

5 光パケットスイッチング

5 Optical Packet Switching

5-1 160 Gbit/s/port 光パケットスイッチプロトタイプ及び関連技術の研究開発

5-1 Research and Development of 160 Gbit/s/port Optical Packet Switch Prototype and Related Technologies

和田尚也

WADA Naoya

要旨

フォトニックネットワークノードにおける光パケットの転送処理能力を飛躍的に向上させるために、光符号ラベル処理、光スイッチング、光バッファリング、電子スケジューリング機能を備えた光パケットスイッチ(OPS)プロトタイプの開発を行ってきた。今回、25 Gchip/sの狭帯域光符号ラベルを用いたラベル処理、ノイズ除去機能を有する光バッファを新規に導入し、1 入出力ポート当たり160 Gbit/s/portのポート速度を実現する、OPSプロトタイプを開発した。

また、40 Gbit/s 可変長パケットに対応可能な、新しい、パケットビット誤り率(BER)及びパケット損失の実時間評価方式と評価システムを開発した。これによりパケット間隔やパケット長が時間的に変動するパケットやバースト信号の、ペイロードデータ部のみの実時間評価を可能とした。OPSシステムと今回開発した評価装置を用いることにより、様々な条件下でのパケット BER 及びパケット損失の実時間評価を実験的に検証する。バッファレス 160 Gbit/s 可変長 OPS、光時分割一多重/分離(OTDM-MUX/DEMUX)、そして10 Gbit/s プリアンブルフリー光パケット3R受信機とともに、可変長パケットBER及びパケット損失の実時間評価を実験実証する。

最後に光バッファ機能を持った160 Gbit/s/port OPSプロトタイプとパケット BER 評価システム及び160 Gbit/s と10 Gbit/s 光信号のOTDM-MUX/DEMUXシステムを組み合わせた総合試験を行った。

We have developed optical packet switch (OPS) prototype with optical code label processing, optical switching, optical buffering, and electronic scheduling to improve drastically the switching performance of optical packets in photonic network nodes. 160 Gbit/s/port OPS prototype is developed by introduction of 25 Gchip/s narrow-band optical code label processing and optical buffering with noise reduction function.

A novel packet bit error rate (BER) and loss real-time measurement method and system for 40 Gbit/s variable-length packets has been proposed. In real-time, only the payload data part of packet and burst stream with fluctuated packet interval time and packet length is evaluated. Packet BER and loss real-time measurement with various conditions is experimentally demonstrated by using proposed measurement system and OPS system. Packet BER and loss real-time measurement with 160 Gbit/s variable-length OPS, OTDM-MUX/DEMUX, and preamble free 10 Gbit/s optical packet 3R receiving are experimentally demonstrated.

Finally, total demonstration by using 160 Gbit/s/port OPS prototype with optical buffer, packet BER evaluation system, and 160 Gbit/s to 10 Gbit/s OTDM-MUX/DEMUX system is reported.

[キーワード]

フォトニックネットワーク, 光パケットスイッチング, 狭帯域光符号ラベル処理, 光バッファリング, 160 Gbit/s/port 光パケットスイッチプロトタイプ, 可変長光パケット, パケット BER 評価, パケットロス評価, 光パケット受信機

Photonic network, Optical packet switching, Narrow-band optical code label processing, Optical buffering, 160 Gbit/s/port optical packet switch prototype, Variable-length optical packet, Packet BER evaluation, Packet-loss evaluation, Optical packet receiver

1 はじめに

近年、数多くの光パケットスイッチ (OPS) システムが開発されている。これは、このシステムが、高いスケーラビリティ、微細粒度、超高速ホッピングという大きな利点を有していることによる [1]–[5]。昨年、我々は、160 から 20 Gbit/s までの多重チャネルレート OPS システムのための、狭帯域光コード (OC) ラベル処理を提案した [6]。50 km を超える伝送における 160 Gbit/s×2 WDM 固定長光パケットスイッチングを、我々が提案した技法に基づいて、実験的に検証しているが [6]、光バッファとスケジューラによる光パケットの衝突回避等の機能を持つプロトタイプレベルでの総合動作実証には至っていなかった。

一方で、パケットビット誤り率 (BER) 及び損失の実時間評価も、OPS ネットワークにとって、非常に重要な課題である。我々は、光パケット冒頭の捨てビットであるプリアンブルが不要の 10 Gbit/s 光パケット 3R 受信機 [8] を用いて、パケット BER 及び損失の実時間測定システムを提案し、実験的検証を行った [7]。このシステムは、パケット間のインターバルタイムが時々刻々変化する、パケット及びバーストストリムのペイロードデータ部のみを評価することはできるが、ペイロードデータ部自体が可変長のパケットストリームには用いることができないという問題が残されていた。

本論文では、まず新しい 40 Gbit/s 可変長パケット評価システムを提案する。本システムでは、可変長非同期到着ランダムパケットについて、BER 及び損失の実時間測定を行うことができる。狭帯域 OC ラベル処理による 160 Gbit/s OTDM 可変長ランダムパケットの生成及びラベルスイッチングを実験的に検証する。そして同時に OTDM 多重分離と光パケット 3R 受信機との組合

せによる可変長パケットの BER 及び損失の実時間測定をデモンストレーションし、本提案方式の有効性を示す。

続いて、狭帯域 OC ラベル処理、光スイッチング、光バッファリング、電子スケジューリング、OTDM-MUX/DEMUX、パケット BER 及び損失の実時間測定の技術に基づいて、160 Gbit/s /port 光パケットスイッチの総合動作試作を行い、超高速 OPS システムの実現可能性を示す。

