

令和元年6月21日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06355

研究課題名（和文）空間多重光増幅技術を用いた広域・高速制御型光ネットワークの研究

研究課題名（英文）A study on wide-area and fast-controlled optical networks using a space-division multiplexed optical-amplification technology

研究代表者

増田 浩次（Masuda, Hiroji）

島根大学・学術研究院理工学系・教授

研究者番号：60583127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）： 将来の超大容量光ネットワーク実現に向けて、必要不可欠かつ最も重要な要素技術である空間多重光増幅技術に関する実験及び理論検討を行った。本研究で提案し実施した検討により、従来技術である単一コア・単一モード伝送が具備し、今後の空間多重光ネットワークにおいてもその実現が望まれる光ネットワークの広域性と光増幅器の高速制御特性が達成可能であることを確認した。査読を有する雑誌論文4件の掲載と、招待講演2件を含む学会発表6件を達成し、本研究の学術面での重要性と社会における有用性の情報発信を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、超大容量の光ネットワークへの適用が期待される、独創的な本提案技術に関し、動作機構の明確化、設計技術の確立及び有効性の検証を行ったことである。本検討では、実験・理論の両面において、新規かつ重要な知見の獲得に成功している。

一方、本研究の社会的意義は、今後の新規空間多重光ネットワークの光増幅系において、顕著なコスト及び消費電力低減、さらに新規機能の創出の見通しが得られた点にある。将来の超高速・大容量及び多機能な情報通信サービスの実現に大きく寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）： For realizing an optical network with ultra-high capacity in the future, an experimental and theoretical study, which is indispensable and most important constituent technology in the network, on the space-division multiplexed optical-amplification technology has been conducted. We confirmed that it is possible to achieve wide-area operation of the network and high-speed control characteristics of the optical amplifiers used in the network as in the case of the present optical network which use single-core and single-mode optical fibers.

研究分野：光通信及び光計測

キーワード：光増幅 空間多重 広域ネットワーク 高速制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

光ネットワークにおける伝送容量は、研究開始当初まで 30 年以上に渡り指数関数的な顕著な伸び（20 年間で約 1000 倍）を示しており、将来のペタからエクサビット級の伝送容量実現技術の研究開発が必要不可欠な重要課題であった[1, 2]。上記実現技術として、新規な空間多重ファイバと空間多重型光増幅器（SDM OA）などを用いた伝送技術（SDM）の研究開発が世界的に活発に行われていた[1, 2]。上記の空間多重ファイバとして、マルチコアファイバ（MCF）及びマルチモードファイバ（またはフューモードファイバ）（MMF）が研究され、また、SDM OA としてマルチコア・エルビウム添加ファイバ増幅器（MC-EDFA）及びマルチモード EDFA（MM-EDFA）が研究されていた。将来の SDM ネットワークにおいて、従来技術である SMF ベースの光ネットワークと同様の長距離性、広域性、伝送品質、消費電力、装置サイズ及び経済性を実現するためには、光中継器及びノード内増幅器として使用される SDM OA の高速利得一定制御（AGC）が必須であった。また、SDM ネットワークの光増幅中継システムの長距離性及び広域性を確保するための新しい分布型光増幅技術の確立が急務であった。

<参考文献>

[1] T. Morioka, OECC, pp. 13-17, 2012

[2] P. J. Winzer, Advanced Photonics, NeS1D.1, 2015

2. 研究の目的

本研究における検討事項は、SDM OA の高速 AGC 技術及び SDM ネットワークにおける分布型光増幅技術である。SDM ネットワーク内の波長多重（WDM）システムでは、光増幅器の利得制御がない場合、波長数変動に伴い利得が大きく変動する。この利得変動を抑圧する技術として、従来技術として、制御光パワーのフィードフォワード AGC が提案されていたが、その技術の場合には、コアごとに、アクティブ動作の部品・回路として、利得検出回路、励起光源、及び高速 AGC 光電子回路が必要であり、回路が大がかりかつ消費電力が大きいという欠点を有していた。一方我々は、全光型のフィードフォワード AGC（AO FF-AGC）を提案していたが、この技術は、複数のコアに共通な 1 つの励起光源、及び制御光発生回路を光励起する 1 つの励起光源のみを必要とし、回路が簡素で消費電力が小さいというメリットを有する。我々は、この AO FF-AGC の基本的な動作及び特性を、研究開始当初までの検討により確認済であるが、本研究では、本提案方法の有効性実証のために不可欠な理論・実験検討を行い、AO FF-AGC 機能を有する MC-EDFA の優位性及び性能の明確化を主な目的とした。また、遠隔励起型マルチコア EDFA（RP MC-EDFA）に、全光型のフィードバック AGC（AO FB-AGC）を適用し、RP MC-EDFA の自立型高速 AGC を可能とする新規提案を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

