

高橋浩司*
Koji Takahashi
稲村卓也*
Takuya Inamura
平瀬貴博*
Takahiro Hirase

10G-EPONユーザー宅内装置

Optical Network Unit for 10Gigabit Ethernet Passive Optical Network

要旨

光アクセスネットワークとしてデータ伝送速度が最大1 GbpsであるGE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)システムが広く普及しているが、インターネットを用いた高精細映像配信やテレワークの浸透によって、データ伝送速度の高速化要求が年々高まっている。

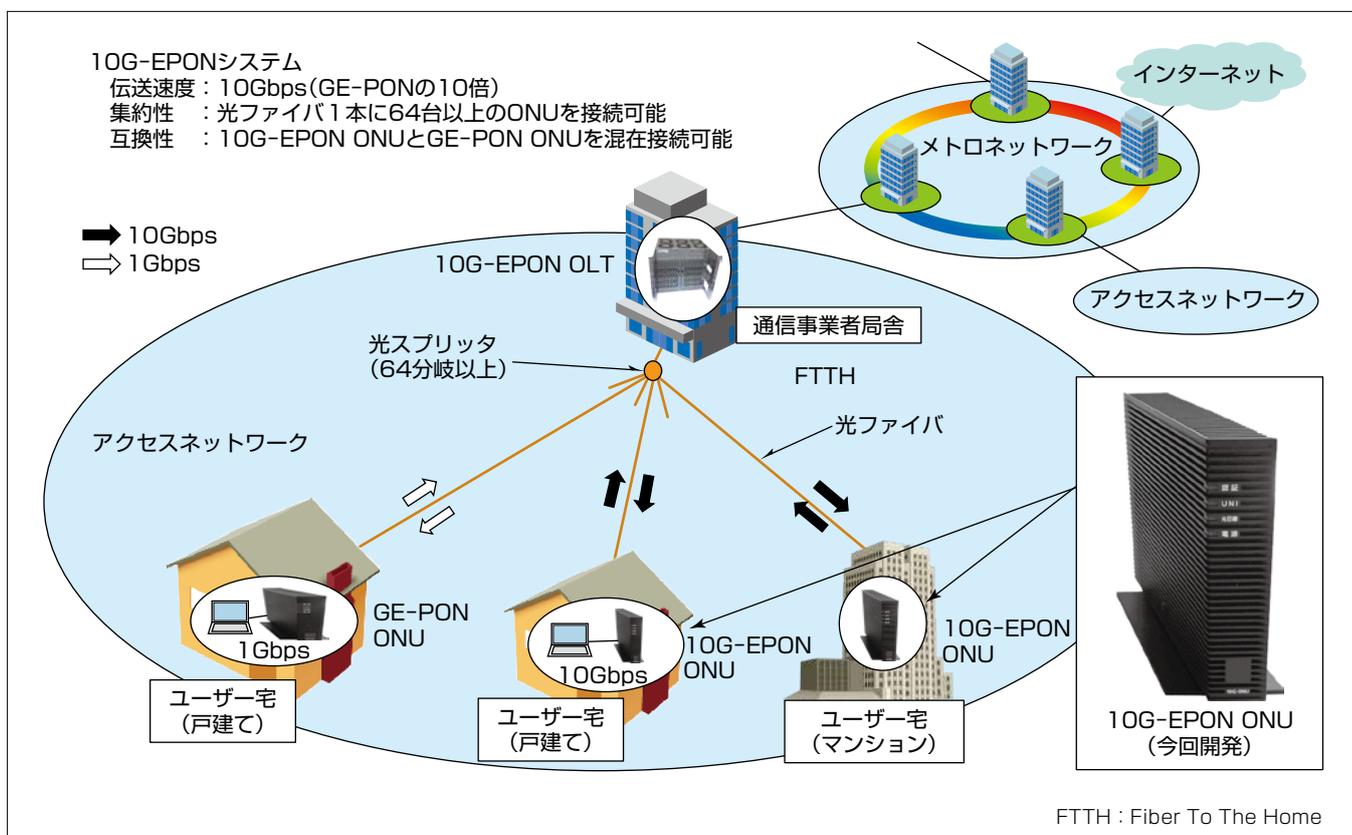
三菱電機は、GE-PONシステムの後継として、データ伝送速度を最大10Gbpsに高速化した10G-EPON(10 Gigabit-Ethernet Passive Optical Network)システムを開発した。