2 40 Gbit/s 可変長パケット実時間評価システム

パケット BER とパケット損失の実時間測定は、OPS ネットワークの開発において非常に重要な課題となっている。図 1 (a) に示されるように、パケット状のデータであっても、単なる伝送システムであれば、通常の連続系用 BER 評価装置を用いて、BER の評価が可能である。しかし、パケットスイッチングにより一部のパケットが抜けたり逆にマージされる場合 (図 1 (b))、バッファリングによりパケット間隔が動的に変動する場合 (図 1 (c))、さらにはルーティングによりパケットの順番が入れ替わってしまうような場合 (図 1 (d)) には、もはや通常の連続系用 BER 評価装置では評価が不可能になる。また、パケットロスの実時間測定も不可能である。

図 2 に、40 Gbit/s 可変長パケット BER とパケ

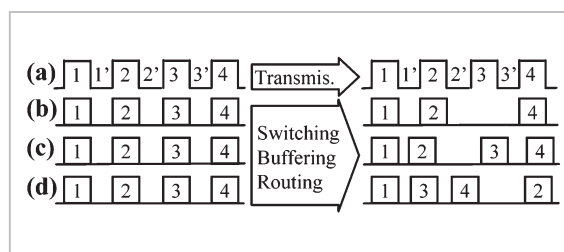


図 1 パケットデータ列が受ける変化の例

ット損失リアルタイム測定装置のブロック図を示す。光パケット 3R レシーバ[8]により E/O 変換されたパケットデータは DEMUX され、測定システムに入力される。このシステムは、パターンエディタ及びエラー分析ソフトウェア、そして、可変長パケットエラー評価部から構成されている。このエラー評価部は、五つのセクション(フレーム検知、リアラインメント、シーケンス及びペイロード長検知並びにリファレンスパターン及び BER とパケット損失カウント)と CPU から構成されている。エラー評価部での測定結果は CPU へ出力され、PC により処理され表示される。

本システムの特徴は、エラー評価部の 5 機能がすべて FPGA によりハードウェアとして実装されていることにある。そのため、ソフトウェアを用いたシステムと比較して非常に高速の処理が可能であり、40 Gbit/s の光パケットデータ入力まで、実時間計測を可能としている。

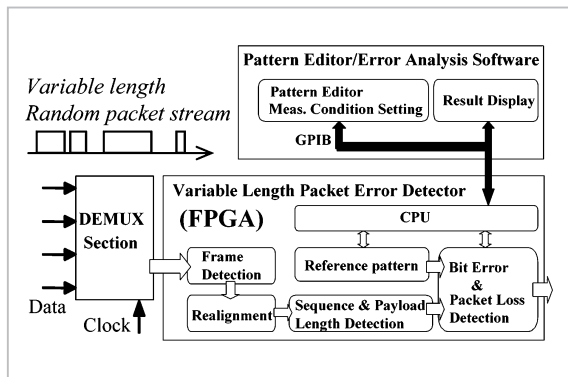


図2 40 Gbit/s パケット BER& 損失実時間評価装置ブロック図

図 3 (a) は FPGA のブロック図を示している。このエラー評価部は、総容量 40 Gbit/s までのデータをリアルタイム測定する処理を行うことができる。パケットシーケンスが変更された場合の測定を可能にするため、内部パラレル処理とエラー検知が各パケットに対して実行される。フレームが検知されたデータは、リアラインメントセクション A と B により正しい DEMUX シーケンスでアラインされる。シーケンス情報(Packet number (パケット番号)と Payload length (ペイロード長))は、リアラインされたパケットデータから検知される。可変長ペイロードデータは、探知された Payload length (ペイロード長)情報によりコントロールされた可変長ゲートパルスにより、(リアラインされた)入力データから切り出される。この検知された Packet number (パケット番号)に対応するペイロードデータは、RAM から読み込まれ、BER 検知セクションで切り出された可変長ペイロードデータと比較される。パケット損失は、検知できるパケットと探知できないパケットの間での閾値評価により測定される[7]。図 3 (b) に開発した、可変長パケット実時間評価システムの外観を示す。

図 4 (a) にプリアンプル不要の 10 Gbit/s 光パケット 3R 受信機プロトタイプ構成を、図 4 (b) にその外観を示す[8]。本受信機は UTC-PD、D-FF、EX-NOR、位相シフタ、低ジッタゲイテッド VCO を基本要素とする構成を有する。インターネットの平均パケット長である 500 バイトの 10 Gbit/s パケットデータの場合、パケット間イン