高速利得一定制御機能を有する SDM 広域光ネットワークの実現を目指し、SDM 光増幅器の高速 AGC 技術、及び分布増幅型光増幅技術の理論・実験検討を行うこととした。その理論検討においては、光増幅及び AGC 動作のモデリングとシミュレーション解析を行い、設計技術の確立を目指す。また、実験検討においては、まず、構成がより簡単で実験が容易な SMF を用いた動作・特性の確認実験を行い、その後、SDM EDFA 及び SDM 伝送ファイバを用いた検証実験を行うこととした。さらに、上記の 2 つの技術の検討結果を踏まえ、SDM 光増幅器及び光ネットワークの最適構成・性能に関する総合的な検討を行い、本提案技術のコアネットワーク及びメトロ・アクセスネットワークへの適用可能性の検討を行うこととした。

特に、SDM OA の高速制御技術に関し、全光型フィードフォワード AGC（AO FF-AGC）型 MC-EDFA 及び遠隔励起マルチコア EDFA（RP MC-EDFA）の構成最適化、AGC 特性の伝送システム動作パラメータ依存性（SDM OA の対する入力・出力パワー、入力パワー変動時定数、WDM 波長配置）の明確化、及び従来の AGC 技術との性能比較を行うこととした。数値目標として、SDM OA の残留利得偏差（ ΔG ）として、1 台あたり約 0.1~0.5dB 以下を目指す。また、利得媒質として、EDFA 以外に半導体光増幅器（SOA）を検討することとした。SOA の自然放出光寿命は EDFA に比べ桁違いに短いため、 ΔG が顕著に低減する可能性があるものと予想した。

4. 研究成果

マルチコアファイバを用いた伝送システムの基本構成について、図 1 に 3 通りの場合を示した。多中継の場合は単位伝送スパン、無中継の場合はその無中継区間の構成である。図 1(a)が、線形中継のマルチコア EDFA を用いた場合、図 1(b)が、マルチコアの DRA を用いた場合、また図 1(c)が、マルチコアの RP-EDFA を用いた場合の基本構成である。その DRA と RP-EDFA が、分布型光増幅技術である。上記の 3 つの場合のいずれもシングルコア伝送システムにおいて実用に供されている技術である。シングルコアの場合とマルチコアの場合の構成の違いは、マルチコアの場合には、伝送ファイバの両端にファンイン（Fan-in: FI）及びファンアウト（Fan-out: FO）デバイスが配置されている点がまず挙げられる。さらに、DRA と RP-EDFA の場合には、励起光と信号光を合波するためのマルチコア対応の合波器（Coupler）が必要となる。励起光源（PLS）からのハイパワーの励起光が、Coupler を介してマルチコアファイバ

に入力される。以下に、集中増幅型のマルチコア EDFA 及び分布増幅型の RP-EDFA に関する利得一定制御 (AGC) の検討結果を示す。

まず、全光型利得一定制御技術について説明する。フォトニックネットワーク (フォトニック NW) で用いられる光増幅器には、一般的に利得一定制御機能が求められる。例えば、線形中継器として用いられる EDFA、光 add-drop ノード、光クロスコネクタ (OXC) ノードの入力段及び出力段に設置した EDFA がそのような光増幅器である。シングルコアファイバのフォトニック NW では、波長多重システム (WDM) における波長チャネルの add-drop やクロスコネクタなどの波長ルーティングにより、EDFA に入力する波長数、ひいてはトータルの光パワーが時間変動する。以上の観点から、我々は、マルチコア EDFA に適用すべき AGC として、全光型フィードフォワード AGC (All-optical feedforward AGC: AO-FF-AGC) と全光型フィードバック AGC (All-optical feedback AGC: AO-FB-AGC) を提案し、その性能の明確化に向けた検討を行っている。AO-FF-AGC は、ノードの集中型増幅器として用いられるマルチコア EDFA への適用を目指し、AO-FB-AGC は、給電ができない遠隔励起 EDFA への適用を目指している。以下に、上記の 2 つの AGC 技術に関する検討結果を示す。

