

高品質・低消費電力光アクセスネットワークを実現する WDM/TDM-PON 用高機能送受信器技術の開発

鹿嶋 正幸 岩村 英志
藤田 典一 向島 俊明

現在、日本が抱えているエネルギー・環境問題、高齢化などの問題を解決する手段として安全で快適な社会を実現するスマートコミュニティが注目されており、研究開発や実証実験も進められている。スマートコミュニティ化により、例えば、電力需給の状況変化を収集し、太陽電池などの分散電源を含めた制御により電力を最適に活用したり、高齢者の見守りなど個々人の環境状況を把握し、各人が求めるサービスを提供したり、と言ったことが可能となる。これらを実現するには次世代アクセスネットワークを含めた通信インフラが必要となる。

このような通信インフラに対しては、様々な要求に対応できる柔軟性と動画配信等の大容量を必要とするアプリケーションに対応するブロードバンド化が求められる。さらに今後アクセス系の主流となるモバイルアクセスでは端末数とトラフィック量の爆発的な増大に対応するため、高密度に配置した無線基地局を光アクセス網に収容する光無線融合化も望まれており、柔軟で品質の高いネットワークが期待されている。また、通信装置の速度が増すと電力も上がるため、システムの低消費電力化も重要な課題の一つである。

我々はこのような高品質・低消費電力を実現する通信ネットワークとして、WDM/TDM-PONをベースとする高品質・低消費電力の光無線融合ネットワーク研究開発を行っている。本文では次世代通信インフラとしての将来ネットワークのイメージを示し、それに必要なWDM/TDM-PONシステム及び高機能送受信器技術を紹介する。

高品質・低消費電力を実現する将来ネットワーク

図1に我々が考える将来ネットワークのイメージ図を示す。将来のコアネットワークにおけるノード（ルータ/スイッチ）は、ソフトウェア機能で構成する仮想ノードとなり、より柔軟なネットワークが必要になる（SDNコアネットワーク）。また、爆発的に普及するモバイル端末の高速化や『モノのインターネット（IoT）』の進展により、コアネットワークを流れるトラフィックが増大するため、データセンタ（DC）のクラウドサーバー自体もローカル

サーバーによる分散配置が効果的であり、仮想ネットワークはクラウドサーバーとローカルサーバーで連携動作することにより、コアネットワークを流れるトラフィックの抑制や低遅延制御が実現できる。

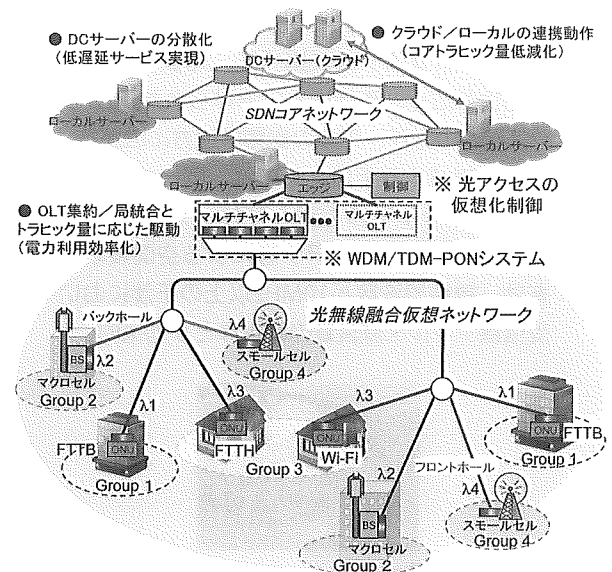


図1 将来のネットワーク像

アクセス領域では、光アクセスネットワークにモバイルのトラフィックを収容することを想定すると、朝・昼・夜などの1日の時間帯に応じて、1つの装置が処理するトラフィックの変動が顕著に発生する。こうした場合、仮想的に帯域及び装置を制御することで、ネットワークを効率的に運用できる。

WDM/TDM-PONは波長と時間で帯域を割り当てることができるので、サービス毎のグループ管理が可能となる。例えば、ビジネス向け、コンシューマ向け、モバイル等、トラフィック量に応じて、波長次元と時間次元による柔軟なグループ分けを行い、1日に発生するトラフィックに応じて、ONUの収容数を制御し、OLTの駆動数を制御することで電力消費を低減できる。

また、モバイル回線（LTE等）や固定アクセス回線（Wi-Fi等）などを用いるモバイル端末においては、アク

セスポイントまでの距離の違いや方式の違いで消費電力が異なるため、端末の位置・エリア内の端末数・各端末の通信容量等を考慮し、最適な経路接続を行うことで、消費電力を低減できる¹⁾。

