



非対称 10G-EPON システムの開発

大道文雄*・井上徹*・川西康之
山崎和宏・吉村明展・芝晋吾
神山真一

Development of Asymmetric 10G-EPON System — by Fumio Daido, Toru Inoue, Yasuyuki Kawanishi, Kazuhiro Yamazaki, Akinobu Yoshimura, Shingo Shiba and Shinichi Kouyama — Gigabit Ethernet-passive optical networks (GE-PONs), which were ratified by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.3 committee in 2004, have been widely used for FTTH service in Asia, particularly in Japan. However, five years have passed since the inauguration of its commercial deployments and Internet service providers are not satisfied with the GE-PONs any more for their providing latest broadband applications such as high-definition video distribution. In response to such situation, IEEE802.3 has started to standardize 10G-EPONs, whose transmission rate is ten times faster than conventional GE-PONs, for the next generation FTTH system. Along with standardization activities for 10G-EPONs, the authors have also developed an asymmetric 10G-EPON system and succeeded in demonstrating its technical feasibility.

Keywords: FTTH, 10G-EPON, asymmetric, FEC

1. 緒言

国内のプロードバンドサービス契約者数は、2008年12月末の時点で初めて3000万件を超え、その中でもFiber To The Home (FTTH) サービスは1441万件と、ブロードバンドサービス全体の48%を占めるまでに急成長し⁽¹⁾、今後も契約者数が継続して増加していくと予想されている。

国内のFTTHサービスで主に使用されているのは、IEEE 802.3で2004年6月に標準化されたGigabit Ethernet Passive Optical Network (GE-PON)である。しかしながら、GE-PON導入⁽²⁾から約5年が経過し、FTTHを利用した地上波のデジタル配信や多チャンネルの映像配信がサービス提供されるなど、将来的には1Gb/sであるGE-PONの帯域不足が懸念されている。そこで、より高速な次世代FTTHシステムの登場が期待されている。そのような背景から、IEEE802.3ではGE-PONを10倍高速化した10G-EPONの標準化を2006年3月から開始し、2009年の9月に標準化が完了する予定である⁽³⁾。10G-EPONでは、局装置(OLT)から宅装置(ONU)への下り伝送レートは10Gb/sであるが、宅装置(ONU)から局装置(OLT)への上り伝送レートは、1Gb/sと10Gb/sの2種類がある。上り1Gb/sのシステムが非対称10G-EPON、上り10Gb/sのシステムが対称10G-EPONと呼ばれている。今回、当社では、非対称10G-EPONの試作機を開発し、実機評価を行ったので、試作機の概要、評価結果について報告する。

2. 10G-EPON システム

2-1 要求条件 国内ではGE-PONシステムを使用したFTTHサービスが大規模に展開されている。したがって、10G-EPONシステム導入時に、新たな光アクセス網を

構築するとなると多大な投資と期間が必要となる。そこで、10G-EPONでは現在敷設済みの光アクセス網が利用できることが必要となる。また、GE-PONから10G-EPONへのスムーズな移行パスを実現する必要もあった。具体的には、課題①：既存の光アクセス網の最大線路損失(29dB)をサポートすること、課題②：GE-PONと10G-EPONが既存の同一光アクセス網で共存可能であることが、2つの大きな課題であった。

2-2 標準化 IEEE 802.3avタスクフォースでは、上記10G-EPONへの要求条件を考慮に入れ標準化作業が行われており、2009年3月時点でDraft3.1が発行され技術的にはほぼ確定した状態である。課題①の線路損失29dBを実現するため、非対称用にPRX30、対称用にPR30というPMDクラスが定義された。表1にPRX30下り(10Gb/s)の仕様概略を示す。光送信部の高出力化、光受信部の高感度化、電気デジタル受信回路部の誤り訂正符号(FEC)の3つの要素技術により、最大線路損失条件(29dB)を実現している。GE-PONでは、誤り訂正はオプ

