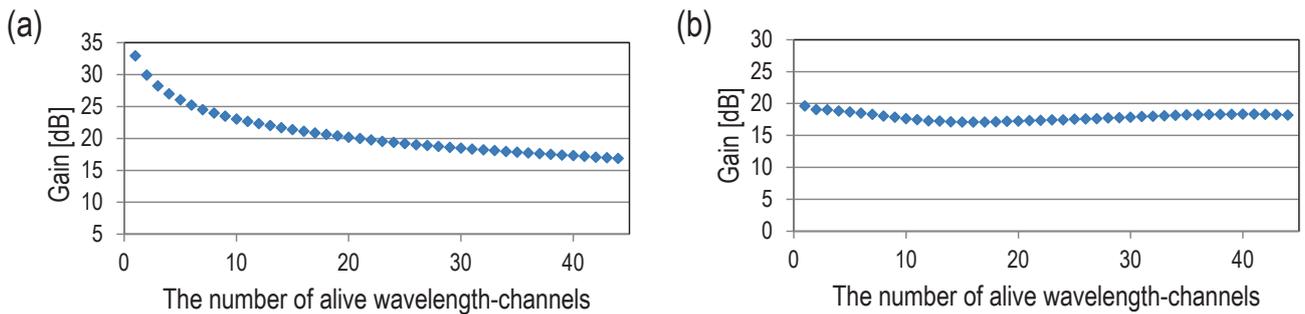


図5 波長数変化時の利得特性 (a) 市販のEDFA、(b) バーストモードEDFA

全域の 1531.90 nm から 1563.05 nm までの 100 GHz 間隔・44 波長の連続光を入力し、その後、1 波長ずつ削除した。図 3 及び 4 は、残存波長数を 44、24、14 としたとき、市販 EDFA 及びバーストモード EDFA による増幅後に測定された出力光信号のスペクトル波形である。図 3(a)–(c) に示すように、市販の EDFA では、波長数の増減により入力光強度の総和が変動することになり、波長数に依存して増幅後の残存波長の光信号の出力光強度が変動することが分かる。一方、図 4(a)–(c) に示すように、バーストモード EDFA では、波長数の増減による増幅後の残存波長の光信号の出力光強度の変動が抑制されていることが分かる。また、図 5 に波長数と各 EDFA の利得の関係を示す。図 5 の横軸は残存している波長数、縦軸は残存波長の光信号を合計した入力光強度、出力光強度から算出した EDFA の利得である。市販の EDFA では波長数の少ない領域では過剰な利得、波長数の多い領域では利

得飽和が生じるなど、波長数によって利得が変化することが分かる。一方、バーストモード EDFA では、利得がほぼ一定となっており、C バンド帯における任意の波長数の増減に対して、利得変化が抑制されることが分かる。このため、バーストモード EDFA を用いることで、光増幅部に利得変動を抑制するために光強度制御機構を追加する必要がなくなる。

3 複数波長光パスの高速設定の実証実験 [6]

WSS のポート設定は 1 つのコマンドで複数のポートや光パスを制御できる。しかし、従来の制御手法では、光パスを 1 波長ずつ制御してきた。一方、我々の提案する並列光パス処理では複数波長の設定／解放時に複数波長全てを同時に処理するため、処理時間は波長数によらず一定時間となる。このため、処理する波長数が多いほど処理時間の節減が可能となる。