WDM/TDM-PONシステム

既にWDM/TDM-PONは国際電気通信連合電気通信標準部門 (ITU-T) の G.989にて規格化が進められており、当社も開発成果の提案活動を行っている。G.989の主な仕様を表1に示す。参考のためG-PON/XG-PONの仕様も示す。

表1 各種 PON システムの主な物理仕様

		仕様		
		G.989 TWDM-PON	G.987 XG-PON	G.984 G-PON
速度	下り	10Gbps	10Gbps	2.5Gbps
	上り	2.5Gbps /10Gbps	2.5Gbps /10Gbps	1.24Gbps /2.5Gbps
波長帯	下り	1596-1604nm	1575-1580nm	1480-1500nm
	上り	1524-1540nm	1260-1280nm	1260-1360nm
波長数		4 or 8	1	1
波長間隔		100GHz	-	-
分岐数		64以上	32	32
伝送距離		40km以上	20km	20km

G.989での基本速度は、XG-PON (G.987) と同じ 10Gbpsであり、波長数を4または8に増やすことで、XG-PONの4倍以上 (40Gbps以上) の総容量を実現するものである。波長帯は、これまでのPONシステムと共存ができるように使用していない波長帯を設定している。本システムはOLTをマルチチャネル化することで、複数波長の信号をフレキシブルに活用することができ、総容量40Gbps (4波時) の帯域をネットワークの使用状況に応じて、効率よく割当てることができる。また、OLTの集約及び局統合も視野に入れ、多分岐・長延の仕様としているため、これまでのPONシステムに比べ、送信光電力を高く、光受信感度も高める必要がある。しかし、現状のデバイスでは、ほぼ限界の特性で使用しているため、これ以上の向上は難しい。

そこで、光増幅器を用いて、ブースト/中継/光プリアンプを行う方法が考えられる。しかしながら、中継タイプでは光配線・スプリッタ網の途中に配置するため、電力供給や保守運用面を考慮する必要がある。

以上のことから、我々は、多分岐・長延化を実現する

送受信器の高機能化として、OLT装置に内蔵できるブースター及び光プリアンプの検討を行っている。

高機能送受信器技術

PONシステムは、異なる位置にあるONUをTDMで多重するため、上り光信号はバースト信号となる。従い、高バジェットに用いる光増幅器はバーストタイプのものが必要となる。また、光ファイバ伝送では非線形の影響があり、長距離を伝送すると波長分散により、波形劣化が発生する。以後では、バースト光増幅器の検討結果と波形整形処理を加えた伝送実験の結果について述べる。

(1) バースト光増幅器

光増幅器には、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) や半導体光増幅器 (SOA) がある。EDFAは一般的な光増幅器として使われており、波長帯域としてCバンド (1530nm~1560nm) とLバンド (1560nm~1600nm) の波長帯を増幅する。SOAは光スイッチング等に使われており、増幅器としては素子の構造により、どの波長でも増幅が可能である。

先にも述べた様に、PONシステムは1対Nの接続に置いて、TDMで通信を行うため、各ONUはバースト的に信号を発生する。また、波長は1260nm~1625nmが使われている。従い、PONシステム用の光増幅器は、バースト駆動と広い波長帯を考慮する必要がある。

①光プリアンプ方式

SOAは励起準位粒子の寿命が短いため、バースト信号でも光学的なサージ (以下、サージと呼ぶ) が発生する問題はないが、パターン効果による波形劣化が発生する。サイズは、半導体チップであるため、他の光部品と集積ができることから、小型化に向いている。SOAを光プリアンプに使った場合の効果を図2 (a) に示す。図2 (a) は受信器の直前にSOAを配置し、ビットエラーレート (BER) を測定した結果である²⁾。SOAを使用した場合は、最小受光感度-34dBm@10⁻³が実現でき、約6dB改善できることがわかる。ここで、SOAのもう一つの課題は雑音指数 (NF) が大きいことであり、これ以上の改善を行うには、NFを小さくしなければならない。

一方、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) はNFが小さいが、励起準位粒子の寿命が長いこと、入力信号が無い場合は、ファイバ中に励起光のエネルギーが残る、バースト信号を入力するとサージが発生する問題がある。このため、信号入力がない場合はダミー光を入力し、

