空間分割多重光増幅方路制御ノードの省電力化技術

柳町 成行¹, ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル²

¹日本電気株式会社IoTデバイス研究所(〒305-8501 つくば市御幸が丘34)

²日本電気株式会社IoTデバイス研究所(〒211-8666 川崎市中原区下沼部1753)

Low Power Consumption Technologies for Space-Division Multiplexing Optical Amplification and Switching Nodes

Shigeyuki YANAGIMACHI¹ and Emmanuel LE TAILLANDIER DE GABORY²

¹NEC Corporation, IoT Devices Laboratories, 34 Miyukigaoka, Tsukuba 305-8501

²NEC Corporation, IoT Devices Laboratories, 1753 Shimonumabe Nakahara-ku, Kawasaki 211-8666

(Received March 30, 2018)

Space-division multiplexing nodes are attracting attention for future ultra-high capacity networks; low power consumption technologies for space-division multiplexing optical amplification and switching repeater nodes are required in this context. Here, we review technologies for low power consumption of optical amplifiers, which are used for compensating the loss of fibers and optical nodes. Namely, we present recent research results and the plausible evolution regarding the module structure and high efficiency pump control technologies for multicore erbium doped fiber amplifiers.

Key Words: Space-division multiplexing, Multicore fibers, Erbium doped fiber amplifiers, Pump lasers

1. はじめに

近年、インターネットトラフィック等の増大に伴い、光伝送では高速・大容量通信を行うため、さまざまな取り組みがなされてきた。高速信号生成技術としては、デジタルコヒーレント技術を用い、1波長当たり100 Gbps以上の高速通信技術の実用化が進められている。また、大容量伝送技術としては、波長多重技術を用いて1ファイバ当たり10 Tbps級の通信が実現されているが、SMF (Single Mode Fiber)の入力パワー制限により、今後限界が予想されている。これを解決する技術として1つのファイバに複数のコアを充填するMCF (Multi Core Fiber)を用いたSDM (Space Division Multiplexing)の研究開発が進められている。また、交換技術としては、ネットワークのトポロジがPoint-to-pointからRing型となり、トラフィックを中継するフォトニックノードとしては波長分割多重 (Wavelength Division Multiplex: WDM) 信号を波長単位で任意に挿入分岐可能なROADM (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer)が広く用いられている。現在用いられているROADMはSMFに対応した構成であるが、SDMの進展に伴い、SDMに対応した大容量フォトニックノード (SDMノード)の実現が期待される。SDMノードの構成をFig. 1に示す。

SDMノードは主に、送受信器であるTPND (Transponder), 方路の切り替えを行う光スイッチ (主にWDM信号

Fig. 1 Construction of SDM Node.

を波長単位で任意に挿入分岐するWSS (Wavelength Selective Switch)が用いられている), フォトニックノード間で生じる光損失を補償する光アンプで構成される。SDMノードは、これまでのSMFを用いたノードに比較して、スイッチ規模が大きくなる。すなわち、同じファイバ数 (入出力ポート数) で比較すると、20 コアのMCFを用いた場合、スイッチ規模はSMFを用いた場合の20倍となる。このような大規模スイッチングを有するSDMノードは、ノードのサイズが小型であることに加えて、省電力であることが求められるのは言うまでもない。光アンプはノードを構成する光コンポーネントの中では、TPNDとともに電力を多く消費するコンポーネントであるため、ノード全体の消費電力を抑えるためには、光アンプの省電力化が1つのカギとなる。本報では、光アン

プの省電力化に関するこれまでの取り組みを紹介するとともに、SDMノード実現に向けた今後の期待について述べる。

2. MCF光増幅の省電力化技術

2.1 SMF用EDFAの省電力化技術

これまで、光伝送で用いられる光アンプ技術は1本のファイバに1つのコアを有するSMFに対応したEDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) を中心に研究および開発が進められてきた。本節では、MCFの増幅技術として、MCFの各コアを光アンプ部で分離してSMFとし、EDFAで個別に励起する技術における省電力化の研究開発について述べる。

