

# 適応制御による大容量フォトニックネットワーク

High-capacity photonic networks based on adaptive optical-path control



森 洋二郎 (Yojiro MORI, Ph. D.)  
名古屋大学 工学研究科 情報・通信工学専攻 准教授  
(Associate Professor, Nagoya University)  
IEEE, OSA, 電子情報通信学会 レーザー学会 他  
研究専門分野: 通信工学 光ネットワーク デジタル信号処理

## あらまし

光ネットワークが扱うデータトラフィック量は急速に増大している。このため光ネットワークのトラフィック収容効率の向上が急務である。収容効率向上のために、高次変調方式と超高密度波長分割多重方式の導入が望まれるが、このようなシステムでは光ファイバの非線形性及び光ノードにおけるスペクトル狭窄に起因する信号品質の劣化が顕著であるため、伝送距離とノードホップ数が厳しく制限されてしまう。距離適応変調は光パスの伝送距離に応じて変調次数を選択することでネットワークの容量を向上することが可能であるが、超高密度波長分割多重システムに距離適応変調を適用するためには距離とノードホップ数に依存する伝送特性を考慮する必要があるため、その実現は容易ではない。一方、我々が提案してきた Grouped Routing ネットワークは光パスをグループ単位でルーティングすることで、超高密度波長分割多重を実現しながらもスペクトル狭窄の回数を規定値以下に制御する。このため、距離のみを指標とした距離適応変調を使用することが可能である。本稿では、距離適応変調と Grouped Routing を組み合わせることで光ファイバの利用効率を大幅に向上できることを、伝送特性解析とネットワーク設計により示したので報告する。

## 1. 研究の目的

急速に増加を続ける光ファイバ通信需要に対応するためには、高次変調方式、超高密度波長分割多重システム及びエラスティック光ネットワークの導入が必要

不可欠である[1-3]。しかし、これらの方法は光ファイバの非線形性及び光ノードによるスペクトル狭窄に起因する信号品質の劣化が顕著であるため、最大伝送距離とノードホップ数が厳しく制限されてしまう[4]。一方で、伝送距離に従って変調時数を決定する距離適応変調方式は周波数利用効率を大幅に向上することが可能である[3]。しかし超高密度波長分割多重システムでは距離だけではなくノードホップ数も伝送性能に影響を与えることから、距離適応変調を適用することは容易ではない。距離とノードホップ数に応じて変調方式とパス帯域を割り当てることでこの問題を解決できると考えられるが、全ての光パスに対して最適な変調方式とパス帯域の組み合わせを決定する必要がありその実現は困難である。一方で、我々が提案してきた Grouped Routing ネットワークは、光パスをグループ単位でルーティングし、add/drop のみを光パス単位で行う。本方式を用いることで、超高密度波長分割多重を実現しながらもスペクトル狭窄の回数を制御することが可能である[5]。このため、ノードホップ数を考慮することなく高密度性を維持しながら距離適応変調を用いることができる。

本稿では、距離適応変調と Grouped Routing を組み合わせることで、周波数利用効率を大幅に向上できることを伝送特性解析及びその結果に基づいたネットワーク設計により示す。

## 2. 距離適応変調 Grouped Routing ネットワーク

従来、距離適応変調を用いる場合には、スペクトル狭窄の影響を受けないほど十分に広い帯域を光パスに割り当てていた。一方で、光パス帯域を狭める事で周波数利用効率を改善することが期待される。しかし、そのような場合、光ノード内の波長選択スイッチ(WSS: Wavelength-selective switch)に起因するスペクトル狭窄により最大ノードホップ数は厳しく制限されてしまう。このため、スペクトラム狭窄を生じるシステムでは距離適応変調を有効に使用することはできない。図1に示すように、距離とノードホップ数に応じて変調方式とパス帯域を割り当てることでこの問題を解決できると考えられるが、全ての光パスに対して最適な変調方式とパス帯域の組合せを決定する必要が

