

超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発 (課題 I (a) 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術)

Research and Development for ultra high speed/low power consumption optical network technology (Task I(a) Technology for multi-forking, long-reach subscriber networks)

研究代表者

木村 俊二 日本電信電話株式会社 デバイスイノベーションセンタ
Shunji Kimura NTT Device Innovation Center, NTT Corp.

研究分担者

坂本 健[†] 吉田 智暁[†] 浅香 航太[†] 藤原 正満[†] 木村 康隆[†] 金子 慎[†] 氏川 裕隆[†] 酒井 慈仁[†]
田口 勝久[†] 王 寛[†] 胡間 遼[†] 向島 俊明^{††} 鹿嶋 正幸^{††} 鈴木 祥也^{††} 古沢 聡^{††} 藤田 典一^{††}
玉井 秀明^{†††} 岩村 英志^{†††} 更科 昌弘^{†††}

Takeshi Sakamoto[†] Tomoaki Yoshida[†] Kota Asaka[†] Masamichi Fujiwara[†] Yasutaka Kimura[†]
Shin Kaneko[†] Hiroataka Ujikawa[†] Yoshihito Sakai[†] Katsuhisa Taguchi[†] Hiroshi Ou[†]
Ryo Koma[†] Toshiaki Mukojima^{††} Masayuki Kashima Akiya Suzuki^{††} Satoshi Furusawa^{††}
Yoshikazu Fujita^{††} Hideaki Tamai^{†††} Hideyuki Iwamura^{†††} Masahiro Sarashina^{†††}

[†]日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所

^{††}沖電気工業株式会社 通信システム事業本部 ^{†††}沖電気工業株式会社 研究開発センタ

[†]NTT Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corp.

^{††}Telecom Systems Business Division, Oki Electric Industry Co. Ltd.

^{†††}Corporate Research & Development Center, Oki Electric Industry Co. Ltd.

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

概要

本研究課題では、収容可能ユーザ数 512 以上を有し、総伝送距離 40 km 以上、局内装置の消費電力 30%以上削減（対 10 Gbps 級装置比）の 40 Gbps 級超高速・低消費電力光アクセスネットワークシステムを実証することを目標とし、平成 24 年度から平成 26 年度までの研究期間において各要素技術の研究開発に取り組んだ。本稿では、研究開発の目的や背景、各要素技術の成果および今後の展開について報告する。

1. まえがき

我が国のインターネット通信量は大幅な伸びを続けており、今後も大幅な増加が予想されている。同時に、これまでの通信機器を単純に高速化した場合、伝送する情報量の増加に比例して通信機器の消費電力も大幅に増加することとなる。そのため、大量の情報を高速かつ低消費電力で伝送できる通信方式や通信機器が求められている。また、災害時等におけるネットワークの途絶といった通信環境の激変に対しても、必要な通信を維持できるネットワークの構築が必要である。これらの課題を解消するため、伝送方式の高性能化等により、ネットワーク全体の超高速化、低消費電力化、耐災害性の強化を同時に実現する技術確立し、国民生活の利便向上と地球温暖化対策に貢献することを目的とした。

その中で本研究開発は、アクセスネットワーク（加入者・局舎ネットワーク）高速大容量化・低消費電力化における加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術の研究開発を行う。加入者ネットワークにおける収容局に収容する加入者数の 16 倍（512 ユーザ）以上の拡大、また、伝送距離の 2 倍（40 km）以上の拡張により 40Gbps 級の高速大容量化を実現する技術の確立を目指す。これにより、収容局に大規模障害が起きた場合でも他局の設備で代替できるため、大規模災害時においてもネットワークの迅速な復旧が可能となり、耐災害性向上が期待される。また、多分岐長延化によって収容エリアを広域化すれば、装置を配置

する局数を減らすことが可能になる。これによりネットワーク全体としての消費電力量を現状よりも 3 割以上の削減が期待される。そのため、局内装置の消費電力 30%以上削減（対 10 Gbps 級装置比）を目標とした。

これらの目標を実現するためにまず、システム全体を各小課題に分解し、各課題の検討を進めた後に、各装置を連携させ最終的な総合検証を行うとした。システム全体図と各小課題を図 1 に示す。