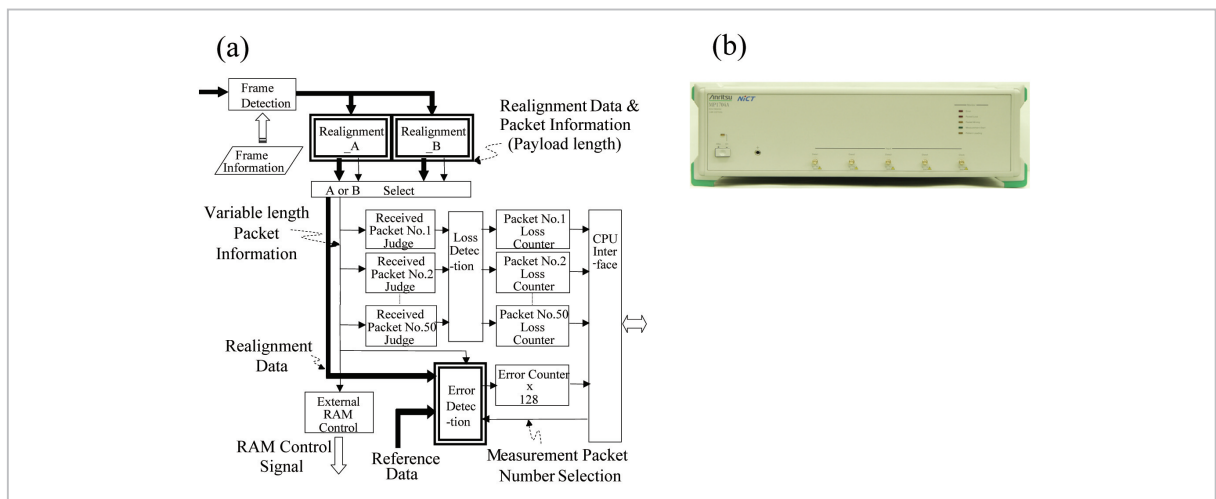


図3 40 Gbit/s パケット BER& 損失実時間評価装置における FPGA 構成と評価装置外観

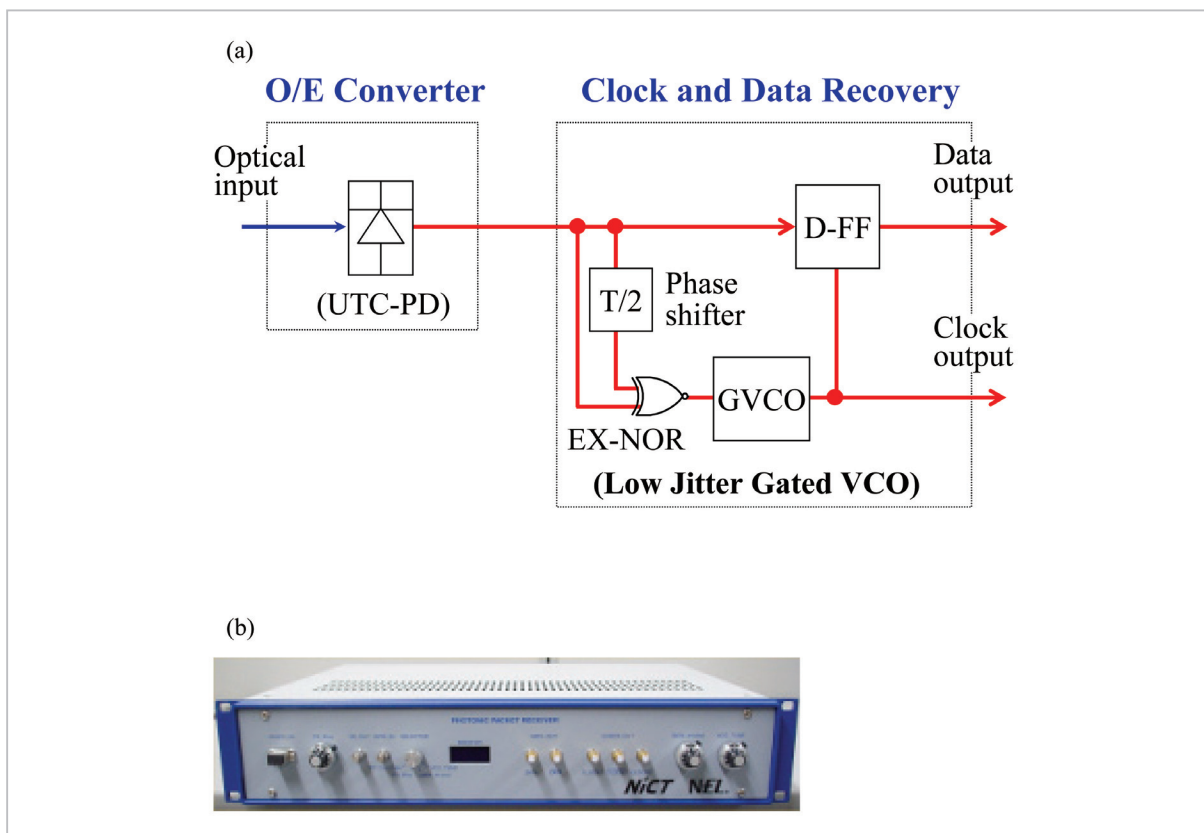


図4 10 Gbit/s パケット受信機プロトタイプ構成及び外観

ターバル時間が数十ビットから数万ビットまでランダムに変化しても、100 ps 以内の時間でクロックの再生が行える機能を有する [8]。

3 160 Gbit/s/port 可変長 OPS 実験

図 5 は、実験系のブロック図である。狭帯域 OC ラベル処理を用いた、160 Gbit/s/port 可変長光パケットスイッチングにおける、パケット BER とパケット損失の実時間評価実験系を示している。この系は、パケットパルスパターンジェネレータ (PPG)、光パケットトランスミッタ、10-160 Gbit/s OTDM マルチプレクサ、狭帯域 OC ラベルプロセッサ、可変長光スイッチ、160-10 Gbit/s OTDM デマルチプレクサ、光パケット 3R レシーバ、そして、可変長パケットエラー評価装置から構成されている。