# 適応制御による大容量フォトニックネットワーク

High-capacity photonic networks based on adaptive optical-path control

あり、パス割り当ての処理が複雑となるためその実現は困難である。

周波数利用効率を高めながらもこの複雑性を解消するために、我々は距離適応変調と Grouped Routing を組み合わせたネットワークを提案する。この手法では、複数の光パスが Grouped Routing Entity(GRE)と呼ばれるグループにまとめられ、ルーティング処理は GRE 単位で行われる[5]。GRE 内には信号を密に収容し、一方で GRE 間に十分なガードバンドを挿入することでルーティング処理時のスペクトル狭帯の影響を最小化しながらも周波数利用効率を向上させることができる。スーパーチャネルを構成するサブキャリアとは異なり、Grouped Routing では add/drop 処理は光パス単位で行う。これによりグループ単位でのルーティングにおける性能劣化の影響を抑制することができるが、隣接パスの add/drop 処理時にスペクトル狭帯の影響を受けてしまう。この隣接パスの add/drop 処理時に生じるスペクトル狭帯の回数は波長割り当てアルゴリズムを適用することで制御することができるため信号品質はノードホップ数に依存しない。したがって、光パスの伝送距離のみを考慮することで最適な変調方式を割り当てることが可能となる。これまでに説明した手法の特徴を図 2 にまとめた。



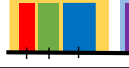
|        | 提案手法  |   |   |
|--------|---|---|---|
|        | 距離適応変調  | 距離及びホップ適応   | 距離適応 Grouped Routing  |
| 信号配置例  |  |  |  |
| 主な劣化要因 | 距離  | 距離<br>ホップ数  | 距離  |
| 適応制御   | 変調方式  | 変調方式<br>割り当て間隔  | 変調方式  |

図 2 手法の比較

## 2. 伝送特性解析

図 3 に示す非線形系伝送路モデルを用いて伝送シミュレーションを行い、400Gps 信号の伝送可能距離及びホップ数を評価した。使用した変調方式は 32Gbaud DP-QPSK×4, 43Gbaud DP-8QAM×2, 32Gbaud DP-16QAM×2 とした。16QAM と QPSK のサブキャリア間隔は 37.5GHz, 8QAM のサブキャリア間隔は 50 GHz とした。各サブキャリアのスペクトルはロールオフ率 0.05 のルートコサインロールオフフィルタにより成形される。入力パワーを最適化した後、信号は WSS を経由して伝送リンクへと入力される。1 スパンは 100 km の SMF と EDFA からなる。SMF の損失係数、波長分散パラメータ、非線形係数はそれぞれ、0.2 dB/km, 16 ps/nm/km, 1.5 /W/km とし、EDFA の雑音指数は 5 dB とした。損失、波長分散、ファイバ非線形効果の相互作用はスプリットステップフーリエ法を用いて計算した。n スパン伝送させた後、信号は隣接ノードに到達する。本研究では n=2, 6 すなわちノード間距離を 200 km, 600 km として数値実験を行った。ノードは route-and-select 型で接続された複数の WSS からなる。WSS のピーク損失は 6.5 dB とした。WSS の通過帯域は、割当帯域幅を持つ矩形関数と 10 GHz の 3 dB 帯域幅を持つガウス関数との畳み込みによって表現されている。複数ノードを経由した後、目標の信号はドロップされデジタルコヒーレント受信器で復調される。復調はデジタル信号処理によって行われ、ビット誤り率(Bit-error ratio: BER)が計算される。前方誤り訂正(FEC: Forward