表1 PRX30下り仕様

下りラインレート	10.3125 Gb/s
下り光波長	1575-1580 nm
OLT光送信パワー	+2 ~ +5dBm
消光比	9dB
挿入損失(max)	29dB
TDP(max)	1.5dB
ONU受信感度 @BER=10 ⁻³	-28.5dBm

ション扱いであったが、10G-EPONでは、厳しい線路損失条件を満たすため誤り訂正は必須扱いとなった。また、非対称のPRX30の上り(1Gb/s)に関しては、29dBの線路損失を満たす国内のGE-PONシステムの仕様が反映された。

課題②に関しては、GE-PONとの共存を実現可能とするよう波長配置の検討が行われた。図1にGE-PONと10G-EPONの波長配置を示す。下りは、GE-PON用の波長(1490nm)と、10G-EPON用の波長(1577nm)で異なる波長帯域を使用するWDM方式が採用された。一方、上りに関しては、1Gb/sと10Gb/sの波長帯域はオーバーラップする配置とし、各ONUからの信号をバースト的に時間で多重化するTDM方式が採用された。なお、非対称10G-EPONシステムの場合には、10G-EPONのONUとGE-PONのONUの上り速度は両者とも1Gb/sとなるため、上りはシングルレートでTDM多重されることになる。

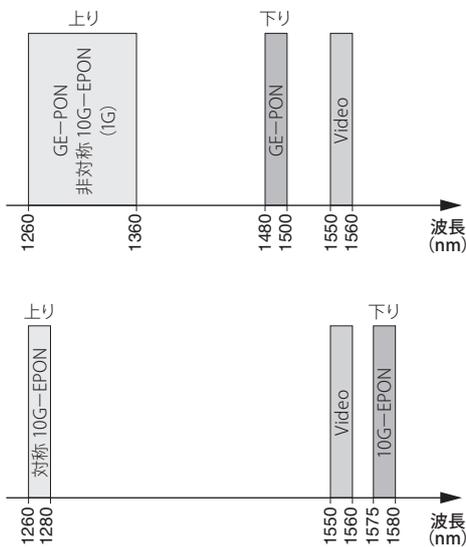


図1 波長配置

3. 非対称10G-EPONシステム試作機

3-1 開発方針 試作機は、光インタフェース部や、デジタル送受信部などを、標準化の議論と並行して開発することで、標準化で採用された要素技術の技術実現性を検証することを主目的として開発を行った。そのため、光インタフェース部は、子基板構成とし、様々な構成がテスト可能となるようにした。また、デジタル回路部は、回路データの書き換えにより回路変更が可能であるField Programmable Gate Array (FPGA) を用いて開発を行った。

また、光アクセス機器のコア技術である光部品については、当社の光デバイスの研究開発部門と連携し、機器と並行して開発を進めることで、試作機の早期検証を可能とした。

表2 非対称機の仕様諸元

PON光インタフェース	PRX30準拠
SNIインタフェース	10G-BASE-LR, 1000BASE-T
管理ポート	RS232C
電源	AC100V 50/60Hz
消費電力	約60W (typical)

(a) OLT

PON光インタフェース	PRX30準拠
UNIインタフェース	1000BASE-T
管理ポート	RX232C
電源	AC100V 50/60Hz
消費電力	約45W (typical)

(b) ONU



(a) OLT

(b) ONU

図2 評価機外観

3-2 仕様緒元 表2に非対称OLTと非対称ONUの仕様緒元、図2にそれぞれの外観を示す。

4. 実機評価

4-1 最大線路損失(29dB)の実現

[10G下り光特性]