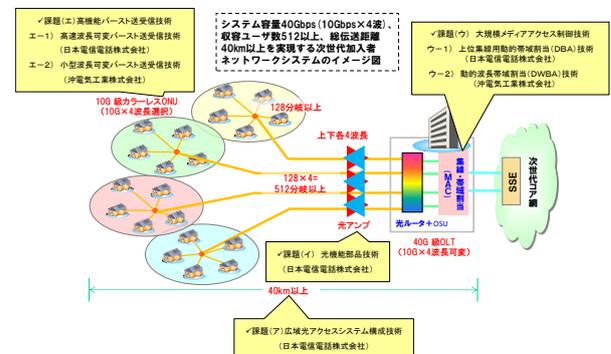


図 1 加入者ネットワーク多分岐化・長延化技術の構成

2. 研究開発内容及び成果

課題ア) 広域光アクセスシステム構成技術

課題アにおいては、長延化・多分岐化に有利な光増幅器の導入も含めた伝送システム構成及び基本仕様を明確化する。既存網との親和性や標準化議論状況を勘案し、パワースプリッタを用いた上り下り 10 Gbps の光信号を 4 波長多重した WDM/TDM-PON (Wavelength Division Multiplexing/Time Division Multiplexing-Passive Optical Network) システムをターゲットにし、目標パワーバジェットを 31 dB (光アンプ 20 dB 増幅目標) と策定した。また、収容ユーザ数を拡大する観点から、上位集線動的帯域割当 (DBA) 技術の検討を行った。上位ネットワークの出力レートを保持して、上位集線部のバッファ量を低減する方法として、PON 区間のみで使用するオーバーヘッドとユーザデータの伝送時間を重畳する手法を検討した。さらに、上位集線 DBA の実装に必要な計算能力等を洗い出し、測定項目の精査を行う等、課題ウにおける試作ボードの仕様を明確化した。WDM/TDM-PON システムでは、加入者側装置 (ONU) は、送受信波長を変更することにより、運用中に、論理接続する OLT 内終端装置 (OSU) を変更できる。この動的波長運用においては、ONU が収容局側装置 (OLT) からの指示に従って送受信波長を変更する「波長変更プロトコル」と、OLT がトラフィック状況等に応じて各 ONU へ割り当てる波長と帯域を決定する「動的波長帯域割当 (DWBA) アルゴリズム」が必要となる。図 2 に、考案した波長変更プロトコルを示す。波長帯域割当、設定プロトコルは ITU における国際標準化会合においてベースラインとして提案し、審議および改善を経て G.989.3 および G.9802 に採択された。また、試作システムの構成をベースに、将来商用レベルの部品構成を想定して各構成品の消費電力を算出し、20 km 半径の 4 エリアで均一に分布するユーザを 10G-EPON システムで収容した場合と、40 km に長延化した最大 512 のユーザを収容する WDM/TDM-PON システムで収容した場合の消費電力を算出し比較した。その結果、集約効果による局内装置の消費電力を最大 39% 減、さらに、OSU 省電力動作による削減効果 15% 減を考慮すると局内装置は 49% の電力削減効果が期待できることが分かった。また、スリープ機能を実装した ONU による削減効果 30% も含めるとアクセスネットワーク全体の電力 35% 減を達成する見込みであることを明らかにした (アクセスネットワークの消費電力配分を ONU 75%、局内装置 25% とした場合)。

課題イ) 光機能部品技術

PON では、スプリッタまでの距離が異なる加入者が混在して収容されるため、中継光増幅器には大きなレベル偏差を有する上りバースト光信号が入力される。特に、スプリッタまでの距離が近い加入者の光信号が入力されると、増幅過程における信号歪みや、過大増幅による受信器の過負荷を引き起こす。したがって PON に適用するには、光増幅器へ入力可能な光レベル範囲拡大する必要がある (広入力ダイナミックレンジ化)。NICT の旧委託研究 (平成 22~24 年度)、「課題番号 139: 広域加入者系光ネットワーク技術に関する研究開発」では、10G-EPON の上りバースト光信号を、広入力ダイナミックレンジに増幅することが可能なバースト対応光増幅器の研究開発を行ってきた。本研究課題では、WDM/TDM-PON システムを対象として、更なる装置の小型経済化を成し得ると同時に、上記の目標を達成することのできるバースト対応光増幅器の開発を目指す。なお、PON の上りバースト信号に対応した信号増幅を行うためには、入力バースト信号毎に出力

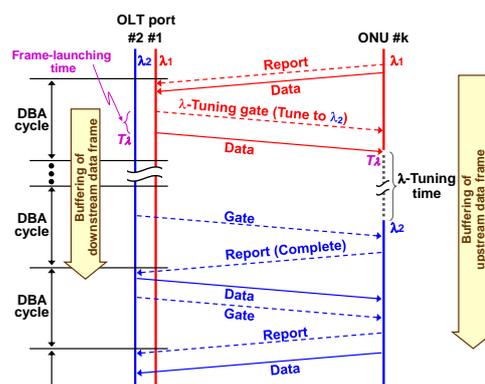


図 2 ONU 送受信波長の波長変更プロトコル

光レベル制御を行う必要があるため、WDM/TDM-PON における複数波長の上りバースト信号を一括して増幅することは困難である。従って、下り連続信号は複数波長を一括して増幅する一方、上り信号は波長ごとに個別増幅する中継器構成を用いる。

平成 24 年度は、光増幅器を所外中継器として用いる場合を想定し (図 3 参照)、光増幅器の出力光レベルを入力光レベルに応じて高速に変化させることにより、広入力ダイナミックレンジ化を実現するフィードフォワード制御方式を提案した。図 4 に、高速自動レベル制御 (ALC) 回路を具備した光増幅器の構成を示す。図 4 (a) は、NICT 旧委託研究において採用した構成である。高出力化を図るため、半導体光増幅器 (SOA) を 2 段接続した構成である。また、高速 ALC 機能は、可変減衰器 (VOA) の減衰量をバースト信号ごとに高速駆動することにより実現する。本 ALC 回路により、入力光信号レベルに係わらず、VOA 出力光レベルを一定値に制御し、後段 SOA における波形歪みの発生を防ぐ。一方、図 4 (b) は、本研究課題で提案する光増幅器の構成である。高出力化を図るため、図 4 (a) と同様、SOA を 2 段接続するが、装置の小型化・経済化を狙いとし、VOA を用いず、増幅媒体である SOA の駆動電流を変化させることにより ALC 機能を実現する。広入力光レンジに対する出力光レベルの平坦化を図るため、両 SOA の駆動電流を制御することにより、パターン効果による波形歪みの影響を緩和する効果を同時に達成することができる。本提案構成による上り光増幅器を試作し、実験により 19.0 dB の広入力ダイナミックを達成可能であることを確認した。

平成 25 年度は、光増幅器への電源供給の容易化を目的とし、提案制御方式を拡張し、所内中継への適用を図った (図 3 参照)。所内中継器として使用する場合、光増幅器に入力される光レベルが低減し、光増幅器が放出する自然放光 (ASE) 雑音の影響が相対的に大きくなると同時に、収容局内のスプリッタにおける ASE 雑音の合流により (図 3 参照)、上り信号の性能劣化が大きく劣化する。この影響を緩和するため、光増幅器に信号が入力されない時間に放出される ASE 雑音を遮断する機能を制御機構に追加した。これにより、収容局内のスプリッタにおける ASE 雑音の合流を回避し、上り信号の性能劣化を防ぐ。本機能を組み込むと同時に、小型化を目指した装置試作を行った。図 5 に、小型化した試作装置の外観を示す。本試作装置を用いた実験により、20 dB 以上の ASE 雑音の遮断特性が得られ、また ASE 雑音の合流による上り信号の性能劣化が生