図 6 に示すように、パケットラベルの解析は、OC を用いて時間領域において平行光相関演算に基づいて行われる。一組の光相関器はラベル

バンクとして機能し、ルーティングテーブルにおいて送信先ノードに対応するラベルを記録する。光相関器は、コードが一致した場合は高強度自己相関 (AC) 信号を、そうでない場合は低強度相互相関 (XC) 信号を出力する。ペイロードは時間領域に拡散されてしまう。結果として、ラベルの認識は、強度に閾値を設定することで行うことができる。しかし、ペイロードのビットレート (160 Gbit/s) が OC のチップレートに非常に近い場合、ペイロードのスペクトル帯域は OC のものとほとんど重なり合う (図 7 を参照)。この場合、時間領

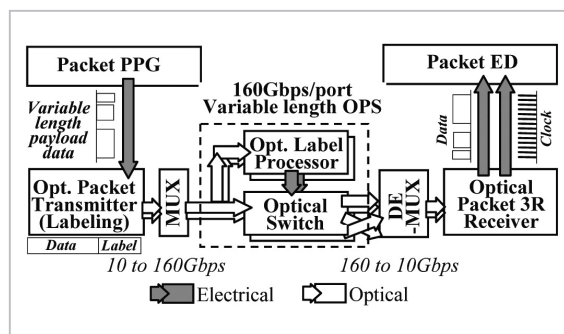


図5 160 Gbit/s/port 可変長 OPS 実験系

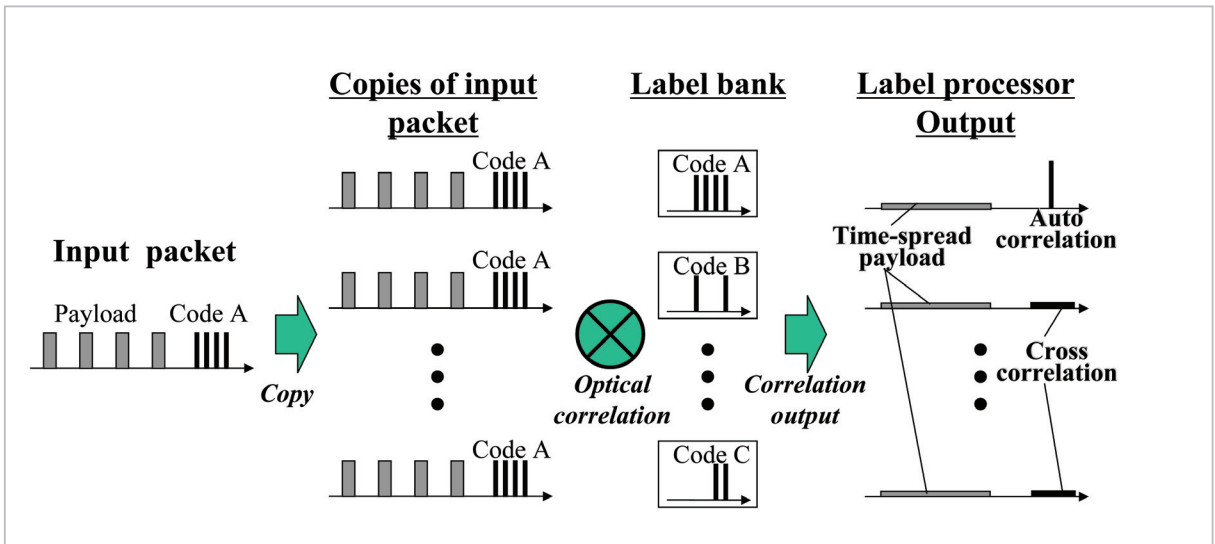


図6 全光パラレルラベル処理の原理

域に拡散されたペイロードデータの強度が XC 信号のものよりも大きくなる場合が出てくる。したがって、このような場合、閾値の-margin が小さくなってしまふという問題があった。AC 信号と時間領域に広がるペイロードとの強度比を改善するために、我々はスペクトル帯域幅がもっと狭い OC を用いる [6]。OC パルスの中心波長は、その波長チャンネル内において、ペイロードパルスのものからずらすことができるので、相関処理によるマッチトフィルタリング及びスペクトルフィルタリングにより、拡散されたペイロードデータ成分を排除し OC 成分のみを抽出し、閾値処理にお

いて高い識別度を実現することができる。

図 8 (a) は、異なるラベル“A”と“B”を有する可変長 160 Gbit/s パケットを示している。図 8(b) は、生成されたパケットのヘッダ部である。これは、L : Optical label (光ラベル)、P : Preamble (プリアンブル)、F : Frame pattern (フレームパターン)、S : Sequence information (シーケンス情報) [Reference pattern (パターン情報)、Packet number (パケット番号)、Pattern length (パターン長)]、D : Payload data (ペイロードデータ) から構成されている。図 8(c) は 160 Gbit / ペイロードデータを光サンプリングオシロスコープで測定

