

## 5-4 超高速光処理技術とそのフォトニックネットワークへの応用

### 5-4 *Ultra-fast Optical Processing Technology and its Application to Photonic Network*

和田尚也 久保田文人  
WADA Naoya and KUBOTA Fumito

#### 要旨

超高速の全光ラベル処理方式を提案し、実験実証する。その方式を使うことでラベル処理能力が大幅に向上する。光処理技術の応用事例として、光パケットスイッチ (OPS) ノードを用いた OPS システム及びネットワークについて述べる。全光ラベル処理装置、光スイッチ、光バッファ及び電子スケジューラを備え、ポート当たり 40Gbit/s という速度を初めて実現する OPS プロトタイプについて説明する。また、OPS ネットワークの実現可能性について実験実証する。

Ultra-high speed all-optical label processing methods are proposed and experimentally demonstrated. These methods dramatically increase the label processing capability. Optical packet switch (OPS) systems and networks based on OPS nodes are expressed as an application of optical processing technologies. First 40Gbit/s/port OPS prototype with all-optical label processor, optical switch, optical buffer, and electronic scheduler is expressed. The feasibility of OPS networks is verified by experimental demonstrations.

#### [キーワード]

ネットワーク, 光通信, 光ラベル処理, 光パケットスイッチング, プロトタイプ  
Networks, Optical communications, Optical label processing, Optical packet switching, Prototype

### 1 はじめに

次世代光ネットワークは、広帯域(ブロードバンド)性能に加えて高い拡張性と細かいデータ粒度が強求められる。広帯域データ伝送は波長分割多重(WDM: wavelength division multiplexing)技術によって実現された[1]。しかし、WDMによる回線ネットワークは粒度が粗い。IP (Internet protocol)/GMPLS (generalized multi-protocol label switching) over WDMを採用すれば粒度は細くなるが[2]、ヘッダー分析のために行われるIPルータでのメモリアクセスなどの電子処理が低速であるため、ネットワークのボトルネックとなる。広帯域フォトニックネットワークに必要な高速処理を実現するには、光処理技術が必要となる。我々は、ヘッダー分析やラベルスワップといった光ラベル(=符号)処理

を行う光パケットスイッチング(OPS: optical packet switching)ネットワークを提案し、実験実証した[3][4]。光処理方式を採用するOPSネットワークは、高い拡張性、細かい粒度及び超高速ホッピングを実現する。光技術は未成熟であるにもかかわらず、その大きなメリットによって最近では多くのOPSシステムが研究されている[5]-[8]。我々は光スイッチ、光バッファ及び電子スケジューラを備えた40Gbit/sインタフェースの全光ラベル処理式OPSプロトタイプを先ごろ開発した[8]。これは超高速機能を備えた初めてのOPSプロトタイプであり、アドレステーブルの光ルックアップやトランスペアレントな光バッファリングなどの機能を備えている。

光パケットはヘッダーとペイロードデータから成る。ヘッダーにはあて先ノードを示す光符号型ラベル(optical code-based label)[3][4][8]-[10]

[12]がある。ラベル処理装置ではパケットヘッダのラベル分析がすべて光学的に行われる。全光ラベル処理方式の概要を図1に示す。我々が開発したラベル処理方法は次の3種類である。

- (a)平面光導波路(PLC : planar lightwave circuit) から成る相関器で、2値位相変調 (BPSK : binary phase shift keying) 符号ラベルを扱うもの[3][8]。
- (b)マルチセクションファイバ回折格子 (FBG : fiber Bragg grating) をから成る相関器で、多波長ラベルを扱うもの[4]。
- (c)強度変調 (OOK : on-off keying) ラベル又は BPSK ラベルを扱うホログラフィック多重相関器[9][10][12]。

(a)方式と(b)方式では一群の光相関器がルーティングテーブルの機能を果たし、あて先アドレスに相当する光ラベルをルーティングテーブルに保持する。ラベル認識は、ある入力光ラベルとルーティングテーブル内に存在するラベルとを時間領域や周波数領域で光並列相関処理することによって行われる。(c)方式では、入力ラベル用の多重相関器として角度多重ホログラム (AMSH : angular multiplexed spectral hologram) を使用する。AMSHはあて先アドレスに相当する光ラベルを多数保持し、入力ラベルに

応じた角度で相関信号を出力する。

## 2 光符号を用いたラベル処理とスイッチング

### 2.1 ネットワーク構成とパケットフォーマット

図2(a)に、我々が提案するフォトニックネットワークの構成を示す。ネットワークは、エッジノード、光クロスコネクタ (OXC : optical cross connect) 及び OPS ノードで構成される。エッジノードは、アクセス網又はユーザ宅内に設置されるローカルルータに接続される。OPS ノードは、バックボーンルータとしてフォトニックネットワーク内に設置される。これらのパケットスイッチは、コア網内の OXC を介して互いに通信することができる。パケットを一つずつ扱う電子処理は行われない。そのため転送遅延が最小限に抑えられ、高いスループットのノードが可能になる。図2(b)は本稿提案のパケットフォーマットである。パケットはヘッダーとペイロードデータで構成される。我々は、あて先ノードアドレスの情報が入ったパケットヘッダーとして、200Gchip/s、8チップのBPSK光符号ラベルを使用する。システム内では可変速度のバーストデータも許容される。これは、データ

