

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13756

研究課題名（和文）適応制御による超高密度フォトニックネットワークの研究

研究課題名（英文）Highly spectrally efficient photonic networks based on adaptive control

研究代表者

森 洋二郎（Mori, Yojiro）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10722100

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：光ネットワークが扱う通信量は指数関数的に増大している。これに対応するため光ネットワークの大容量化が急務である。大容量化を実現するためには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。本研究では、超高密度波長分割多重ネットワークにおけるスペクトル狭窄補償技術、伝送特性の詳細な解析、および適応的ネットワーク制御を融合することで飛躍的な周波数利用効率の向上を達成するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、超高密度波長分割多重ネットワークにおける種々の課題を解決することで、飛躍的な周波数利用効率向上および大容量化を達成するものである。本研究成果は、次世代の情報通信社会の基盤たる大容量フォトニックネットワークの構築に資するものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：The amount of data traffic handled by photonic networks is increasing exponentially. Therefore, the capacity of photonic networks needs to be increased. To realize high-capacity networks, it is desirable to introduce ultra-dense wavelength division multiplexing technologies to photonic networks. In such systems, however, the signal quality deteriorates due to spectral narrowing at each optical node, so the transmission distance and the number of node hops are strictly limited. In this research, we achieved a significant improvement in frequency-utilization efficiency based on spectral narrowing compensation, detailed analysis of transmission characteristics, and adaptive network control in ultra-dense wavelength division multiplexing.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：光ファイバ通信 情報通信 ネットワーク 信号処理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

指数関数的増加を続ける光ファイバ通信需要に対応するために、大容量通信を実現するフォトニックネットワーク技術が必要である。現在のフォトニックネットワークは、複数の異なる波長信号を一本の光ファイバ内に集約する波長分割多重方式と、光ノードにおいて信号の波長に応じて経路を決定する波長ルーティングを行うことで、大容量通信システムを経済的に提供している。しかし、光ファイバ通信で使用可能な周波数帯域は光増幅器が増幅可能な帯域に制限され、使用可能な帯域は既に逼迫している状況にある。このため、さらなる伝送容量増加のためには限られた周波数帯域を有効に利用しなければならない。2005 年以降、デジタル信号処理とコヒーレント光受信器を融合したデジタルコヒーレント技術の進展により、光ファイバ通信システムの周波数利用効率は飛躍的に向上した。4 相位相偏移変調(QPSK)や 16 相直交振幅変調(16QAM)などの多値変調方式が利用可能となり、従来の非コヒーレントシステムの 10 倍以上の周波数利用効率が実現されている。16QAM 信号は既に商用システムに導入されつつあるが、それでもなお帯域は逼迫しており、さらなる周波数利用効率向上が強く望まれる。このためには、隣接する波長信号間に挿入されているガードバンド(不使用帯域)を狭くした、超高密度波長分割多重システムの実用化が期待される。しかし、超高密度波長分割多重システムでは、光ノードにおける波長ルーティングの過程で生じる‘スペクトル狭窄効果’が不可避である。波長ルーティングの役割を担う波長選択スイッチの周波数特性は矩形でないため、信号スペクトルが狭窄を受けるとして信号品質が劣化する。この影響はノード通過回数が多く、またガードバンドが狭いほど顕著である。すなわち、伝送容量増加のために超高密度化を行うと、許容ノード通過回数および伝送可能距離が減じられてしまう。ノード通過回数および伝送距離への要求を満たすためには変調次数を下げざるを得ず、結果として周波数利用効率が低下してしまう。

2. 研究の目的

光ファイバ非線形効果による距離制約を考慮した距離適応変調の導入が検討されているが、超高密度波長分割多重ネットワーク特有のスペクトル狭窄効果の影響は考慮されておらず、次世代システムへの直接の適用は不可能であった。これは、従来の波長分割多重ネットワークでは光ファイバ非線形効果が信号品質劣化の主要因であったのに対し、超高密度波長分割多重ネットワークではスペクトル狭窄効果こそが信号品質の決定要因となるためである。本研究では、超高密度波長分割多重ネットワークにおけるスペクトル狭窄補償技術、伝送特性の詳細な解析、および適応的ネットワーク制御を融合することで飛躍的な周波数利用効率の向上を達成するものである。

3. 研究の方法

フォトニックネットワークのサブシステムである【A】送信器、【B】光ノード、【C】受信器の全てにおいてスペクトル狭窄効果の低減処理を行うことで、ネットワークの伝送容量を最大化する。さらに、【D】補償技術を考慮した伝送特性の解析、およびその結果に基づく【E】適応的ネットワーク制御を行うことで、現行のフォトニックネットワークの限界を超えた周波数利用効率向上を達成する。