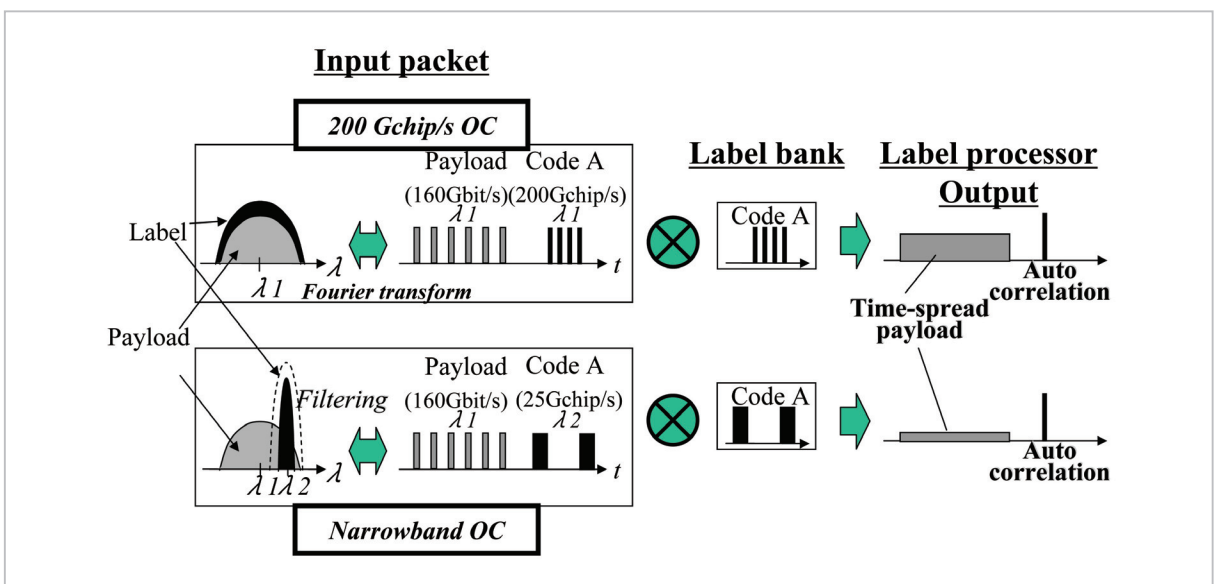


図7 狭帯域光ラベル処理の原理

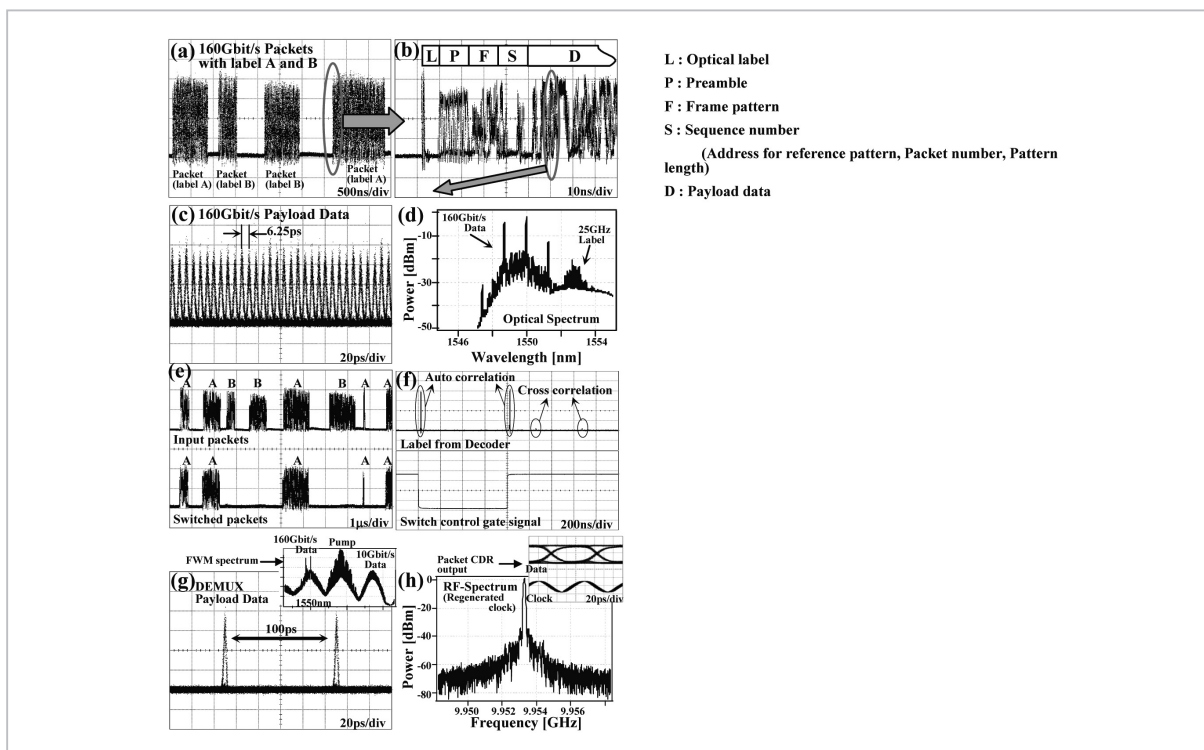


図8 160 Gbit/s/port 可変長 OPS 実験結果 (1)

したアイダイアグラムである。

図 8 (d) は 160 Gbit/s データと狭帯域 (25 Gbit/s) BPSK 光ラベルのスペクトルである。図 8 (e) は、(上部) 光スイッチへの 160 Gbit/s 入力光パケット、そして、(下部) そのスイッチからの出力パケットを表している。この結果は、160 Gbit/s/port 可変長 OPS の良好な動作を示している。図 8 (f) は (上部) 光ラベルプロセッサ出力 (一致したラベルと一致しないラベルの各場合) そして、(下部) 生成されたスイッチコントロールのためのゲート信号を示している。図 8 (g) は、高非線形ファイバによる 4 光波混合を用いた DEMUX 時のスペクトルと、DEMUX された 10 Gbit/s ペイロードデータである。図 8 (h) は、光パケット 3R 受信機により再生されたクロックとデータのアイパターンと、再生クロックの RF スペクトルである。

