

研究種目: 基盤研究 (B)  
研究期間: 2007 ~ 2008  
課題番号: 19360171  
研究課題名 (和文) 多波長・広帯域波長変換によるフォトニックネットワーク技術の研究  
研究課題名 (英文) Studies of photonic network with multiwavelength and broadband wavelength conversion scheme  
研究代表者  
来住 直人 (Kishi, Naoto)  
電気通信大学・電気通信学部・准教授  
研究者番号: 10195224

研究成果の概要: 情報信号の伝送帯域拡大に対応可能な、広い波長帯域を利用したフォトニックネットワークの地域ノードにおいて、集中型の多波長光源とするアーキテクチャを提案し、併せて、各地域ノードからの送出データを実時間に行う手法を提案した。さらに、そのようなノードの実現に不可欠な、光波形を伝送路に応じて柔軟に制御する手法や、発振周波数制御を光周波数標準等の外部光によって行う光信号源の提案と特性評価を行った。

## 交付額

(金額単位: 円)

年度	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2008 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

## 研究分野: 工学

科研費の分化・細目: 電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード: 波長多重光通信 半導体光増幅器 非線形光ファイバ 光波長変換 光波形変換 光ネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 光ネットワーク (フォトニックネットワーク) は、将来の重要な情報通信基盤技術であり、長距離系だけではなく、近距離系においても不可欠となる。近距離系においては、長距離系に比較して、光ファイバの波長分散や非線形特性による波形劣化が少ないため、広い波長帯域における多くの波長を用いたシステムにより、経済的な通信システム構築が可能である。また、ある地域に存在する近距離系の

データを別の地域に送出する場合は、地域内の光ノードから送出される情報を統合する必要がある。その際に、地域内のデータを、各ノードの要求する割当て量に応じて公平・迅速に集約するアルゴリズムが必要となる。

(2) 上記のような光ノードの実現のためには、波形変換や波長変換などの光信号処理技術、が必要となる。伝送距離が 100 km 以内の比較的近距离の場合は、送信波形の最適化によって伝送品質劣化を最小にすることが可能となる。

さらに、ネットワークにおいて用いられる波長はITUで定められている国際的な標準に準拠するために、それらの波長(周波数)の光を正確に生成する必要が生じる。

## 2. 研究の目的

本研究課題においては、前記の背景に基づいた以下の事項を研究の目的とする。

### (1) 光ネットワーク構成法

本研究においては図1に示すような、長距離系においては波長  $1.55\ \mu\text{m}$  帯の  $100\ \text{nm}$  程度の帯域を、近距離系においては波長より広い波長  $1.2\ \mu\text{m}$  から  $1.7\ \mu\text{m}$  にわたる  $500\ \text{nm}$  程度の帯域を利用した光ネットワークモデルを仮定し、長距離系と近距離系のシームレスな接続方法と、信号のブロードキャスト・マルチキャストの波長パス設定が可能な、自由度の高い光ネットワークの実現を目指す。なお、近距離系の構成法としては、光バースト形ネットワークとスタートポロジ形ネットワークを仮定する。

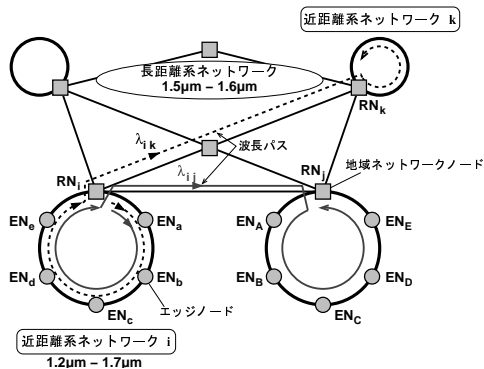


図1 対象とする光ネットワークモデル

### (2) 光ネットワークノードにおける要素技術

(1) で用いられる光ノード実現のための要素技術として、広波長帯域へのマルチキャストを可能とする波長変換方式の実現を目指し、信号波形の可変によって伝送信号品質を最適化することが可能な光波形変換器の実現方法を検討する。さらには、光周波数標準のような基準光によって、国際規格に従う光周波数グリッドにおいて周波数を制御可能な波長可変光信号源の実現を目指す。