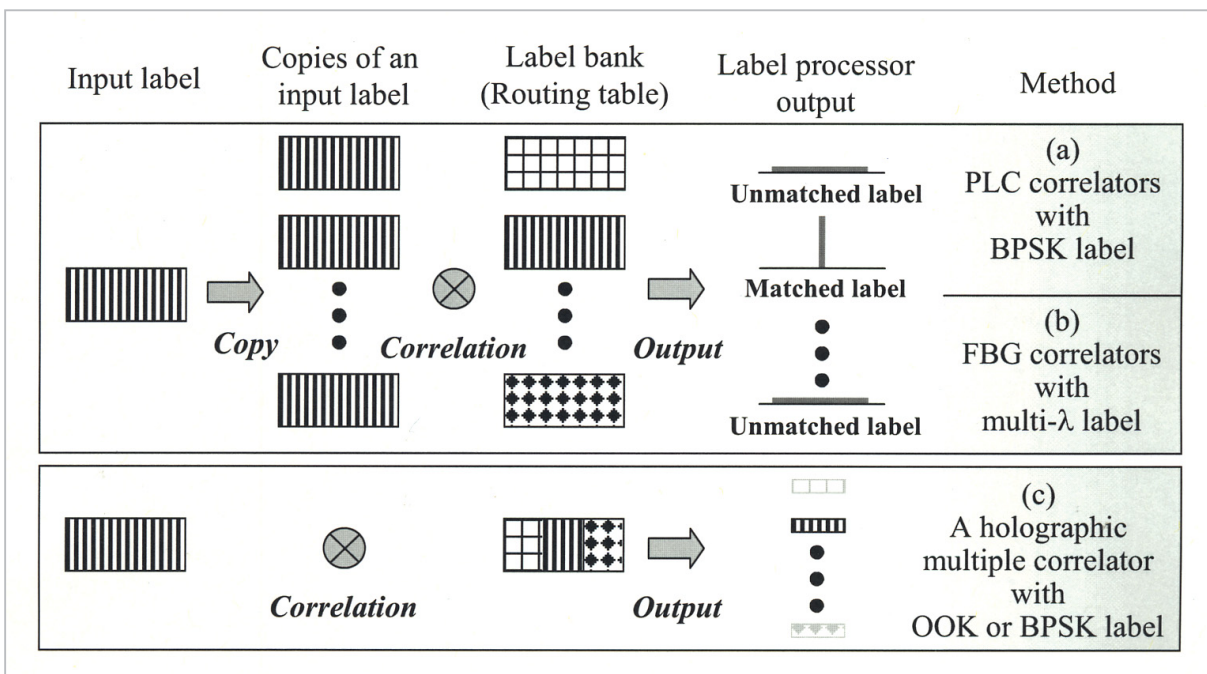


図1 全光ラベル処理方式

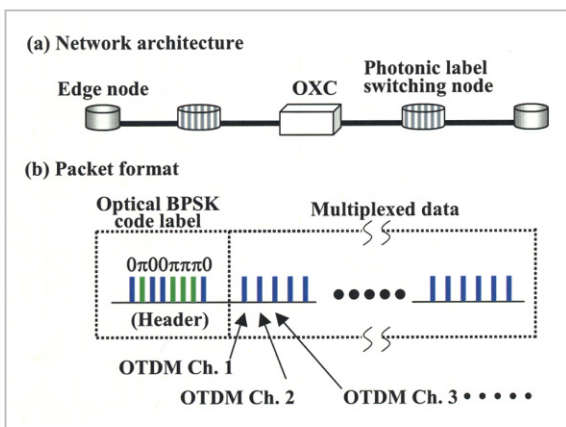


図2 (a) ネットワーク構成、(b) パケットフォーマット

の光電変換が不要であることによる。また、高速データを生成するため、電気時分割多重 (ETDM: electric time domain multiplexing) 又は光時分割多重 (OTDM: optical time domain multiplexing) の技術を導入する。ラベルのチップレートは、どのようなデータレートであっても変更されることはない。OPS ネットワークに上記の時分割多重技術を使用することは、短いパケットの生成やネットワーク拡張性の向上の面で有用である。

## 2.2 ラベル認識とパケットスイッチング

2.1 で述べたように、光パケットはヘッダーとデータで構成される (図2 (b) 参照)。ヘッダーに

は光符号で表したあて先ノードのラベルが置かれる。OPS ノードにおいて、光パケットは単純に二つの部分に分割される。ラベル処理部では光ラベル処理装置がパケットヘッダーを光学的に分析する。全光ラベル認識方式を図3に示す。光ラベル処理装置の中では一群の光相関器がルーティングテーブルとして機能し、あて先アドレスに相当する光ラベルをルーティングテーブルに保存する。ラベル認識は、ある入力光ラベルとルーティングテーブル内に存在するラベルとを時間領域で光並列相関処理することによって行われる。各相関器は各パケットヘッダーの入力ラベルをデコードして信号を出力する。その信号は、符号の一致・不一致に応じてそれぞれ高い値又は低い値をとる。高い値の信号はあて先ポートのゲートスイッチを開く一方、低い値の信号は他のスイッチを閉じた状態に維持する。

## 2.3 実験

二つのポートを持つ OPS の実験系を図4に示す。実験系は光パケット送信器と OPS とで構成される。OPS には、ラベル処理装置、1×2 光ゲートスイッチ及び光遅延線が備わっている。光パケット送信器は、2ps、10GHz のモード同期半導体レーザー (MLLD: mode locked laser diode)、LiNbO<sub>3</sub> 強度変調器 (IM: intensity modulator)、