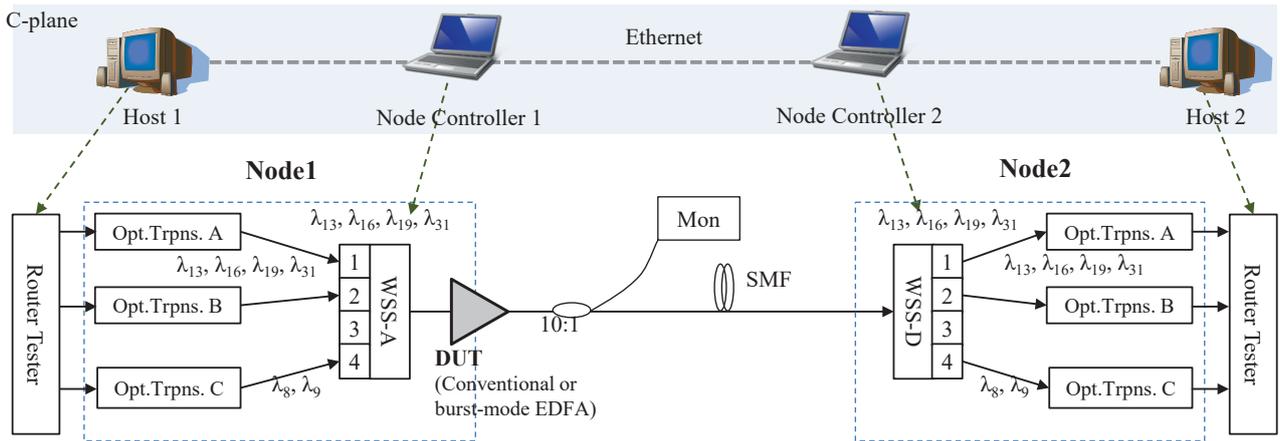


図6 複数光パス設定/解放の実証のための実験系

ここで、複数波長の光パスが設定/解放された場合でも残存する光パスに過渡的な信号劣化を起こさず、通信品質を保ったままで、迅速な複数波長の光パスの再設定が可能であることを実証する。図6に、実証実験の測定系を示す。実験には1531.90 nm から1563.05 nm までの100 GHz 間隔40 波長チャンネルを波長資源とするネットワークを用いた。光信号の入出力には固定100 GHz グリッドのWSSを用い、40 波長($\lambda_1 \sim \lambda_{40}$)の光信号を伝送可能とする。全ての10 Gbps 光送受信機(光送信機A、B、C、光受信機A、B、C)はルータテストに接続され、各波長光パスで7.5 Gbps データが送信される。初期状態(状態1)では、6 波長の光パス($\lambda_8, \lambda_9, \lambda_{13}, \lambda_{16}, \lambda_{19}, \lambda_{31}$)が設定されており、ノード1とノード2の間で接続されたシングルモード光ファイバに多重化されて伝送される。その後、光送信機Aから4 波長の光パス($\lambda_{13}, \lambda_{16}, \lambda_{19}, \lambda_{31}$)は、WSSにより従来手法では1 波長ごとに、提案する手法では同時に解放される(状態2)。さらに、光送信機Bからの4 波長の光パスは、従来手法、提案手法ともに4 波長同時に設定される(状態3)。

ノード1の出力部には、伝送路である光ファイバの減衰を補填する光増幅器を実装した。光増幅器には、被試験デバイス(DUT: Device under test)として、従来技術のEDFA若しくはバーストモードEDFAを配置した。DUTの違いにより伝送される光信号及び受信された信号をそれぞれ比較する。ノードコントローラ1及び2は、光信号を適切な方向に送るためのWSS-A及びWSS-Dをそれぞれ制御する。さらに、WSSに内蔵されたVOAの値も設定する。ノード1の光送信機Cからは2 波長光パス(λ_8, λ_9)がノード2に送信される。

図7(a)に従来のEDFAを使用した場合の状態1、2のスペクトル波形、図7(b)に λ_8 光パスの時間波形、図7(c)に λ_8 で送信されたデータのビットレートを示

す。光送信機Aからの4 波長信号が解放(状態2)されると、残存する λ_8 の光信号パワーは、従来技術EDFAの利得が大きくなり図7(b)に示すように光信号パワーを激増させる。このとき、図7(c)に示すように受信データは0となり、データ送受信ができなくなった。

一方、提案するシステムでは、過渡的な入力光信号のパワー変動があってもバーストモードEDFAが増幅出力光信号の利得変動を抑える。図8(a)に、バーストモードEDFAを使用した場合の状態1、2のスペクトル波形、図8(b)に λ_8 光パスの時間波形、図8(c)に λ_8 で送信されたデータのビットレートを示す。バーストモードEDFAを使用した場合、状態2から状態3に変化しても λ_8 光パスの光信号パワーは図8(a)、図8(b)に示すように同じパワーのままであった。したがって、図8(c)に示すように、データの損失は観察されなかった。