上り1Gb/sについては、GE-PONの技術を適用すれば実現可能なため、本稿では下り10G/sでの最大線路損失実現についてのみ述べる。

表3にOLTの光送信特性の1例を示す。また、図3に高出力DFB-EAレーザを内蔵した送信デバイスの外観と光出力波形を示す。

光送信特性は、IEEE802.3avの規格に対して十分なマージンがあることを確認した。また、光出力波形もアイマスクに対して、十分なマージンがあることを確認した。

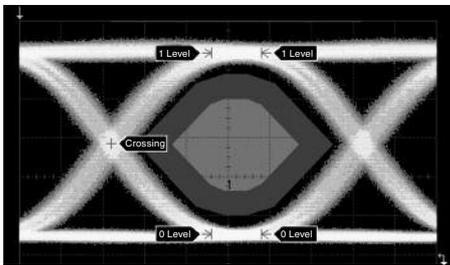
表3 OLT下り送信特性例

波長	1577.6 nm
消光比	10 dB
出力パワー	+4.1 dBm

図4にONUの双方向デバイスの外観を示す。受信素子としては高感度を実現するためAvalanche Photo Diode (APD)を採用した。図5に上記送受信モジュールを使用し、ファイバー長を20Kmとした場合のアイパターンの劣化と誤り特性を示す。20Km伝送時にも、ペナルティーは約0.6dBでありPRX30の標準規格を満足していることを確認した。



(a) 外観



(b) 出力波形 (フィルタあり)

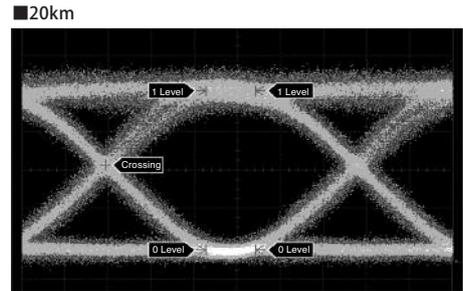
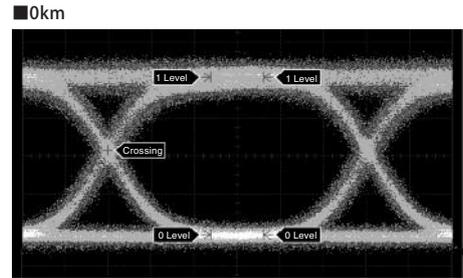
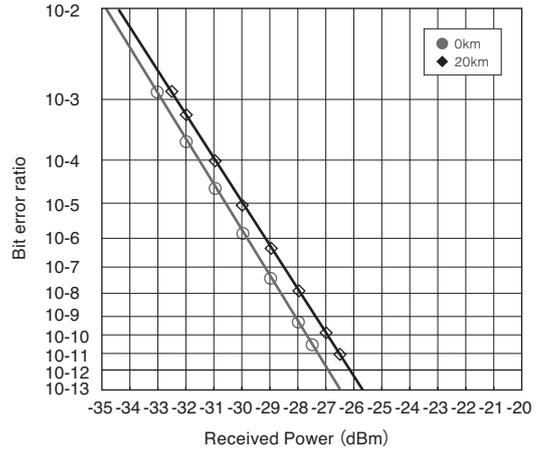
図3 OLT送信デバイス外観と光波形



図4 ONU双方向デバイス外観

[10G下り誤り訂正符号 (FEC)]

GE-PONでは誤り訂正はオプション扱いであったが、10G-EPONでは29dBの線路損失を実現するため必須扱いとなっている。誤り訂正アルゴリズムとしては、リードソロモン (255,223) を使用し、インバウンド方式で誤り訂正用のパリティ分のオーバーヘッドを収容することになった。そのため、MACレイヤーからみた場合、約13%のオーバーヘッドがあり、イーサネットフレームの最大スループットは約8.7Gb/sとなる。