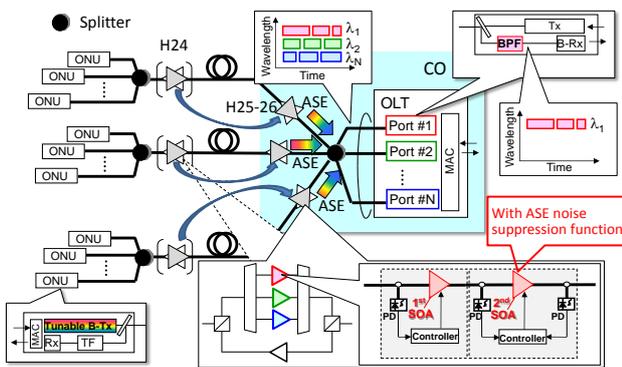


図 3 中継光増幅器の配置.

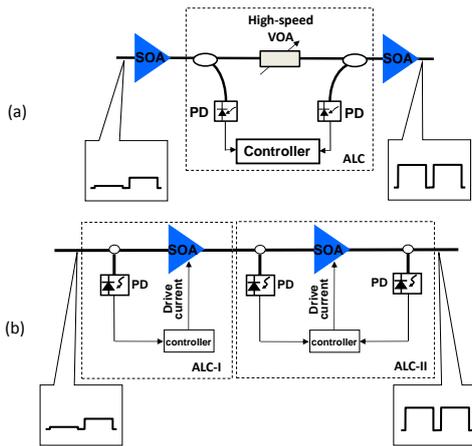


図 4 上り光増幅器の構成. (a) NICT の旧委託研究で採用した構成. (b)本研究課題における構成

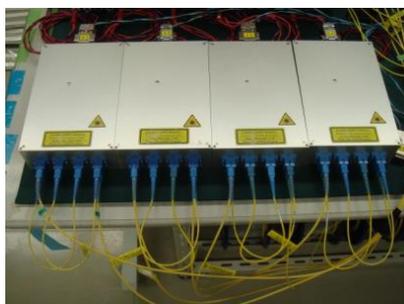


図 5 上り光増幅器の試作装置

しないことを確認した。

H26 年度は、フィールドトライアルに先駆けて、全 4 波長分の試作装置を、各々、課題ウの最終成果物、課題エの成果物により構成される伝送装置(OLT,ONU)と接続した、実験室環境下におけるシステム動作検証を行い、所外中継、所内中継ともに、40 km、512 分岐が達成し得ることを確認した。

課題ウ) 大規模メディアアクセス制御技術

課題ウー 1) 上位集線用 DBA 技術

本課題では、収容ユーザ数を拡大しつつ、上位集線部におけるバッファ量を削減する観点から、従来の PON 分岐毎の動的帯域割当 (DBA) を、複数 OSU 間で連携する上位集線 DBA を検討した。上位集線 DBA の検討では、上位ネットワークでの出力レートを保持した上でのバッファ量削減を目指した。更に、検討した上位集線 DBA の動作

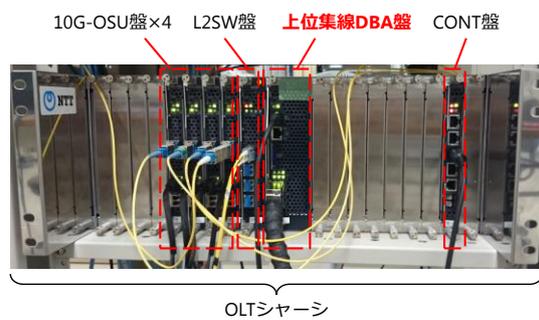


図 6 上位集線 DBA 装置

を確認するために、上位集線 DBA 装置を開発した。上位集線 DBA 装置は、CONT 盤、上位集線 DBA 盤、L2SW 盤、OSU 盤からなる OLT と 16 台の ONU で構成した(図 6)。

上位集線 DBA 装置には、上位集線 DBA として (i) 上位集線 DBA 盤が一括して全 ONU に割当する一括 DBA 方式、(ii) 上位集線 DBA 盤が OSU に割当し、割当された範囲内で各 OSU が ONU に割当する連携 DBA 方式の 2 方式に加えて、比較のための (iii) 他の OSU とは独立に各 OSU が ONU に割当する従来 DBA 方式の 3 方式を実装した。

まず、上位集線 DBA のバッファ削減効果を評価するため、フレームバッファ最大蓄積量を 16 ONU 接続構成で測定し、(i) 一括 DBA 方式と (ii) 連携 DBA 方式のいずれでも、(iii) 従来方式に対してバッファ削減効果が同等であることを明らかにした(図 7)。ここで、従来 DBA 方式のフレームバッファ最大蓄積量は、上位集線 DBA 装置のバッファ容量が不足するため、フレーム導通量及びフレーム廃棄量から算出した。