10G-EPONシステムは、通信事業者局舎内装置(Optical Line Terminal : OLT)とユーザー宅内装置(Optical Network Unit : ONU)で構成しており、ユーザー宅内に

設置される10G-EPON ONUは、高速化での課題を次の機能を搭載することによって解決した。

- (1) 前方誤り訂正(Forward Error Correction : FEC)機能搭載によるOLTとONU間のパワーバジェット(送信器の出力レベルと受信器の感度の差)の確保
- (2) 2.5G/5G/10GBASE-Tへの対応と優先制御機能搭載によるONUとユーザー端末間的高速化と通信安定化
- (3) 動的消費電力削減技術搭載等による省電力化
- (4) 自己監視機能搭載による保守運用性の向上

2018年から10G-EPON OLTを、2020年から10G-EPON ONUを通信事業者向けに提供開始し、社会の発展に貢献している。



10G-EPONシステム

通信事業者局舎内に設置される10G-EPON OLTとユーザー宅内に設置される10G-EPON ONUで構成し、OLTとONU間のデータ伝送速度を従来比10倍の10Gbpsに高速化している。OLTからONUへのデータ送信には波長多重技術、ONUからOLTへのデータ送信には時分割多元接続技術を適用し、10G-EPON ONUとGE-PON ONUの混在収容を可能にしている。

1. ま え が き

FTTHによるインターネットサービスの国内契約者数は2017年に3,000万人を超え、2019年12月時点で3,274万人に達している⁽¹⁾。さらに、インターネットを用いた高精細映像配信やテレワークの普及によって、データ伝送速度の高速化要求が年々高まっている。

10G-EPONシステムは、FTTHを始めとする光アクセスネットワークに広く適用されているGE-PONシステムの後継システムであり、高速大容量化を図っている。

本稿では、まず10G-EPONシステムについて述べ、次に今回開発した10G-EPON ONU(以下“10G-ONU”という。)に適用した伝送速度の高速化技術、優先制御技術、省電力化技術、保守運用性改善技術について述べる。

2. 10G-EPONシステム

図1に10G-EPONシステム構成を、表1にGE-PONシステム及び10G-EPONシステムの主要諸元を示す。10G-EPONシステムは、通信事業者局舎内に設置される10G-EPON OLTとユーザー宅内に設置される10G-ONUで構成し、OLTとONU間のデータ伝送速度を、GE-PONシステムの10倍になる最大10Gbpsへ高速化したシステムである。また、OLTからONUへのデータ送信(以下“下り方向通信”という。)には波長多重技術、ONUからOLTへのデータ送信(以下“上り方向通信”という。)には時分割多元接続技術を適用し、同一ファイバ上に複数のONUを接続可能にしている。

10G-EPONシステムの特長の一つとして、10G-ONUとGE-PON ONU(以下“1G-ONU”という。)の混在収容が挙げられる。10G-EPONシステムでは、下り方向通信は全てのONUに対して同報送信される。10G-ONUに対しては発光波長 $1,577.5 \pm 2.5\text{nm}$ の光信号、1G-ONUに対しては発光波長 $1,490 \pm 10\text{nm}$ の光信号を用い、各々のONUの光受信器に具備した波長フィルタによって適切な波長を選択することで、10G-ONUは10Gbpsのデータ信号だけを、1G-ONUは1Gbpsのデータ信号だけを受信できるようにしている(波長分割多重技術)。一方、上り方向通信では、10G-ONUは発光波長が $1,270 \pm 10\text{nm}$ 、1G-ONUは $1,310 \pm 50\text{nm}$ の光信号を送信するため、波長が一部重なり波長多重技術が適用できない。そこでOLTからONUに対して上り方向の送信タイミングを割り当て、10Gbpsと1Gbpsのデータ信号が光ファイバ上で衝突しないように制御している(時分割多元接続技術)。これらの技術を適用することによって、10G-EPONシステム上での