この実証実験では、使用できる光送受信機の数的な制限により4 波長光パスの処理時間を測定した。4 波長光パスを同時に解放する処理時間は約9秒だった。一方、従来どおり4 波長光パスを1 波長ずつ個別に解放した場合は約135秒かかった。提案するシステムでは複数波長信号を同時に制御する並列パス処理を用いているため、使用できる光送受信機の数が増え処理する波長光パス数が増えても、処理時間は1 波長を処理するのと同じ約9秒となる。また、状態の変化時間はWSSを制御する評価ボードとノードコントローラの応答時間で決まっている。評価ボードの応答時間を早くすることで処理時間は更に短くなる。このように、バーストモードEDFAを用いることで可能となる並列処理方式により、複数波長の光パスの設定/解放やリンク障害時のバックアップ光パスの高速設定が可能となる。

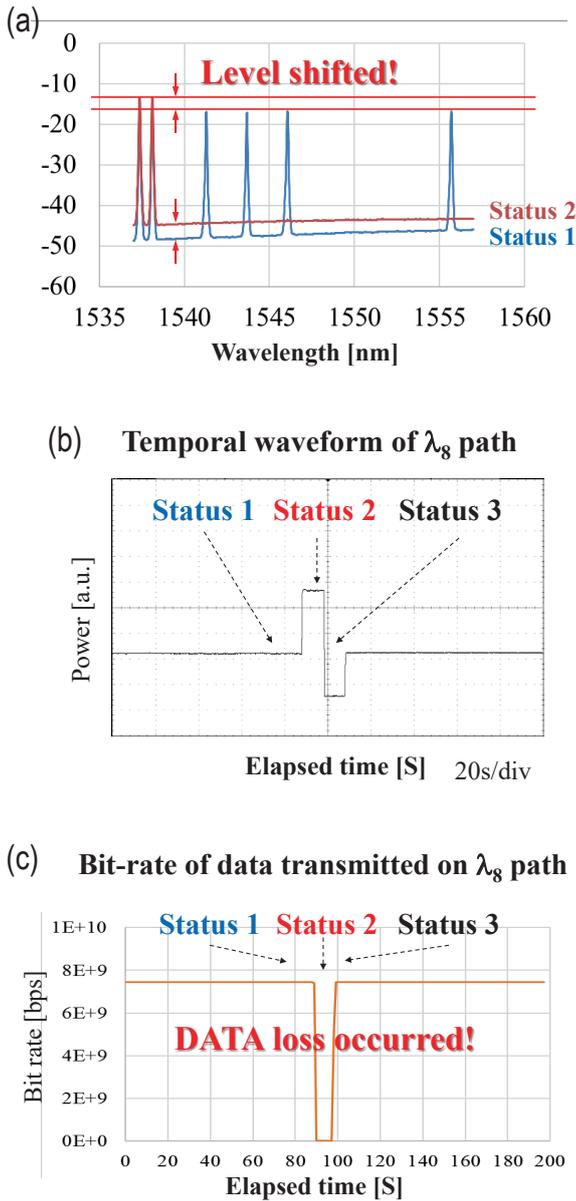


図7 市販のEDFA (a) スペクトル波形、(b) λ_g の時間波形、(c) λ_g で送信されたデータの受信量

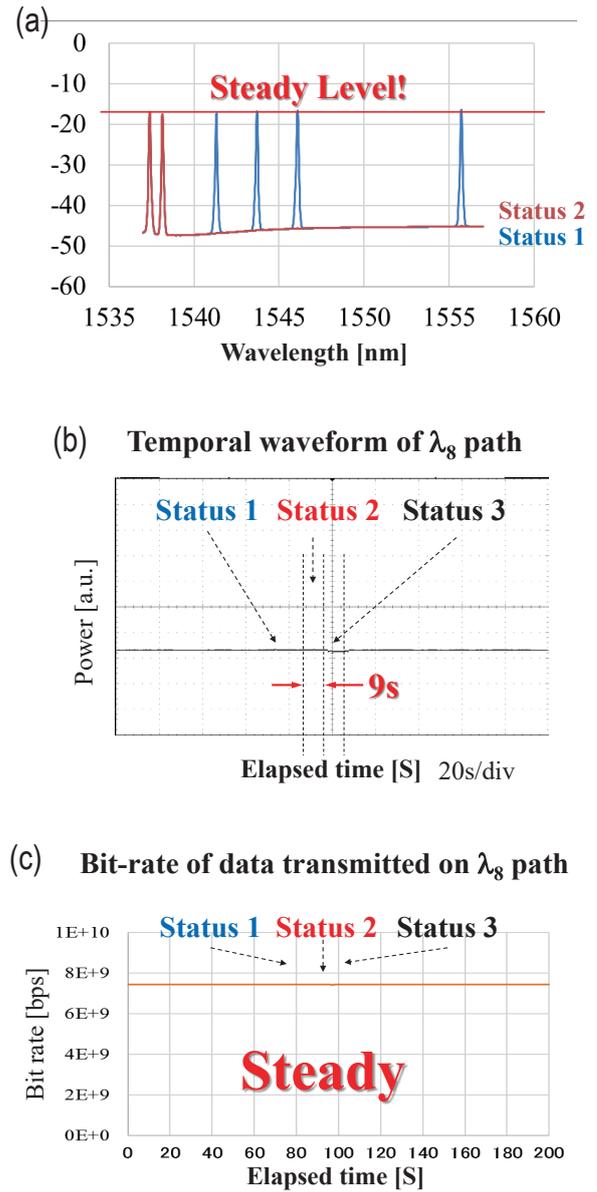


図8 パースモードEDFA (a) スペクトル波形、(b) λ_g の時間波形、(c) λ_g で送信されたデータの受信量

4 リンク障害時におけるネットワーク全体へのQoT劣化伝搬の評価 [7]