次に、上位集線 DBA では、PON 区間のみで使用するオーバーヘッドの分、集線後の上位ネットワークでの出力レートが低下する。オーバーヘッドは、MPCP (Multi Point Control Protocol) のための Report と、バースト受信のための BOH (Burst Overhead) がある。レート低下への影響は、ONU が少ないうちは BOH が主であるが、ONU 増加につれて MPCP の Report も無視できなくなる。上位ネットワークでの出力レートを保持するため、これらのオーバーヘッドとユーザデータの伝送時間を重畳する(図 8)、3 つの重畳手法(MPCP 重畳、BOH 重畳、及び両者の組み合わせ(MPCP + BOH 重畳))を、それぞれ (i) 一括 DBA 方式に追加実装して評価した。フレームバッファ最大蓄積量は図 7 に示すように、3 手法とも従来 DBA 方式の 1/10 以下であり、ASIC 化の際に ASIC 内蔵が期待できるバッファ容量である。出力レートは図 9 に示すように、ONU 512 台接続を模擬した系でも、MPCP + BOH 重畳で 9.9 Gbps 超であり、従来 DBA 方式と同等である。ここで、従来 DBA 方式の実測値は、上位集線 DBA 装置のバッファ容量不足により、出力レートが低くなっているため、本来想定される従来 DBA 方式の出力レートと比較した。このようにして、ONU 接続台数に依らず、上位ネットワークでの出力レートを保持した約 100% の帯域利用効率で、当初の目標であるバッファ容量 1/10 を実現する MPCP+BOH 重畳手法を適用した上位集線 DBA が最適であることを明らかにした。

以上示したように、上位集線 DBA では、上位ネットワークでの出力レートを保持した上で、バッファ容量を 1/10 とすることに成功した。バッファ長を 1/10 以下とすることで、外付けバッファを不要とし、バッファ消費電力 1/100 以下が期待できる。

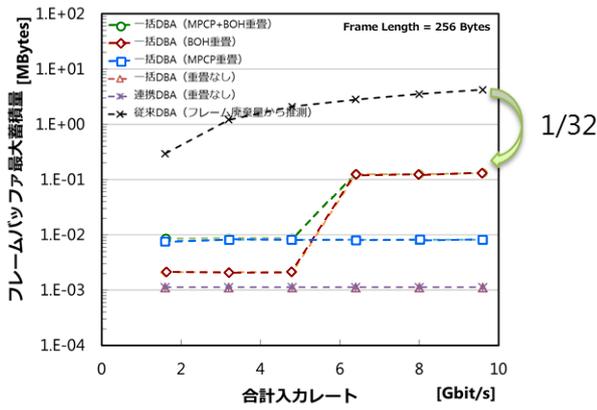


図7 バッファ蓄積量

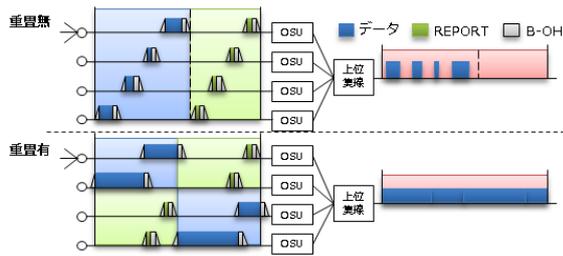


図8 重畳方式の模式図

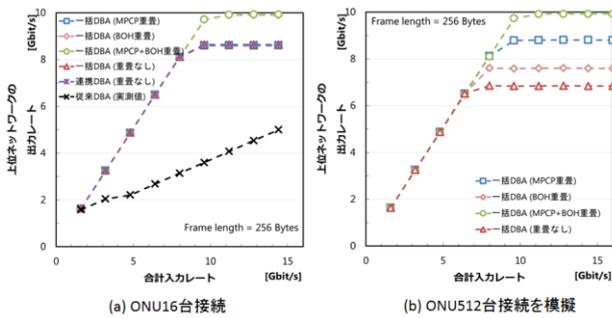


図9 帯域利用効率特性

課題ウー2) DWBA 技術

(1) DWBA 技術開発のため、WDM/TDM-PON MAC (Media Access Control) ボードの開発を実施した。図10(a)に ONU-MAC ボードの機能図と写真、図10(b)に ONU-MAC ボードの機能図と写真を示す。

(2) 波長掃引ディスカバリ方式

WDM/TDM-PON システムでは、Discovery 時、ONU が送受信波長を周期的に変更 (波長スイープ) し、Discovery Gate を受信できた波長にて Discovery シーケンスを行う方式を開発した。ONU はどの波長の Discovery Gate であってもリンクアップし、波長依存がないことを実証した。

(3) ONU エミュレータ

ONU エミュレータは、疑似波長スイープ動作、ディスカバリ動作およびディスカバリ完了後の Gate/Report 送受信動作 (MPCP 処理) を実施する疑似 ONU 機能を提供するもので、疑似 ONU 機能最大 128 台の同時動作が可能である。WDM/TDM-PON システムに本エミュレータ ONU を 4 台使用することで、ONU512 台接続時のディスカバリ動作検証を実施した。距離、疑似 ONU 台数をパラメータとしてリンクアップ時間を実測し、512 台のリンクアップを確認した (図11)。