## 3. 研究の方法

前記の目的の達成のための方法を項目別に以下に示す。

### (1) 光ネットワーク構成法

長距離系と近距離系のシームレスな接続のために、光バースト形ネットワークを採用した近距離系の各ノードから送出されたデータを統合して送出する際に、従来は、空のデータフレームを近距離ネットワークに周回して各ノードの送出要求量の情報収集を行い、その情報を基に算出した各ノードの割当データを次の周回時に収集する「二周回方式」を用いてきた。そこで、効率の向上のために情報収集とデータの収集を同時に行う「一周回方式」のアルゴリズムを提案し、その特性を計算機シミュレーションによって評価する。併せて、利用する多くの波長を多波長光源よっての集中管理するスタートポロジ形近距離ネットワークにおいて、光信号源に要するコストの削減効果を理論解析する。

### (2) 光ネットワークノードにおける要素技術

広波長帯域へのマルチキャストを可能とする波長変換方式を半導体光増幅器を用いた光回路により実現し、その特性を評価する。波形変換方式に関しては、入力波形よりもパルス幅の大きな波形への変換に関しては既に見ているので、入力波形よりもパルス幅の短い波形への変換方式に関して、半導体光増幅器及び非線形光ファイバを用いる手法及び、光ファイバのラマン散乱を用いる手法の二種類を検討し、特性の評価を行う。

なお、波形変換で用いられる半導体光増幅器においては、変換後の波形に、信号強度に応じた光周波数の過渡的な変化(周波数チャージング)が生じ、チャージング特性を正確に把握することが信号処理機構の特性評価において重要となる。そこで、このような周波数チャージングを高精度で測定する手法を検討する。

外部注入光によって周波数を制御可能な波長可変光信号源としては、単一周波数光ファイバレーザを取り上げる。単一または二つの外部光による周波数制御については既に見ているので、外部光数を4以上にした場合の周波数制御特性の評価を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 光ネットワーク構成法

###### ① 光ノードにおける高効率データ収集法

図1に示したネットワークモデルにおいて、送信元の近距離ネットワーク*i*から、長距離ネットワークを介した受信先の近距離ネットワーク*j*への通信を行う場合は、送信元と受信先を特定可能な固有の波長 $\lambda_{ij}$ を後に行う。この際に、近距離ネットワーク*i*の各エッジノード(EN<sub>a</sub> ~ EN<sub>e</sub>)からのデータを集約したものを、地域ネットワークノード(RN<sub>i</sub>)から送出する。従来方式では、RN<sub>i</sub>から空のデータフレームを時計回りに近距離ネットワークを周回させて各エッジノードのデータ送出要求情報を収集し、2周目において要求量に応じて計算された割当て量のデータを各エッジノードから収集し、同時にその次の周回時のデータ送出要求情報を収集している。本研究においては、このような要求情報の収集とデータ送出を一周回で行うためのアルゴリズムを提案し、データ送出の高速化と高効率化を図った。この際に、エッジノードの位置関係による予約割当て量の不均衡が生じないために、“max-min fair share”に基づいて各ノードからの割当て量の公平化を行った。その結果、各エッジノードの送出要求値の分布のいくつかのパターンにおいて、公平さの指標である“fairness index”の値が大きくなる値を取ることがわかった。

###### ② 集中形多波長光源を用いた近距離ネットワーク

上述のような地域ネットワークにおけるエッジノードには、所望の波長の光を出力する光信号源が必要となる。しかしながら個々のエッジノード毎に多数の波長に対応したレーザダイオード等の光源を備えるのは経費の面から非効率である。そこで、多数の波長の光を出力可能な多波長光源を地域ネットワークにひとつ用意してスター形ネットワークを用いてエッジノードへ接続することで、必要に応じて所望の波長の光源を容易に使用できるネットワーク構成を提案した。この構成に基づいて光源に必要な経費を計算し、エッジノード毎に光源を備える通常の構成と比較を行った結果、使用する波長数がある程度大きい場合は、提案手法の経費は通常の構成よりも大きく抑制可能であることを示した。

##### (2) 光ネットワークノードにおける要素技術

###### ① 広波長帯域マルチキャスト

三段接続の半導体光増幅器を用いた広帯域マルチキャスト方式を提案し、帯域320 nmにわたる広波長帯域へのマルチキャストが可能であることを実証した。マルチキャストの対象として、疎密度波長多重(CWDM)及び高密度波長多重(DWDM)信号を考えたが、いずれにおいても信号再生効果を有する高品質なマルチキャストを実現した。なお、波長1.55  $\mu\text{m}$ 帯への高密度波長多重(DWDM)マルチキャストのための従来手法においては、半導体光増幅器の非線形効果による不要な波長成分の生成を抑制するために、出力信号の周波数間隔を100 GHz以上に設定する必要があったが、本手法においては半導体光増幅器の多段接続により非線形効果の低い波長1.3  $\mu\text{m}$ 帯に入力信号を変換することで、この問題を解決している。したがって、出力信号の周波数間隔をより柔軟に設定できるために、25 GHz間隔の信号へのマルチキャストも可能となった。