エネルギーの蓄積を除去する方式であるバーストEDFAを開発した。増幅できる波長は1530-1560nm (Cバンド)と1560-1600nm (Lバンド)であり、G.989の波長に対応している。このバーストEDFAを使って、光プリアンプの効果を評価した。評価系はSOAと同様であるが、EDFAは多波長一括増幅器であるため、単一波長の性能のみ評価を行った³⁾。BERを測定した結果を図2(b)に示す。最小受光感度を-40dBm@10⁻³まで改善できた(約11dBの改善)。SOAに比べ、5dBも効果を大きくできる。

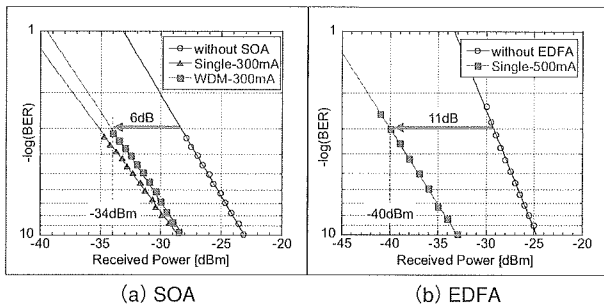


図2 光プリアンプによる効果

②ブースター方式

SOAをブースターに使う場合は、光変調後の強い光信号をSOAへ入力するため、パターン効果による波形劣化が発生する。従い、パターン効果を抑制する機能が必要となり、十分な出力が出せなくなる。また、逆に光変調の前にSOAでブーストすれば、パターン効果は発生しないが、こちらもブースト後に光変調するため、十分な出力がだせない。すなわち、どちらの構成においても、出力は+10dBm程度となる。

一方、バーストEDFAはブースターに使用してもパターン効果などの影響はない。そこで、1575nmから1598nmの波長(下り方向の波長)で入出力特性を測定した。結果を表2に示す。また、最も出力の大きい波長でBERを測定した結果、伝送劣化がないことを確認した。

以上の結果から、OLT側だけにブースター及び光プリアンプを配置することで、下り方向(送信+12dBm/受信-28dBm)、上り方向(送信0dBm/受信-40dBm)共に40dB以上のバジェット^{*1)}を実現でき、これまでの32分岐を256分岐以上の多分岐化が実現できることがわかる。

表2 ブースターモード時の入出力特性

入力	出力			
	1575nm	1580nm	1596nm	1598nm
-5dBm	+16.5dBm	+14.8dBm	+12.5dBm	+12.2dBm
0dBm	+17.2dBm	+16.5dBm	+15.9dBm	+15.0dBm

*1) 送信器の光出力と受信器の受光感度との差 (dB で表す)

(2) 伝送実験による有効性確認

現在、敷設されている光ファイバは1.3μmゼロ分散であるため、国際標準化G.989で規定されている1524nm~1604nmの光信号を敷設光ファイバ中で伝送させると波長分散の影響で伝送劣化が発生する。ここでは、アクセスネットワークにおける分散補償の手段となる波形整形処理と80km伝送の結果について述べる。

①波形整形処理による分散補償

コアネットワークでは分散補償ファイバ等を用いて伝送劣化を補償するが、アクセスネットワークにおいては、ユーザー毎に距離が異なることと低価格で実現することを考慮しなければならない。また、昨今、電気処理技術の進歩により、ギガビット級の信号でもDSPで信号処理ができるようになってきている。そこで、光/電気変換後に電気処理にて波形整形処理を行うことで分散による波形劣化を補償する方法を取り入れた。

図3にイコライザによる波形整形処理の効果を示す。図3(a)は80km伝送後の信号波形、図3(b)は80km伝送後に波形整形処理を行った波形を示す。(a)は波長分散の影響で波形劣化が生じているが、(b)はEye開口が大きく、波形劣化を補償していることが確認できる。

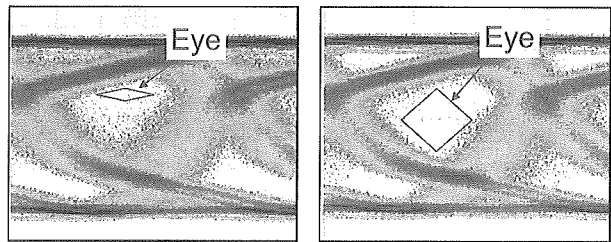


図3 イコライザによる波形整形処理

②80 km伝送実験

次に、開発技術の有効性を示すために伝送実験を行った結果を示す。長延化のメリットを生かすために、将来のOLT集約・局統合を想定し、伝送距離を80kmとした。

図4にPONシステムを想定した実験系の構成を示す。バーストEDFAによるブースター及び光プリアンプは、システムの低コスト化を考慮し、OLT側だけに配置する。波形整形処理(CTLE/DFE)は、将来的にはDSPとして組み込むため、OLT側/ONU側のそれぞれの受信器の後に配置する。使用した波長は、下り方向が1575nm、上り方向が1535nmである。性能を示すBERの測定は、FPGA内にあるBERT機能を用いて測定した。

mobile multi-resource optimal L4 communication and basic experiment with OpenFlow”, ECOC2014 Mo.3.2.2, 2014.