4. 研究成果

(1) 予等化フィルタは、信号送信前に部分的な等化処理を行うことで、受信器側での等化処理の負担を軽減し雑音強調を抑制する技術である。現行のシステムでは受信器のデジタルフィルタによる雑音強調が信号対雑音比(Signal-to-noise ratio: SNR)の低下を引き起こすために、等化処理後の信号品質を制限していた。予等化フィルタはこの受信器側での雑音強調を軽減するため、信号を送信する前に等化処理の一部を行う。すなわち、予等化フィルタは損失の大きい周波数成分を送信前に強調することで雑音強調を低減し、帯域狭窄効果の影響を緩和する。しかし予等化により減衰の大きい周波数成分に大きな電力を割り当てるため、波長選択スイッチ(Wavelength-selective switch: WSS)通過時の損失が大きくなる。狭窄の度合いが大きい場合は予等化により割り当てられる電力も大きくなるため、この過剰な損失は WSS 通過回数に伴い大きくなる。一見するとこの問題は信号の光ファイバ入力パワーを大きくすることで解決できるように思えるが、光パワーの上昇に伴い非線形雑音が増加するためファイバ入力パワーは制限される。したがって WSS 通過に伴う過剰な損失が信号パワーを低減し SNR を低下させるため、予等化方式による伝送性能向上には限界がある。この問題を解決するために、予等化フィルタとパーシャルレスポンスフィルタの積を送信信号のスペクトル整形に用いる。予等化フィルタは事前にパワーを強調する一方でパーシャルレスポンスフィルタは事前にパワーを減衰するため、両者是对称的な特徴を持っている。この2つの対称的なフィルタが、互いを打ち消すのではなく有機的に結合するために、信号の伝送品質を大きく改善する。

図1はBER対伝送距離を示している。ここで、 L は光増幅器スパン長、 r はノード間にあるスパン数である。したがって、ノード間の光ファイバ長は Lr である。大規模なコアネットワークでは伝送距離が長くなることから高次多値変調方式の利用は想定されていないため、4-QAM 信号の伝送結果のみを示している。4-QAM 信号の場合、提案方式は全ての結果で信号の最大伝送可能距離を拡大した。これは、4-QAM 信号の伝送において信号帯域狭窄効果が信号品質劣化の主要因であるためである。ノード間距離が拡大すると、提案方式によるホップ数の増加は小さくなるが、距離の増加は大きくなる。また、本報告書には示していないが、16-QAM 信号の場合、提案方式は信号の伝送可能距離を延伸するものの、ノードが B&S 型でノード間距離 80km の場合は予等化方式より性能が悪化する。これはスプリッタに使用及び比較的長距離の伝送により雑音の影響が大きくなったためである。64-QAM 信号の場合はさらに雑音耐力が低下するため、いずれの場合も提案方式は有効ではなくなる。以上の結果から、信号帯域狭窄効果が信号品質劣化の主要な要因であるとき、提案方式は極めて有効であることが確認された。

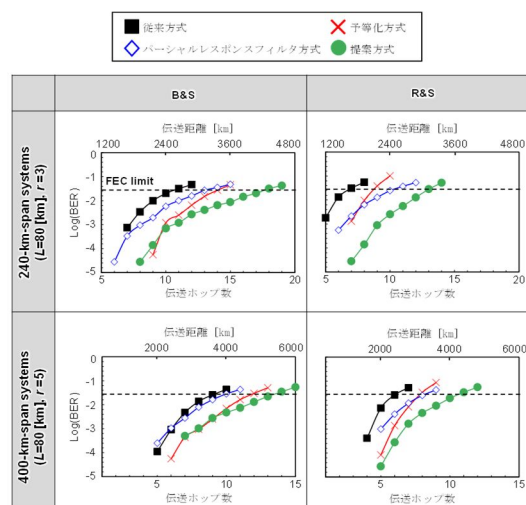


図1 BER 対伝送距離。

(2) 従来,距離適応変調を用いる場合には,スペクトル狭帯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,先に述べたように,そのような場合,光ノード内の WSS に起因するスペクトル狭帯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,スペクトラム狭帯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.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した.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.GRE 内には信号を密に收容し,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.つまり,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.