光アンプの省電力化を実現するには、光増幅媒体を励起する励起光源の消費電力をいかに低減できるかが大きなカギとなる。ここでは、励起光源共有化技術、励起光リサイクル技術、動的な制御による省電力化技術について記述する。まず、励起光源共有化技術とは、複数の励起媒体に対して、1つの励起光源を配置して共有する方法である。例えば、伝送媒体として12 コアのMCFを用い、光アンプ部において、12 コアをSMFに分離後、共有化された励起光源で励起することで省電力化が図れることが示されている¹⁾。ただし、1つの励起光源を用いて多数のSMFの励起を行うためには、高出力な励起光源が必要であるとともに、高出力条件で高効率動作が求められる。すなわち、非常に高い線形性の励起光源が必要である。

また、高出力な励起光源の利用を避ける方法としては、励起光リサイクル技術が提案されている。この技術は、複数のコアで共有する励起光源の励起光量の不足分を、初期に注入した励起光のうち、励起媒体に吸収されなかった光量を光カプラ等で再度励起媒体に注入することで、従来熱として廃棄されていた光量を励起光源として再利用する方法である²⁾。

また、これまで光アンプの構成やパラメータ設定は初期に調整された状態を維持する静的な設定がとられている。これに対して、環境条件(温度等)や、トラフィック(光アンプへの入力光量に相当)の状況に応じて動的に構成やパラメータを変更して省電力化を図る新しい検討もなされている。具体的には、冷却機能(Thermoelectric Cooler: TEC)を用いた高出力励起光源と、TECを用いない低出力励起光源を、環境温度や光アンプへの入力光量に応じて、選択的に用いることにより省電力化を図る。つまり、入力光量が少ない場合、低出力励起光源を用いることにより、これまで一律に高励起光源を用いた場合に比較して、極端な条件で90%までの省電力化が図れることが報告されている³⁾。但し、入力光量が多い場合は、省電力効果がなくなる。

さらに、これまでの励起光源共有と入力光量等に応じた動的な制御を組み合わせた光アンプの可変共有方式も検討されている⁴⁾。Fig. 2 に可変共有化方式の構成図、Fig. 3 に省電力効果について示す。本検討では、従来の

Fig. 2 Construction of variable share pumping.

Fig. 3 Power reduction of variable share pumping.

SMF増幅に対して、30%以上の電力を削減可能なことが示されている。

2.2 コア励起マルチコア光増幅技術

前節では、MCFを光アンプ部でSMF化したのちに増幅する技術について述べた。本節では、光アンプ部における増幅媒体にMCFを用いて増幅を行うMC-EDFA (Multi Core EDFA) 技術のうちコア毎に増幅する技術について記載する。Fig. 4 は7 コアのコア励起MC-EDFAの構成図である。

励起用MCFの前方および後方より980 nm SM-LD (Single Mode-Laser Diode) を7つのコアに直接結合させた構造であり、アンプ特性としては最大増幅ゲイン15 dBとなっている。なお、現在ではアンプの改善が進み増幅ゲインも15 dBを超える報告がなされている。また、開発したアンプを用いた伝送試験では40 波長128 Gb/s (PDM-QPSK) 信号の6160 km伝送を実現している⁵⁾。しかし、本研究で用いられているのは前節で述べたSMFの増幅技

Fig. 4 Construction of MC-EDFA.

術と同じであり、省電力への寄与は薄い。また、別の検討としては、直接的に省電力化とリンクしていないが、結合型MCF(Coupled Core MCF)を用いた光アンプにより、モード損失を低減する検討⁶⁾や、MCFと励起光源にMM-LD(Multi Mode Laser Diode)を用いた構成により省電力化を図る方法が検討されている⁷⁾。

2.3 クラッド励起マルチコア光増幅技術

これまで、MC-EDFAで検討されたコア励起に対し、多数のコアを取り巻くクラッドをMM-LDで励起することにより、複数のコアを一括励起するクラッド励起マルチコア光増幅が検討されており、これまで、従来のSMFへEDFAを適用した場合にと比較して約33%省電力効果が報告されている^{8,9)}。消費電力には、LDの変換効率とファイバの吸収効率が寄与するが、変換効率はクラッド励起よりもEDFAがやや高く、吸収効率はコア径拡大とクラッド縮小効果によりSMFよりMCFが優れている。また、クラッド励起で用いるMM-LDは非冷却で使用できる利点も大きく、今後更なる低電力化が期待される。

なお、光アンプ部において、必要なゲインを得るには増幅媒体の長さを十分にとる必要があるため、利得の面ではL帯が有利であり、当初、L帯を中心に検討がなされた⁹⁾。しかしながら、実際の光ネットワークは主にC帯を中心に構成されており、近年C帯での応用も検討されている¹⁰⁾。