リンク障害が発生し、そのリンクを経由している全ての光パス信号が切断された場合、切断された光パスだけではなく、後段のリンクで切断された当該光パスと同じ光ファイバを伝送していたほかの光パスに対しても強度変動を引き起こし、QoTの深刻な劣化を引き起こす可能性がある。つまり、このQoT劣化が、ネットワークの広範囲にわたって伝搬する可能性があると言える。障害リンクにおけるこれらの光パスを、本稿では「切断光パス」と呼ぶ。ここではリンク障害が発生した事象において、EDFAの過渡応答によるQoT劣化伝搬をネットワークの観点から評価する。

図9にQoT劣化の影響がネットワークレベルで伝搬する様子を示す。本図において、丸はノード、線はリンクを表しており、トポロジはJPN12[8]を用いている。また、各ノード内の数字はノード番号を、各リンクの数字は片方向リンク番号をそれぞれ表しており、例えばリンク1はノード1からノード2へのリンク、リンク2はノード2からノード1へのリンクである。3つの光パスが波長多重されて設定されており、リンク7に障害が発生したと仮定する。このとき、リンク7を通過していた光パスAが切断されることにより、リンク18及びリンク22において光信号が急激に消失する。その結果、光パスB及び光パスCは障害リンク(リンク7)を通過していないにもかかわらず、当該リンクを通過していた光パスの受信ノード側で光ファ