図 9 (a) と (b) は、測定されたパケットの BER とパケット損失をそれぞれ示す。これらの結果は、超高速可変長 OPS とその実時間特性評価を実証している。

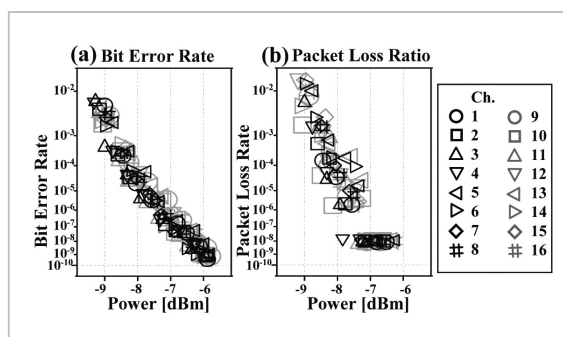


図9 160 Gbit/s/port 可変長 OPS 実験結果 (2)

4 160 Gbit/s/port OPS プロトタイプ

図 10 (a) と (b) は、160 Gbit/s/port OPS プロトタイプのアーキテクチャと外観を示したものである。狭帯域ラベル処理において最も適切なパケット出力ポートを、ラベルの分析により決定する。ラベルプロセッサは光スイッチを制御し、パケット着信情報を電子スケジューラに渡す。スケジューラは光バッファを制御し、パケットの衝突を回避する。光バッファは必要な時間だけパケットを保存する。光バッファでは、光パケットがそ

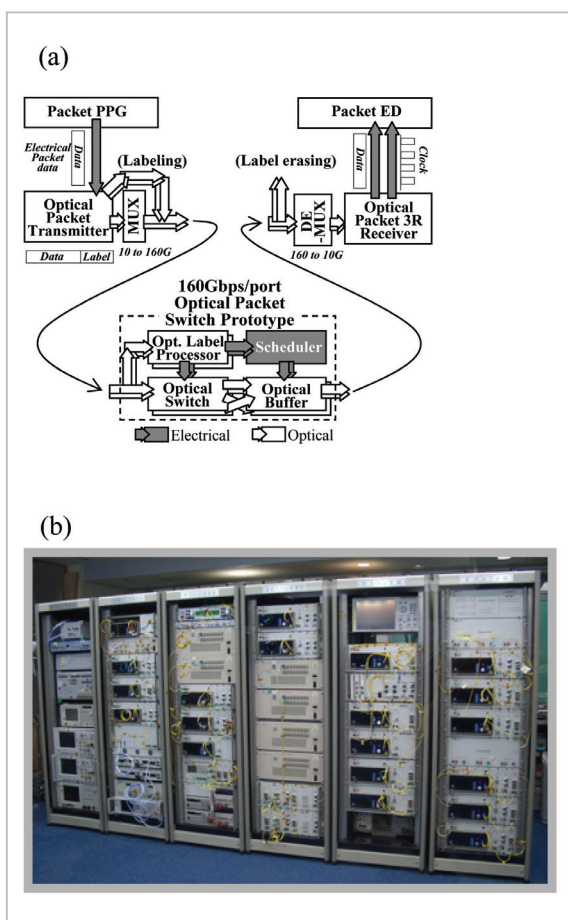


図10 160 Gbit/s/port 入出力インタフェースを有する OPS プロトタイプを用いた総合試験システムブロック図と外観

それぞれ異なる長さの光ファイバ遅延線 (FDL) にスイッチされる。そして、スイッチされたパケットは必要な時間だけ保存され、再度マージされ出力ポートより出力される。しかしながら、バッファで用いる光スイッチの消光比が不十分であるので、スイッチされたパケット間の干渉及び残存ノイズ成分により、マージされたパケットの S/N 比の低減が引き起こされる。このため、我々は、追加のゲートスイッチを用いて、光バッファの各 FDL において残存ノイズ成分を除去する方式を採用した。

我々は、この実験において、バッファのアーキテクチャを単純化するために、パケットは固定長を持つと仮定する。一つのパケットの継続時間は 512 ns である。光増幅器を用いて、すべての成分の挿入損失を補正した。トランスミッタにおいて、中心波長 1550.0 nm でパルス幅 1.9 ps を持つ 10

GHz モードロックレーザーダイオード (MLLD) をペイロードデータ生成用光源として用いた。狭帯域 OC を用いるために、符号生成用光源のパルス幅はそれぞれ 1552.8 nm において 4.0 ps とした。LiNbO₃ 強度変調器 1 (LN-IM 1) が、これらのパルスの繰り返し周期をパケット生成周期にまで低減した後、25 Gchip/s のチップレートを持つ 16 チップ 2 値移相変調 (BPSK) のラベル A 及び B を、光平面導波路 (PLC) エンコーダ 1 及び 2 によりそれぞれ生成した。10 Gbit/s から 160 Gbit/s への OTDM 用 MUX において、LN-IM 2 が生成する 10 Gbit/s ペイロードを 61440 ビットの 160 Gbit/s ペイロードに多重化した。同じラベルをペイロードの前方部分 (光スイッチオープン用ラベル) 及び後方部分 (光スイッチクローズ用ラベル) に追加した。そして、ラベル A 及び B を持つ光パケットを複製し、OPS プロトタイプが有する複数の入力ポートへの入力光パケット列とした (図 10、図 11 (a) を参照)。