送信波長 1577.6nm
ファイバ分散 354ps/nm@20km

図5 10G下りビット誤り特性

図6に誤り訂正を適用した場合のビット誤り特性を示す。リードソロモン (255,223) の電気符号利得は約7.2dBである。光符号利得は、受信機の光デバイスのノイズ特性に依存する。PIN-PDを使用した場合には、ノイズとして熱雑音が支配的となるため、光符号利得は電気符号利得の半分になる。一方、10G-EPONで使用されるAPDの場合には、ノイズとして熱雑音とショットノイズが混合されるため、光符号利得は電気符号利得の0.7~0.9倍程度となる。ショットノイズが多いほど、光符号利得は、電気符号利得の1.0倍に近づく。図6の例では、光符号利得としては6.4dB程度あり、誤り訂正後の受信感度 (BER = 10⁻¹²) として-31.7dBmを実現していることを確認した。なおビット誤り率 (BER) は、測定に用いたイーサネットフレームのパケットエラー率 (PER) から概算した。イーサ

ネットフレームのフレームビット長をNとすると、PERとBERの関係は式(1)となる。

$$PER = 1 - (1 - BER)^N \dots\dots\dots (1)$$

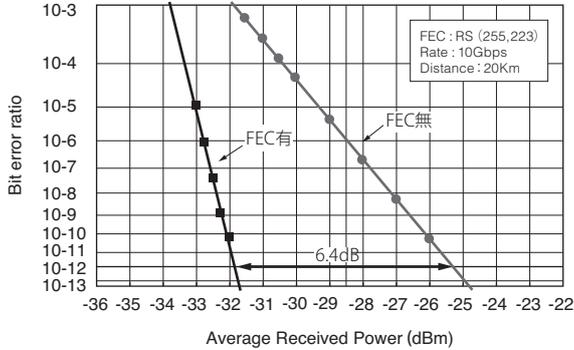


図6 誤り訂正後のビット誤り特性

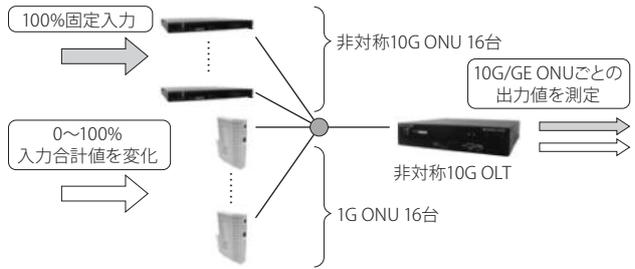


図7 GE-PONとの共存評価環境

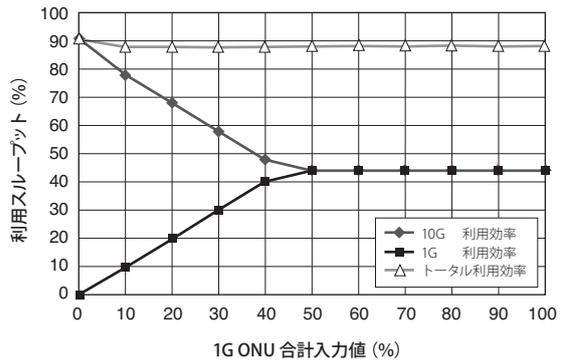


図8 共存時の上り利用効率

[パワーバジェット]

OLT側の光送信パワーは+4.1dBm、ONU側の誤り訂正後の受信感度は-31.7dBmであり、パワーバジェットの1例として約35.8dBを実現可能であることが分かった。PRX30のパワーバジェット要求は30.5dB（最大線路損失：29dB +最大ペナルティ：1.5dB）であり、標準規格に対して、十分なマージンがあることを確認した。

4-2 GE-PONとの共存 非対称10G-EPON ONU（以下、10G ONU）とGE-PON ONU（以下、1G ONU）が共存した場合の上り（ONU→OLT方向）スループットの公平性を評価するため、図7のように同一光アクセス網に、それぞれ16台ずつ接続した評価系でスループット測定を行った。