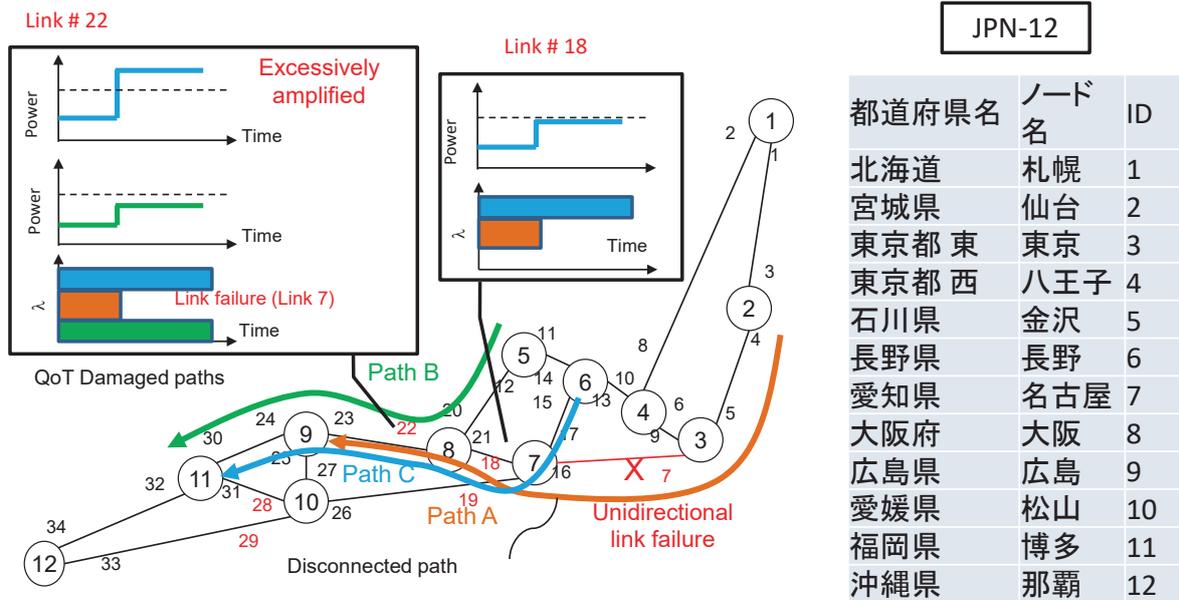


図9 伝送品質劣化の伝搬

イバ資源を共有していたことにより、EDFA の利得過渡応答の影響が生じ QoT が劣化する。本稿では、光パス B 及び光パス C のように QoT 劣化の影響を受ける光パスを、「QoT 劣化光パス」と呼ぶ。この場合、1 ホップずつ順次再調整を繰り返していく必要があり、多くの EDFA 及び VOA をステップバイステップで再調整する必要がある。結果として全ての光パス伝送が十分に安定して実施されるまでにより長い時間がかかる。

従来の EDFA を用いた場合におけるネットワークスケールの QoT 劣化伝搬の影響を計算機シミュレーションにより評価する。最初に、12 ノード 34 片方向リンクから成る JPN12 モデル (図 9) を評価トポロジとして採用した。各光パスは、全ての送受信ペアに対して 1 本ずつ最短経路で設定されていると仮定する。各シミュレーション試行において、ネットワークのいずれかのリンクに障害が発生したとし、当該リンクを経由する全ての光パスが切断されるとする。図 10 に、単一リンク障害が発生した場合に影響を受けるリンク数を示す。ここで、影響を受けるリンクとは、障害リンクを経由している光パスの信号が消失することにより QoT 劣化を受ける「QoT 劣化光パス」が通過する宛先ノード側のリンクである。複数の QoT 劣化光パスから影響を受ける場合でも 1 とカウントしている。図 10 の横軸は、各試行における障害が発生したリンク ID を表す。この図より、例えばリンク 4 に障害が発生した場合、全体の 29.4 % にあたる 10 本のリンクが、障害リンクから直接的な影響を受けることが分かる。

