

通信ネットワークの 到達距離の拡大に最適な光増幅器

ジョン・ザイスカインド、アテュール・スリヴァスタバ

波長分割多重光通信アーキテクチャの到達距離は、CバンドとLバンドのエルビウムドープファイバ増幅器(EDFA)、ハイブリッドラマン/EDFAシステム、新しい利得媒質材料および半導体光増幅器を使用して拡大を続けている。

過去15年間、光増幅器は高密度波長分割多重(DWDM)にもとづく光ファイバ通信ネットワークを可能にし、一般家庭から企業までの帯域幅ニーズを満足する重要な役割を果たしてきた。また、通信システムの到達距離の拡大と再構成可能光アド/ドロップ多重装置(ROADM)による波長ルーティングネットワークの両方を可能にしてきた。

ネットワークの継続的な費用低減と機能増強の必要性は、光増幅器の設計に進展をもたらした。現在、2つの大きな動向がメトロおよび長距離光ネットワークの発展を牽引している。第1の動向はシステム容量を到達距離の減少なしに拡大し、装置とファイバの費用を低減する。第2の動向はROADMによる光ネットワークを使用し、装置の利用率を高めて、激しく変化し急速に増大するトラフィック需要への対応を可能にする。

働き者のEDFA

1990年代のエルビウムドープファイバ増幅器(EDFA)の導入が、光増幅器/DWDMの技術革新を引き起こした。この増幅器を用いることでシステム容量は2桁も増加し、同時に、システム到達距離の拡大と高価な光・電気・光再生器の必要数の低減が可能になった。

EDFAはエルビウムドープコアの単一モードファイバを使用する。このフ

ァイバは適切なポンプ光(一般に980nm、場合によっては1480nmの半導体レーザー)を使用して、Cバンド(約1528~1565nm)の波長の光信号を増幅する。EDFAは適度のポンプパワー、高い出力パワー(一般に23dBmだが、ポンプパワーを高くすれば、より高い出力パワーも得られる)、量子限界に近い雑音性能、偏光無依存性、遅い利得動特性(DWDMチャンネル間の利得仲介クロストークなしの深い飽和の動作を可能にする)などの利点を得られる。

DWDMシステムで使用される標準のEDFAは、利得平坦化フィルタ、内部可変光減衰機(VOA)および自動利得制御を内蔵する多段アーキテクチャからなり、Cバンドの全域にわたる平坦利得スペクトルを広い利得範囲で得ることができる。さらに、分散補償モジュールを中段に配置する設計は、雑音への影響を最小に抑えながら、関連する損失を補償できる。

現在の1.2Wが得られるデュアルチップ980nm半導体レーザーポンプなどの高パワーポンプは、先端アーキテクチャDWDM増幅器を設計するための重要な手段になっている。システム到達距離の減少のない容量増加を支援するために、装置メーカーは40Gbit/sと100Gbit/sのチャンネル速度でのコヒーレント検出による偏光多重化直交位相シフトキーイング(PM-QPSK)伝送など

の新しい変調フォーマットを活用して、大容量チャンネルを実用化している。

符号速度が向上し、多値変調方式がさらに複雑になると、雑音の要件はより厳しくなる。さらに、これらの新しい変調方式に使用するコヒーレント受信機は光学非線形性の許容範囲が直接検出よりも狭くなり、受信機の光学雑音対雑音比(SNR)低下の原因となる信号パワーの低減が必要になる。その結果、システムの到達距離を維持し、付加的な光・電気・光再生器の付加コストを不要にするために、増幅器の雑音性能の改善が必要になる。

ハイブリッドラマン/EDFAシステム

希土類ドープファイバ増幅とは異なる分布型ラマン増幅は、どのようなファイバでもポンピングによって可能であり、ファイバ材料に固有の光学フォノンを利用して誘起され、雑音性能が顕著に改善される。分布型ラマン増幅には2つの重要な利点がある。第1に、分布型増幅は伝送用ファイバをポンピングすることで誘起され、その雑音性能は分散型EDFAに比べると5dBの改善になる。第2に、EDFAのような原子イオンの電子遷移ではないため、ポンプ波長を適切に選択すると、平坦で広帯域の利得スペクトルが得られ、スペクトル操作も可能になる。

