

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420342

研究課題名(和文)次世代波長多重光受動ネットワークにおける光終端装置のカラーレス化に関する研究

研究課題名(英文)A study on color-less optical network unit for next generation WDM-PON

研究代表者

前田 譲治 (Maeda, Joji)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：10256670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：WDM-PONシステムにおいては、波長無依存に動作するカラーレス加入者終端装置の開発が望まれている。半導体光増幅器(SOA)の飽和を用いた下流再変調方式が提案されているが、SOAのキャリア寿命によって数ギガビット毎秒までの動作に限られていた。本研究では、この方式を10ギガビット毎秒以上のシステムに対応できるよう、速い信号変調成分をファブリペロエタロンによって光学的に除去する手法を提案・検討し、双方向伝送の模擬実験に成功した。また、実用化の際に不可欠なエタロンの自動同調方式を提案し、その基本動作を実験によって示した。

研究成果の概要(英文)：Color-less optical network units that operate at an arbitrary wavelength are anticipated in WDM-PON systems. Downstream re-modulation schemes using gain saturation of semiconductor optical amplifiers (SOAs) have been demonstrated so far, though available bit rates are limited below several gigabits per second due to slow carrier life time of SOAs. The researcher studied an SOA-based downstream re-modulation scheme available for beyond-10 gigabits per second systems assisted by a Fabry-Perot etalon that cuts off high frequency components of modulation sidebands. Experiments of bi-directional transmission were successfully demonstrated. The researcher also proposed a scheme of automatic tuning of the etalon, and experimentally demonstrated its basic operation.

研究分野：光通信システム

キーワード：光アクセスシステム 半導体光増幅器 波長多重 下流再変調 WDM-PON

1. 研究開始当初の背景

我が国では、光ファイバによる高品質な大容量アクセスシステムが広く普及している。スマートフォンの無線 LAN を通じたインターネット接続が家庭に普及するなど、光アクセスシステムの利用は多面的に展開しつつある。

光アクセスシステムのうち、受動光ネットワーク(PON)では、局側光回線終端装置(OLT)からのファイバ出線一本(き線ファイバ)に対して複数の加入者を収容している。

現在の PON では、時分割多重(TDM)を用いて複数の加入者を収容する TDM-PON が主流である。時分割多重方式は、信号の分岐が容易である、ONU からの上り信号用の光源に対する要求が厳しくないなど、コストの面で優れている。しかし、接続された全ての加入者が、ファイバ上の信号の全てを共有することから、一加入者当たりの伝送容量が制限されてしまう。

これに対し、加入者ごとに異なる波長を割り当て、波長分割カプラ等によって分配する波長多重 PON(WDM-PON: 図1)では、他の加入者の信号は波長によって分離される。このため、き線ファイバは一本であっても、仮想的に OLT と ONU が 1 対 1 に接続されることになる。次世代の PON 規格である NG-PON2 では、WDM 技術と TDM 技術を併用した TWDM-PON が採用されており、活発な研究開発が行われている。

WDM-PON の問題として、加入者からの上り信号の光源をどのように用意するかが挙げられる。加入者ごとに異なる波長の光源を用意することは、コストの面から困難である。このため、ONU を使用波長に依存しないように設計する「カラーレス化」が課題とされる。すでに一部実用化されている技術に、反射型半導体光増幅器(RSOA)の飽和特性を用いて下り信号の変調成分を抑圧し、これを上りデータで変調する「下流再変調方式」がある。この方式を用いれば、下り信号に用いた光を

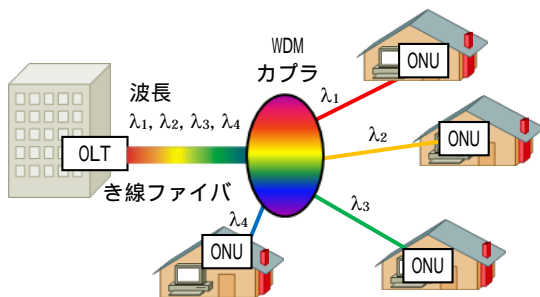


図1: 波長多重光受動ネットワーク(WDM-PON)の概念図。OLT: 局側光回線終端装置、ONU: 加入者光回線終端装置、WDM カプラ: 波長分離・多重カプラ。

再利用するため、ONU で独自の光源を用意する必要がなくなる。

しかし、RSOA の飽和特性を用いた手法が適用できるのは、数 Gbps 以下の伝送速度のシステムに限られる。これは、RSOA の飽和が数百ピコ秒程度の応答時間を有し、数 GHz 以上の周波数成分に対しては透過する性質を持つためである。