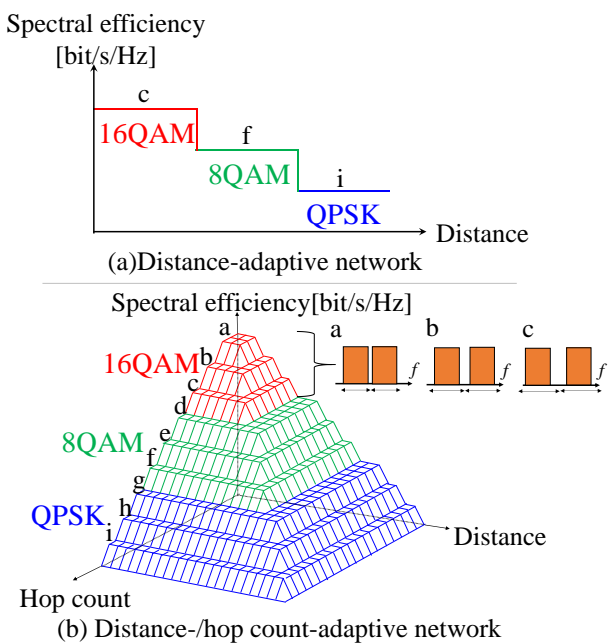


図 1 距離適応変調及び距離ホップ適応変調

# 適応制御による大容量フォトニックネットワーク

High-capacity photonic networks based on adaptive optical-path control

error correction)を考慮して、信号が  $BER < 1.0 \times 10^{-2}$  を満たす限界を最大距離またはホップ数として求めた。

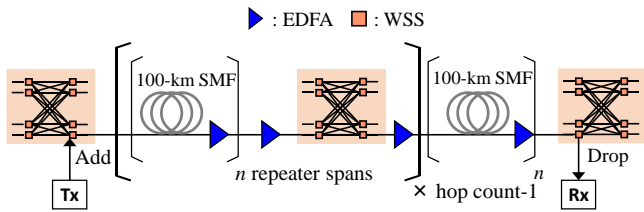


図3 伝送路モデル

図4はパス帯域をそれぞれ75GHzと100GHzに設定し、32Gbaud DP-16QAM×2の信号を800km伝送させた時のコンスタレーションとBERを示している。パス帯域が75GHzの場合、帯域狭窄回数が増加する毎に信号品質が劣化していることが分かる。

図5はそれぞれノード間距離が200km, 600kmの時の伝送特性を示しており、縦軸は伝送可能な最大のノードホップ数または距離を、横軸はスペクトル狭窄化の回数を示している。図5が示す通り、超高密度波長分割多重システムにおいてはノードホップ数が厳しく制限され、ノードホップ数と距離に応じて適切なパス帯域を割り当てる必要がある。一方で、我々が提案する Grouped Routing ネットワークでは隣接パス add/drop の回数、すなわち帯域狭窄回数を制限することが出来るため、変調方式を決定するためにノードホップ数を考慮する必要はない。このように提案手法は超高密度波長分割多重システムの導入におけるパス割り当ての処理を簡素化することが出来る。

| Path bandwidth                    | 100 GHz |         |         |         |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| The number of add/drop operations | 0       | 2       | 4       | 6       |
| Constellation diagram             |         |         |         |         |
| BER                               | 0.00074 | 0.00078 | 0.00082 | 0.00082 |
| Path bandwidth                    | 75 GHz  |         |         |         |
| Constellation diagram             |         |         |         |         |
| BER                               | 0.0011  | 0.0037  | 0.0136  | 0.0361  |

図4 800km伝送後のコンスタレーションとBER値 (1スパン:200km)