また、最大コア数を増大させて増幅効率を改善する方法として、19コアのMC-EDFAを用いることで7コアのMC-EDFAに比較して、幾何学的なクラッド対コアの密度改善により増幅効率が高まる報告がなされている¹¹⁾。さらに、32コアのMC-EDFAの開発も行われており、さらなる増幅効率改善が見込まれる¹²⁾。

ただし、これまでの研究はMC-EDFA単体としての特性改善についての議論であり、各コアへの波長充填の方法によっては、クラッド一括励起よりコア励起のほうが増幅効率がすぐれる場合もあるため、全体の省電力化を図るには波長充填率も考慮する必要があると思われる¹³⁾。

3. ハイブリッド励起による省電力マルチコア光増幅技術

3.1 ハイブリッド励起技術の概要

前節で述べたクラッド励起マルチコア光増幅技術は、1つの励起光源で複数のコアを一括に励起するため、各コア個別に励起パワー調整することができない。このため、これまでWDMネットワークに用いられている光アンプには必須である自動利得制御(Auto Gain Control: AGC)を個々のコアで実現することが困難である。ここで、AGCとは入力波長数が増減しても光アンプの利得を一定にする制御方式である。そこで、本課題を解決すべく、クラッド励起とコア励起を併用したハイブリッド励起技術が提案されている。Fig. 5にハイブリッド励起方式の構成図を示す。

ハイブリッド励起技術では、前方励起として、975 nm

Fig. 5 Construction of Hybrid pumping. CCP: Common Clad Pumping. ICP: Individual Core Pumping.

MM-LD、後方励起として、1480 nm SM-LDを用い、入力信号光のパワー-6 dB~-21 dBの入力信号光パワーに対して、利得変化0.4 dBで制御可能なことが示されている^{14,15)}。

さらに、ハイブリッド励起技術を用いたシステム評価としては、NICTプロジェクトにおいて、125 μ mクラッド4コアを用いた伝送試験において、116 波長36 Gbaud/s (PDM-16QAM) 信号を用いて118.5 Tbp/s 316 kmの伝送試験に成功している¹⁷⁾。

3.2 省電力化を実現する制御技術

本節では3.1節で挙げたハイブリッド励起方式の省電力化制御技術について、特に、光アンプの動的な制御による省電力化に関して述べる。

3.2.1 外部温度をパラメータとした省電力化制御技術

ハイブリッド励起構成において、クラッド励起光源を980 nm非冷却型MM-LD、コア励起光源を1480 nm冷却型SM-LDで構成し、動作温度によって、クラッド励起とコア励起光源の励起パワー比率を最適化することにより、従来の静的な条件での設定に比較して最大38%の電力削減ができることが示されている¹⁸⁾。

3.2.2 利用コア数と伝送距離を考慮した省電力化制御技術

MCFは、従来のSMFに比較して芯数倍の帯域を有する。したがって、トラフィックの状況によっては、すべてのコアを用いない場合も多い。すなわち、利用されるコア数に応じた制御による省電力化が考えられる。具体的には、クラッド励起において、励起光源のパワーを一定とした場合、利用コア数が多いほどクラッド励起の配分を大きくする制御が省電力化に効果的である。また、伝送距離によって必要となる光アンプのゲインも変化するため、伝送距離に応じた制御による省電力化も期待される。具体的には、スパン長が長くなると高ゲインが必要となるため、高ゲインで消費電力が低いクラッド励起が有利となり、クラッド励起の配分を大きくする制御が省電力化に効果的である。これを理論的、実験的に解析(Fig. 6)し、コア励起のみの励起条件に対し、最大16.5%の省電力化が可能なが示されている^{16,19)}。

2.1節においては、SMFの省電力化技術として、励起

Fig. 6 Power reduction for number of using cores and transmission distance.