10Gbps 級の PON に適用可能な下流再変調方式としては、下り信号を逆変調する方式が提案されている。この方式では、再変調の際に受信信号をアナログ的に重畳し、変調成分を消去している。しかしこの手法では、受信側の電気回路が生じる波形劣化を等化する回路が必要になる、電気駆動ドライバの直線性が要求されるなど、変調器の駆動系が複雑になるという欠点がある。

2. 研究の目的

本研究では、半導体光増幅器(SOA)の飽和を用いた下流再変調方式を 10Gbps 以上のシステムに適用するサブシステムを研究した。具体的には、SOA の前段で速い信号変調成分を光学的に除去することにより、広帯域な変調信号抑圧を可能とする。本研究では、このサブシステムの基本動作を確認し、実用上の問題点を明らかにした。

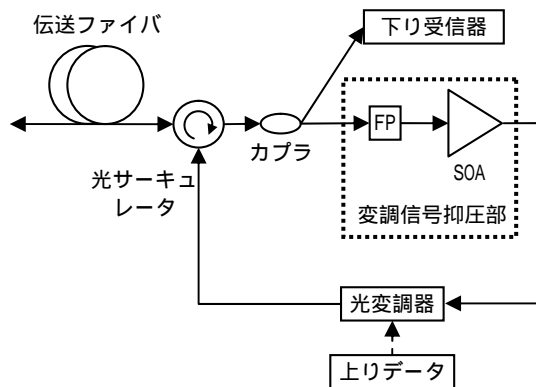


図2: 提案する下流再変調方式 ONU。EDFA: エルビウム添加ファイバ増幅器、SOA: 半導体光増幅器、FP: ファブリペロエタロン。

図2に、提案するシステムの構成を示す。下りおよび上りの光信号は、光サーキュレータを介して伝送ファイバと結合される。下り信号はカプラによって分岐され、一方は受信器に、他方は再変調のための変調信号抑圧部に導かれる。変調信号抑圧部は、ファブリペロエタロンによる高周波成分除去段と、SOA の飽和による変調信号抑圧段で構成される。ただし、SOA の飽和が生じるのに十分な光パワーが得られない場合は、SOA の前段に前置増幅器を設置する。

3. 研究の方法

半導体光増幅器 (SOA) の利得飽和を用いた変調成分抑圧の原理を、シミュレーションと実験の両面から明らかにする。また、ファブリペロエタロンによって高周波変調成分を除去し、広帯域な信号抑圧を可能にするシステムを構築する。疑似ランダム信号を用いた再変調の実験と、実用化に向けた要素技術の検討を行う。

(1) SOA による変調成分抑圧の理論検討

飽和領域における SOA の動作解析に必要な SOA のパラメータ、飽和強度とキャリア寿命の値を抽出する。具体的には、SOA の利得飽和特性から飽和強度を求め、この結果と周波数応答特性からキャリア寿命を推定する。

キャリア寿命の推定方法は以下の通りである。単一周波数で強度変調された光入力に対する応答を、レート方程式を用いて解析する。変調周波数を変化させて周波数応答特性を得る。この解析を、キャリア寿命を変化させて繰り返し、実験で得られた特性と最もよく合致するものを選んで、キャリア寿命とする。

強度変調抑圧と直接には関係しないが、線幅増大係数の抽出も試みる。利得飽和状態の SOA にキャリア寿命よりも速く変化する信号を入射した場合、出力光のスペクトルは非対称になることが知られている。そこで、この非対称性を観測することで、線幅増大係数の同定を試みた。

(2) 疑似ランダム変調信号抑圧の実証と双方向伝送実験

NRZ 疑似ランダムビット列で強度変調された光信号を変調信号抑圧部に入射し、変調成分の抑圧特性を調べた。また、得られた知見を用いて、双方向伝送の模擬実験を行った。データレートは 10GPON を想定して約 10Gbps とした。

(3) 実用化に向けたエタロン自動同調システム究の検討

エタロンの透過周波数は、使用する石英ガラス基板の厚みがバラつくことにより個体差が生じる。そこで、ファブリペロエタロンの透過域を下り信号の波長に合わせる技術を検討した。

4. 研究成果

(1) SOA による変調成分抑圧の理論検討

図 3 に、単一周波数で強度変調された光信号を SOA に入射した時に得られる変調成分抑圧

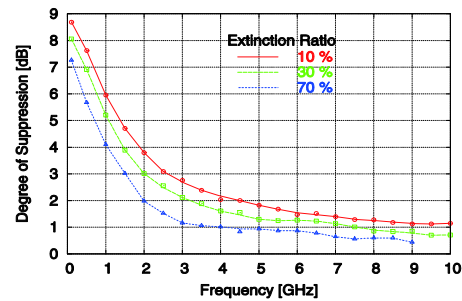


図 3: SOA (破線) エタロン (実線) 両者の縦続接続 (点線) による強度変調成分抑圧の周波数特性。

の周波数特性を示す。ここで、入力信号の変調度を 10%、50%、70% として実験を行った。SOA への入射光パワーは 0dBm とした。本図から、変調が深いほど抑圧度が低下することが分かる。