続いて、任意のリンクが 1 本切断された際に、各リ

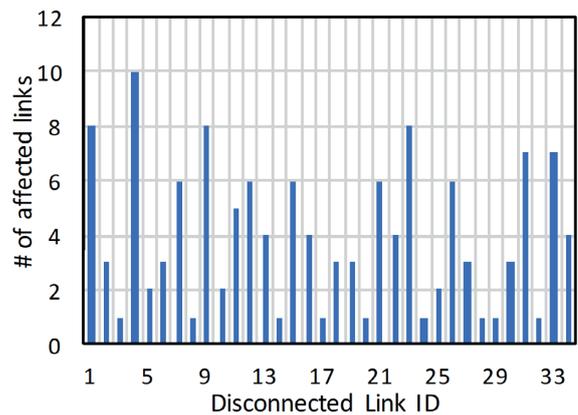


図 10 JPN12 トポロジにおける単一リンク障害により影響を受けるリンク数

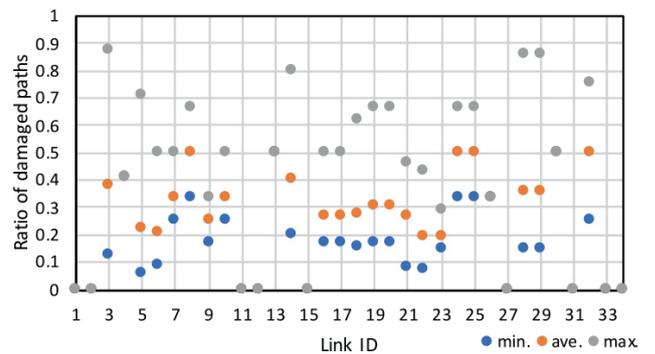


図 11 単一リンク障害におけるリンクごとの QoT 劣化パス割合

リンクを伝送中のパスのうちどの程度のパスがリンク切断の影響を受けるかを図 11 に示す。つまり、任意のリンクで障害が発生した際に、各リンクを伝送中のパスに対して、直接的に QoT 劣化の影響を受ける光パスの割合を表している。図 11 より、リンク障害が発

生じた場合、各リンクにおいて平均 25.4 % のパスが QoT 劣化の影響を受けることが分かる。ネットワーク全体の光パス数に対する QoT 劣化光パス数及び切断光パス数の割合としては、最もリンク切断の影響が大きいケースでは、18.1 % の光パスが切断され、40.2 % もの光パスが QoT 劣化の影響を受ける。また、19 本のリンクにおいてリンク障害により影響を受ける光パス数が 50 % を超えており、全リンクの半数以上のリンクで、いずれかのリンク障害発生時に EDFA 等の再調整を実施する必要があることが分かる。一方で、バーストモード EDFA を用いることで光信号パワーの変動を抑制し、ネットワークレベルでの QoT 劣化伝搬の影響を軽減することが可能である [7]。

古川英昭 (ふるかわ ひであき)

ネットワークシステム研究所
 フォトニックネットワークシステム研究室
 研究マネージャー
 博士(工学)
 フォトニックネットワーク、光情報処理

5 まとめ

通信サービス要求の動的変化への対応やリンク障害時の迅速な復旧が可能な光ネットワークの実現を目指し、我々は光パスを高速かつ弾力的に運用するためのフレキシブル光パス交換技術の研究開発を行っている。本稿では、開発したバーストモード光増幅器を導入したフレキシブル光パスノード、本ノードを用いた複数光パスの高速制御の実証、リンク障害時における従来光増幅器が与えるネットワーク全体への影響の評価等、得られた成果を紹介した。

【参考文献】

- 1 Recommendation ITU-R M.2083-0, 2015.
- 2 5GMF White Paper "5G Mobile Communications Systems for 2020 and beyond," 2016. <http://5gmf.jp/en/>
- 3 Y. Awaji, H. Furukawa, N. Wada, P. Chan, and R. Man, "Mitigation of Transient Response of Erbium-Doped Fiber Amplifier for Traffic of High Speed Optical Packets," The Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2007), JTuA133, Baltimore, USA, May 2007.
- 4 M. Shiraiwa, Y. Awaji, H. Furukawa, S. Shinada, B. J. Puttnam, and N. Wada, "Performance evaluation of a burst-mode EDFA in an optical packet and circuit integrated network," Optics Express, vol.21, no.26, pp.32589-32598, Dec. 2013.
- 5 古川 英昭, 白岩 雅輝, 廣田 悠介, 品田 聡, 原井 洋明, 和田 尚也, "フレキシブル光パスノードにおける光強度変動抑制機能の実証," 電子情報通信学会和文論文誌 B, 2018 年 12 月 (発行予定).
- 6 H. Furukawa, M. Shiraiwa, H. Harai, and N. Wada, "Softwarized dynamic optical switching network suppressing transient optical power in link failures," Photonics in Switching 2017, PTu2D.2, New Orleans, July 2017.
- 7 Y. Hirota, M. Shiraiwa, H. Furukawa, H. Harai, and N. Wada, "Demonstrating Network-scale Gain Transient Impact of Multiple Series EDFAs in Link Failure Cases," The Optical Networking and Communication Conference and Exhibition (OFC 2018), Tu3 E.5, San Diego, March 2018.
- 8 JPN Model, <http://www.ieice.org/cs/pn/jpn/jpnm.html>