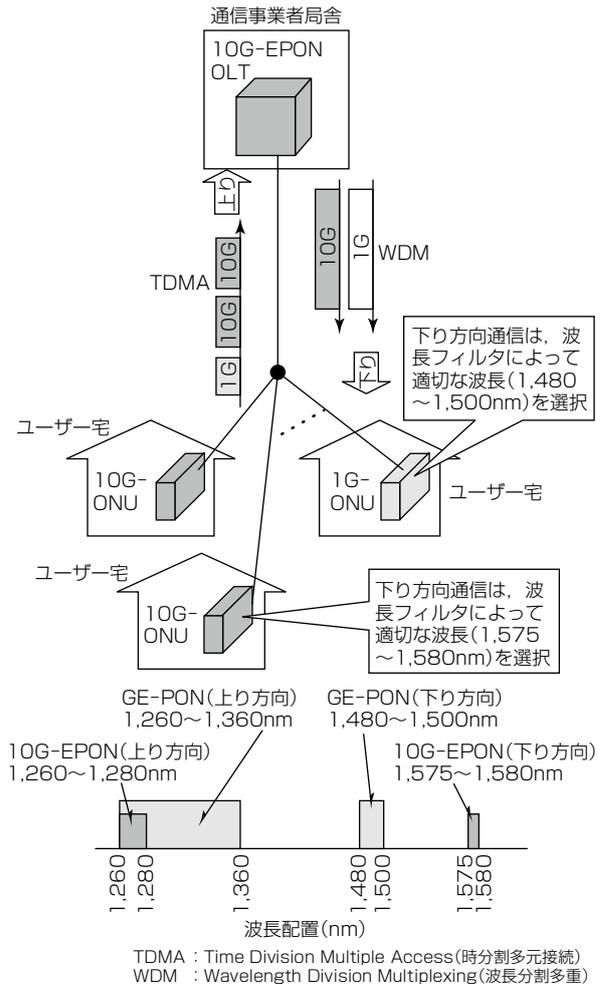


図1. 10G-EPONシステム構成

表1. システムの主要諸元

項目	GE-PON	10G-EPON
データ伝送速度	1 Gbps	10Gbps(実効帯域は約8.7Gbps)
物理速度	1.25Gbps	10.3125Gbps
FEC機能	オプション	必須
発光波長(上り方向)	$1,310 \pm 50\text{nm}$	$1,270 \pm 10\text{nm}$
発光波長(下り方向)	$1,490 \pm 10\text{nm}$	$1,577.5 \pm 2.5\text{nm}$
伝送媒体	IEC60793準拠 シングルモード光ファイバ (1.3μm零分散)	
ファイバ本数	1本(一芯双方向)	
ONU接続台数(最大)	32台以上	64台以上

10G-ONUと1G-ONUの混在収容を実現し、データ伝送速度が最大1Gbpsの従来のFTTHサービスを継続しつつ、10Gbpsに対応した新しいFTTHサービスへのスムーズな移行を可能にした。