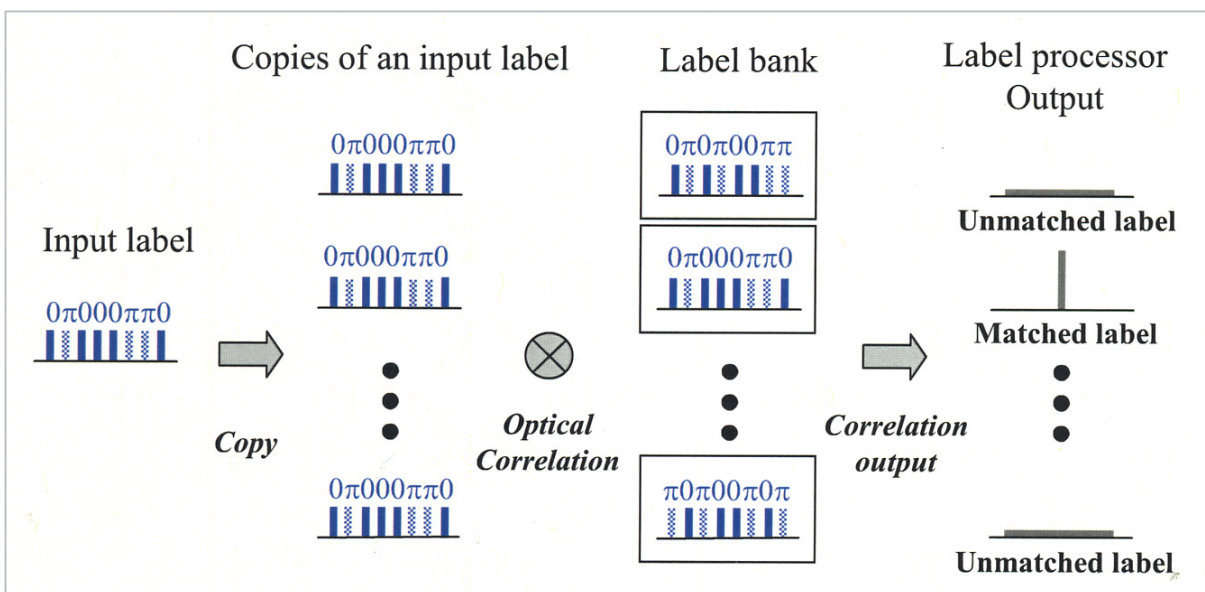


図3 全光的な並列テーブルルックアップ処理

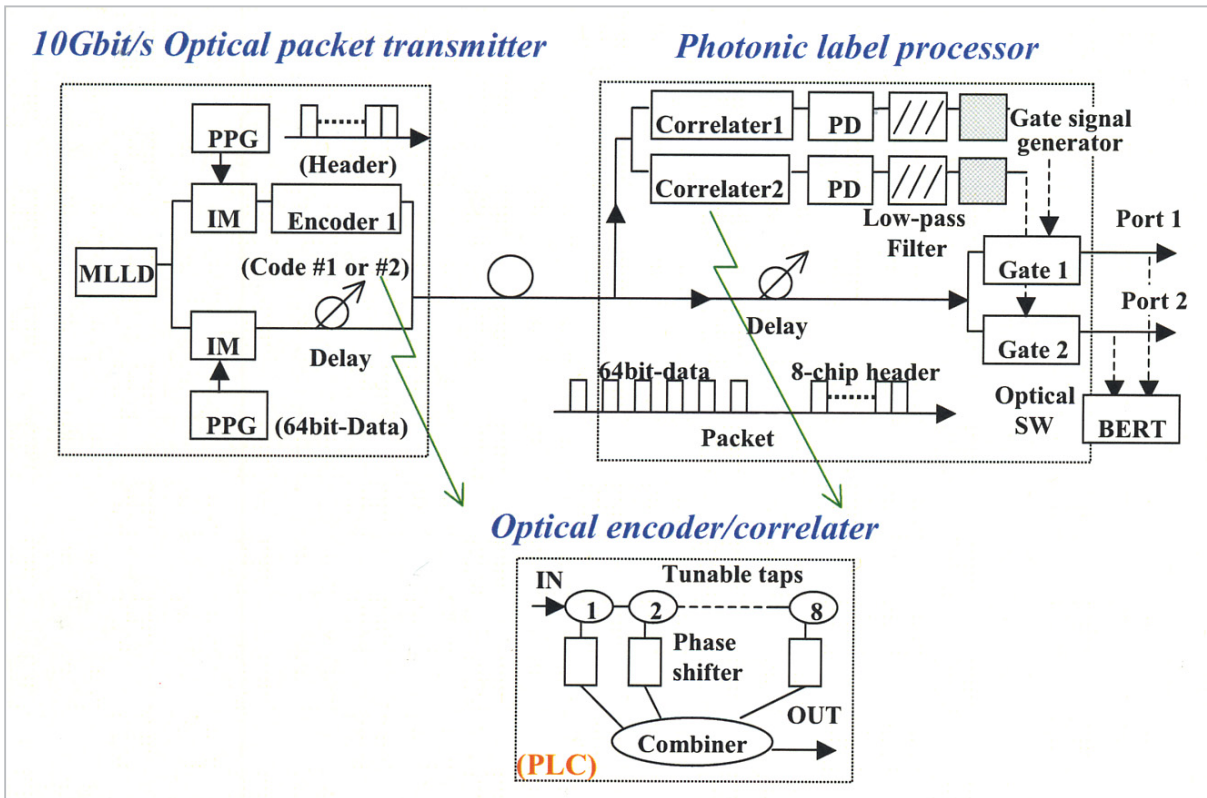


図4 実験系

光エンコーダ及び光遅延線で構成される。光エンコーダは、図4に示すように温度制御タイプの光移相器を備えた光タップ付き光遅延線から成る。すべての素子はPLC技術を用いてモノリシックに集積されている。各チップパルスの光搬送波位相が移相器によって0または $\pi$ だけシフトされることにより、8チップBPSK符号が生成される[11]。ラベル処理装置は、光相関器、光検波器(PD)、低域通過フィルタ(LPF)及びゲート信号生成器により構成される。1×2光ゲートスイッチは、40GHzの帯域を持つ二つのIMで構成される。

図4に示す光パケット送信器において、IM2は64ビット長のパケットデータ信号を10Gbit/sで生成する。IM1と光エンコーダは光ラベルを生成する。これは、5ピコ秒(ps)の時間間隔を持つ8チップBPSK光符号である。生成された光符号とペイロードデータ信号は合波されて一つのパケットを形成する。ラベル処理装置では、入力符号が相関器の符号と一致すれば出力(相関信号)が高い値をとる。逆に不一致の場合、相関信号は低い値をとる。一致した場合、相関信号は電気信号に変換されたあとゲート制御に使用され、

ゲート信号生成器を介してIMゲートスイッチを開状態に保持する。一方、不一致の場合ではバイアスは変更されず、ゲートスイッチは閉じたままとなる。ラベル処理装置は、目的のゲートスイッチを開いて一致パケットを対象ポートに転送することができる。

図5(a)は、光符号1「 $0\pi\pi\pi\pi\pi\pi 0$ 」を持つ相関前パケットのストリークカメラ記録である。図5(b)と(c)は、それぞれ光符号1「 $0\pi\pi\pi\pi\pi\pi 0$ 」(一致符号)及び光符号2「 $0\pi 0\pi 0\pi 0\pi$ 」(不一致符号)をヘッダーに持つパケットを入力とする、相関器出力のストリークカメラ記録である。いずれの場合も、パケットのペイロードデータの各ビットは相関器を通過することによって時間領域に拡散されており、デコードされたラベルと比べて値がかなり小さくなっている。そのためゲートスイッチを作動させることがない。

図6(a)と(b)に示すのは、それぞれ相関器1と一致するラベル「 $0\pi\pi\pi\pi\pi\pi 0$ 」及び相関器2と一致するラベル「 $0\pi 0\pi 0\pi 0\pi$ 」を持つ、異なる二つの入力パケットについて、ポート1とポート2で測定したペイロードデータである。二