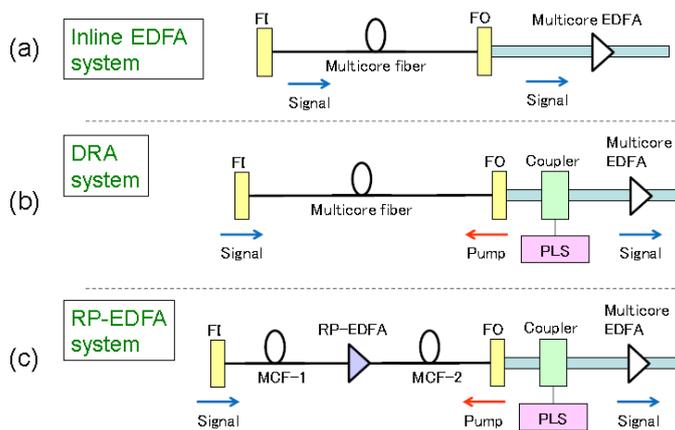


図 1 マルチコアファイバ伝送システムの基本構成

(1) 全光型フィードフォワード AGC

図 2 に、フィードフォワード AGC の基本構成を示す。図 2(a) は従来の電気段処理を用いた AGC、(b) は我々が提案している全光型の AGC である。その従来技術では、入力信号光パワーを分岐した後、フォトダイオードで光パワーを検出 (OE 変換) し、その光パワーに基づいて、制御光をあらかじめ決められた光パワーで送出 (EO 変換) する。その結果、制御対象の EDFA ゲインブロック (EDFA GB) に入力するトータルの光パワーが実効的に変化せず一定となるように動作させている。すなわち、制御光発生回路は O-E-O 機能を有する。一方、我々の提案方法では、分岐した信号光パワーを全光型の制御光発生回路に入力する。その制御光発生回路は、励起された EDF を有するファイバリング回路である。制御光発生回路からの出力光を、伝搬信号光とともに EDFA GB に入力し、トータルの光パワーが実効的に変化せず一定となるように動作させている。上記のように、本提案方法における制御光発生回路は、電気段での信号処理を含まず、O-O 機能を有している。

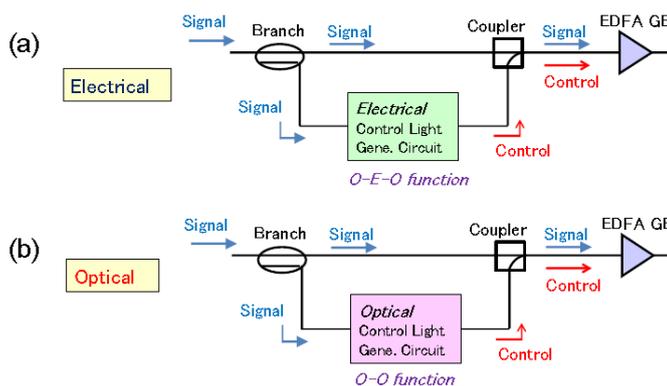


図 2 フィードフォワード AGC の基本構成

図 3 に、フィードフォワード AGC における利得制御特性の実験結果を示す ([雑誌論文] ④、[学会発表] ①、⑤参照)。マルチコア EDFA の各コア (ひいては EDFA GB) に入力するトータル信号光パワー及びターゲット利得からの利得偏差の時間依存性を示している。利得偏差の時間依存性では、AGC を用いない場合 (without AGC) と用いた場合 (with AGC) の結果が示されている。AGC を用いない場合の利得偏差は 7.9dB であった。一方、AGC を用いた場合の利得偏差は、絶対値の最大で 0.65dB であった。したがって、顕著な利得偏差の低減が実現可能であることが明らかになった。また、利得媒質を EDF から SOA に変えた

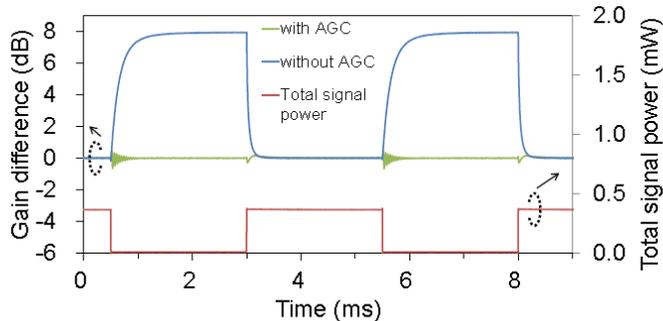


図 3 フィードフォワード AGC の利得制御特性

場合の実験検討を行った（〔雑誌論文〕①、〔学会発表〕③、④参照）。SOA の時間応答特性が、EDF に比べけた違いに短いことから、より高速な利得一定制御が実現し、利得偏差は、絶対値の最大で約 0.12dB という顕著に小さな値を達成した。