以上の実験結果と解析結果をフィッティングすることにより、キャリア寿命の抽出を行ったところ、およそ 200ps 程度であると見積もられた。この値は通常の SOA に一般的な値であり、妥当であると判断される。ただし、変調の深さによって、推定されるキャリア寿命の値は異なり、変調が深いほど短くなる傾向がみられた。また、変調が深いほど、モデルとの乖離が大きくなることも分かった。

出力スペクトルの非対称性から線幅増大係数を推定する実験でも、変調の深さに応じて 4~10 程度の間で変化することが分かった。この値も、SOA に一般的な値ではあるものの、入力に依存してしまう問題が生じた。

このことは、解析に用いたモデルを、より深い変調の場合にも適用できるものに変更する必要を示唆する。

(2) 疑似ランダム変調信号抑圧の実証と双方向伝送実験

疑似ランダムビット列 (PRBS) を用いる実験に先立ち、単一周波数で強度変調された光信号を、SOA、ファブリペロエタロン、およ

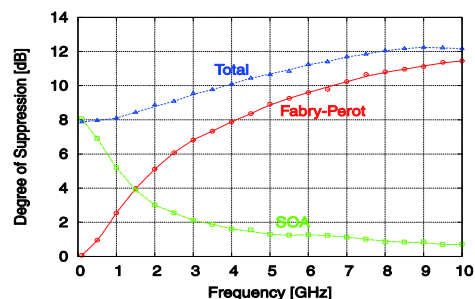


図 4: SOA (破線) エタロン (実線) 両者の縦続接続 (点線) による強度変調成分抑圧の周波数特性。

び両者の縦続接続にそれぞれ入射した時に得られる変調成分抑圧の周波数特性を調べた。図4にその結果を示す。ここで、用いたエタロンの透過帯域の半値幅は約1.3GHz、自由スペクトル間隔は約50GHzである。入射した光の変調度を50%、SOAへの入射光パワーを0dBmとした。

本図より、広い帯域に渡って8dB以上の抑圧が可能であることが分かる。

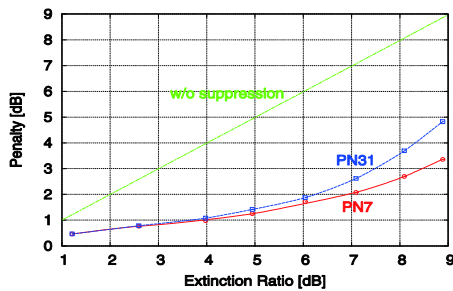


図5: SOA とエタロンの縦続接続によるNRZ-PRBS信号の抑圧特性。入射信号の消光比に対する出力信号のペナルティ。

このデバイスに、NRZのPRBS信号によって強度変調を施した光信号を入射して信号抑圧の実験を行った。図5に、入射信号の消光比に対する出力におけるペナルティを示す。ここで一点鎖線は抑圧デバイスを用いない場合、実線はPN7段、破線はPN31段に対する結果である。