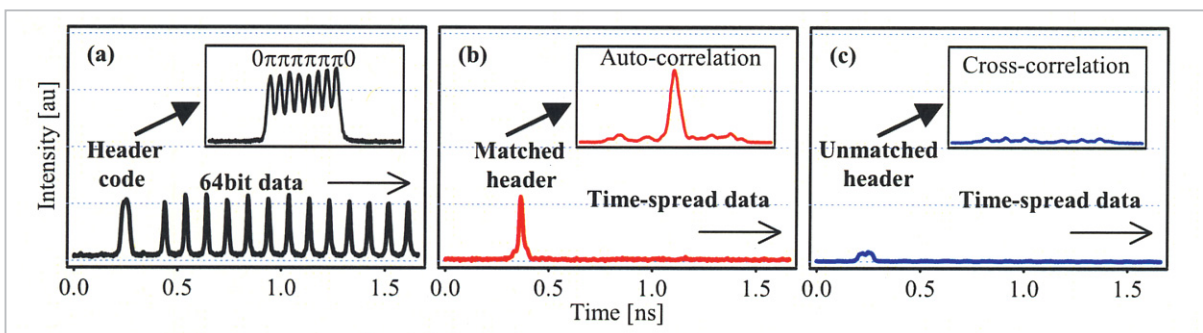


図5 ストリークカメラの記録：(a)生成されたパケット、(b)一致した場合、(c)不一致の場合における相関後の信号

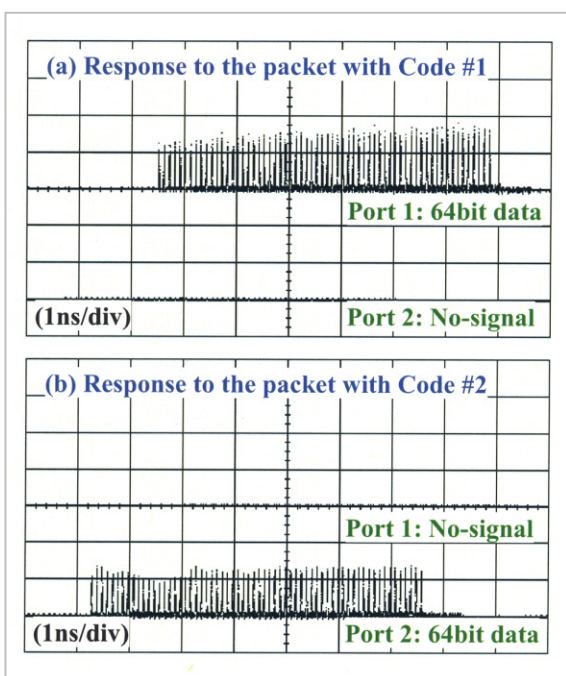


図6 (a) 符号1、(b) 符号2によってルーティングされたパケットデータ

この図は、入力光符号が1と2の間で切り替わったときに、アドレス処理装置が二つの光ゲートスイッチを交互に切り替えていることを明確に示している。これは、ラベル処理装置がパケットヘッダーにある8チップ長の光符号ラベルを区別し、光スイッチを制御していることを意味する。図7(a)と(b)は、それぞれ光符号1と光符号2をもつ、ルーティング後の64ビット長ペイロードデータについて測定した、対応するポートでのビット誤り率 (BER) である。BERの測定値は $10^{-10}$ 以下であり、適切なパケットルーティングが行われたことを示している。これらの結果は、高速OPSネットワークが実現可能であることを保証するものである。

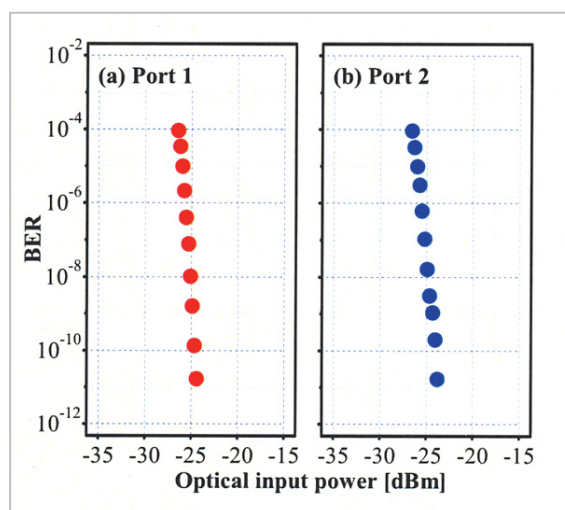


図7 (a) ポート1、(b)ポート2で測定したBER

### 3 多波長ラベル処理と可変長パケットスイッチング

#### 3.1 ネットワーク構成とパケットフォーマット

我々が導入する新たなパケットフォーマットは、図8(a)のようにヘッダー、ペイロード及びトレーラーから成る。ヘッダーにはあて先ノードのラベルが入っている。ラベルの長さはKチップであり、いずれもW個の波長のいずれかである。図8(a)に示すのは、 $K=W=4$ の場合である。この場合では、 $\lambda_{1A}$ 、 $\lambda_{1B}$ 、 $\lambda_{1C}$ 及び $\lambda_{1D}$ を用いて多波長ラベルを生成している。一方、可変長ペイロードデータには、ラベルに使用されるものとは異なる波長 $\lambda_{1E}$ を使用する。トレーラーはヘッダーと同じである。 $\lambda_{1A}$ から $\lambda_{1E}$ までの波長は、波長帯 $\lambda_{1A-E}$ を形成する。各波長帯では独立した同数のラベルが生成され、それがパケットのヘッダー及びトレーラーとして使用される。

図8(b)にネットワーク構成を示す。ネットワ

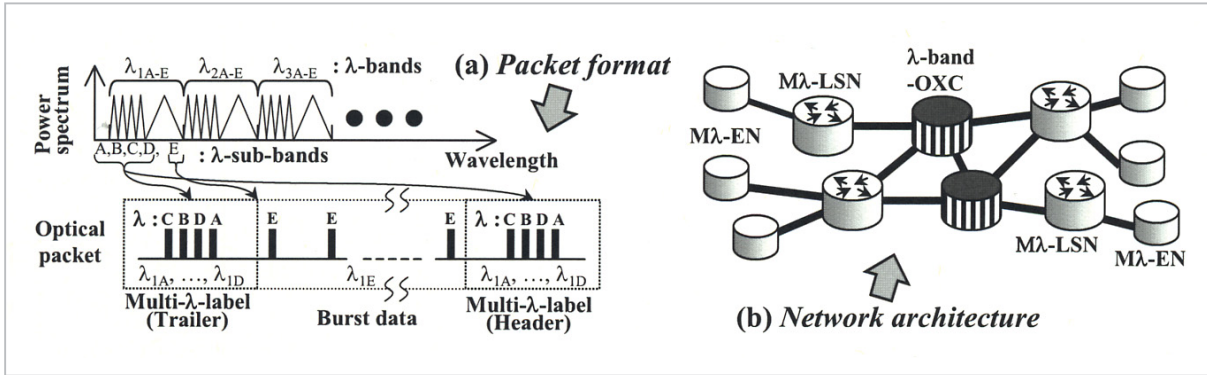


図8 (a) パケットフォーマット、(b) ネットワーク構成

ークは、多波長エッジノード (Mλ-EN：multi-wavelength edge node)、多波長ラベルスイッチノード (Mλ-LSN：multi-wavelength label switching node) 及び波長による光クロスコネクタ (λ-OXC：wavelength based optical cross connect) で構成される。Mλ-ENは、多波長を用いて一つのラベルを与える。Mλ-LSNは光領域において多波長ラベルを認識し、パケットを指定ポートに転送する。多波長ラベルの生成と認識は、マルチセクションファイバ回折格子 (MS-FBG：multi-section fiber Bragg grating) によって全光学的に実施される。λ-OXCは波長帯の切替えを行う (詳細は[4]を参照)。

Mλ-LSNを備えたネットワークは、λ-LSNのネットワークよりも多くの光ラベルを認識できる。ラベルの成分でいえば、 $W!/(W-K)!$  通りのラベルがパケットに使用できる (ここでWは波長の数である)。言い換えると、互いに全光的に通信できるノード数は、λ-LSNの場合だとW個であるのに対し、Mλ-LSNでは  $W!/(W-K)!$  個になる。例えば多波長ラベルが16波長の場合を考えると、Mλ-LSNを使用したネットワークのラベル数は40億を超える。これはインターネット

での個数 ( $2^{32}$ ) よりも多い。7波長のラベル成分でも6,000個を超え、これは将来のWDM技術における波長数よりも大きい値である。

### 3.2 多波長ラベルスイッチノード

我々の提案するMλ-LSNのブロック図を図9に示す。この装置は、ラベル-データ分離器、多波長ラベル処理装置、スイッチ (SW) コントローラ、1×N光スイッチ、出力バッファ及びラベルスワップ装置で構成される。パケットのラベルとペイロードデータは分離器において分離される。光ラベルの認識及びラベルバンクとの比較処理は、すべて多波長ラベル処理装置によって並列に処理される。多波長ラベル処理装置は、パケットのヘッダーとトレーラーの位置においてオープンパルスとクローズパルスをそれぞれ出力する。SWコントローラは1×Nの光スイッチを制御し、可変長パケットを出力バッファ経由で指定ポートに転送する。パケットのラベルスワップが必要なときは、ラベルスワップ装置がそのパケットに適した新しいラベルを生成する。今回の実験では、装置を簡単にするために出力バッファとラベルスワップ装置を省略して