(4) OLT 省電力動作

多分岐・長延長化による OLT 集約/局統合によるスタ

ティックな省電力化に加えて、通信量が少ない時に消費電力抑制する、ダイナミックな省電力機能が要求される。

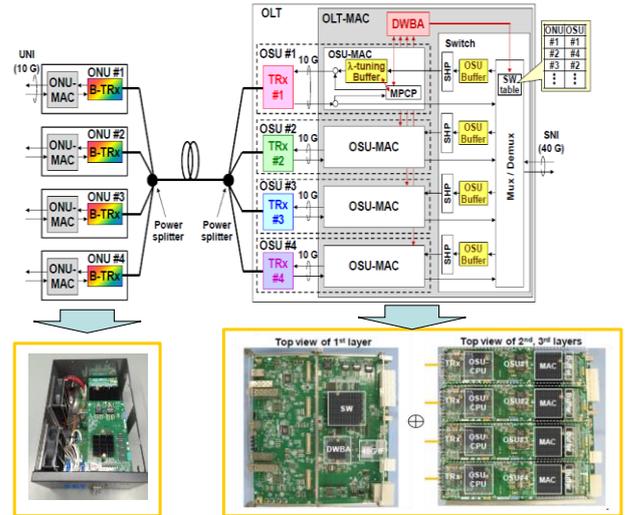


図10(a) ONU-MAC

図10(b) OLT-MAC

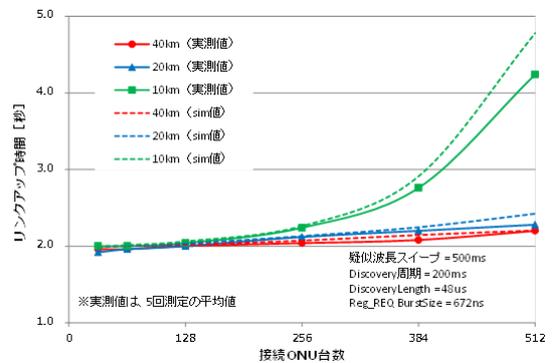


図11 エミュレータによる512台リンクアップ動作

今回我々は、トラフィックモニタ機能と波長切替機能を使用して、トラフィックの増減に応じた OSU の増減を行うアルゴリズムを使用して検証を実施した。検証結果：図12に示すように、1日のトラフィックパターンをモデル化し、OLT側の省電力効果を確認した。トラフィック量に応じ、OSUの起動・停止が繰返し実施され、それに連動した省電力効果が確認できた。この省電力動作による OSU 増減においてもパケットロスの発生は無かった。省電力動作をしない 4OSU 稼働モデルと比較して、最大33%、平均16%の省電力効果を確認した。

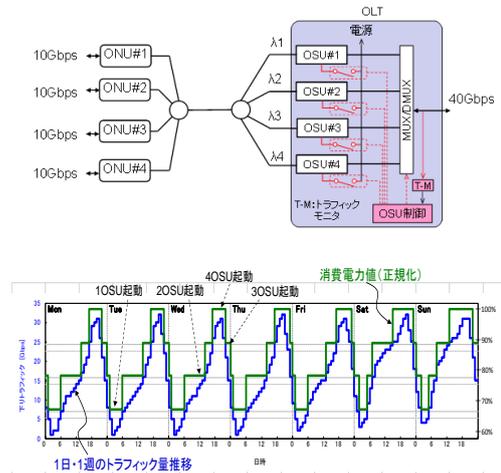


図 12 省電力構成（上）と消費電力推移（下）

(5) OLT プロテクション

波長スweepにより Discovery Gate を受信した波長にて Discovery シーケンスを行う。このため、リンクアップしている波長に障害が発生した場合に、一旦リンクダウンした後、波長スweepにより別波長へ再リンクアップすることが可能であり、プロテクション機能としての利用が可能である。今回我々は、以下に示す 5 つのプロテクション動作モードを搭載した WDM/TDM-PON システムを試作し、Discovery によるプロテクション動作とその切替時間（信号導通回復時間）に関する検証を行った。比較的アルゴリズムの単純な、モード 3 以外のモードにおいて、1 秒～数秒オーダーで信号が復旧することが確認でき、自動救済が要求されるサービスへの適用の可能性を示した。

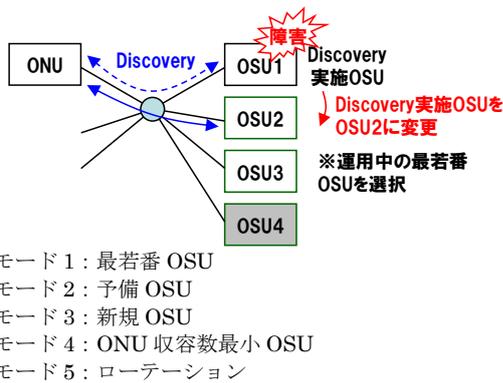


図 13 波長スweepによるプロテクション

課題エ) 高機能バースト送受信技術

課題エー 1) 高速波長可変バースト送受信技術

課題エ-1 では、WDM/TDM-PON における ONU 向け高速波長可変トランシーバ技術の確立に向けた要素技術開発を実施した。平成 24 年度から、送信部はバースト制御法および高速波長可変制御法に関して、また受信部は高速波長可変制御法に関して、候補技術の選定と要素技術検討を行った。送受信部共に、高速波長可変性を実現するため、数 100ns オーダの極めて高速で波長切替可能な、アレイ型光部品とセレクトアスイッチ(SW)を組み合わせたトランシーバを提案し、開発を行った

図 14 に高速波長可変トランシーバのブロック構成図を示す。送信器モジュールは異なる 4 つの波長(λ_{u1} , λ_{u2} , λ_{u3} , λ_{u4})と各波長 10 Gbps の伝送容量を有する SOA 集積 EADFB (Electro-Absorption Distributed Feedback) レーザアレイと光合波器 (MUX) 及びセレクトア SW や各種ドライバ回路 (EA 変調器ドライバ (EAD)、レーザドライバ (LDD)、SOA ドライバ (SOAD)) から構成される。ONU の送信波長制御信号はコントローラを経て、セレクトア SW にて SOA 集積 EADFB レーザアレイの内、一つのレーザを選択して送信波長を決定する。また、バースト制御信号は、コントローラを経て SOAD にて、SOA の発光・非発光を制御することで、高速な波長選択機能とバースト信号生成機能を実現する。一方、受信器モジュールは、APD-TIA (Avalanche Photodiode-TransImpedance Amplifier)アレイと光アレイ型導波路 (AWG) タイプの光分波器及びセレクトア SW や等価増幅器 (LA) から構成される。入出力ポートより入力された各波長 10 Gbps の下り信号 (λ_{d1} , λ_{d2} , λ_{d3} , λ_{d4})は、C/L-band filter を経て、AWG にて波長毎に分波される。各波長は各 APD-TIA にて光電