3. 10G-ONUの開発

3.1 10G-ONUの主要諸元

10G-ONUの主要諸元を表2に示す。OLTとONU間、ONUとユーザー端末間共に、最大10Gbpsのデータ伝送

表2. 10G-ONUの主要諸元

項目	10G-ONU	
外形寸法 (mm)	35(W)×195(D)×170(H)	
質量	0.8kg以下	
空冷方式	自然空冷	
設置条件	屋内	
温度条件	0～40℃	
湿度条件	30～95%(結露しないこと)	
OLT側 インタ フェース	ポート数	1ポート
	コネクタ	SCコネクタ (JIS C 5973)
	伝送媒体	IEC60793準拠 シングルモード光ファイバ (1.3μm零分散)
	準拠規格	IEEE802.3-2018 10GBASE-PR30
	使用波長	上り：1,260～1,280nm 下り：1,575～1,580nm
	送信光レベル	+4.0～+9.0dBm
	受信光レベル	-28.5～-10.0dBm
ユーザー側 インタ フェース (UNI)	ポート数	1ポート
	コネクタ	RJ45コネクタ (IEC60603-7)
	伝送媒体	ANSI/TIA/EIA-568-A UTPケーブル
	準拠規格	IEEE802.3-2018 10GBASE-T(全二重) 5GBASE-T(全二重) 2.5GBASE-T(全二重) 1000BASE-T(全二重) 100BASE-TX(全二重)
主要機能	<ul style="list-style-type: none"> ・暗号化機能 ・FEC機能 ・優先制御機能 ・VLAN機能 ・省電力化機能 ・保守機能 	
給電方式	AC100V 50/60Hz	

VLAN : Virtual Local Area Network

速度に対応し、伝送速度を1G-ONUの10倍に向上させた。また、省電力技術の適用によって、高速化に伴う消費電力増加の課題を克服し、35(W)×195(D)×170(H)(mm)の外形寸法を自然空冷で実現した。10G-ONUの外観を図2に示す。

3.2 OLTとONU間の高速化技術

10G-EPONシステムも従来のGE-PONシステムと同じ光ファイバ伝送網を使用するため、光送受信器はGE-PONシステムと同じパワーバジェット(送信器の出力レベルと受信器の感度の差)を確保する必要がある。一方、



図2. 10G-ONU

10G-EPONシステムでは、OLTとONU間の物理速度を1G-ONUの1.25Gbpsから10.3125Gbpsに高速化するため、光受信器の受信感度が劣化する。光受信器の受信感度劣化を、光送信器の高出力化及び光受信器の高感度化だけで実現することは困難であるため、光送信器の高出力化と光受信器の高感度化に加えて、FECを必須機能として搭載することで、GE-PONシステムと同じパワーバジェットを実現した。

10G-EPONシステムで搭載必須にしたFEC機能は、訂正アルゴリズムにリードソロモン(255, 223)符号を適用し、データ量216バイトに対して32バイトのパリティを付与して送信する方式である⁽²⁾。パリティ付与によって、実効帯域は8.7Gbps(=10Gbps×216バイト/(216バイト+32バイト))となるが、FEC訂正前にBER(Bit Error Rate)≤10⁻³の入力データをFEC訂正によってBER≤10⁻¹²に引き下げることができ、受信感度劣化の改善効果がある。

図3にONU接続台数とONU1台当たりの平均スループットの関係を示す。ONU1台当たりの最大スループットは、ONU接続台数によらず、GE-PONシステムでは1Gbps、10G-EPONシステムでは8.7Gbpsになるが、PONシステムでは伝送帯域を全ONUで分配するため、ONU接続台数が増加すると平均スループットは低下する。図3から、ONUを32台接続した場合の平均スループットは、GE-PONシステムでは31Mbps/台まで低下するが、10G-EPONシステムでは272Mbps/台を確保可能である。さらに、ONUを64台接続した場合でも、10G-EPONシステムの平均スループットは136Mbps/台であり、ONU接続台数が増えなくてもユーザーは高速化の恩恵を受けることができる。