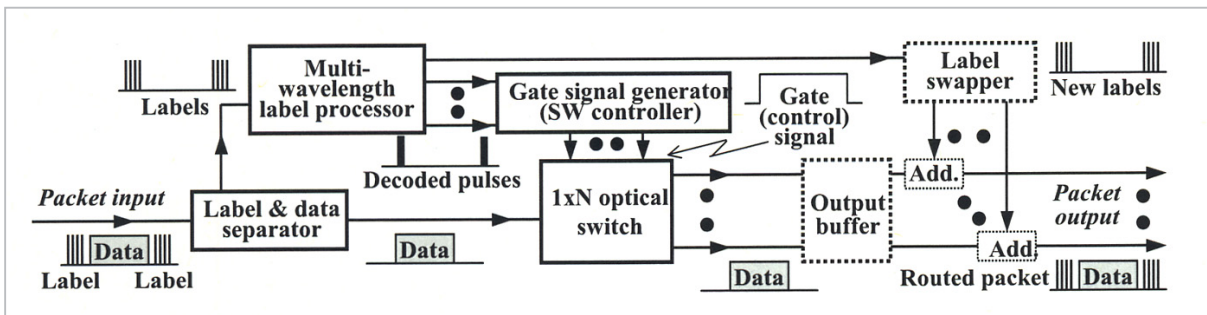


図9 可変長パケットに対応した多波長ラベルスイッチ

いる。

### 3.3 実験

図10に実験系を示す。実験系は多波長パケット送信器、50kmの分散シフト光ファイバ(DSF: dispersion-shifted fiber)及び3ポートのMλ-LSNで構成される。多波長パケット送信器は、160nmを超える帯域を持つスーパーコンテナニウム(SC)光源(図10(a))、LiNbO<sub>3</sub>強度変調器(IM)、3セクションFBG、帯域通過フィルタ(BPF: band-path filter)及び光遅延線によって構成される。SC光源は、10GHzのMLLD、エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)及び分散フラット光ファイバ(DFE: dispersion-flattened fiber)から構成される[4]。SC光源から出力される多波長パルスは3セクションFBGによって三つのパルスに分割され、多波長ラベルとなる(図10(b)の「λ<sub>1A</sub>, λ<sub>1C</sub>, λ<sub>1B</sub>」)。一方、BPFによって抽出された波長λ<sub>1E</sub>のパルスにより、可変長パケットが生成される。3チップの多波長ラベルヘッダーとトレーラー及びデータから成る光パケットが、全光学的に生成される。

Mλ-LSNは、FBG(図10(c) - (e))、PD、ゲート信号生成器(SWコントローラ)、BPF及び光遅延線によって構成される。1×3の光ゲートスイッチは、帯域が40GHzの三つのIMで構成される。ゲート信号生成器は、しきい値検出器、リミッタ付きRF増幅器及びTフリップフロップで構成される。Mλ-LSNではFBGが相関器とラベ

ルバンクの役割を果たす。入力ラベルが相関器の波長セットと一致した場合、出力は高い値となる。一致しなかった場合は相関された信号は低い値となる。相関信号はPDによって電気パルス信号に変換される。一致した場合には、一致したヘッダーラベルに対するパルスがIMゲートスイッチを開き、一致したトレーラーラベルに対するパルスがスイッチを閉じる。一方、不一致の場合ではバイアスに変更されず、ゲートスイッチは閉じたままとなる。ラベル処理装置は、目的のゲートスイッチを開き、一致した可変長パケットを対象ポートに導くことができる。

図11(a)は、ヘッダーとトレーラーに多波長ラベル「λ<sub>1A</sub>, λ<sub>1C</sub>, λ<sub>1B</sub>」を持つ相関処理前の64ビット長パケットである。図11(b)と(c)は、「λ<sub>1A</sub>, λ<sub>1C</sub>, λ<sub>1B</sub>」を入力ラベルとし、波長組「λ<sub>1B</sub>, λ<sub>1C</sub>, λ<sub>1A</sub>」を持つFBG1\*の相関出力及び波長組「λ<sub>1C</sub>, λ<sub>1B</sub>, λ<sub>1A</sub>」を持つFBG2\*の相関出力をそれぞれ表す。一致した場合(図11(b))では相関信号が高いピークを持つのにに対し、不一致の場合(図11(c))では相関信号は高いピークを持たない。これは、全光多波長ラベル認識が行われていることの証明である。図11(d) - (f)は、長さが異なる三つの入力パケットについてスイッチングされた後の、ポート1、2及び3におけるペイロードデータを表す。上記三つの入力パケットはそれぞれ、(d) FBG1\*と一致するラベル「λ<sub>1A</sub>, λ<sub>1C</sub>, λ<sub>1B</sub>」を持つ64ビットのデータ、(e) FBG3\*と一致するラベル「λ<sub>1C</sub>, λ<sub>1B</sub>, λ<sub>1A</sub>」を持つ128ビットのデータ、