###### ② 光ファイバ四光波混合を用いたNRZ-RZ変換

光信号波形のパルス幅を変換するための手法のひとつとして、光ファイバ中の四光波混合を利用した擬似的なAND論理ゲートとパルス幅可変クロック光源を組合せて構成した、図2に示すようなNRZ(non return to zero)信号から所望のパルス幅を持つRZ(return to zero)信号への変換を可能とする光回路を提案した。

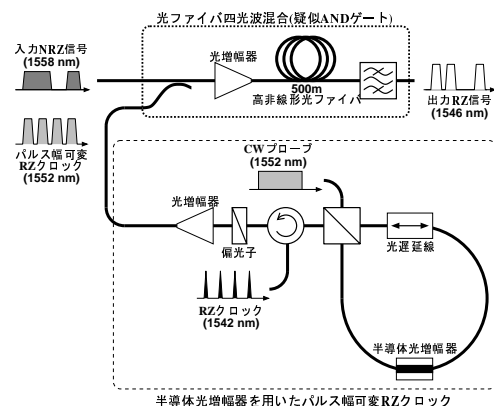


図2 NRZ-RZ変換光回路の構成

これにより図3に示すように、ビットレート10 Gb/sのNRZ信号を20 psから80 psにわたるパルス幅を持つRZ信号に高品質で波

形変換が可能となった。さらに、このような機能を組み込んだノードの近距離伝送における信号品質の最適化機能を検証するために、変換信号を距離 20 km の通常の単一モード光ファイバを伝送した場合の符号誤り率特性を図 4 に示す。パルス幅が縮まることにより、変換後の信号の受信感度が入力 RZ 信号よりも上回っていることがわかり、パルス幅が 40 ps ( $\Delta\tau = 40\text{ps}$ ) の場合に受信感度が最良となっていることから、パルス幅可変によって伝送特性の最適化が可能となることがわかった。

なお、同様の手法を用いることで、4 ないし 8 チャンネルの多波長 NRZ 信号をパルス幅可変 RZ 信号に変換することにも成功した。

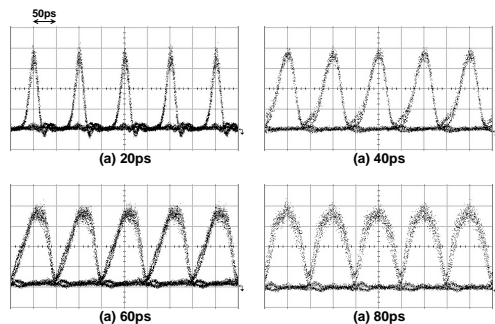


図 3 変換信号のアイパターン

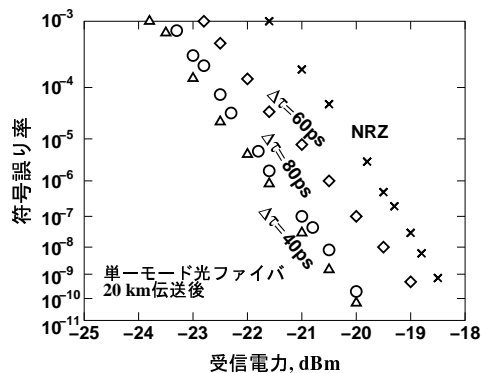


図 4 20 km 伝送後の符号誤り率特性

### ③ ラマン増幅器を用いた光波形変換

前述の NRZ-RZ 変換において用いられた半導体光増幅器は、パルス幅が 20 ps を下回る場合は良好な波形の出力が困難となるため、より短いパルス波形への変換手法として、図 5 に示すような光ファイバを伝搬する信号のラマン増幅に伴う光パルス圧縮を利用した方式の検討も行った。波長 1553 nm、パルス幅 14.7 ps、繰り返し周波数 10 GHz のパルス信号を 10 Gb/s のデータで変調した信号を入力信号と

し、この信号のパルス幅を、長さ 17 km の分散移動ファイバと波長 1449 nm の励起光で構成されるラマン増幅器によるパルス幅可変波形式変換器によって可変している。