変換および LA による等価増幅を経てセレクトア SW に入力する。ONU の受信波長制御信号に応じて、セレクトア SW

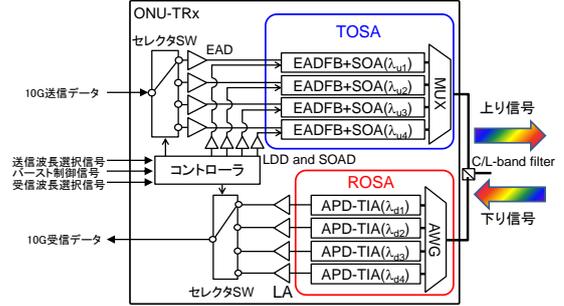


図 14 高速波長バースト送受信器のブロック構成図

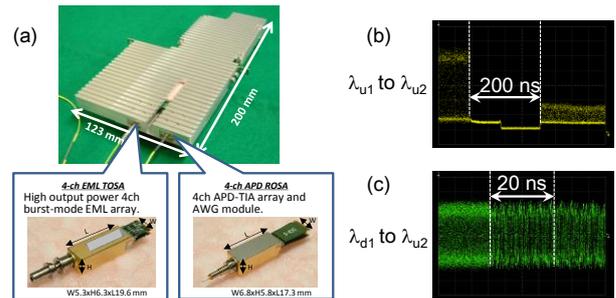


図 15 (a)高速波長可変バースト送受信器の外観写真、(b) 高速波長可変バースト送受信器の波長切替 ($\lambda_{u1} \rightarrow \lambda_{u2}$) 時の送信波形、(c) 高速波長可変受信器の波長切替 ($\lambda_{d1} \rightarrow \lambda_{d2}$) 時の受信波形

が 4 つの受信信号から一つを選択して、受信波長 (信号) を決定する。本構成により、波長可変速度はセレクトア SW の駆動速度と同レベルとなり、数百 ns 以下の高速な波長切替時間が実現できる。

図 15(a)に、試作した ONU 用高速波長可変バースト送受信器の外観写真と高速波長切替特性を示す。本試作器は、高速イーサネットワーク向けトランシーバで用いられている集積アレイデバイス技術を適用することで、課題ウの成果物 (ONU 装置) に実装可能な程度にまで小型化を実現した (実装面積 $123 \times 200 \text{ mm}^2$)。送信器側は、4ch アレイ 10Gbps-SOA 集積 EADFB (EML) と MUX を集積した光送信器サブアセンブリ (TOSA) の開発により、受信器側は 4ch 10Gbps APD-TIA アレイと AWG を集積した光受信器サブアセンブリ (ROSA) の開発により、小型化を実現した。大きな市場を有する高速イーサネットワーク向け光部品技術の本試作に活用することにより、構成部品の一部共有化などにより将来的な経済化が期待できる。ITU-T G.989.2 においては、上り信号波長範囲として $1524\text{-}1544 \text{ nm}$ また光周波数間隔を $\text{min. } 50 \text{ GHz}$, $\text{max. } 200 \text{ GHz}$ と規定しているため、本試作における TOSA においては、 $\lambda_{u1}=1532.68 \text{ nm}$ (195.6 THz), $\lambda_{u2}=1533.47 \text{ nm}$ (195.5 THz), $\lambda_{u3}=1534.25 \text{ nm}$ (195.4 THz), $\lambda_{u4}=1535.04 \text{ nm}$ (195.3 THz) の各送信波長を採用し、標準に準拠した。また、ROSA においては、ITU-T G.989.2 で規定されている下り信号の各波長グリッド (光周波数間隔 100 GHz)、 $\lambda_{d1}=1596.34 \text{ nm}$ (187.8 THz), $\lambda_{d2}=1597.19 \text{ nm}$ (187.7 THz), $\lambda_{d3}=1598.04 \text{ nm}$ (187.6 THz), $\lambda_{d4}=1598.89 \text{ nm}$ (187.5 THz) に準拠した受信波長グリッドを有する波長可変受信器を開発した。

図 15(b)に、送信波長を λ_{u1} から λ_{u2} に切り替えた際の信号波形を示す。信号波形より 200 ns 以下での高速波長切

替を達成した。また、他の送信波長の切替時間も 200 ns 以下であることを確認した。さらに、波長可変バースト送信器の各送信波長における光出力強度は+7.8 dBm となり、ITU-T G.989.2 で規定される最低出力強度+4 dBm を満たすことを確認した。図 15(c)に、受信波長を λ_{d1} から λ_{d2} に切り替えた際の信号波形を示す。信号波形より 20 ns 以下の高速波長切替を確認した。また、他の受信波長の切替時間も 20 ns 以下であることを確認した。以上、アレイ型集積デバイスと高速駆動可能なセレクタ SW による波長選択を行うことで、数 100 ns オーダの極めて高速な波長可変動作を達成した。

課題エー 2) 小型波長可変バースト送受信技術

小型波長可変バースト送受信技術の開発では、小型・経済性を考慮した波長可変型の送受信器開発を実施した。

図16は分布ブラッグ反射鏡 (DBR) 型の波長可変レーザを用いて、バースト送受信器を試作した結果である。バースト信号発生時のLaserのON/OFFによる波長チャープ防止及び光オフレベルを十分に得るために光増幅器 (SOA) を内蔵した構成である。また、SOAのパターン効果を防止するために、DBR/SOA/変調器の順番で構成した。波長はITU-T G.989.2規定の上り1524 nm~1544 nmの範囲から100 GHz間隔の4波長とした。図17に開発した光送受信器の評価結果、(1)バースト信号発生、(2)波長切替時間を示す。バースト信号発生はSOAで生成することにより、高い光オフレベル (-47.5 dBm) を実現すると共に、消光比 (10 dB) の良好なアイマスク波形を得た。また、波長切替時間は約1 msとなり、G.989.2の切替速度クラス2 (100 μ s~25 ms) である。尚、このバージョンの試作では、光受信部はOLT側の出力がバースト信号でも受信できるようにAPD-Burst TIAとLimiting-AMPを搭載した。また、WDMフィルタ部は外部設置の構成とした。