ラマン利得(dBの対数尺度で測定する)は使用するポンプパワーにほぼ比例する。実用的な利得の生成に必要なポンプパワーはかなり高く、分散シフトのないファイバのCバンドの全域で

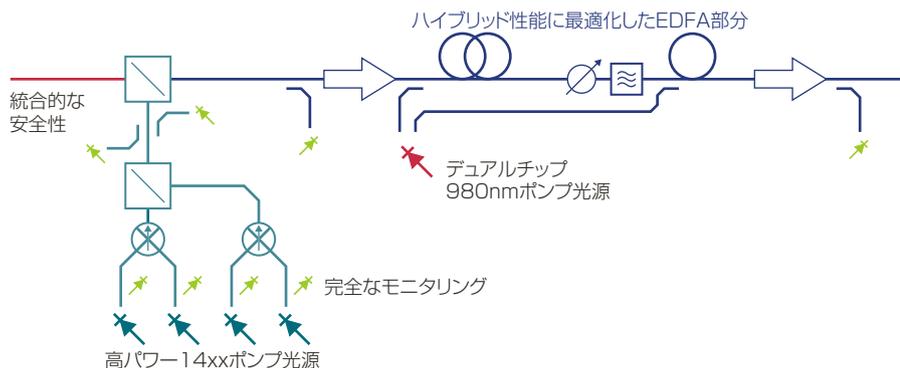


図1 ハイブリッドラマン/EDFAシステムは、組み合わせた高パワー14xxラマンポンプ半導体レーザー光ファイバに励振され、伝送信号とは反対方向に伝搬する。分布型ラマン前置増幅は雑音が低く、EDFAは高い利得と高い出力信号パワーが得られる。4ポンプ波長ラマンポンプ、可変光減衰器をもつ二段EDFAおよび二段間の利得平坦化フィルタを組み合わせて広い利得帯域の平坦化利得スペクトルを確保する。

かなり平坦な約10dBの利得を得るには、少なくとも2つのポンプ波長から合計約500mWのポンプパワーが必要になる。今日の高性能ラマン増幅器は波長の異なる4つのポンプモジュールを使用して、広帯域で平坦な利得スペクトルを生成する。残念なことに、高いポンプパワーの供給コストは、ラマン増幅を商用通信ネットワークに採用するときの障害であった。

ラマン利得は偏光依存性が高いため、ポンプの偏光解消手段を内蔵したポンピング方式が必要になる。初期のラマンポンプの場合、このことは2つのポンプ半導体レーザーのポンプ波長を偏光多重化することで実現されたが、現在はポンプ光の偏光解消が広く採用され、例えば、リオ偏光解消器が使われている⁽¹⁾。ラマン増幅は優れた雑音性能を確保できるが、得られる利得と信号出力パワーには制約がある。したがって、後方ポンプ分布型ラマン前置増幅器および利得と高出力パワーを付与するブースタEDFAからなるハイブリッド配置が広く採用されている(図1)。

高いポンプパワーは敷設されたファイバ内部に励振されるため、ラマン増幅は人体へのアイセーフ限界以上の露

光を防止する安全対策が必要になる。また、ラマン増幅器の性能は増幅ファイバの特性の影響を受ける。例えば、チャンネル監視装置や新しいファイバ診断装置を用いる監視制御方式は、安全対策と性能最適化の2つの用途を見出すと考えられる。

コヒーレント通信とROADM

コヒーレント通信方式は光増幅器に加えて、波長分散(CD)の電気的補償の大容量化を支援する。従来の高速データ伝送システムの場合、CDはそれぞれの中継器サイトに配置される分散補償モジュール(DCM)を使用して補償される。DCM損失の補償は、関係する光損失と非線形性による性能ペナルティを最小にするための、非常に複雑で高価な多段増幅器アーキテクチャが必要になる。インライン分散補償装置を必要としない新規システムにコヒーレント方式を採用する場合は、増幅器アーキテクチャを簡素化できるため、光増幅器の費用と性能改善が可能になる。