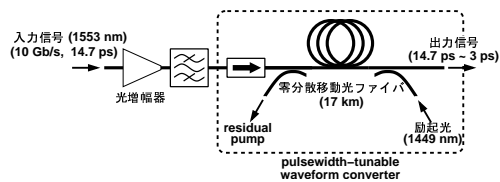


図 5 ラマン増幅による短パルス光波形変換

図 6 に、出力パルス幅と波形のピーク-ペデスタル比を、励起光電力の関数として示す。図の励起光電力の範囲において、パルス幅が 13.2 ps から 3.06 ps の間で、高いピーク-ペデスタル比を保ちながら可変出来ることがわかる。図 7 に、パルス幅 13.0 ps および 3.06 ps における光信号品質を、受信電力に対する符号誤り率として示す。これらのパルス幅の中間の値に対する信号品質は図示の特性の中間に存在しており、波線で示す変換前の信号 (back-to-back) と比較したパワーペナルティの劣化は 1 dB 以下になっている。

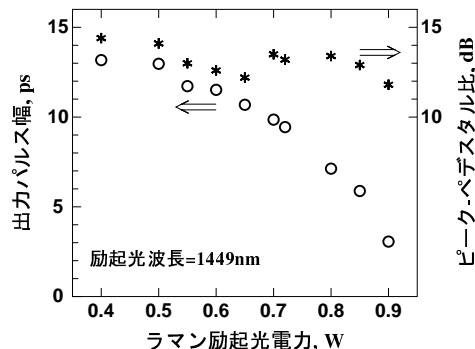


図 6 パルス幅とピーク-ペデスタル比の励起光依存

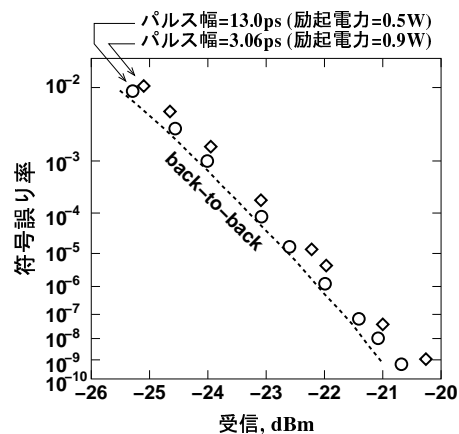


図 7 パルス幅変換信号の品質

#### ④ 半導体光増幅器の周波数チャープングの高精度測定

波長可変フィルタと高速波形測定装置を用いることによって半導体光増幅器出力の周波数チャープング特性を簡便に測定する手法を提案した。これは、波長可変フィルタの最大透過波長の両側に存在する正と負の傾斜を持つ透過帯において信号波形を測定することにより、周波数チャープング特性を見積もる手法である。この手法によって、半導体光増幅器の増幅出力信号や、波長変換出力のチャープング特性の 1 GHz 以下の分解能の高精度測定が可能となった。

#### ⑤ 単一周波数光ファイバレーザの多波長外部光制御

発振周波数を外部光によって制御可能な単一周波数光ファイバレーザにおいて、波長の固定した多数のスペクトルを持つ多波長光源を外部光として用いると、光ファイバレーザに組み込まれている波長フィルタを可変することによって外部光のスペクトルのいずれかの周波数に同期してレーザ発振することから、外部光スペクトルのいずれかの周波数に一致した離散的な周波数制御が可能となる。従来は 2 波長の外部光を用いた周波数制御に成功しているため、2 波長を越える多数のスペクトルを持つ外部光を用いて発振周波数制御を試みた。その結果、4 波長もしくは 8 波長の独立したレーザ光源で構成された多波長光源において、周波数間隔 50 GHz および 25 GHz の場合において離散的周波数制御が可能であることがわかった。さらに、光周波数コムをにより生成された周波数間隔 10 GHz の多波長スペクトルによっても周波数制御が可能となることが明らかになった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件: 全て査読あり)

- [1] M. Matsuura, B. P. Samarakoon, and N. Kishi, "Wavelength-shift-free adjustment of the pulsewidth in return-to-zero on-off keyed signals by means of pulse compression in distributed Raman amplification", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.21, pp.572-574 (2009).