3.3 UNIの高速化技術

10G-ONUのユーザー側インタフェース(User Network Interface : UNI)は、1G-ONUのときの100BASE-TXと

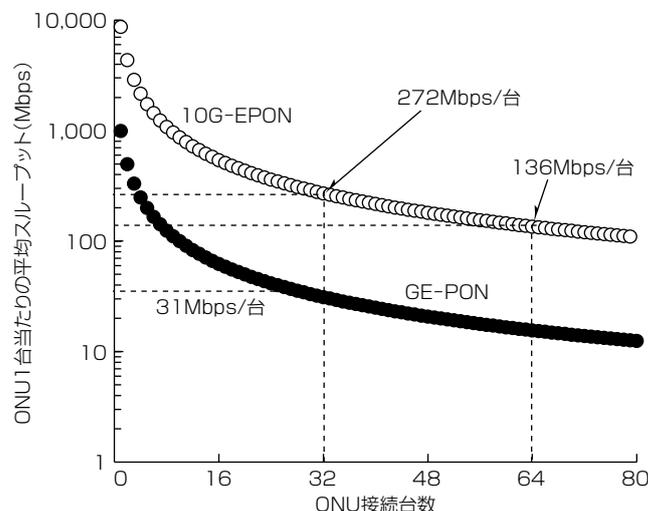


図3. スループット(理論値)の比較

1000BASE-Tに加えて、2.5GBASE-T、5GBASE-T、10GBASE-TのEthernet^(注1)規格に対応することで、ONUとユーザー端末間のデータ伝送速度を最大10Gbpsに高速化した。

10GBASE-Tは、一般家庭にも普及している1000BASE-Tと同様のUTP(Unshielded Twist Pair)ケーブルを使用するEthernet規格で、IEEE802.3anとして2006年に標準化された。ただし、UTPケーブルのカテゴリーは、1000BASE-TのCat.5Eよりも高規格になるCat.6A以上を使用する必要がある⁽³⁾。1000BASE-Tから符号化方式及び信号変調方式を変更し、FECを適用することで、10倍のデータ伝送速度を実現している。

一方、2.5G/5GBASE-Tは、IEEE802.3bzとして2016年に標準化された規格である。10GBASE-Tと比較してデータ伝送速度は1/4又は1/2になるが、10GBASE-Tより消費電力が低く、1000BASE-Tで使用していた敷設済みのCat.5E又はCat.6のUTPケーブルを使用して2.5Gbps又は5Gbpsの高速通信が可能である⁽⁴⁾。Ethernet規格と対応するケーブルカテゴリーを表3に示す。

10G-ONUのUNIは様々なEthernet規格に対応したため、ユーザーはユーザー端末側が10GBASE-Tに対応していない場合でも1G-ONUのときと同じ1000BASE-Tで使用でき、ユーザー端末側が高速なEthernet規格に対応している場合には2.5G/5G/10GBASE-Tによる高速化の恩恵を受けることができる。

(注1) Ethernetは、富士ゼロックス㈱の登録商標である。

3.4 優先制御技術

10G-ONUは、OLT側インタフェースのデータ伝送速度が最大10Gbpsに対して、UNIは5Gbps以下(10GBASE-T以外の100/1000/2.5G/5GBASE-Tで接続時)の場合があるため、10G-ONU内でEthernetフレームの滞留・廃棄が発生する。電話や映像データといった優先度が高いフレームの10G-ONU内での滞留・廃棄を回避するために搭載した優先制御機能を図4に示す。

優先制御機能は、クラシファイ機能、プライオリティキューイング機能によって実現している。クラシファイ機

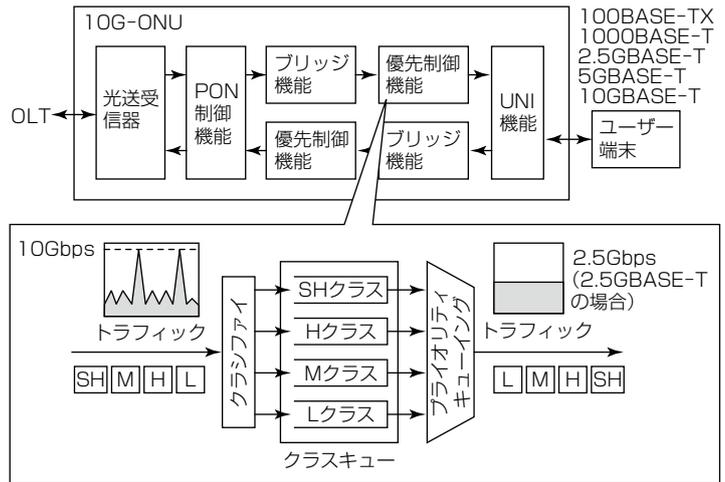


図4. 10G-ONUのブロック図

能は、OLTから入力されたEthernetフレームの優先度に基づき、SH(最高優先)、H(高優先)、M(中優先)、L(低優先)にクラス分けし、各々のキューに格納する。プライオリティキューイング機能は、キューに格納されたフレームを優先度が高いクラスから順に読み出し、ユーザー端末へ送信する。優先制御機能によって、OLTからの平均フレーム入力レートがUNI速度を超過した場合でも、高優先フレームのONU内での滞留・廃棄を回避できる。