最近報告された雑音のほとんどない位相有感増幅器がDWDMシステム用に商品化されると、システムの雑音性能のさらなる改善への道が開かれる。

開発される増幅器をタンデムに使用すると、光増幅器の帯域が拡張されるため、DWDM容量の拡大が可能になる。このことはCバンドとLバンドのEDFAを組み合わせる広帯域幅ハイブリッドラマン/EDFAシステムなどの多重アーキテクチャの使用または広帯域幅増幅器利得媒質材料の導入により達成される。

光増幅器の高速制御はチャンネルのアド・ドロップ時に発生する増幅されるDWDMネットワーク増幅のパワー変動防止のために重要になる。光増幅器の動作速度の高速制御は、ROADMのスイッチング速度の高速化とともに、その必要性が増大している。光ネットワークのチャンネルのアドまたはドロップ速度は意図的に抑えて、過渡現象の発生を防ぐ場合が多い。一方で、ROADMはチャンネルパワーを調整する機能があり、増幅器の利得スペクトルの平坦化、とくにメトロネットワークのようなROADMの多い用途における平坦化の要求を緩和する。確かにROADMにもとづく光波長の経路選定は、チャンネル経路長を増加させており、超低雑音増幅技術が必要としている。

次世代のROADMは、ネットワーク費用を低減し、経路選定の柔軟性を増強するために、無色・無指向性・無競合(CDC)特性が必要になるだろう。CDC機能はROADMノードの送受信機にアド/ドロップポートを恒久接続し、送受信機を遠隔制御することで可能となる。この方式はすべての波長と方向の同調をアド/ドロップのツリー当たり一定のチャンネル数で再現しながら、波長の競合を回避できる。CDCノードを構成するために、20以上を想定した大きいポート数の波長選択スイッチ(WSS)が検討されている。さらに、ノードではアド/ドロップのツリー用のマルチポートスイッチも必要になる。費用対

効果のあるマルチポートスイッチの実現には損失補償のための小型増幅器と光増幅器アレイが必要になる(図2)。

半導体光増幅器

最近提案された低コスト WDM 受動型光ネットワーク (PON) アーキテクチャなどのアクセスネットワークでは、EDFA ばかりでなく、半導体光増幅器(SOA)も注目を集めている。SOA はシステムの伝送損失を補償し、分岐比または PON システムの到達距離を拡大できる。この応用の場合、SOA は温度無依存アレイ導波路スプリッタ (AWG) などの受動部品を内蔵し電力供給を必要としない遠隔ノード内に配置される。

WDM - PON の商業的な実現可能性は設備投資と運用費用が非常に低いことに依存する。したがって、顧客の家庭内に設置する光ネットワークユニット (ONU) はカラーレス送信機などの部品のさわめて低い費用と簡単な PON アーキテクチャが要求される。遠隔ノードの無電力化を実現するには、光ネットワーク端末の単一デバイスにおいて、上り回線信号の増幅と変調機能の組み合わせも可能な反射型 SOA (RSOA) の利用が非常に魅力的だ(図3)。最近、RSOA を利用する WDM-PON アーキテクチャは、10Gbit/s の信号速度と 100 km の到達距離が実証されている⁽²⁾。

光増幅器は DWDM 革命から生まれたため、能力の増強とアクセスネットワークから DWDM 長距離システムまでに使われるときの光通信コストの低減が継続的に不可欠となる。コヒーレント通信などの新しい応用の登場とともに、ROADM を用いる光ネットワークと WDM-PON は、より多くの光増幅器を必要とし、EDFA、分布型ラマン増幅器および SOA を含めたさまざまな小型形状要素部品の進歩と革新を牽引している。