ラベルの処理において、ペイロードデータ成分をマッチトフィルタリング及びスペクトルフィルタリングにより除去するとともに、ラベル成分のマッチトフィルタリングを実行する。我々はこの実験において、ラベルプロセッサ 1 及び 2 を設置し、ラベル A のみを認識した。図 11 (b) は、プロセッサ 1 において、AC 信号 (一致した場合)、XC 信号 (一致しなかった場合)、時間領域に広がるペイロードを示したものである。ラベル A を認識することができ、時間領域に広がるペイロードは十分に抑制されていることが確認できる。そして、1×2 光カプラ及び LiNbO₃ ゲートスイッチから構成される光スイッチの開閉を行うために、ゲート信号生成器 (GSG) から電気信号を出力した。図 11 (C) は、ラベル A を持つ光パケットに対するスイッチングの様子を示したものである。

光バッファは 1×2 LiNbO₃ スイッチ (LN-SW) 及び異なる長さを持つ複数の FDL からなる。バッファサイズ (最大遅延) は 2 パケット (1024 ns) である。我々は本実験において、一本の FDL に二つの LN-SW を設置した。第二のスイッチはノイズ成分を除去し、高い消光比を実現するために用いられる。バッファにおける二重スイッチによる残存ノイズ成分の抑制効果を図 11 (d) に示す。制御信号を光バッファ 1 及び 2 の LN-SW に渡す

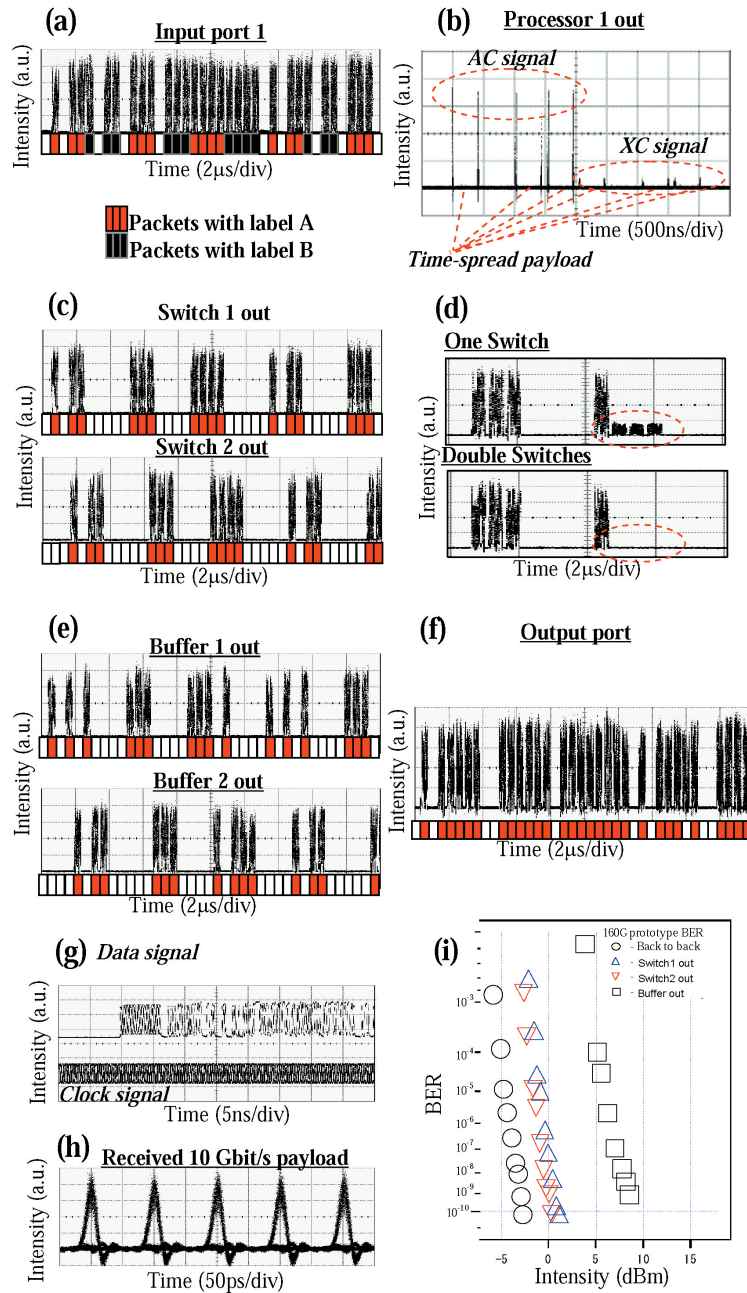


図 11 160 Gbit/s/port 入出力インタフェースを有する OPS プロトタイプを用いた総合試験結果

ことでパケットの衝突を回避する [4]。FPGA ベースの電子スケジューラは、ラベルプロセッサからパケット到着のタイミング情報を受け取り、スケジューリングの計算を開始する。バッファリングされたパケットは再びマージされる。図 11 (e)、11 (f) はそれぞれ、バッファリングされた光パケット及びマージされた光パケットを示したものである。受信機において、高非線形ファイバによる