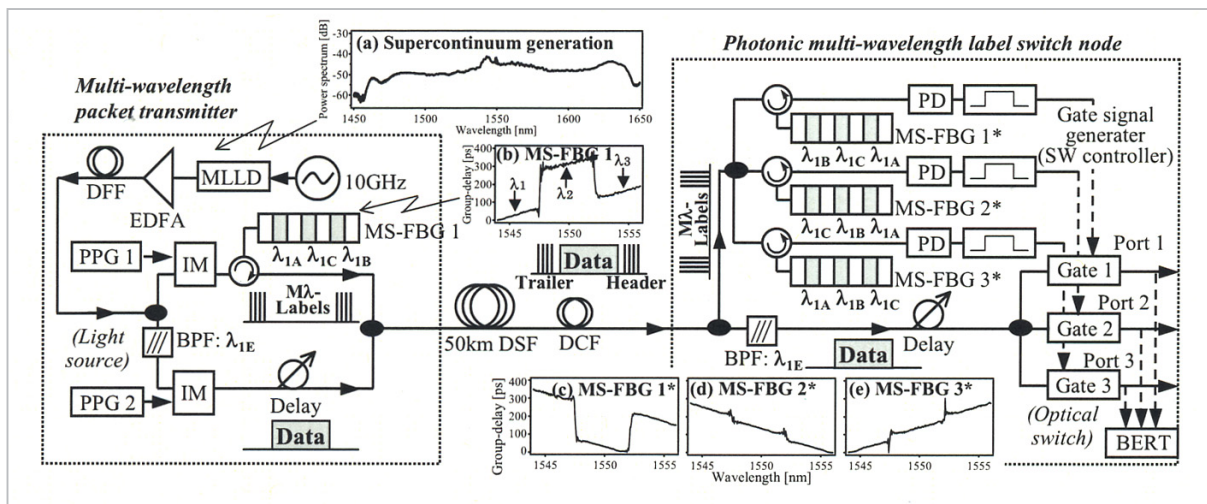


図10 実験系

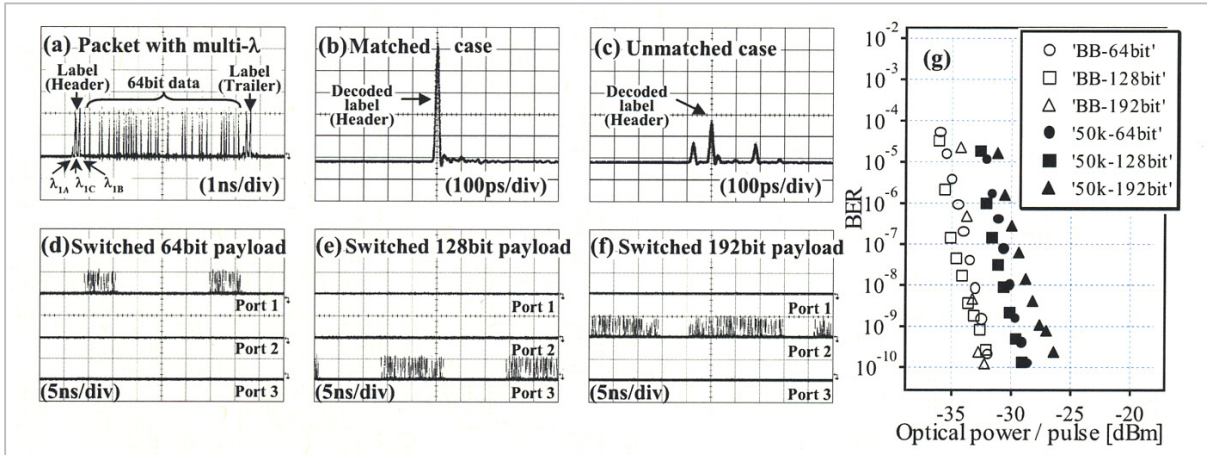


図 11 実験結果

(f) FBG2\*と一致するラベル「 $\lambda_{1A}$ ,  $\lambda_{1B}$ ,  $\lambda_{1C}$ 」を持つ192ビットのデータ、である。これらの図から、M $\lambda$ -LSNが入力光ラベルに応じて可変長パケットをスイッチングできることが明確に分かる。図11(g)は、長さが異なる三つのパケットについてバックツーバック(BB)及び50kmの伝送後にポート1で測定したBERである。これらの結果は、多波長ラベル処理を用いた超高速OPSネットワークが実現可能であることを保証している。

#### 4 AMSHによるホログラフィックラベル処理

大規模な光並列ストレージの実現にホログラムの角度多重化能力が利用できることは既に表示されている。角度多重ホログラム(AMSH)をアドレスバンクとして使用することにより、光ラベル処理装置における相関器の個数を減らせると我々は考える[9]。ホログラフィックラベル処理装置の概要を図12(a)に示す。ホログラフィックラベル処理装置は、回折格子、フーリエ変換レンズ及びAMSHで構成される。あて先アドレス情報を持つラベルは、回折格子によって時間軸と空間軸に分離される。回折された信号はフーリエ変換レンズを通り、物体光としてスペクトルホログラムに入射する。一部のラベルは角度多重の方法で既に記録されている。AMSHによって生成された再構成光は再びフーリエ変換レンズを通り、各入射ラベルに応じた位置に相関ピークとして出力される(図12(b),(c))。光は

PDアレイによって検出される。各ラベルが持つアドレス情報は、PDアレイにおける位置情報として検出される。信号は光ゲートスイッチを動作させ、光データパケットは指定ポートに転送される。

空間ラベル認識処理では、信号の空間パターンを使用する必要がある。時間軸と空間軸を完全に分離する全光時空変換技術について、幾つかの研究グループが既に報告を行っている。しかし、我々のシステムで必要なものは、完全な時空変換パターンではなく、空間パターンが信号の時間波形を反映することである[10]。入射信号中に含まれるそれぞれの周波数成分は回折格子によって角度分散され、レンズの後焦点面で合焦する。周波数成分はそこで1次元に沿って空間分離される。そのため我々は、AMSHの作成に当たって空間分散した光フーリエ成分を使用する。このラベル処理方式については最近の報告書で詳細に述べている[12]。

#### 5 40Gbit/sインタフェースのOPSプロトタイプ

##### 5.1 プロトタイプの構成

我々は、40Gbit/sインタフェースの全光符号ラベル処理式OPSプロトタイプを先ごろ開発した[8]。図13に、このプロトタイプのブロック図を示す。プロトタイプは、光ラベル処理装置、光スイッチ、電子スケジューラ及び光バッファから構成される。また、プロトタイプに使うサブシステムとして、このほかにもOTDMマルチブ