2) 鹿嶋、他、「光プリアンプによるWDM/TDM-PON用高バジェット送受信器の一検討」、電子情報通信学会2013ソサイエティ大会、2013.

3) 鹿嶋、他、「EDFAによるWDM/TDM-PON用高バジェット送受信器の一検討」、電子情報通信学会2014全国大会、2014.

4) H.Iwamura et al., “Power Budget Enhancement of WDM/TDM-PON System Utilizing Compact EDFA and Equalization Technology”, ECOC2014 Tu.1.2.1, 2014.

● 筆者紹介

鹿嶋正幸：Masayuki Kashima. 研究開発センタ ネットワーク・端末技術研究開発部

岩村英志：Hideyuki Iwamura. 研究開発センタ ネットワーク・端末技術研究開発部

向島俊明：Toshiaki Mukojima. 通信システム事業本部 キャリアシステム事業部 マーケティング部

藤田典一：Norikazu Fujita. 通信システム事業本部 キャリアシステム事業部 マーケティング部

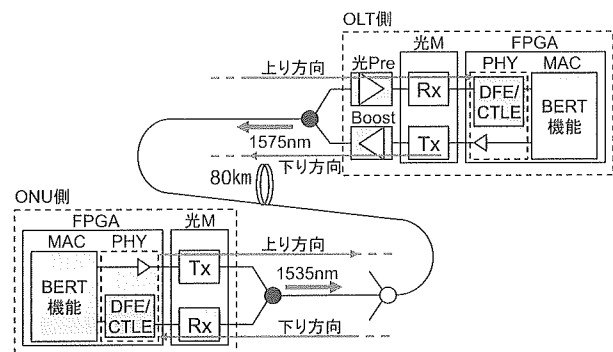
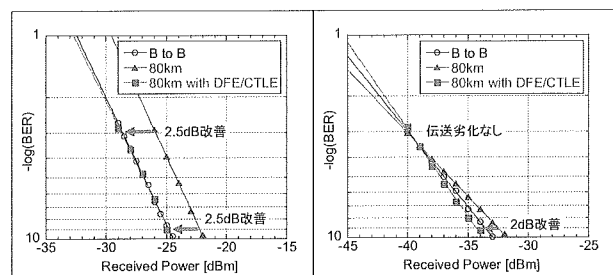


図4 伝送実験系の構成



(a) 下り方向

(b) 上り方向

図5 80 km伝送実験結果

図5に測定結果を示す。図5(a)は下り方向の測定結果、図5(b)は上り方向の測定結果である⁴⁾。○が伝送なし、▲が伝送後、■が伝送後に波形整形処理を行った結果である。共に80kmの伝送劣化を補償することができる。以上、長延化も可能であることを確認した。

今後の取組

高品質・低消費電力光アクセスシステムを実現する仮想ネットワーク像及び仮想ネットワーク実現のキー技術となるWDM/TDM-PONシステム及び高機能送受信器の技術開発状況について述べた。今後は、WDM/TDM-PONシステムの実用化開発に加え、モバイル収容を想定した仮想化光アクセス技術の確立に向けて、光無線融合ネットワークにおける帯域割当技術、トラフィック制御技術や各種装置のスリープ制御の開発を進めて行く予定である。

なお、本研究開発であるWDM/TDM-PONの一部は総務省受託研究「超高速・低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」によるものである。◆◆

【基本用語解説】

SDN (Software-Defined Networking)

通信機器をソフトウェアで集中的に制御し、動的に変更する技術

TDM (Time Division Multiplexing)

時分割多重方式

WDM (Wavelength Division Multiplexing)

波長分割多重方式

PON (Passive optical Network)

1本の光ファイバを複数の加入者へ接続する技術

DFE (Decision Feedback Equalization)

判定帰還形等化器

CTLE (Continues Time Linear Equalizer)

連続時間線形等化器

DSP (Digital Signal Processor)

デジタル信号処理

FPGA (Field-Programmable Gate Array)

プログラミング可能なLSI

参考文献

1) Y.Nakahira et al., “SDN access area network for fixed and