(2) 全光型フィードバック AGC

フィードバック AGC の基本構成を図 4 に示す。図 4(a) は従来の電気段処理を用いた AGC、(b) は我々が提案している遠隔励起 EDFA に関する全光型の AGC である。その従来技術では、入力及び出力信号光パワーを分岐した後、フォトダイオードでそれらの光パワーを検出（OE 変換）し、それらの光パワーに基づいて、利得を算出し、ターゲット利得が得られるように利得の誤差信号に基づいて励起光パワーを制御する。すなわち、O-E-O 型の制御である。一方、図 4(b) は、利得制御対象の EDFA GB とフィードバックループとしてのファイバリングを有する全光型の AGC 光リング回路である。その全光型 AGC 光リング回路は、制御光（Laser）の波長を決定するための OBPF を有する。EDFA GB に対する励起光は、遠隔励起システムにおける励起光源に接続された伝送光ファイバを經由して EDFA GB に入力する。励起光源から EDFA GB までの距離が数 10km 程度の遠隔励起システムへの適用を考えているので、上記の従来型の電気段処理を有する制御の適用は困難である。

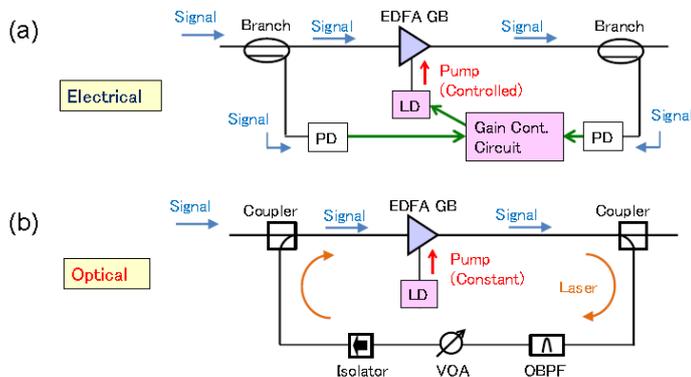


図 4 フィードバック AGC の基本構成

フィードバック AGC の実験構成を図 5 に示す（〔雑誌論文〕③、〔学会発表〕①、⑥参照）。実験の都合上、シングルコアの実験系において、AGC 特性の評価を行った。WDM 波長数の変化が、40 から 1 の Drop 及び 1 から 40 の Add の場合を模擬する実験である。Surviving チャネルの波長を 1550.0nm、他の WDM 信号光の 39 チャネル分を Saturation チャネルとして、4 波長のレーザ光（1532.7～1552.5nm）を用いている。音響光学変調器（AOM）を用いてその Saturation チャネルをオン・オフしている。伝送路は、2つの 30km の光ファイバのボビン（Fiber-1 及び 2）、スパン損失調整用の可変光減衰器（VOA）、及び RP-EDFA から構成されている。励起光源は、波長が 1490nm の偏波多重光を送出し、合波器（Coupler）を介して、Fiber-2 に励起光を導入し、Fiber-2 から出力した励起光が RP-EDFA に入力している。伝送路のファイバ長を 134km と想定した場合、スパン損失は 25.4dB であった。

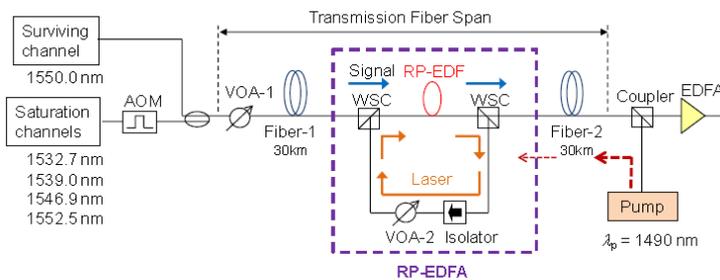


図 5 フィードバック AGC の実験構成

図 6 に、フィードバック AGC の利得制御特性を示す。RP-EDFA に関し、ターゲット利得からの利得偏差の時間依存性を示している。AGC を用いない場合（without AGC）と用いた場合（with AGC）の結果を示している。AGC を用いない場合の利得偏差は、2.1dB であった。一方、AGC を用いた場合の利得偏差は、絶対値の最大で約 0.22dB であった。したがって、十分に低い利得偏差が可能であることが確認された。ただし、本研究開始時点における利得偏差の目標値は、約 0.1dB 程度から約 0.5dB 以下であり、その目標値を十分に満足している。