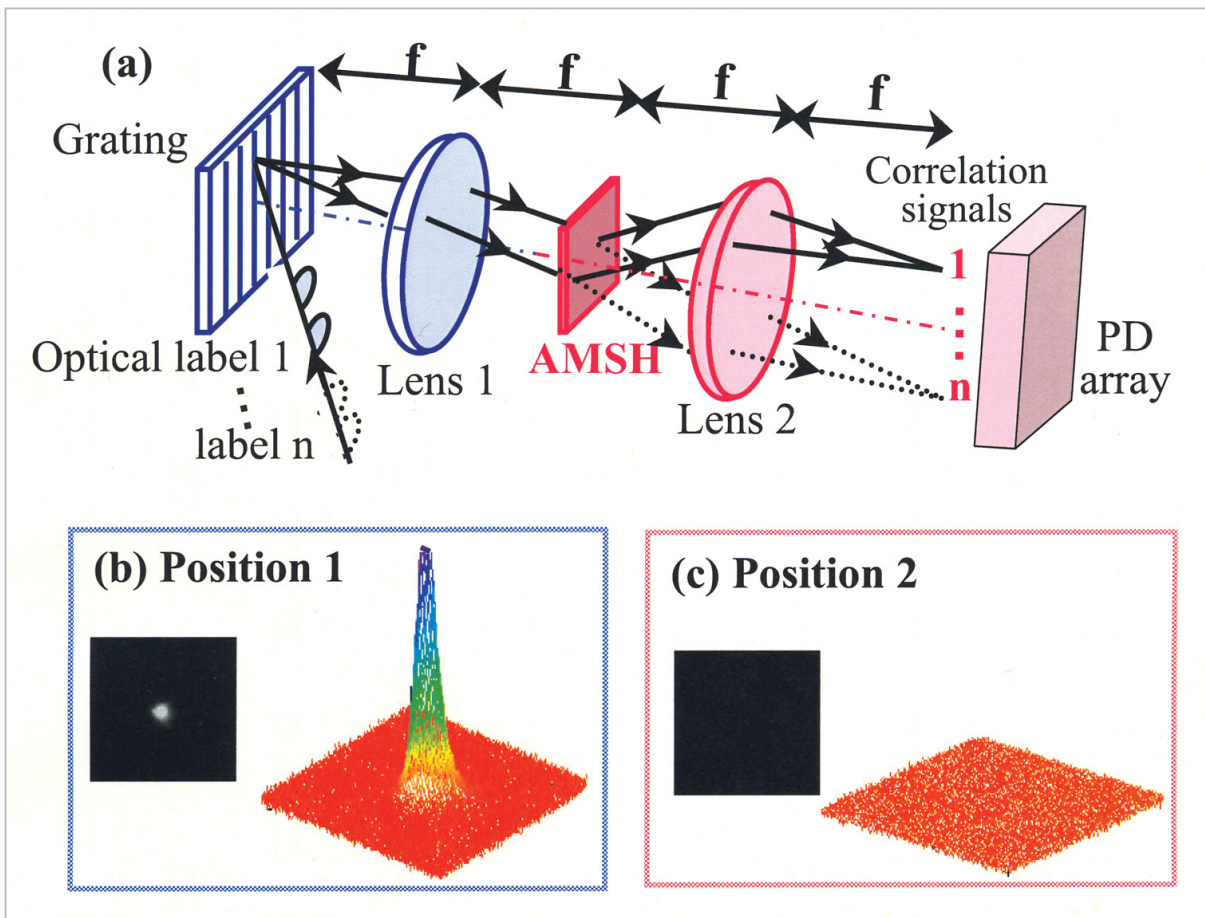


図 12 (a) ホログラフィックラベル処理装置、(b) 位置 1、(c) 位置 2 における測定強度分布

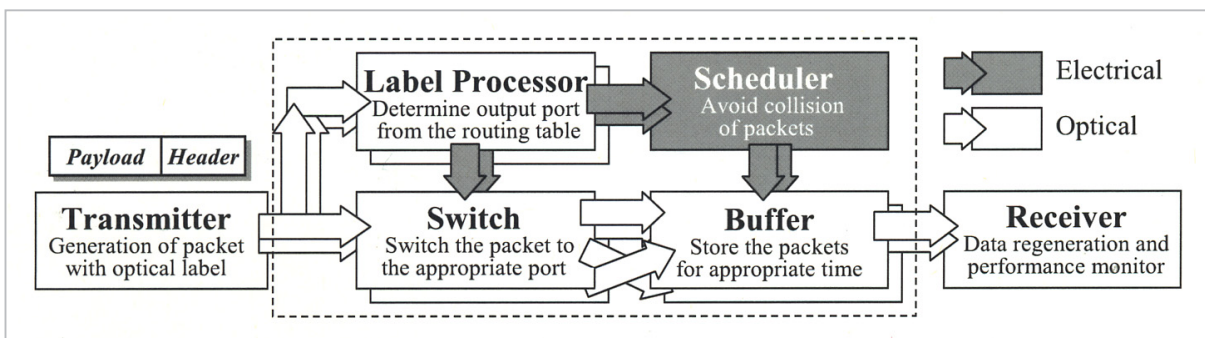


図 13 プロトタイプブロック図

レクサを備えた光パケット送信器及びOTDMデマルチプレクサを備えた光パケット受信器をパフォーマンス分析用に開発した。光パケットは、図13に示すようにヘッダーとペイロードデータとから成る。ヘッダーにはあて先ノードを表す光符号ラベルが入っている。ラベル処理装置ではパケットヘッダーのラベル分析が全光学的に行われる。

### 5.2 ラベル処理とスイッチング

我々が開発したOPSプロトタイプでは、図1のラベル認識方法(a)を採用している。ラベル処理装置が光スイッチを制御し、パケット到着情報をバッファスケジューラに通知する。パケットスイッチの各機能を分離することで、全光ラベル処理能力をフルに利用することができる。プロトタイプの概要を表1に示す。プロトタイプは2×2のパケットスイッチである。バッファ構造を簡単にするためにパケットは同時に到着す

表1 OPSプロトタイプの概要

アーキテクチャ	出力バッファ型光パケットスイッチ	
入力回線数	2	
出力回線数	2	実験では1
バッファサイズ (最大遅延時間)	2パケット (1024ナノ秒)	
最大データレート	39.81312Gbit/s (OC-768に相当)	
ラベル認識速度	1回線あたり100億パケット/秒	1パケットあたり100ピコ秒未満
ラベル認識方法	PLC型相関器と8チップBPSK 符号を用いた光相関処理	非同期
光スイッチ	1×2スイッチで構成	LiNbO <sub>3</sub> ゲートスイッチを備えたカブラ
バッファ管理方式	ラウンドロビン、FIFO	同期パケットに限定(到着間隔512ナノ秒)
光バッファ構成	1×2LiNbO <sub>3</sub> スイッチの直列接続	オーバーフローしたパケットは廃棄