この結果、デバイスを用いない場合に比べ、PN7段の場合最大で5.3dB、PN31段の場合最大で4.5dBのペナルティの低減を得た。

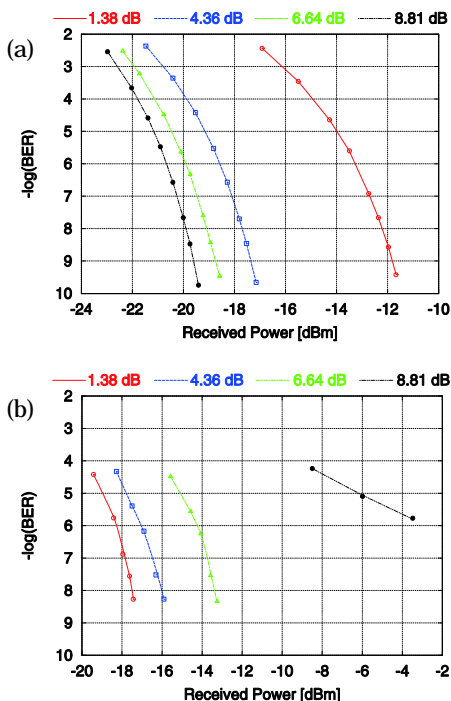


図6: 受光パワーに対するビット誤り率。(a): 下り信号、(b): 上り信号。

抑圧された信号に再度、PRBSによって強度変調を施し、これを上り信号に擬して、下り・上り両信号の符号誤り率を測定した。

図6は、受光パワーに対する符号誤り率特性である。パラメータは下り信号の消光比である。下り信号の消光比が大きいほど、下り信号の符号誤り率特性が改善されるが、上り信号の誤り率特性は劣化する。これにより、下り信号の消光比に関して、下り・上り信号のシステム特性がトレードオフの関係にあることが確認された。なお、下り信号のペナルティは、消光比とほぼ対応しているが、上り信号のペナルティは抑圧度から予想されるペナルティよりも大きくなっている。この原因については究明中である。

(3) エタロン同調システムの検討

自由スペクトル間隔約50GHz、透過帯域幅約4GHzのソリッドエタロンに温度調整機能を設けたモジュールを用い、温度制御によってその透過帯域の一つを信号光波長に同調させるシステムを構築した。モジュールの透過波長を実測したところ、制御可能な範囲において自由スペクトル間隔以上の変化を得ることができた。このことから、動作保証範囲内におけるすべての波長に同調可能であることが示された。また、山登り法を用いた同調アルゴリズムを実装し、その基本動作を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

泉澤拓弥・池田吉輝・大森雄人・前田讓治, “半導体光増幅器の利得飽和を用いた下流再変調方式WDM-PONの高速化に関する検討～ファブリペロエタロンによる帯域制限とその同調について～” 電子情報通信学会技術研究報告(刊行予定) 査読無

Masanobu Miyauchi, Kohei Kimura, Yasuhiro Tsutsumi and Joji Maeda, “Compensation of Modulation Distortion in Microwave Radio-Over-Fiber Systems Using Chromatic Dispersion,” Technical Digest of IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, pp. 1-4, Oct. 2015.

査読有
DOI: 10.1109/MWP.2015.7356657

大森雄人・栗田卓・堤康宏・前田讓治, “半導体光増幅器の利得飽和を用いた下流再変調方式WDM-PONの広帯域化に関する実験的検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 93, pp. 5-9, Jun. 2015.

査読無

Joji Maeda, Kohei Kimura, and Satoshi Ebisawa, "Experimental Study on Variation of Signal Amplitude in Radio-Over-Fiber Transmission Induced by Harmonics of Modulation Sidebands Through Fiber Dispersion," J. Lightwave Technol., vol. 32, no.20, pp. 3536-3544, Oct. 2014.
査読有
DOI: 10.1109/JLT.2014.2330612

Joji Maeda and Satoshi Ebisawa, "SPM-GVD effect on radio-over-fiber transmission using OSSB+C signals," J. Opt. Soc. Am. B, vol. 31, no. 7, pp. 1443-1450, Jul. 2014.
査読有
DOI: 10.1364/JOSAB.31.001443

〔学会発表〕(計4件)

泉澤拓弥・池田吉輝・大森雄人・前田譲治, "半導体光増幅器の利得飽和を用いた下流再変調方式 WDM-PON の高速化に関する検討 ~ ファブリペロエタロンによる帯域制限とその同調について ~" 電子情報通信学会光通信システム研究会、北海道大学、北海道札幌市 2016/6/23 (発表予定)

Masanobu Miyachi, Kohei Kimura, Yasuhiro Tsutsumi and Joji Maeda, "Compensation of Modulation Distortion in Microwave Radio-Over-Fiber Systems Using Chromatic Dispersion, IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, Annabelle Hotel, Paphos, Cyprus, 2015/10/27.

大森雄人・栗田卓・堤康宏・前田譲治, "半導体光増幅器の利得飽和を用いた下流再変調方式 WDM-PON の広帯域化に関する実験的検討," 電子情報通信学会光通信システム研究会 OCS2015-11、福井市地域交流プラザ、福井県福井市 2015/6/18.

木元圭介・有田龍太郎・堤康宏・前田譲治, "下流再変調方式 WDM-PON における半導体光増幅器の動作特性解析," 電子情報通信学会 2015 年総合大会 B-10-66, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス、滋賀県草津市 2015/03/12.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 譲治 (MAEDA, Joji)
東京理科大学・理工学部・教授
研究者番号: 10256670

(3) 連携研究者

福地 裕 (FUKUCHI, Yutaka)
東京理科大学・工学部・准教授

研究者番号: 70366433

海老澤 賢史 (EBISAWA, Satoshi)
新潟工科大学・工学部・助教
研究者番号: 50386596