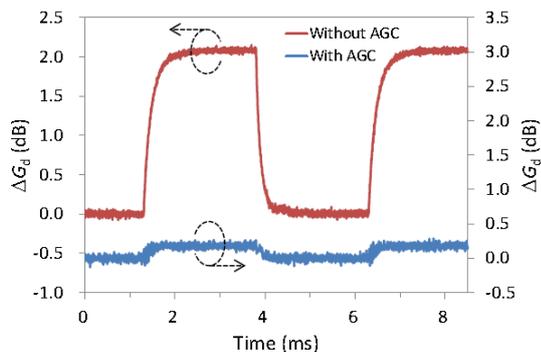


図 6 フィードバック AGC の利得制御特性

また、分布ラマン増幅における超高感度なラマン利得の測定法の提案と特性明確化の検討を行った（〔雑誌論文〕②、〔学会発表〕②、⑥参照）。従来技術の比べ、顕著に高感度なラマン利得検出特性を実験検証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Kokoro Kitamura, Hiroji Masuda, “First experimental demonstration of all-optical feedforward automatic gain control scheme using a semiconductor optical amplifier,” *IEICE Electronics Express*, Vol 16, No. 4, pp. 20190001 1-6, 2019, DOI: 10.1587/elex.16.20190001, 査読有
- ② Hiroji Masuda, Kokoro Kitamura, “Highly sensitive Raman gain coefficient measurement by detecting spontaneous Raman scattering power for distributed Raman amplification systems,” *IEICE Communication Express*, Vol 6, No. 12, pp. 661-666, 2017, DOI: 10.1587/comex.2017XBL0121, 査読有
- ③ Kokoro Kitamura, Kenta Udagawa, Hiroji Masuda, “All-optical feedback gain control of remote optically pumped amplifiers,” *IEICE Communication Express*, Vol 6, No. 9, pp. 519-524, 2017, DOI: 10.1587/comex.2017XBL0083, 査読有
- ④ Kokoro Kitamura, Kenta Udagawa, Hiroji Masuda, “All-optical feedforward automatic gain control scheme for pump power shared erbium-doped fiber amplifiers,” *IEICE Electronics Express*, Vol 13, No. 22, pp. 20160920 1-6, 2016, DOI: 10.1587/elex.13.20160920, 査読有

[学会発表] (計 6 件) すべて予稿あり

- ① 増田 浩次, 北村 心, 「フォトニックネットワークにおけるマルチコア光増幅技術の検討」、電子情報通信学会 PN 研究会、PN2018-3、pp. 15-20、2018 年、**招待講演**
- ② 増田 浩次, 森高 睦, 北村 心, 「分布ラマン増幅システムにおける自然放出光受光型ラマン利得測定」、2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-10-24、2017 年
- ③ 北村 心, 増田 浩次, 「半導体光増幅器を用いた全光型フィードフォワード利得一定制御」、2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、B-10-20、2017 年
- ④ 北村 心, 宇田川 健太, 増田 浩次, 「励起光源共有型 EDFA のための SOA を用いた全光型フィードフォワード利得一定制御」、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、19a-C303-12、2017 年
- ⑤ Hiroji Masuda, Kokoro Kitamura, “Distributed optical amplification technologies for multicore fiber transmission,” 2016 IEEE Summer Topical Meeting, Me4.2, 2016, **招待講演**
- ⑥ Kokoro Kitamura, Kenta Udagawa, Hiroji Masuda, “All-optical dynamic gain control of remotely pumped erbium-doped fiber amplifier,” *OECC/PS 2016*, TuC3-2, 2016, **査読あり**

[その他]

ホームページ等

<http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~masuda/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：北村 心

ローマ字氏名：(KITAMURA, kokoro)

所属研究機関名：島根大学

部局名：総合理工学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：60549179

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。