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,スペクトル狭帯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.複数のネットワークトポロジに対して評価を実施した.4x4 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 x 4, 43Gbaud DP-8QAM x 2, 32Gbaud DP-16QAM x 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,スペクトル狭帯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.図 2 は変調方式と割り当てチャンネル帯域の対応を示している.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.

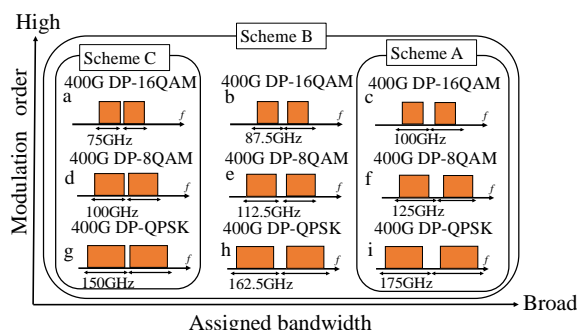


図 2 変調方式及び割り当てチャンネル帯域の優先順位.

図3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応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。一方で距離適応変調と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が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。

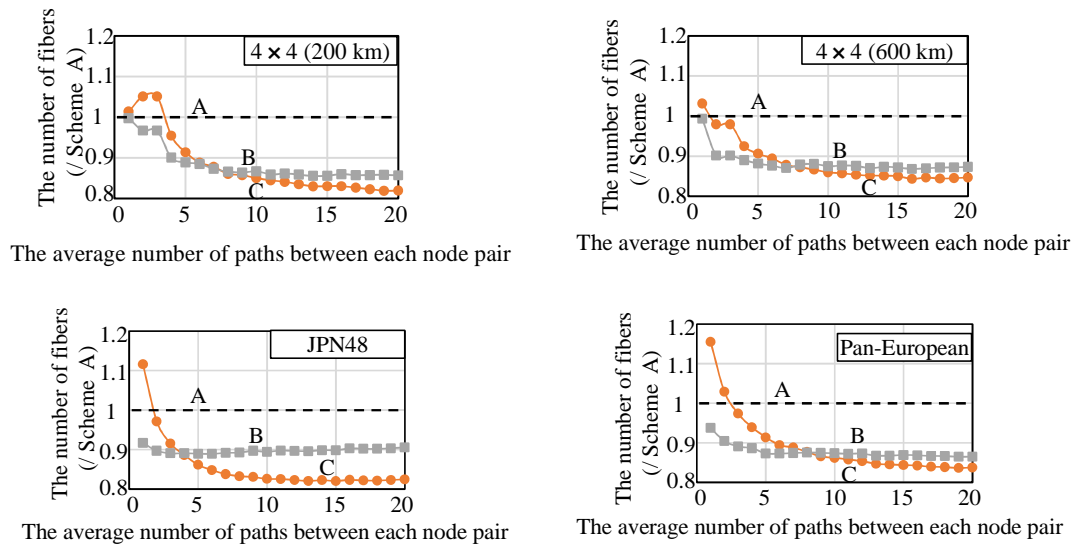


図3 必要光ファイバ数比。

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4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4 数値実験を基にした手法の比較。