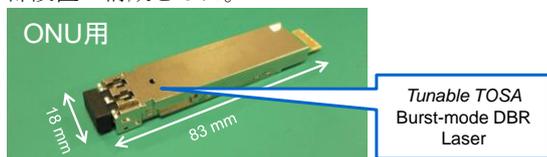
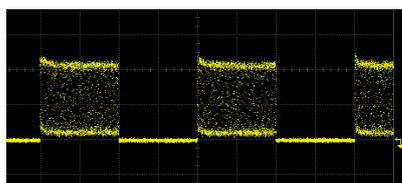
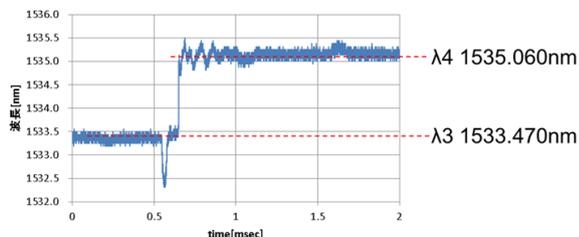


図16 小型波長可変バースト送受信器 (送信可変)



(1)バースト信号発生



(2)波長切替時間

図17 送信器性能

図18は、波長可変フィルタ内蔵受信器に薄膜型温調方式の波長可変フィルタとAPD-TIAを一体化した受信部を開発した結果を示す。G.989.2 規定の波長及び波長切替

クラスに対応するONU用送受信器となる。波長はG.989.2規定の下り1596 nm~1603 nmの範囲から100

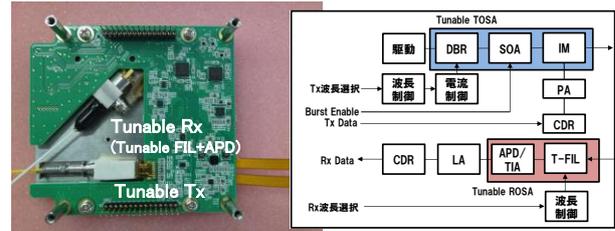


図 18 波長可変バースト送受信器 (送受可変波長)

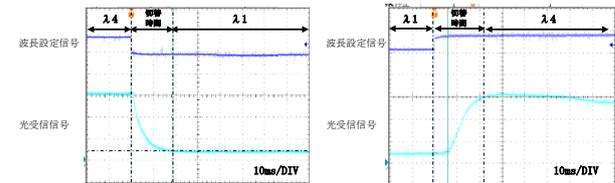


図 19 受信波長切替性能

GHz間隔の4波長とした。波長可変フィルタの波長制御は、送受信器内部の温度センサに応じ制御部からの電流制御により実現した。波長可変フィルタの波長設定は、外部波長選択端子からの波長設定信号により送受信器内部の制御部にて生成した波長毎の電流値を切り替えることにより実現した。切替時間の測定は、最も波長が離れ、波長切替時間が長くなる λ_4 と λ_1 間の波長切替時間を確認した。図19は、 λ_4 から λ_1 への切替時間の測定結果であり、約20 msで切替わることを確認した。従い、G.989.2の波長切替速度クラス2仕様に準拠する25 ms以下の結果が得られた。

総合システム実証実験

本研究課題において検討を行ってきた波長切替機能を実装したONU/OLT用MACボード(課題アおよび課題ウ)、長延化・多分岐化を実現する光増幅器(課題イ)、波長可変ONUトランシーバおよびOLTトランシーバ(課題エ)など各種要素部品を組み合わせ、最終目標であるシステム伝送容量40 Gbps(10 Gbps \times 4波)、収容ユーザ数512分岐以上、総伝送距離40 km以上の性能を有するWDM/TDM-PONシステムの総合システム実証実験を北海道に敷設されたファイバ伝送路を用いて実施した。図20に総合システム実証実験の構成を示す。敷設された光ファイバ伝送路は札幌市内の複数のNTTビルを経由して、40 kmの総伝送距離を有する。拠点ビルであるNTTビルAには、OLT、局置分岐スプリッタを模擬した16分岐スプリッタ、長延化・多分岐化用局置光増幅器、外置分岐スプリッタを模擬した64分岐スプリッタ、および伝送距離が0 kmである近距離に収容されるONUを配置した。一方、最も遠い距離の加入者宅を模擬したNTTビルBには加入者宅内装置であるONUを配置した。図20においては、所内分岐および所外分岐を模擬したスプリッタの分岐比は、それぞれ64分岐および16分岐であるため、本構成では総伝送距離および総分岐数が40 kmおよび1024分岐のWDM/TDM-PONシステムとなる。本構成は、局置光増幅器1台で0 kmから40 kmのONUを64台収容可能となる。このため、局内16分岐スプリッタ下部に設置される局置光増幅器を16台用いることで、拠点ビルを中心に0 kmから40 kmのエリアに点在する1024台(64ONU \times 16分岐)のONUを収容することが可能となる。総合システム実証実験では光増幅器の使用方式を、設置場所などの運用課題を克服できる局置構成と、長円化・