- [2] T. Miki, "Dependable networks as a paradigm for network innovation (invited)", *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E92-B, pp.2-8 (2009).
- [3] M. Matsuura, N. Iwatsu, K. Kitamura, and N. Kishi, "Time-resolved chirp properties of SOA measured by an optical bandpass filter", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.20, pp.2001-2003 (2008).
- [4] H. N. Tan, M. Matsuura, and N. Kishi, "Transmission performance of a wavelength and NRZ-to-RZ format conversion with pulsewidth tunability by combination of SOA- and fiber-based switches", *Optics Express*, Vol.16, pp.19063-19071 (2008).
- [5] M. Matsuura, M. Taguchi, and N. Kishi, "S, C, L-band signal transmission using a widely tunable optical clock generator", *Optics Communications*, Vol.281, pp.5423-5428 (2008).
- [6] Y. Cai, M. Matsuura, E. Oki, N. Kishi, and T. Miki, "Optical broadcast-and-select network architecture with centralized multi-carrier light source", *IEICE Electronics Express*, Vol.5, pp.796-801 (2008).
- [7] T. Manodham, L. Loyola, and T. Miki, "A Seamless handoff scheme with access point load balance for real-time services support in 802.11 wireless LANs", *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E91-B, pp.1463-1471 (2008).
- [8] M. Matsuura, N. Kishi, and T. Miki, "Broadband regenerative wavelength conversion and multicasting using triple-stage SOA-based wavelength converter", *Optics Letters*, Vol.32, pp.1026-1028 (2007).

[学会発表]

(計 9 件: 文献 [4] と [6] を除いて全て査読あり)

- [1] N. Kitsuwon, T. Miki, and N. Kishi, "Real-time reservation using dynamic-shared method in burst photonic network", *Seventh International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON2008)*, pp.240-243, Singapore (2008 年 12 月 8 日).

- [2] M. Matsuura, M. Taguchi, and N. Kishi, “S, C, L-band signal transmission by widely tunable pulse source using a single SOA-based wavelength converter”, *The 21st Annual Meeting of the IEEE Laser & Electro-Optics Society(LEOS2008)*, TuX1, Newport Beach, USA (2008年11月11日).
- [3] M. Matsuura, B. P. Samarakoon, and N. Kishi, “Pulsewidth-tunable all-optical signal conversion by pulse compression in distributed Raman amplifier”, *The 21st Annual Meeting of the IEEE Laser & Electro-Optics Society(LEOS 2008)*, MP2, Newport Beach, USA (2008年11月10日).
- [4] 田口勝久, 松浦基晴, 來住直人, “単一周波数光ファイバレーザの多波長外部光源による周波数制御法”, 電子情報通信学会技術研究報告, OFT2008-35, 芝浦工業大学豊洲キャンパス (2008年10月17日).
- [5] Y. Cai, M. Matsuura, N. Kishi, and T. Miki, “Survivable optical broadcast-and-select network with centralized multi-carrier light source”, *14th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2008)*, 16-PM2-C-4, Akihabara, Tokyo (2008年10月16日).
- [6] 來住直人, 松浦基晴, グエン タン フン, ブッディカ プラニース サマラコーン, “光ファイバ非線形現象の光波形変換への応用”, 2008年電子情報通信学会ソサイエティ大会, BS-11-4, 明治大学工学部(神奈川) (2008年9月18日).
- [7] Y. Cai, M. Matsuura, N. Kishi, and T. Miki, “Modeling and architecture design of novel optical broadcast-and-select network with centralized multi-carrier light source”, *13th Optoelectronics and Communications Conference(OECC2008)*, P81, Sydney, Australia (2008年7月10日).
- [8] M. Matsuura, N. Iwatsu, K. Kitamura, and N. Kishi, “Chirp properties induced by SOA for amplification and wavelength conversions measured by an optical tunable bandpass filter”, *13th Optoelectronics and Communications Conference(OECC2008)*, WeH4, Sydney, Australia (2008年7月9日).
- [9] H. N. Tan, M. Matsuura, and N. Kishi, “Pulsewidth tunable NRZ-to-RZ data format conversion by combination of SOA- and fiber-based switches”, *13th Optoelectronics and Communications Conference(OECC2008)*, TuF5, Sydney, Australia (2008年7月8日).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

來住 直人 (Kishi Naoto) (2008 年度)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号: 10195224

三木 哲也 (Miki Tetsuya) (2007 年度)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号: 60272762

### (2) 研究分担者

松浦 基晴 (Matsuura Motoharu) (2008 年度)

電気通信大学・電気通信学部・助教

研究者番号: 40456281

來住 直人 (Kishi Naoto) (2007 年度)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号: 10195224

### (3) 連携研究者

大木 英司 (Okii Eiji) (2008 年度)

電気通信大学・電気通信学部・准教授

研究者番号: 70524156