上述のように、本研究では、次世代大容量フォトニックネットワークの構築に向けて、超高密度波長分割多重技術をネットワークに導入し、それに伴うスペクトル狭窄効果を低減する種々の技術の研究開発を行った。信号処理及びネットワーク制御技術を適切に使用することにより、飛躍的な大容量化を実現できることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Okamura Kazuya, Mori Yojiro, Hasegawa Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Pre-Filtering Techniques for Spectrum Narrowing Caused by Optical Node Traversal in Ultra-Dense WDM Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOT.2021.3065139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Mori Yojiro, Honda Eiji, Shiraki Ryuta, Suzuki Keijiro, Matsuura Hiroyuki, Kawashima Hitoshi, Namiki Shu, Ikeda Kazuhiro, Sato Ken-Ichi	4. 巻 38
2. 論文標題 Wavelength-Division Demultiplexing Enhanced by Silicon-Photonic Tunable Filters in Ultra-Wideband Optical-Path Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 1002~1009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JLT.2019.2947709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shiraki Ryuta, Mori Yojiro, Hasegawa Hiroshi, Sato Ken-ichi	4. 巻 27
2. 論文標題 Design and evaluation of quasi-Nyquist WDM networks utilizing widely deployed wavelength-selective switches	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 18549~18549
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.27.018549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yamaoka Shuhei, Mori Yojiro, Hasegawa Hiroshi, Sato Ken-ichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Digital post-processing against inline spectrum narrowing caused by optical node traversals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 93~98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2018XBL0162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kayano Keisuke, Yamaoka Shuhei, Mori Yojiro, Hasegawa Hiroshi, Sato Ken-Ichi	4. 巻 31
2. 論文標題 Highly Dense Elastic Optical Networks Enabled by Grouped Routing With Distance-Adaptive Modulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 295 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LPT.2019.2892506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kayano Keisuke, Mori Yojiro, Hasegawa Hiroshi, Sato Ken-ichi, Oda Shoichiro, Yoshida Setsuo, Hoshida Takeshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Effectiveness of transmission-quality-aware online network design and provisioning enabled through optical performance monitoring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 81 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/comex.2018XBL0157	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 N. Tsuchida, T. Kuno, Y. Mori, and H. Hasegawa
2. 発表標題 Estimation for IQ skew of a transmitter in digital coherent communication systems
3. 学会等名 the Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Okamura, Y. Mori, and H. Hasegawa
2. 発表標題 Joint pre-emphasis and partial-response coding for spectrum narrowing caused by repeated optical-node traversal in ultradense WDM networks
3. 学会等名 European Conference on Optical Communication (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kuno, Y. Mori, and H. Hasegawa
2. 発表標題 Low-complexity DSP configuration for short-reach transmission systems
3. 学会等名 pto-Electronics and Communications Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Kuno, Y. Mori, and H. Hasegawa
2. 発表標題 Low-complexity digital coherent receivers for short-reach transmission systems
3. 学会等名 IEEE Photonics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂野純, 森洋二郎, 長谷川 浩
2. 発表標題 機械学習を用いた位相雑音耐力の向上
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Okamura, Y. Mori, H. Hasegawa, and K. Sato
2. 発表標題 Quasi-Nyquist WDM networks using receiver-side quadrature duo-binary/quaternary spectrum shaping
3. 学会等名 SPIE Photonics West (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Mori
2 . 発表標題 Ultra-wideband ROADM
3 . 学会等名 European Conference on Optical Communication (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Okamura, S. Yamaoka, Y. Mori, H. Hasegawa, and K. Sato
2 . 発表標題 Evaluation of WSS Characteristics in highly dense WDM networks
3 . 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Mori, H. Hasegawa, and Ken-ichi Sato
2 . 発表標題 High-port-count optical cross-connect using single-module M×M wavelength-selective switches
3 . 学会等名 International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Shiraki, Y. Mori, H. Hasegawa, and K. Sato
2 . 発表標題 Quasi-Nyquist WDM networks using widely deployed wavelength-selective switches
3 . 学会等名 International Symposium on Extremely Advanced Transmission Technologies (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuya Okamura, Shuhei Yamaoka, Yojiro Mori, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato
2. 発表標題 Evaluation of WSS Characteristics in Highly Dense WDM Networks
3. 学会等名 OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Nagai, Yojiro Mori, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato
2. 発表標題 Perfect Compensation for IQ Imbalance in Coherent Receiver Front-Ends under Fast Phase Fluctuations
3. 学会等名 IEICE General Conference
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茅野敬介, 山岡修平, 森洋二郎, 長谷川浩, 佐藤健一
2. 発表標題 距離適応変調Grouped Routing
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本田瑛士, 森洋二郎, 長谷川浩, 佐藤健一
2. 発表標題 コヒーレント検波を用いた波長可変レーザーの動的特性解析
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuhei Yamaoka, Yojiro Mori, Hiroshi Hasegawa, Ken-ichi Sato
2. 発表標題 Novel Demodulation Framework Based on Quadrature Duo-Binary/Quaternary/Octernary Spectrum Shaping and MLSE for Mitigating Spectrum Narrowing Caused by Node Traversals
3. 学会等名 European Conference on Optical Communication (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茅野敬介, 山岡修平, 森洋二郎, 長谷川浩, 佐藤健一
2. 発表標題 距離適応変調及びGrouped Routingによる超高密度光ネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茅野敬介, 山岡修平, 森洋二郎, 長谷川浩, 佐藤健一
2. 発表標題 距離適応変調およびGrouped Routingを用いた超高密度光ファイバネットワーク
3. 学会等名 電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山岡修平, 森洋二郎, 長谷川浩, 佐藤健一
2. 発表標題 光ノード通過により生じる信号帯域狭窄効果の影響を緩和する新たなデジタル信号処理技術
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茅野敬介, 山岡修平, 森洋二郎, 長谷川浩, 佐藤健一
2. 発表標題 距離適応変調及びGrouped Routingによる超高密度光ネットワーク設計とその性能評価
3. 学会等名 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------