図8は、10G ONU 16台にフルレートで上にデータ入力している状態で、1G ONU 16台への入力レートを徐々に増加させたときのOLTのサービスノードインタフェース（SNI）からの出力スループットを測定したものである。1G ONUの総トラフィック増加にともない、10G ONUの総トラフィックが減少し、ある地点からスループットが同等となっていることがわかる。この結果から、ONUの種類に関係なく公平な上りスループットが達成できていることがわかる。

図9は、図7の共存評価環境（光ファイバー長：数m）での下りデータの転送遅延時間に関する評価結果である。10Gと1Gの2種類のONUについて、OLTのSNIとして10Gポートと1Gポートを使用した場合の伝送フレーム長に対する遅延変化を測定した。

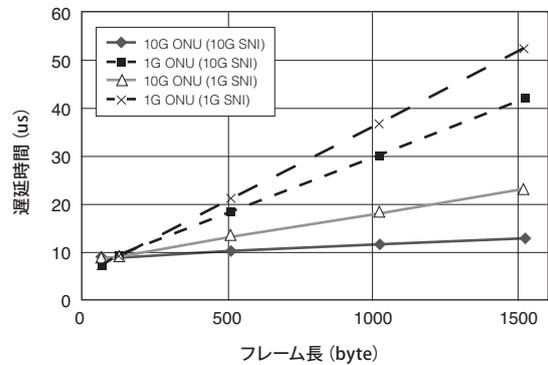


図9 下り伝送遅延時間

評価結果から以下のことが分かる。

- ①誤り訂正を実装している10G ONU（実線）のほうが、誤り訂正を実装していない1G ONU（破線）よりも遅延が小さい。
- ②10G ONUと1G ONUの遅延時間差はフレームサイズが大きくなるほど大きくなる（最大30us）
- ③SNIの速度による遅延時間差よりもPON伝送速度による差が支配的

③は、SNIの速度差はOLTでの受信処理時間にのみ影響するのに対し、PONの速度差はOLTの送信処理時間とONUの受信処理時間の両方に影響するためである。

また、下りのWDM多重に関しても、GE-PON ONUに1550nm以上の光波長をカットするLow Pass Filter (LPF)、10G-EPON ONUに1575nm～1580nmの光波長を透過させるBand Pass Filter (BPF)を用いることで、両ONUが同一光アクセス網上に共存可能であることを確認した。

5. 結 言

10G-EPONの標準ドラフト案に準拠した非対称10G-EPONの局装置(OLT)と宅装置(ONU)の試作機を開発し、要求条件を十分なマージンを持って満たすことが可能であることを実機評価で確認した。

また、10G-EPONとGE-PONとの共存については、実運用に近い数のONUを使用した評価環境を構築し、共存が実現可能であることを実証した。

今後は、各構成部品の低価格化、低消費電力化を進めるとともに、上りの伝送速度を10Gb/sとした対称10G-EPONについても開発を進めていく。

参 考 文 献

- (1) 総務省報道資料、「ブロードバンドサービスの契約者数等(平成20年12月末)」(平成21年3月18日)
- (2) 村田 他、「GE-PONシステムの開発」、SEIテクニカルレビュー、第164号、pp42-47(2004)
- (3) IEEE P802.3av Task Force, "10Gb/s Ethernet Passive Optical Network"
- (4) 大道、「10G-EPONにおける符号化・誤り訂正技術」、電子情報通信学会総合大会、BT-5-4(2009)

執 筆 者

大道 文雄*：情報通信研究所 伝送システム研究部
グループ長
ブロードバンド用アクセス機器の
研究開発に従事



井上 徹*：情報通信研究所 伝送システム研究部
ブロードバンド用アクセス機器の
研究開発に従事



川西 康之：情報通信研究所 伝送システム研究部 主席
山崎 和宏：情報通信研究所 伝送システム研究部 主査
吉村 明展：情報通信研究所 伝送システム研究部
芝 晋吾：情報通信研究所 伝送システム研究部
神山 真一：情報通信研究所 伝送システム研究部

*主執筆者