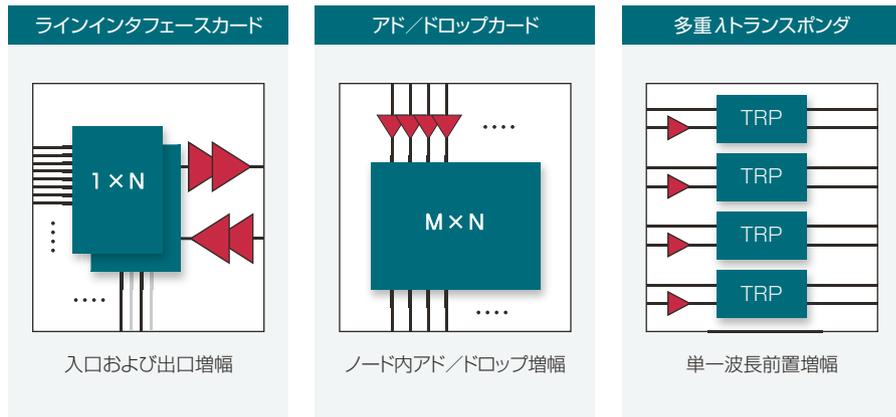


図2 ROADMノード用のアレイ増幅器は、リンク増幅(1×Nは波長選択スイッチ)の入口と出口、アド/ドロップカード(M×Nは光スイッチ)のノード内増幅、受信機の各チャンネル前置増幅などに使われる。

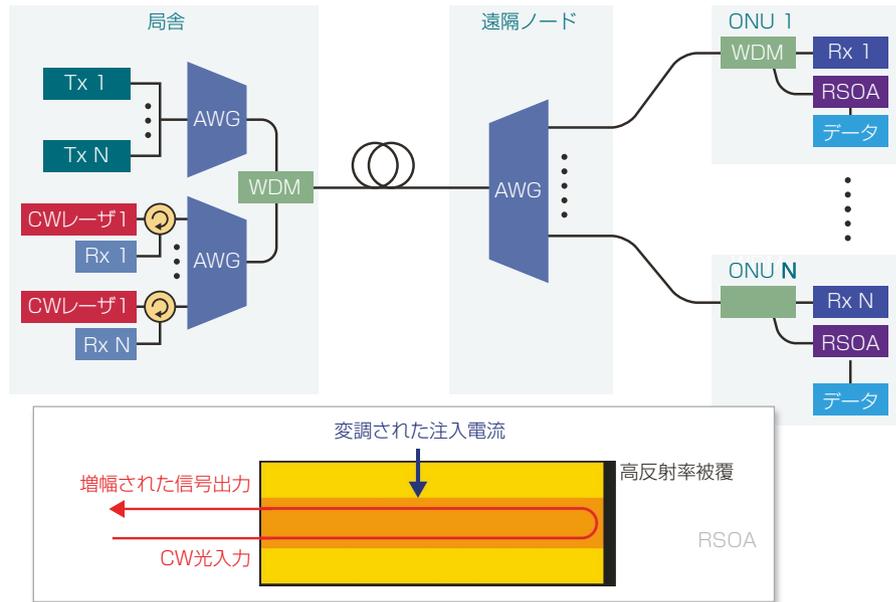


図3 反射型半導体光増幅器(RSOA)は活性利得媒質のチップからなり、その片端は高反射率(>95%)の被覆層をもつ。RSOAは増幅によるリンク損失割当量の増強ばかりでなく、注入電流変調を通して強度および位相変調信号を生成する上り回線信号変調器としても使用される。このアーキテクチャの場合、変調されない光信号は局舎の連続波光源から伝送され、RSOAの注入電流を変調して、ONUの上り回線信号を発生する。この上り回線信号の増幅はシステムの到達距離を拡大する。

参考文献

- (1) J.S. Wang et al., IEEE Photon. Technol. Lett., 11,11,1449-1451 (November 1999).
- (2) Y.C. Chung, "Recent Advancement in WDM PON Technology," Proc. 2011 European Conference on Optical Communications (ECOC), paper Th.11.C4, Geneva, Switzerland (2011).
- (3) J. Zyskind and A. Srivastava, Optically Amplified WDM Networks, Academic Press, Amsterdam, the Netherlands (2011).

著者紹介

ジョン・ザイスカインド (John Zyskind) は米オクラロ社 (Oclaro, e-mail: john.zyskind@oclaro.com URL: www.oclaro.com) のシステムエンジニア部長。アテュール・スリヴァスタバ (Atul Srivastava) は米NELアメリカ社 (NEL America, Inc., e-mail: srivastava@nel-america.com URL: http://nel-america.com) の最高技術責任者。