3.5 省電力化技術

近年、地球温暖化対策の視点から、情報通信技術分野の電子機器でも低消費電力化の要求が高まっている。10G-ONUでは、低消費電力のデバイスを採用するとともに、動的消費電力削減技術を搭載することで、低消費電力化を実現した。

3.5.1 低消費電力デバイスの採用

UNIの高速化に向けて適用した10GBASE-Tは、他のEthernet規格(例えば、5GBASE-T等)と比較して、物理層ICの消費電力が大きいという課題があった。10G-ONUでは、最も低消費電力の物理層ICを採用するとともに、基板上配線の低損失化等によって、消費電力を削減した。

当社ONUのデータ伝送速度当たりの消費電力の推移を図5に示す。縦軸は2004年に製品化した1G-ONUのデータ伝送速度当たりの消費電力を1.0として規格化してある。2014年までのプロットは1G-ONUの消費電力を示しており、2004年から2007年は搭載部品の集約化(Application Specific Integrated Circuit: ASIC)、2007年から2014年は電気回路の最適化によって消費電力を削減した。2019年のプロットは今回開発した10G-ONUの消費電力0.18(arb. unit)を示しており、2014年に製品化した1G-ONUの0.22(arb. unit)に対し十分に省電力化が図られている。

表3. Ethernet規格と対応ケーブルカテゴリー

Ethernet規格	ケーブルカテゴリー			
	Cat.5	Cat.5E	Cat.6	Cat.6A
100BASE-TX	○	○	○	○
1000BASE-T		○	○	○
2.5GBASE-T		○	○	○
5GBASE-T			○	○
10GBASE-T				○