多分岐化効果が効率的に得られる中継構成については、所外および所内スプリッタの分岐比を変えながら、システム

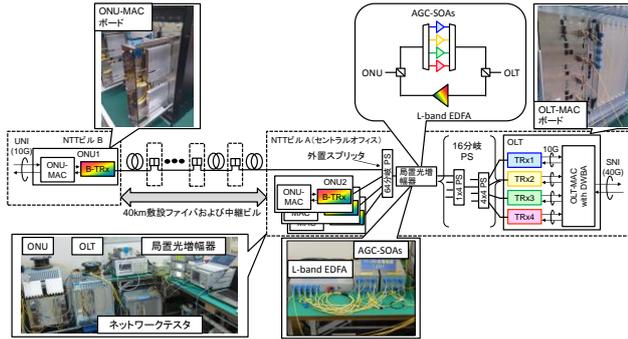


図 20 総合システム実証実験の構成

特性評価を実施した。

その結果、光増幅器を使用する中継構成においては、敷設ファイバ伝送路が 40 km の構成において外置スプリッタ 128 分岐、局置スプリッタ 4 分岐の合計 512 分岐まで分岐数を拡大することに成功した。本構成は光増幅器 1 台で 128 台の ONU を収容可能であるため、4 台の光増幅器を用いることで 512 台の ONU を収容できる。一方、光増幅器の局置構成においては、外置スプリッタの最大分岐数は 64 分岐、局置スプリッタの最大分岐数は 16 分岐まで拡大することに成功した。このため、局置構成においては 16 台の光増幅器を用いることで、1024 台の ONU を収容可能となることを明らかにした。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

近年、北米や欧州の一部のオペレータが WDM 技術を活用した次世代光アクセスシステムである NG-PON2(Next Generation-Passive Optical Network 2) 標準化会合で積極的に発言するとともに各国の装置ベンダによるプロトタイプ学会発表及びプロモーション活動が活発化している。本研究課題終了後も、本研究開発成果のタイムリーなアピールのため、主要な光通信関連の国際会議に積極的に投稿を行うとともに、ITU-T 国際標準(G.989 シリーズ)の完成に向けて引き続き貢献を行っていく予定である。また、実用化に向けて開発した「WDM/TDM-PON 技術」のさらなる信頼性向上を目指すとともに、装置の小型化にも取り組む予定である。さらに、合わせて国内外の機関とも連携し、成果のグローバル展開を目指す。

4. むすび

本研究課題において設定した具体的数値目標に関しては、全ての項目で目標を達成し、一部の項目では著しく目標を凌駕した。40 Gbps の大容量化、40 km の長延化、耐災害性の向上については目標を 100%達成。多分岐化は目標 512 分岐を 2 倍上回る 1024 分岐を達成した。局内装置の低消費電力化の目標値 30%に関しては 39%削減の(9%目標を上回る)試算が得られた。これらの成果については、特許出願、論文誌および国際会議での発表、国際標準化提案および採択、報道発表など通じて積極的にアピールした。特に、光通信の分野で世界最大の国際会議(OFC)において 2014 年、2015 年の 2 年連続でポストデッドラインペーパーとして採録されており、国際的に高い評価を得ている。

【査読付発表論文リスト】

- [1] S. Kaneko, T. Yoshida, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukoujima, S. Kimura, N. Yoshimoto, “Demonstration of Load-Balancing Operation Based on Hitless Dynamic Wavelength Allocation on Symmetric 40-Gbit/s λ -Tunable WDM/TDM-PON”, Journal of Lightwave Technology Vol.33 No.3 pp645-652 (2015 年 2 月 1 日)
- [2] S. Kaneko, T. Yoshida, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukoujima, S. Kimura, N. Yoshimoto, “First λ -tunable Dynamic Load-Balancing Operation Enhanced by 3-msec Bidirectional Hitless Tuning on Symmetric 40-Gbit/s WDM/TDM-PON”, Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) 2014, paper Th5A.4 (2014 年 3 月 13 日)
- [3] K. Taguchi, K. Asaka, M. Fujiwara, S. Kaneko, T. Yoshida, Y. Fujita, H. Iwamura, M. Kashima, S. Furusawa, M. Sarashina, H. Tamai, A. Suzuki, T. Mukoujima, S. Kimura, K. Suzuki, A. Otaka, “First Field Trial of 40-km Reach and 1024-Split Symmetric-Rate 40-Gbit/s λ -tunable WDM/TDM-PON”, Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2015 Post Deadline Papers, Paper Th5A.6 (2015 年 3 月 26 日)

【取得特許リスト】

- [1] 金子慎、吉田智暁、木村俊二、光通信装置及び動的波長帯域割当方法、日本、2013 年 8 月 30 日、2014 年 10 月 30 日、特許第 5639240 号
- [2] 更科昌弘「加入者側装置登録方法及び光ネットワークシステム」、日本、2013 年 3 月 18 日、2014 年 2 月 28 日、特許第 5482931 号
- [3] 玉井秀明「加入者側装置登録方法及び光ネットワークシステム」、日本、2013 年 3 月 1 日、2014 年 6 月 13 日、特許第 5556921 号

【国際標準提案・獲得リスト】

- [1] ITU-T SG15 WP1 Q2, Proposal for ONU registration and wavelength tuning functions in MW-PONs with wavelength-splitter-based ODN, 2012 年 9 月 12 日
- [2] FSAN general meeting, Proposal for a wavelength tuning sequence in G.989.3 using PLOAM messages, 2013 年 11 月 5 日
- [3] ITU-T/SG15/Q2, FSAN, “Statistical analysis on the burst extinction ratio requirement”, 2013 年 8 月 27 日

【受賞リスト】

- [1] 吉田智暁、Young Engineer Award, The 11th International Conference on Optical Internet (COIN2013), “Recent research progress in λ -tunable WDM/TDM-PON”, 2013 年 10 月 18 日～20 日
- [2] 浅香航太、日本 ITU 協会賞、国際活動奨励賞、功績賞分野、2015 年 5 月 15 日

【報道掲載リスト】

- [1] “OKI/NTT 伝送距離・容量を拡大。WDM 利用した新 PON で 1024 ユーザ収容”、化学工業日報、2015 年 3 月 30 日
- [2] “NTT と OKI 新たな PON 技術、世界初で成功”、電経新聞、2015 年 3 月 30 日
- [3] “NTT と OKI 波長多重技術で伝送距離などを拡大する PON 技術を共同開発。従来の伝送容量、32 倍の収容ユーザ数を実現”、電波タイムズ、2015 年 4 月 3 日