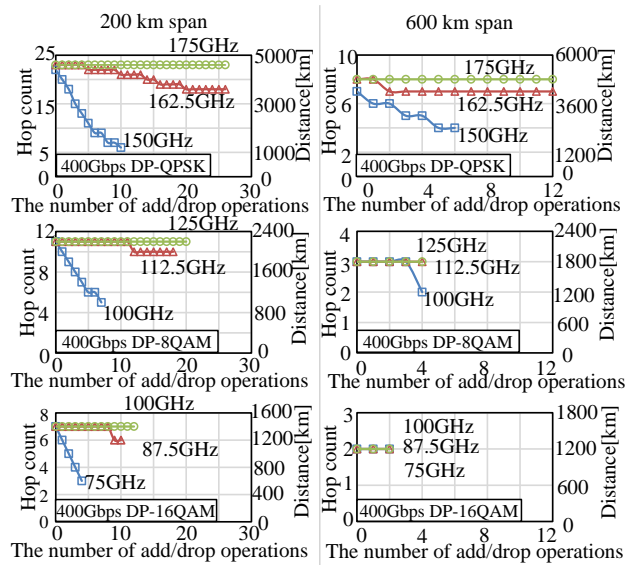


図5 伝送特性

### 3. ネットワーク特性解析

提案手法の有効性を確かめるために静的ネットワークシミュレーションを行った。以下の3つの手法(図2参照)について光ファイバの利用効率を数値実験により検証した。A)距離適応変調を用い、スペクトル狭窄化の影響を受けないチャンネル間隔を設定し、ルーティングは光パス単位で行う。B)距離とノードホップ数に応じて変調方式とパス帯域を選択する手法を用い、ルーティングは光パス単位で行う。C)距離適応変調と Grouped Routing を用い、隣接パス add/drop 回数は1回に制限した。利用可能な帯域をC帯(4.4THz, 352スロット)とした。また、使用したネットワークトポロジとその特徴を図6に示す。4×4トポロジについてはノード間距離を200kmと600kmの二通りについてデータを取得した。トラフィック需要は一律に発生するものとした。また、光パスの容量は全て400Gbpsとし、変調方式は32Gbaud DP-QPSK×4, 43Gbaud DP-8QAM×2, 32Gbaud DP-16QAM×2を想定した。提案手法である Grouped Routing の各グループの幅は48スロットに設定し、スペクトル狭窄の影響を緩和するためにGRE間に2スロット(25GHz)のガードバンドを挿入した。また、図5の伝送特性から得られるそれぞれの手法が要するスロット数を図7にまとめた。図8は変調方式と割り当てチャンネル帯域の対応を

# 適応制御による大容量フォトニックネットワーク

## High-capacity photonic networks based on adaptive optical-path control

示している。手法毎の選択範囲から伝送特性を満たした上で周波数利用効率を最大化するように変調方式と割り当てパス帯域を選択する。ここでは周波数利用効率が高い順にアルファベットがつけられている。

|   | 4×4             | JPN48           | Pan-European Network |
|---|-----------------|-----------------|----------------------|
|   |                 |                 |                      |
| The number of nodes                         | 16              | 48              | 26                   |
| Maximum hop count                           | 6               | 14              | 6                    |
| Average link length (length in simulations) | (200 or 600 km) | 154 km (200 km) | 627 km (600 km)      |

図6 使用したネットワークトポロジとその特徴

| Modulation format | The number of subcarriers | The number of assigned slots <sup>a</sup> |             |    |
|-------------------|---------------------------|---|-------------|----|
|                   |                           | A   | B           | C  |
| 32-Gbaud DP-QPSK  | 4                         | 14  | 12,13 or 14 | 12 |
| 43-Gbaud DP-8QAM  | 2                         | 10  | 8, 9 or 10  | 8  |
| 32-Gbaud DP-16QAM | 2                         | 8   | 6, 7 or 8   | 6  |

図7 必要スロット数

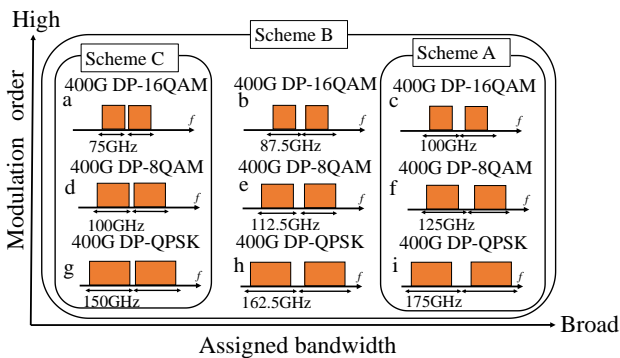


図8 変調方式及び割り当てチャンネル帯域の優先順位

図9, 図10, 図11, 図12は各ネットワークトポロジに対するシミュレーション結果を示している, 縦軸は手法Aにおいて必要なファイバ数を1として規格化したものである。距離とノードホップ数に適應して変調方式とパス帯域を割り当てる事により 4×

4(200km)では14.3%, 4×4(600km)では12.7%, JPN48では10%, Pan-Europeanでは13.5%のファイバ数の削減が可能になる。一方で距離適應変調と Grouped Routingを併用することでファイバ数を4×4(200km)では18%, 4×4(600km)では15.4%, JPN48では17.8%, Pan-Europeanでは16.3%も削減することができる。伝送距離が短い場合か最大ホップ数が大きい場合, 帯域狭窄による劣化の影響がファイバの非線形性による劣化の影響よりも大きくなるため従来手法との削減比が大きくなっていることが分かる。