光源共有化技術について述べた。ハイブリッド構成においては、クラッド励起用MM-LDおよびコア励起用SM-LDがあり、制御するパラメータが増える。すなわち、増加したパラメータを最適化することにより、さらに省電力化の可能性が増大する。近年の検討では、ハイブリッド励起構成において、コア励起光源を7コアで共有するとともに、その共有する比率を利用コア数に応じて可変とすることで、コア励起のみに比較して最大23.2%の省電力化が図れることが示されている²⁰⁾。ただし、コア共有化では高出力で高効率が求められるため、共有可能なコア数は励起光源の線形性に依存する。

4. 信号光パワーの平坦化技術

本節では、WDMネットワークで必須の技術である利得平坦化技術について述べる。従来のSMFを用いたWDMネットワークでは、送信側TPNDから受信側TPNDまで、光スイッチ、光フィルタ、光アンプ等の光学素子を複数通過するのが一般的である。この光学素子は波長特性を持つため、複数の送信側TPNDの光信号を均等なパワーとして波長軸方向でフラットなWDM信号を生成しても、通過するたびに、WDM信号が波長軸方向で歪んでしまい、信号の受信側TPNDにおいてS/Nの劣化を招く。そのため、例えば、ノードの出口において、1つのコア内のWDM信号パワーを波長軸方向において平坦化することが必要である。さらに、これまで述べた

Fig. 7 Power reduction of variable share pumping.

SDMにおいては、MCF内に設置された複数のコア間でもパワー偏差があるため、コア間でWDM信号全体のパワーを平坦化する必要がある。例えば、32コアMCFにおいては、コア間損失ばらつきが2 dB程度あることが報告されている²¹⁾。

ここで、光アンプ自体は波長方向の平坦化制御ができない。このため、通常、光アンプ通過後にイコライザを用いて平坦化するのが一般的である。しかしながら、この方法では、最も低い光量の波長チャンネルに合わせて、それを超える波長チャンネルの光量をカットするため、エネルギー効率が悪い。すなわち、なるべくこのカットする光量を抑えつつ、平坦化を実現することが省電力につながる。この問題を解決する1つの方法として、アンプの増幅帯域のうち、ゲインの平坦な部分を用いて波長間のパワーばらつきを抑える方法が報告されており、SMF構成において、市販の980 nm SM-LDで12 chの増幅を行うことが可能なことが示されている¹⁾。しかしながら、帯域を制限しているため、伝送容量が制限されるという問題もある。また、コア間でのパワーばらつきを平坦化する技術としては、ハイブリッド構成において平坦化が可能なことを示した¹⁴⁾。しかしながら、1つのコア内のWDM信号パワーを波長軸方向において平坦化することができないという問題もある。

今後、これらの問題を解決するイコライズ方法の開発が進むことが期待される。

5. スイッチとの連携による低省消費電力化技術

これまで、光アンプ単体での省電力化技術について記載した。また、光ノードの省電力化技術としては、ノード主構成要素であるWSSの小型・省電力化の検討²²⁾がなされており、それぞれの構成要素ごとの省電力化の検討が進んでいる。ここでは、さらに、光ノード内の光素子間での連携について考察する。具体的には3.2.2節で述べたように、利用コア数に応じて光アンプを制御することにより省電力化が図れることを示した^{16,19,20)}。つまり、利用コア数の変化に応じた光アンプの省電力化制御技術とWSSの制御を連動することにより、光ノード全体としての省電力制御の効果が高まることが期待される。例えば、WSSの制御により、MCFの特定のコアにトラフィックを集中させる、あるいは、すべてのコアに平均に分散させる等の制御と、ハイブリッドMC-EDFAのクラッド励起とコア励起の励起配分を連動させてノード全体の消費電力を削減する等の技術が考えられ、今後の技術検討が期待される。

6. 今後の展開

これまで、従来のSMF、これから大容量伝送で期待されるMCFにおける省電力化技術の方向性について記載した。特に、マルチコアにおいては、複数のコアを一括励起することが可能なクラッド励起の利用が光アンプの低消費化に大きく寄与しており、さらに、コア密度を高

める研究¹²⁾と連動することで、その効率も高まる。コア密度を上げたクラッドを一括で励起するには、これまでより高効率、高出力なMM-LDの実現が期待される。また、SMFの光アンプ省電力化制御として、励起光源の共有について述べた。この場合も、高効率かつ高い平坦性を持つSM-LDが期待される。

最後に、省電力な次世代光ノードには、これまでの光アンプ単体の制御だけではなく、WSS等他の構成要素と連動した制御が重要である。

謝 辞

本研究内容の一部国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究「空間多重フォトニックノード基盤技術の研究開発」プロジェクトの成果である。