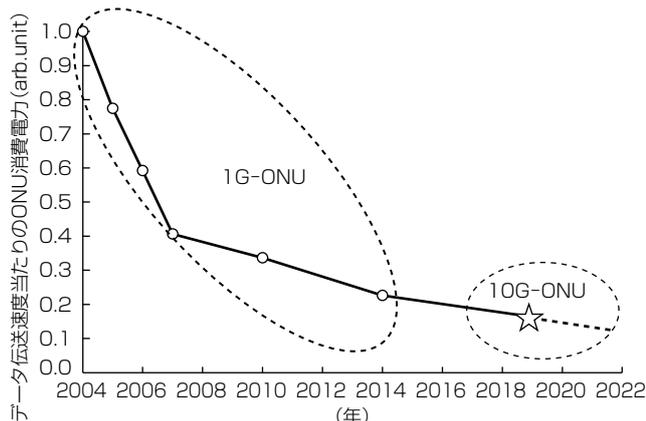


図5. 当社ONUのデータ伝送速度当たりの消費電力の推移

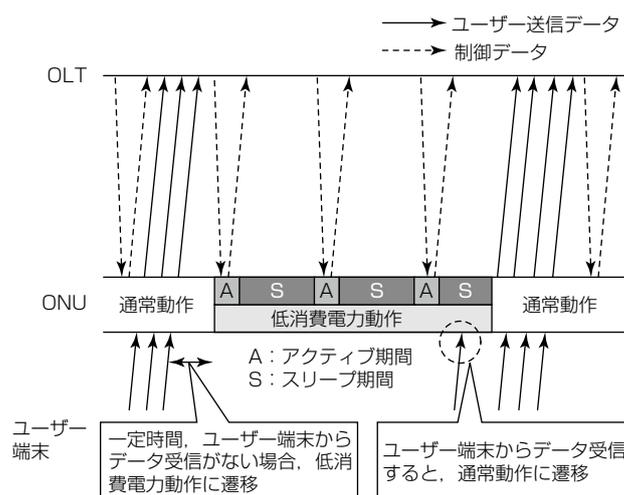


図6. 動的消費電力削減技術の動作

3.5.2 動的消費電力削減技術

10G-ONUの動的消費電力削減技術の動作を図6に示す。データ伝送が必要なとき以外は消費電力を削減する技術として、UNIにはIEEE802.3az(Energy Efficient Ethernet)を、OLT側インタフェースには光送信器を動的にシャットダウンする技術を搭載した。一定時間、ユーザー端末側からデータ受信がない場合、低消費電力動作に遷移し、ユーザー端末側からデータを受信すると通常動作に遷移することで、低消費電力化を実現している。低消費電力動作中は、光送受信器をシャットダウンするスリープ期間と、シャットダウンを解除しOLT-ONU間の制御データの送受信だけ許可するアクティブ期間を周期的に繰り返している。これによって、低消費電力動作中も、OLTからの監視・制御を可能にしている。

3.6 保守運用性改善技術

10G-ONUは、保守運用性を向上するため、フレーム転送の正常性と光送受信器の発光状態、装置内温度を監視する自己監視機能を搭載した。図7に10G-ONUの自己監視機能を示す。

フレーム転送の正常性監視は、フレーム転送に関わる各々の機能ブロックにCRC(Cyclic Redundancy Check)による監視機能を搭載することで実現した。フレーム転送の正常性監視機能を搭載することによって、通信障害発生時の原因特定が容易になる。

光送受信器の正常性監視は、PON制御機能と連携することで実現した。故障等によって光送受信器が連続発光状態になった場合など、OLTから指定された発光タイミングと異なる発光状態(誤発光状態)になったときに、光出力を停止することが可能になり、誤発光による他ONUの通信への影響を回避できる。

また、装置内温度の監視は、基板上に温度センサを搭載

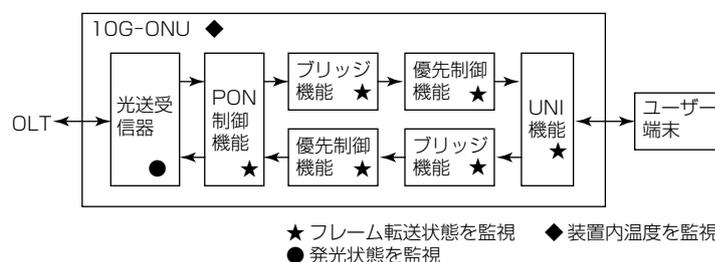


図7. 10G-ONUの自己監視機能

することで実現した。異常発熱時に10G-ONUの動作を停止することで発熱を抑制し、安全性を高めた。

4. む す び

OLTとONU間及びONUとユーザー端末間のデータ伝送速度を最大10Gbpsに高速化した10G-EPON ONUを開発した。昨今、5Gに代表されるモバイルネットワークの広帯域化が進んでおり、10G-EPONを適用したFTTHサービスはそのオフロード回線としてもますます重要性が増してくると想定される。引き続き10G-EPONの普及に貢献していくとともに、これまでの開発で培った光アクセスネットワーク技術や当社が持つ多様な技術を活用して、次世代の光アクセスネットワークシステムの開発を進め、社会の発展に寄与していく。

参考文献

- (1) 総務省：ブロードバンドサービス等の契約数の推移(四半期)(2020)
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010103.xls>
- (2) IEEE Std 802.3-2018 : IEEE Standard for Ethernet (2018)
https://standards.ieee.org/standard/802_3-2018.html
- (3) JEITA : ツイストペア配線 最新規格動向と関連情報 (2011)
- (4) NBASE-T ALLIANCE : NBASE-T Performance and Cabling Guidelines (2016)
https://archive.nbase-t.ethernetalliance.org/wp-content/uploads/2016/08/NBT_CablingWhitePaper_082916.pdf