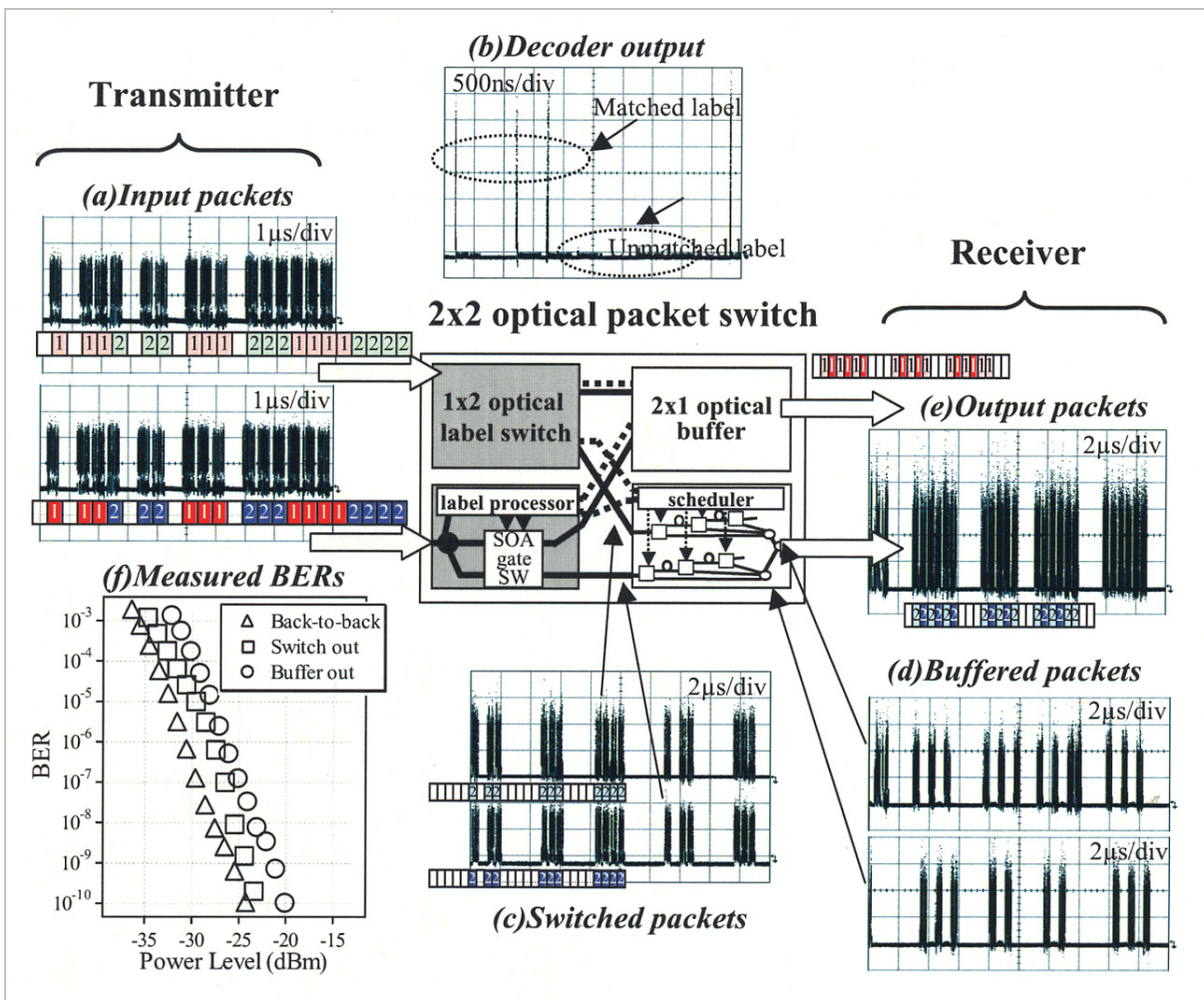


図14 OPSプロトタイプの実験実証

るものと仮定している。また、パケットは固定長である。各ポートにおけるパケットの到着間隔はTの倍数である。ただしTは、パケット長と保護時間の和に等しい時間である。

光パケット送信器は、8チップ、200Gchip/sの

BPSKラベルと40Gbit/s、16000ビットのランダムバーストデータを生成して一つの光パケットを形成する。生成される光パケットの波形を図14(a)に示す。ラベル処理装置は、PLC相関器と光スイッチドライバで構成される。パケットラ

ベルのテーブルルックアップ処理は、**2**で述べたように光電・電光変換なく並列で実行される[3]。ラベルが一致した場合、相関器は高いピークを持つ自己相関波形(図14(b))を出力し、目的の光ゲートスイッチを開いて宛先ポートにパケットを転送する。ラベルが不一致のときは高いピークのない相互相関波形(図14(b))を出力し、ゲートを閉じた状態に維持する。スケジューラは、固定長パケットの同時到着が扱える。それは光ラベル処理装置からパケット到着情報を受信する。その情報は先着順処理(FIFO: first-in first-out)でラウンドロビン・スケジューリングに基づいて処理する。光スイッチは、カプラと半導体光増幅器(SOA)ゲートスイッチで構成される。異なる二つの入力ポートから同一の出力ポートへとスイッチングされたパケットの波形を図14(c)に示す。プロトタイプは出力バッファを備えている。我々は、光ファイバ遅延線(FDL: fiber delay line)の総全長が物理経路に応じて異なるFDLバッファを開発した[13]。また、到着パケットがFDLバッファに到達する前に、そのそれぞれについて適切なFDLを選択することが必要である。パケットの衝突を回避し、またパケット遅延を減らすため、FPGA(field programmable gate array)を用いた電子スケジューラを開発した。これはバッファ内にあるパケット数をカウントし、バッファ内の光スイッチに制御信号を送出する。異なる二つのポートからバッファリングされたパケットの波形を図14(d)に示す。バッファリングされたこれらのパケットは最後にマージされ、一つのポートに出力される。出力パケット波形を図14(e)に示す。バックツーパー

ック、SOAスイッチの出力及びバッファの出力において測定されたBERを図14(f)に示す。これらの結果は、40Gbit/sのフォトニックパケットスイッチングが実現可能であることを保証している。結果については文献[14]に詳しく記載している。

## 6 まとめ

超高速の全光ラベル処理方式を提案し、実験実証した。その方式を使うことでラベル処理能力が大幅に向上した。光処理技術の応用事例として、光パケットスイッチ(OPS)ノードを用いたOPSシステム及びネットワークについて記載した。全光ラベル処理装置、光スイッチ、光バッファ及び電子スケジューラを備え、40Gbit/sというポート当たり速度を初めて実現するOPSプロトタイプについて説明した。また、OPSネットワークの実現可能性について実験実証した。

## 謝辞

本研究においては、大阪大学の北山研一教授、日本女子大学の小館教授と清水氏、職業能力開発総合大学校の石井教授、スラナリ工科大学のJ. Widjaja氏及び情報通信研究機構(通信総合研究所)の原井研究員に共同研究や有意義な議論でお世話になりました。この場を借りて感謝の意を表します。また、研究を支援していただいた松島情報通信部門長並びに飯田前理事長に感謝いたします。

## 参考文献

- 1 White Paper Information and Communications in Japan, The Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications (MPHPT) (inJapanese).  
<http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/h15/pdf/F1010000.pdf>
- 2 K. Sato, N. Yamanaka, Y. Takigawa, M. Koga, S. Okamoto, K. Shiimoto, E. Oki, and W. Imajuku, IEEE Commun. Magazine Vol.40, No.3, pp.96-101, 2002.
- 3 K. Kitayama and N. Wada, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, No.12, pp.1689-1691, 1999.
- 4 N. Wada and H. Harai, Proceedings of SPIE, Vol. 4872, pp. 185-198, 2002.
- 5 D.J. Blumenthal, A. Carea, L. Rau, V. Curri, and S. Humphries, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, No., pp.1497-1499, 1999.

- 6 J. McGeehan, S. Kumar, and A. Willner, Tech. Dig., OFC2003, Vol.2, No.FS6, pp.798-801, 2003.
- 7 S.B. Yoo, Tech. Dig., OFC2003, Vol.2, No.FS5, pp.797-798, 2003.
- 8 N. Wada, H. Harai, and F. Kubota, Tech. Dig., OFC2003, Vol.2, No.FS7, pp.801-802, 2003.
- 9 J.Widjaja, N.Wada, Y.Ishii, and W.Chujo, IEE Electronics Letters, Vol.37, No.11, pp.703-704, 2001.
- 10 K. Shimizu, N. Kawakami, N. Wada, W. Chujo, and K. Kodate, ICO2002, Vol. 19, No. We-EI-3, pp. 563-564, 2002.
- 11 N.Wada and K. Kitayama, J. Lightwave Technol., Vol.17, No.10, pp.1758-1765, 1999.
- 12 N. Kawakami, K. Shimizu, N. Wada, F. Kubota, and K. Kodate, submitted to Opt. Rev.
- 13 H. Harai, N. Wada, F. Kubota, and W. Chujo, IEEE ICC 2002, 2843-2847, May 2002.
- 14 N. Wada, H. Harai, and F. Kubota, Invited paper, IEICE Trans. Electron., Special Issue on Ultra-fast Photonics, Vol. E85-C, 2004.



和田尚也

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)  
光通信、フォトニックネットワーク



久保田文人

情報通信部門研究主管 博士(工学)