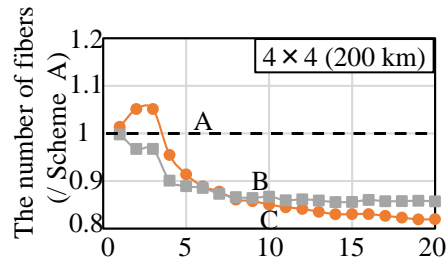


図9 必要光ファイバ数比(4×4:200km)

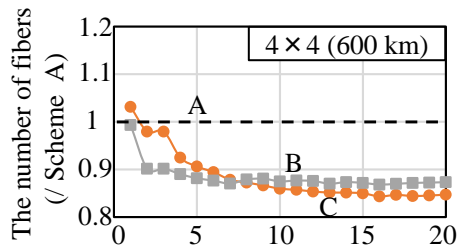


図10 必要光ファイバ数比(4×4:600km)

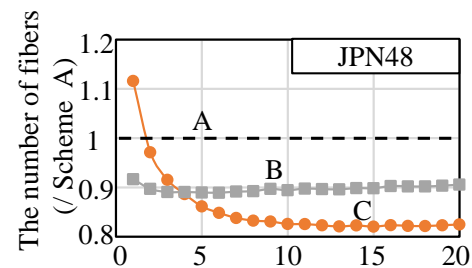


図11 必要光ファイバ数比(JPN48)

# 適応制御による大容量フォトニックネットワーク

High-capacity photonic networks based on adaptive optical-path control

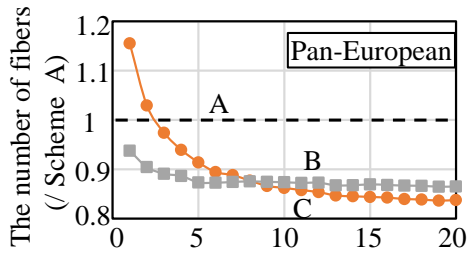


図 12 必要光ファイバ数比(Pan-European)

伝送特性とその結果に基づく三つのネットワーク設計手法の数値実験を踏まえた特徴を図 13 にまとめた。手法 A はパス割り当ての処理は単純だがファイバ利用効率が手法 B, C より低い。手法 B は、ファイバ利用効率は高いが距離とノードホップ数の両方を考慮する必要があるため多くの伝送特性解析を要する。一方で我々が提案する手法 C では大幅なファイバ利用効率の向上が実現できるうえに、ホップ数に適応することなく高密度なネットワークを実現できる。

|                            | A          | B                      | C           |
|----------------------------|------------|------------------------|-------------|
| Routing unit               | Path       | Path                   | Group (GRE) |
| Impairment-related metrics | Distance   | Distance & hop count   | Distance    |
| Adaptive assignment        | Modulation | Modulation & bandwidth | Modulation  |
| Fiber utilization          | Fair       | Good                   | Excellent   |

図 13 数値実験を基にした手法の比較

## おわりに

本稿では、距離適応変調と Grouped Routing を組み合わせた手法を提案し、伝送特性解析と、その結果に基づいたネットワークシミュレーションによりその有効性を証明した。また、Grouped Routing の導入によりファイバ利用効率が大幅に向上するだけでなくパス割り当ての処理を複雑にすることなく距離適応変調方式を超高密度波長分割多重システムに適用できることを示した。

## 参考文献

[1] K. Kikuchi, "Fundamentals of coherent optical fiber communications," IEEE/OSA J. Lightwave Technology, Vol. 34, pp. 157-179, 2016.

[2] G. Bosco et al., "On the performance of Nyquist-WDM terabit superchannels based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers," IEEE/OSA J. Lightwave Technology, Vol. 29, pp. 53-61, 2011.

[3] M. Jinno et al., "Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network," IEEE Communication Magazine, Vol. 48, p. 138-145, 2010. . . . .

[4] Y. Mori et al., "Joint pre-, inline-, and post-compensation of spectrum narrowing caused by traversing multiple optical nodes," Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC), paper P1.SC3.45, 2017.

[5] Y. Terada et al., "Highly spectral efficient networks based on grouped optical path routing," OSA Optics Express, Vol. 24, pp. 6213-6228, 2016.

この研究は、平成 28 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 29 ~ 令和元年度に実施されたものです。