FWM を利用した OTDM 用 DEMUX システムを用いて、160 Gbit/s ペイロードを 10 Gbit/s に DEMUX した。そして、10 Gbit/s ペイロードの BER 及びパケット損失率を、光パケット 3R 受信機及び実時間パケット BER 測定装置を組み合わせた評価システムにより測定した。パケット受信機は実時間でランダムパケットストリームを測定する。図 11 (g) は、パケット 3R 受信機にて再生

されたパケットデータ及びクロック信号を示したものである。ランダムにかつバースト的に受信されるパケットデータからクロックが安定して再現されていることが確認された。図 11 (h) は、受信された 10 Gbit/s ペイロードデータの Eye パターンである。図 11 (i) は、送信側、スイッチング直後及びバッファリング直後において測定した BER である。Eye が明らかに開いており、測定した BER は 10^{-10} 未満である。これらの結果により、超高速光パケットスイッチングの性能が実証された。

5 結論

我々は、新しい 40 Gbit/s 可変長パケット評価システムを提案した。本システムでは、可変長非同期着信ランダムパケットの BER 及び損失の実時間測定を行うことができる。狭帯域 OC ラベル処理による 160 Gbit/s OTDM 可変長ランダムパケットの生成及びスイッチングを実験的に検証した。また、OTDM-DEMUX システムと組み合わせることにより、可変長パケットの BER 及び損失の実時間測定も実験的に検証した。光ラベル処理、光スイッチング、光バッファリング、電子スケジューリング、光 MUX/DEMUX、パケット BER 及び損失の実時間測定のすべての機能を備えた、160 Gbit/s/port OPS プロトタイプの試作を行い、超高速 OPS システムの総合実証実験を行い、本方式の有効性と安定動作を示すことができた。

このような最先端のフォトニックネットワーク技術を、実験室のベンチトップデモンストレーシ

ョンのレベルを超えて、より完成度の高いプロトタイプを開発し実証試験することは重要な意義を持つ。これらのプロトタイプ実証試験では、最先端技術の有効性を確認するとともに、総合システムとしての問題点や課題などの早期抽出を可能とし、フォトニックネットワークの早期実現を加速するものである。

また、本研究開発の過程において、企業の協力を得て開発された、40 Gbit/s 可変長パケット BER 及び損失実時間評価装置 (アンリツ株式会社と協力) と光パケット 3R 受信機 (NTT エレクトロニクス株式会社と協力) はそれぞれの企業から市販されており、フォトニックネットワークの早期実現に資することを期待する。

謝辞

本論分の執筆に当たり、共同研究者であり有益な議論をしていただいた、情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループの古川英昭氏、王旭氏、原井洋明氏、宮崎哲弥氏、情報通信部門の久保田文人氏に感謝する。また、実験において多大なご協力を頂いた、情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループの羽入朋子氏、牧野健氏、住本浩之氏、富山吉広氏に感謝する。

さらに、共同研究において有益な議論をしていただいた大阪大学大学院の北山研一氏、実験システムの開発においてご協力いただいた、アンリツ株式会社の藤沼一弘氏、和田健氏、NTT エレクトロニクス株式会社の飯塚初史氏、藤沼弘志氏に感謝する。

参考文献

- 1 D.J.Blumenthal, A.Carena, L.Rau, V.Curri, and S.Humphries, "All-optical label swapping with wavelength conversion for WDM-IP networks with subcarrier multiplexed addressing", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, No.11, pp.1497-1499, Nov. 1999.
- 2 K.Kitayama and N.Wada, "Photonic IP routing", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, No.12, pp. 1689-1691, Dec. 1999.
- 3 Yoo, S.J.B.; Fei Xue; Bansal, Y.; Taylor, J.; Zhong Pan; Jing Cao; Minyong Jeon; Nady, T.; Goncher, G.; Boyer, K.; Okamoto, K.; Kamei, S.; and Akella, V., "High-performance optical-label switching packet routers and smart edge routers for the next-generation Internet", IEEE Select. Area Comm., Vol.21, No.7, pp.1041-1051, 2003.
- 4 N.Wada, H.Harai, and F.Kubota, "Optical packet switching network based on ultra-fast optical code label processing", IEICE Trans. Electron., Vol.E87-C, No.7, pp.1090-1096, July 2004.
- 5 D.Klonidis, R.Nejabati, C.Politi, and M.O'Mahony, D. Simeonidou, "Demonstration of a fully functional and controlled asynchronous optical packet switch at 40Gb/s", Tech. Dig., ECOC2004, No. PDP-Th4.5.5, 2004.
- 6 Y.Awaji, N.Wada, and F.Kubota, "160G to 20Gb/s Multi-channel rate x2 WDM optical packet switching based on narrowband OC label processing", 30th European Conference on Optical Communication (ECOC 2004), Vol.4, No.We3.5.1, pp.430-431, Sep. 2004.
- 7 N.Wada, K.Fujinuma, T.Wada, H.Iiduka, and F.Kubota, "Pure packet BER and loss real-time measurement with optical label switching and preamble free optical packet 3R (Postdeadline paper)", 30th European Conference on Optical Communication (ECOC 2004), Vol.Post-deadline, No.Th4.5.4, pp.58-59, Sep. 2004.
- 8 N.Wada, H.Iiduka, and F.Kubota, "Preamble Free 10Gbit/s Optical Packet 3R Receiver", 30th European Conference on Optical Communication (ECOC 2004), No. Tu1.5.5, 2004.



和田尚也

新世代ネットワーク研究センター超高速フォトニックネットワークグループ
研究マネージャー(旧情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員) 博士(工学)
フォトニックネットワーク