参考文献

- 1) A. Turukhin, O. V. Sinkin, H. G. Batshon, H. Zhang, Y. Sun, M. Mazurczyk, C. R. Davidson, and J.-X. Cai: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2016)* (2016) Th4C.1.
- 2) A. H. Gnauck, P. J. Winzer, R. M. Jopson, and E. C. Burrows: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2016)* (2016) M.2.A.1.
- 3) 松本 恵一, 竹下 仁士, 柳町 成行, ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル: 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 (2017) B-10-19.
- 4) 松本 恵一, ル・タヤンディエ・ドゥ・ガボリ エマニュエル: 電子情報通信学会総合大会 (2018) B-10-20.
- 5) H. Takahashi, T. Tsuritani, E. L. T. de Gabory, T. Ito, W. R. Peng, K. Igarashi, K. Takeshima, Y. Kawaguchi, I. Morita, Y. Tsuchida, et al.: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2012)* (2012) Post deadline Th.3.C.3.
- 6) N. K. Fontaine, J. Antonio-Lopez, H. Chen, R. Ryf, D. T. Neilson, A. Schulzgen, J. C. Alvarado Zacarias, R.-J. J. Essiambre, H. Sakuma, T. Hasegawa, et al.: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2013)* (2013) Post deadline, Th5D.3.
- 7) P. M. Krummrich and K. Petermann: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2011)* (2011) OMH.5.
- 8) Y. Mimura, Y. Tsuchida, K. Maeda, R. Miyabe, K. Aiso, H. Matsuura, and R. Sugizaki: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2012)* (2012) Tu4.F.1
- 9) Y. Tsuchida, K. Maeda, K. Watanabe, T. Saito, S. Takasaka, M. Tadakuma, R. Sugizaki, H. Ogoshi, K. Doi, H. Matsuura, et al.: *Proc. IEEE Photonics Society Summer Topical* (2014) p. 148.
- 10) Y. Tsuchida, K. Maeda, K. Watanabe, K. Takeshima, T. Sasa, T. Saito, S. Takasaka, Y. Kawaguchi, T. Tsuritani, and R. Sugizaki: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2012)* (2012) M.2.A.2.
- 11) S. Takasaka, K. Maeda, K. Kawasaki, K. Yoshioka, H. Oshio, R. Sugizaki, Y. Kawaguchi, H. Takahashi, T. Tsuritani, and M. Shiino: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2017)* (2017) Th.2.D.3.
- 12) S. Jain, T. Mizuno, Y. Jung, J. Hayes, G. Bai, H. Ono, K. Shibahara, Q. Kang, M. Petrovich, A. Sano, et al.: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2016)* (2016) Post deadline Th.3.A.1.
- 13) H. Takeshita, K. Matsumoto, and E. L. T. de Gabory: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC 2018)* (2018) M3J.5.
- 14) 小野 浩孝, 山田 誠, 細川 宰, 市井 健太郎, 増田 浩次, 小林 壮一: 電子情報通信学会, 信学技報OCS2014-116 (2014) 111.
- 15) M. Yamada, H. Ono, T. Hosokawa, and K. Ichii: *Proc. Opto-Electronics and Communications Conference (OECC2016)* (2016) WC1-2.
- 16) E. L. T. de Gabory, S. Nakamura, S. Yanagimachi, and J. Abe: 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 (2017) B-10-48.
- 17) T. Matsui, T. Kobayashi, H. Kawahara, E. L. T. de Gabory, T. Nagashima, T. Nakanishi, S. Saitoh, Y. Amma, K. Maeda, S. Arai, et al.: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2017)* (2017) Post deadline 1.
- 18) E. L. T. de Gabory, K. Matsumoto, S. Fujita, S. Nakamura, S. Yanagimachi, and J. Abe: *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2017)* (2017) Th1C.1.
- 19) K. Matsumoto, S. Yanagimachi, and E. L. T. de Gabory: *Proc. Technical Committee on Extremely Advanced Optical Transmission Technologies (EXAT) Symposium* (2017) p. 20.
- 20) E. L. T. de Gabory, K. Matsumoto, S. Fujita, H. Takeshita, and S. Yanagimachi: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2017)* (2017) M.1.E.2.
- 21) Y. Jung, S. Alam, Y. Sasaki, and D. J. Richardson: *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC 2016)* (2016) W2B.4.
- 22) A. Sahara, H. Kawahara, S. Yamamoto, S. Kawai, M. Fukutoku, T. Mizuno, Y. Miyamoto, K. Suzuki, and K. Yamaguchi: *Opt. Express* **25** (2017) p. 4061.